

Experimental Investigation on the Rheological Performance of Asphalt Binders Modified with Montmorillonite Nanoclay and RAR at Intermediate and High Temperatures

Hassan Alvandia¹, Amir Kavussi^{2*} , Sina Hatami³

1. Ph.D. Candidate, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. MS.c. Graduated, Bandar Abbas Refinery, Jey Oil Refining Company, Bandar Abbas, Iran.

Abstract

The growing demand for durable and environmentally sustainable pavement materials has directed significant research efforts toward modifying asphalt binders with advanced additives. Among the various options available, montmorillonite nanoclay and reacted and activated rubber (RAR) have attracted particular attention due to their complementary characteristics. Nanoclay, with its layered silicate structure and exceptionally high surface area, is known to enhance the thermal stability, stiffness, and aging resistance of asphalt binders. On the other hand, RAR (derived from recycled waste tire rubber) improves elasticity and fatigue resistance while simultaneously addressing critical environmental concerns related to the disposal of end-of-life tires. The combined use of these two modifiers offers the potential for a synergistic effect, resulting in improved rheological behavior and long-term performance of asphalt binders under varying service conditions. This study was systematically designed to analyze the rheological behavior of asphalt binders modified with different proportions of montmorillonite nanoclay (2, 4, and 5% by weight) and RAR (15, 20, and 25% by weight) under a range of temperature conditions. The modified binders were subjected to a comprehensive testing program using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), and Linear Amplitude Sweep (LAS) tests. Permanent deformation (rutting resistance) was evaluated using DSR at high temperatures ranging from 58 to 82°C (specifically at 58, 64, 70, 76, and 82°C) under a frequency of 1.59 Hz (10 rad/s) and a constant strain of 12%. These tests were conducted on binders both before and after short-term aging with the Rolling Thin Film Oven (RTFO). Fatigue performance was assessed using the DSR in the intermediate temperature range of 16°C to 22°C (16, 19, and 22°C), also at 1.59 Hz, under a constant strain of 1.01%, applied on binders aged with the Pressure Aging Vessel (PAV) to simulate long-term service life. Following these assessments, MSCR tests were performed on short-term aged binders, and LAS tests were conducted on long-term aged binders to provide a holistic evaluation of rutting and fatigue resistance. The experimental results demonstrated that the optimal performance was achieved in binders containing 4% nanoclay and 25% RAR. From an engineering perspective, this composition resulted in substantial enhancements of both rutting and fatigue resistance. Specifically, the parameter $G^*\sin\delta$, a measure of rutting resistance, improved by 115% compared with the base binder, while $G^*\sin\delta$, indicative of fatigue resistance, increased by 87%. These improvements highlight the effectiveness of the nanoclay–RAR system in addressing the critical challenges of permanent deformation at high temperatures and fatigue cracking at intermediate temperatures. Furthermore, the MSCR results confirmed the significant reduction in non-recoverable creep compliance, while LAS outcomes demonstrated enhanced fatigue life, providing robust evidence of the synergistic effects between nanoclay and RAR. The findings of this research emphasize the potential of incorporating nanoclay and RAR as a hybrid modification strategy for asphalt binders, particularly in hot climate regions where pavements are exposed to severe thermal stresses and high traffic loads. Beyond the technical benefits, the use of RAR also offers an environmentally responsible solution by recycling waste tires into value-added infrastructure materials. The integration of advanced nanomaterials and recycled polymers therefore represents a promising approach to designing high-performance, cost-effective, and sustainable asphalt binders capable of extending pavement service life and reducing maintenance costs. This study contributes valuable insights for pavement engineers and researchers, demonstrating that the combined modification with nanoclay and RAR provides a balanced improvement of stiffness, elasticity, and durability, making it a viable candidate for next-generation asphalt technologies.

Review History

Received: Jul 14, 2025
Revised: Sep 9, 2025
Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Nanoclay Montmorillonite
Reacted and Activated
Rubber (RAR)
DSR

* Corresponding Author Email: Kavussia@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-3195-7329



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

ارزیابی آزمایشگاهی ویژگی‌های رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با نانورس مونت موریلونیت و پودر لاستیک فرآوری شده در دماهای بالا و میانی

حسن الوندی^۱، امیر کاووسی^{۲*}، سینا حاتمی^۳

۱. دانشجوی مقطع دکتری تخصصی مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲. استاد تمام گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳. مسئول آزمایشگاه شرکت پالایش نفت جی سایت بندرعباس مهندسی شیمی، بندرعباس، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با مقادیر مختلف نانورس مونت موریلونیت (۲، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر) و پودر لاستیک فرآوری شده (RAR) (۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) تحت تأثیر شرایط مختلف دمای میانی و بالا انجام شده است. بررسی تغییر شکل دائمی قیر با آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR) در محدوده دمایی ۵۸ تا ۸۲ درجه سانتی گراد و در فرکانس ۱/۵۹ هرتز با اعمال کرنش ثابت ۱٪ روی قیر قبل و بعد از پیرشدگی انجام شد. ارزیابی خستگی قیر نیز در دماهای ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درجه سانتی گراد و در همان فرکانس و با اعمال کرنش ۱٪ روی قیر پیرشده تحت فشار انجام شد. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه نانورس و RAR موجب بهبود قابل توجه پارامترهای عملکردی قیر می‌شود. نیز افزایش معنادار مدول برشی مختلط (G^*) و کاهش محسوس زاویه فاز (δ) در تمامی دماها مشاهده شد، به طوری که بیشترین بهبود در نمونه‌های حاوی ۴٪ نانورس و ۲۵٪ RAR مشاهده شد، که حاکی از رفتار الاستیک تر و مقاومت بهتر در برابر تغییر شکل‌های دائمی بود. از دید فنی، این ترکیب موجب ارتقای پارامترهای مقاومت شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) و مقاومت خستگی ($G^*\sin\delta$) به ترتیب به میزان ۱۱۵٪ و ۸۷٪ در مقایسه با قیر پایه شد. در مراحل بعدی آزمایش‌های LAS و MSCR انجام شد که موجب کاهش ۹۲٪ در مقدار مدول غیرقابل برگشت و افزایش ۱۰۷ برابر عمر خستگی نسبت به قیر پایه شد. این یافته‌ها حاکی از آن است که استفاده همزمان از نانورس و RAR ضمن هم افزایی مناسب می‌تواند راهکار مناسبی برای تولید قیرهای اصلاح شده مقاوم در شرایط دماهای میانی و بالای محیط باشد.

کلمات کلیدی

نانورس مونت موریلونیت
پودر لاستیک فرآوری شده
رئومتر برش دینامیکی
بهبود خواص رئولوژیکی

۱- مقدمه

حیاتی در دوام و عملکرد آن دارد. با این حال، قیر خالص به دلیل محدودیت‌های ذاتی خود در برابر تنش‌های محیطی و ترافیکی مانند تغییرات دما، بارهای ترافیکی و عوامل جوی، غالباً قادر به برآورده کردن نیازهای مهندسی مدرن نیست. از این رو، اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌های پیشرفته به یکی از محورهای اصلی

با افزایش تقاضا برای زیرساخت‌های حمل و نقل بادوام و پایدار، به ویژه جاده‌ها، نیاز به بهبود کیفیت و عملکرد مصالح مورد استفاده در ساخت و نگهداری آن‌ها بیش از گذشته احساس می‌شود. قیر به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای روسازی، نقش

* رایانامه نویسنده مسئول: Kavussia@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-3195-7329

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



پژوهش در مهندسی راه تبدیل شده است [1]. در میان مواد مختلف، نانورس مونت موریلونیت و پودر لاستیک فرآوری شده (RAR) به دلیل آثار قابل توجه بر رفتار رئولوژیکی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. نانورس با ساختار لایه‌ای و ویژگی‌های نانومتری خود، موجب بهبود خواص مکانیکی و رئولوژیکی قیر می‌شود [2]، در حالی که RAR، که از بازیافت تایرهای فرسوده به دست می‌آید، علاوه بر مزایای زیست محیطی، مقاومت قیر در برابر تنش‌های دینامیکی و حرارتی را افزایش می‌دهد [3]. ترکیب این دو افزودنی به عنوان یک استراتژی نوین، ظرفیت ارتقای عملکرد قیر در شرایط بارگذاری و محیطی متنوع را دارد [4].

ارزیابی عملکرد رئولوژیکی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی پیشرفته، گام مهمی در بهینه‌سازی فرمولاسیون قیر اصلاح شده است. آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR) یکی از روش‌های رایج برای این منظور است که امکان بررسی مدول برشی، زاویه فاز و رفتار ویسکوالاستیک قیر تحت شرایط مختلف بارگذاری و دمایی را فراهم می‌کند [5]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزودن نانورس موجب افزایش مدول برشی و بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی می‌شود [6]، در حالی که استفاده از RAR به‌طور معناداری مقاومت قیر در برابر ترک‌خوردگی و پیرشدگی را بهبود می‌بخشد [7]. با این حال، پژوهش‌های مربوط به استفاده همزمان از این دو ماده هنوز محدود است [8، 9]. نانورس مونت موریلونیت به دلیل سطح ویژه بالا و توانایی ایجاد شبکه‌های نانو ساختاری در ماتریس قیر، به عنوان یک اصلاح‌کننده مؤثر شناخته می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزودن ۳٪ نانورس می‌تواند مقاومت شیارشدگی را تا ۴۰٪ افزایش دهد [13]. همچنین نانورس با کاهش زاویه فاز و افزایش مدول برشی مختلط، عملکرد قیر را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد [12، 14]. افزون بر این، نانورس با ایجاد شبکه نانو ساختاری در ماتریس قیر، نرخ اکسیداسیون و پیرشدگی قیر را کاهش می‌دهد. با این حال، یکی از چالش‌ها، تجمع ذرات نانورس در ماتریس قیر است که برای رفع آن روش‌هایی مانند استفاده از فعال‌کننده‌های سطحی پیشنهاد شده است [15].

پودر لاستیک فرآوری شده نیز علاوه بر کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از انباشت تایرهای فرسوده، با بهبود پراکندگی و پیوند با ماتریس قیر، خواص الاستیسیته و مقاومت خستگی آن

را ارتقا می‌دهد [16]. با وجود عملکرد مثبت روش‌های سنتی استفاده از لاستیک در قیر، مشکلاتی مانند نیاز به دماهای بالا و زمان اختلاط طولانی، محدودیت‌هایی ایجاد کرده‌اند. تولید RAR با روش اختلاط گرم کوتاه‌مدت و دانه‌های ریز لاستیکی این مشکلات را تا حد زیادی برطرف کرده است [17]. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن ۱۵٪ RAR، ویسکوزیته قیر را تا سه برابر افزایش داده و مقاومت در برابر شیارشدگی را در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد بهبود می‌بخشد [18]. همچنین با جذب اجزای سبک قیر، از پیرشدگی اکسیداتیو جلوگیری می‌کند [19].

ترکیب نانورس و RAR به‌عنوان رویکردی هم‌افزا، پتانسیل غلبه بر محدودیت‌های هر ماده را دارد. نانورس با بهبود پراکندگی ذرات لاستیک، از تجمع آن‌ها جلوگیری کرده و پیوند بین فازها را تقویت می‌کند [20]. همچنین این ترکیب نرخ اکسیداسیون قیر را کاهش داده و پس از پیرشدگی، افت کمتری در انعطاف‌پذیری و افزایش کمتری در سختی نشان داده است [11، 23]. به طور کلی، نانورس و RAR هر یک به تنهایی قادر به بهبود خواص رئولوژیکی، مکانیکی و مقاومت در برابر پیرشدگی قیر هستند و ترکیب آن‌ها آثار هم‌افزایی معناداری ایجاد می‌کند که می‌تواند نسل جدیدی از قیرهای اصلاح شده با عملکرد برتر را معرفی کند.

اگرچه در مطالعات پیشین اصلاح قیر با استفاده از نانورس یا پودر لاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. اما درک جامعی از اثر هم‌افزایی این دو ماده توأمان به طور کامل حاصل نشده است. با توجه به مشکلات استفاده از پودر لاستیک در قیر از جمله تمایل به جدایش فازی، افزایش بیش از حد ویسکوزیته و کاهش پایداری ذخیره سازی مطالعات به سمت استفاده از پودر لاستیک فرآوری شده سوق پیدا کرده که با فعال سازی سطحی و تعامل بهتر با فاز قیر و در نتیجه یکنواختی پخش و افزایش دوام مخلوط آسفالتی همراه بوده است [25-29]. در این پژوهش خواص رئولوژیکی ترکیب دو ماده نانورس مونت موریلونیت و پودر لاستیک فرآوری شده با قیر در دماهای میانی و بالا مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- مواد، مصالح و روش‌های آزمایش

در تهیه تمام نمونه‌ها از قیر با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ شرکت نفت جی استفاده شد که مشخصات فنی آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر خالص ۸۵/۱۰۰ نفت جی

Table 1. Properties of Neat 85/100 Penetration Grade Asphalt Binder from Jey Oil Refinery

Test Description	Standard	Unit	Result
Penetration at 25 °C	ASTM D5	dmm	85
Softening Point	ASTM D36	°C	42
Kinematic Viscosity at 135 °C	AASHTO T 316	cSt	254
Specific Gravity	ASTM D-70	g/cm ³	1.025
Ductility	ASTM D113	cm	100>

حاوی آلومینیوم یا منیزیم) و دو لایه چهاروجهی سیلیس قرار گرفته‌اند. این ساختار باعث می‌شود که مونت موریلونیت توانایی جذب آب و تورم‌پذیری بالا داشته باشد. همچنین، سطح ویژه زیاد و امکان اصلاح شیمیایی آن، این ماده را برای استفاده در نانو تکنولوژی ایده‌آل می‌کند. در این مطالعه از ۴، ۵ و ۲ درصد وزنی قیر، نانورس مونت موریلونیت شرکت فاین نانو که عناصر آن توسط آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) که در جدول (۲) و تصویر حاصل از آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM) آن در شکل (۱) قابل مشاهده است، در اصلاح قیر استفاده شد.

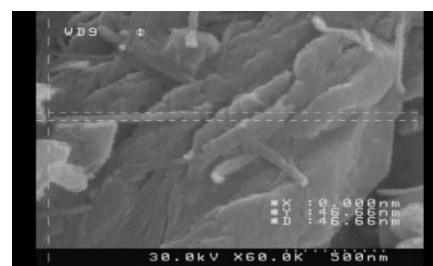
۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای افزودن پودر لاستیک فرآوری شده و نانورس مونت موریلونیت به قیر از دستگاه همزن برشی با دور بالا استفاده شد. ابتدا قیر تا دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد تا به صورت یکنواخت درآید. سپس پودر لاستیک فرآوری شده در مقادیر ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی به قیر اضافه شد و در نهایت نانورس مونت موریلونیت به آرامی به میزان ۴، ۵ و ۲ درصد وزنی قیر در دمای ۱۶۳ درجه سانتی گراد با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به ترکیب اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه اختلاط انجام شد. سپس برای ارزیابی پیرشدگی قیر اصلاح شده آزمایش پیرشدگی کوتاه مدت^۱ (RTFO) و پیرشدگی بلندمدت^۲ (PAV) انجام گرفت. جدول (۳) معرف نمونه‌های ساخته شده و کدگذاری آنها است. (MMT) نماد نانورس و RAR نماد پودر لاستیک فرآوری شده است به عنوان نمونه: 2MMT0RAR نمونه دارای ۲٪ نانورس مونت موریلونیت و ۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده است).

جدول ۲. نتایج آزمایش XRD نانورس مونت موریلونیت مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. XRD test results of Montmorillonite Nanoclay used in this study

Content (%)	Substance	NO.
0.98	Na ₂ O	1
3.29	MgO	2
19.60	Al ₂ O ₃	3
50.95	SiO ₂	4
0.86	K ₂ O	5
1.97	CaO	6
0.62	TiO ₂	7
5.62	Fe ₂ O ₃	8
15.45	LOI	9



شکل ۱. نتیجه آزمایش میکروسکوپ الکترونی نانورس مونت موریلونیت

Fig. 1. Scanning Microscope Electron (SEM) picture of Montmorillonite Nanoclay

RAR در این پژوهش بر اساس روش سوسا و همکاران تولید شده است [24]. این ماده از لاستیک‌های خرد شده با اندازه عبوری از الک ۳۰ میلی متر تهیه و با قیر نرم، پایدارکننده معدنی فعال سطحی (AMBS) و آهک هیدراته در دمای ۱۷۵ درجه سانتی گراد مخلوط شده است. پایدارکننده فعال سطحی با ایجاد سازگاری بین قیر و سنگدانه‌ها، چسبندگی و پایداری مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد.

نانورس مونت موریلونیت از لایه‌های سیلیکات آلومینیوم تشکیل شده که به صورت ساندویچی با یک لایه مرکزی (عمدتاً

¹ Rolling Thin-Film Oven test (RTFO)² Pressured Aging Vessel (PAV)

جدول ۳. کدگذاری نمونه‌ها

Table 3. Sample Coding

Sample Code	RAR content (%)	Nanoclay content (%)	No.
2MMT0RAR	0	2	1
4MMT0RAR	0	4	2
5MMT0RAR	0	5	3
0MMT15RAR	15	0	4
2MMT15RAR	15	2	5
4MMT15RAR	15	4	6
5MMT15RAR	15	5	7
0MMT20RAR	20	0	8
2MMT20RAR	20	2	9
4MMT20RAR	20	4	10
5MMT20RAR	20	5	11
0MMT25RAR	25	0	12
2MMT25RAR	25	2	13
4MMT25RAR	25	4	14
5MMT25RAR	25	5	15



شکل ۲. نمونه‌های آزمایش پایداری ذخیره‌سازی

Fig. 2. Storage stability test specimen

برای شبیه‌سازی پیرشدگی قیر در طول ساخت مخلوط آسفالتی طبق AASHTO T 240 برای شبیه‌سازی پیرشدگی هنگام اختلاط قیر در مراحل تولید آسفالت در کارخانه انجام شد.

۲-۳-۲- آزمایش پایداری ذخیره سازی

برای ارزیابی جدایش فازی و پایداری حرارتی قیرهای اصلاح شده، آزمایش پایداری ذخیره سازی (stability storage) بر اساس استاندارد استرالیایی AG:PT/T108 که به آزمایش Tube Test نیز شناخته می‌شود انجام شد [31]. این آزمایش یکی از مهم‌ترین روش‌های بررسی سازگاری فازی بین قیر و اصلاح کننده‌ها است و معیاری از پایداری سیستم در دمای بالا ارائه می‌دهد.

در این آزمون، حدود ۵۰ میلی‌لیتر از قیر اصلاح شده در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد درون لوله‌های آلومینیومی با قطر ۲۵ میلی‌متر و طول ۱۴۰ میلی‌متر ریخته شد. سپس لوله‌ها بلافاصله در حالت عمودی درون کوره حرارتی به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شدند تا شرایط مدنظر شبیه سازی شود (شکل ۲).

پس از پایان زمان نگهداری، نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای محیط سرد شدند و سپس به سه قسمت مساوی (بالا، میانه و پایین) تقسیم شدند. سپس برای بخش بالا و پایین نقطه نرمی بر اساس روش ASTM D1525 اندازه‌گیری شد. شاخص پایداری ذخیره سازی از طریق رابطه (۱) تعیین شد:

$$\text{Storage Stability Index (SSI)} = 200 \times \frac{T_{top} - T_{bottom}}{T_{top} + T_{bottom}} \quad (1)$$

که در آن SSI شاخص پایداری ذخیره‌سازی (%)، T_{top} نقطه نرمی بخش بالا و T_{bottom} نقطه نرمی بخش پایین نمونه است که برحسب درجه سانتی‌گراد در رابطه (۱) قرار داده می‌شود. بر اساس چارچوب مشخصات استاندارد استرالیایی برای قیرهای اصلاح شده، حداکثر مقدار مجاز شاخص پایداری ذخیره سازی برابر با ۸٪ در نظر گرفته شده است [32].

۲-۲-۴- مشخصات رئولوژی قیر

برای بررسی عملکرد دمای بالای قیرهای خالص و قیرهای اصلاح شده با نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی روی نمونه‌های خام و پیرشده در آزمایش لعاب نازک دوار به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. این آزمایش از دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن

آزمایش درجه نفوذ بر اساس استاندارد ASTM D5، آزمایش نقطه نرمی بر اساس استاندارد ASTM D36 و کندروانی کینماتیکی و دینامیکی به ترتیب در دماهای ۶۰ و ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد بر اساس استاندارد AASHTO T 316 روی قیر اصلاح شده انجام شد.

۲-۲-۲- پیرشدگی قیر

از آنجایی که خواص رئولوژیکی قیر به طور مداوم در طول زمان به دلیل فرآیندهای پیرشدگی مانند اکسیداسیون و تبخیر تکامل می‌یابند. پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر با استفاده از روش RTFO

$$R = \frac{(\varepsilon_{10} - \varepsilon_0)}{\varepsilon_1} \times 100 \quad (3)$$

$$J_{nr} = ave \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (4)$$

در این روابط ε_0 ، ε_c و ε_1 به ترتیب کرنش اولیه در شروع بارگذاری برشی در هر چرخه، مقدار کرنش در انتهای هر چرخه و اختلاف دو کرنش به عنوان کرنش اعمالی و τ سطح تنش و پارامتر γ_u مقدار کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای ۹ ثانیه باربرداری است. حساسیت نسبت به تنش برشی نمونه‌های قیر به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت ($J_{nr,diff}$) می‌باشد. این پارامتر افزایش در مقدار پارامتر J_{nr} را وقتی تنش از ۰/۱ به ۳/۲ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. در عمل، این پارامتر میزان حساسیت قیر به تغییر شکل دائمی در مقادیر تغییر بار ترافیکی یا تغییر دمای سطح روسازی را نشان می‌دهد.

۲-۶- آزمایش جاروب دامنه کرنش خطی (LAS)

این آزمایش روی نمونه‌های پیرشده قیر تحت فشار با قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت استاندارد ۲ میلی‌متر انجام شده است. این آزمایش در دو بخش جاروب فرکانس و جاروب دامنه انجام شد. جاروب فرکانس برای تعیین مقدار پارامتر رئولوژیک غیرمخرب قیر (α) انجام شد. این پارامتر از نسبت معکوس $1+m$ که در آن m حداکثر شیب نمودار مدول مختلط به زمان در مقیاس لگاریتمی است محاسبه می‌شود. در این حالت در دمای اشاره شده و با بارگذاری با مقدار کرنش ۰/۱ درصد، در فرکانس‌های مختلف از ۰/۲ تا ۳۰ هرتز مقدار G^* و δ که به ترتیب نشان دهنده مدول برشی مختلط و زاویه فاز توسط دستگاه رنومتر برشی دینامیکی تعیین و ترسیم می‌شود. در بخش جاروب دامنه نیز آزمایش در دمای موردنظر و در فرکانس ۱۰ هرتز انجام می‌شود. بارگذاری به صورت خطی از کرنش ۰ تا ۳۰ درصد اعمال می‌شود. مقدار حداکثر تنش برشی، حداکثر کرنش برشی و زاویه فاز در هر ثانیه خوانده می‌شود. سپس مقدار خرابی ($D(t)$) به صورت رابطه (۵) در هر زمان محاسبه می‌شود:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n (\pi(\gamma_i)^2 (C_{i-1} - C_i))^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (5)$$

که در آن $C(t)$ نسبت مقدار G^* در زمان t به مقدار G^* اولیه، γ_i درصد کرنش برشی در زمان مورد نظر، α پارامتر ثابت نوع مصالح در بخش جاروب فرکانس و t زمان بر حسب ثانیه است.

پارامتر تغییر شکل دائمی ($G^*/\sin \delta$)، برای قیرهای خالص به بیشتر از ۱ کیلوپاسکال و برای قیرهای اصلاح شده به ۲/۲ کیلوپاسکال برای قیرهای پیرشده ادامه داشت و دمای آزمایش با گام ۶ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد. این آزمایش‌ها در محدوده دمایی ۵۸ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد (شامل ۵۸، ۶۴، ۷۰، ۷۶ و ۸۲ درجه سانتی‌گراد) و در فرکانس ۱/۵۹ هرتز (۱۰ رادیان بر ثانیه) با اعمال کرنش ثابت ۱۲٪ انجام شد.

پس از انجام آزمایش پیرشدگی تحت فشار (PAV) در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ ساعت تحت فشار ۲/۱ مگاپاسکال مطابق استاندارد ASTM D6521، به منظور تعیین دمای عملکردی میانی از آزمایش رنومتر برشی دینامیکی در دماهای ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درجه سانتی‌گراد تا زمانی ادامه یافت که پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ به بیش از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال برسد ادامه یافت. نمونه‌ها دارای ضخامت ۲ میلی‌متر و قطر ۸ میلی‌متر انجام گرفت. بر اساس لزوم اصلاحیه AASHTO T315 مقدار این پارامتر در دمای عملکردی باید حداکثر ۶۰۰۰ کیلوپاسکال باشد تا احتمال ترک خوردگی ناشی از خستگی به حداقل برسد.

۲-۵- آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش (MSCR)

این آزمایش برای سنجش برگشت پذیری قیر تحت سطوح مختلف تنش طبق استاندارد AASHTO TP70 در دماهای بالای عملکردی قیر روی نمونه‌های پیرشده کوتاه مدت انجام شد. این آزمایش در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد روی نمونه‌های قیر با قطر ۲۵ میلی‌متر و با ضخامت ۱ میلی‌متر انجام گرفت. در این آزمایش بار ۱ ثانیه بر نمونه اعمال و ۹ ثانیه حالت استراحت قرار گرفت. ابتدا ۱۰ سیکل بارگذاری تحت تنش برشی ۰/۱ کیلوپاسکال بر نمونه وارد و سپس تنش برشی ۳/۲ کیلوپاسکال برای ۱۰ چرخه بر نمونه وارد شد. پارامترهایی که از آزمون خزش و بازیابی در چند سطح تنش به دست می‌آید شامل مدول غیرقابل بازگشت (J_{nr}) و درصد بازیابی (R) می‌باشد که به ترتیب نمایانگر پتانسیل شیارشدگی یا کرنش باقیمانده در یک نمونه بعد از چرخه‌های بارگذاری و باربرداری در قیر و پاسخ‌های الاستیک در قیر می‌باشد. این پارامترها از رابطه‌های (۲، ۳ و ۴) قابل محاسبه است:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \quad (2)$$

با استفاده از روابط ویسکوالاستیک مکانیک محیط‌های پیوسته عمر خستگی قیر مطابق رابطه (۶) تعیین می‌شود:

$$N_f = A\gamma^{-B} \quad (6)$$

که در آن γ حداکثر کرنش برشی، N_f عمر خستگی و ضرایب A و B ثابت‌های تجربی رابطه هستند که بر اساس AASHTO TP 101-14 از رابطه بین کرنش و عمر خستگی به دست می‌آیند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش‌های استاندارد قیر

انجام آزمایش‌های استاندارد قیر برای بررسی مقدماتی آثار مواد اصلاح کننده بر قیر بود که مطابق جدول (۴) افزایش نقطه نرمی، کاهش درجه نفوذ و افزایش ویسکوزیته قیر را نتیجه داد که به دلیل ایجاد ساختار بین لایه‌ای پیچیده بین ترکیب نانورس و پودر لاستیک با مولکول‌های قیر و برهمکنش سینرژیستی بین اجزاء بود همچنین افزایش ویسکوزیته قیر موجب بهبود رفتار نیوتونی در محدوده دمایی گسترده تر شد. ویسکوزیته کینماتیکی و دینامیکی قیر ۲۱ برابر نسبت به قیر شاهد شده است که موجب کاهش روانی قیر شده و در نتیجه دمای اختلاط و انرژی تراکم مخلوط آسفالتی برای رسیدن به درصد فضای خالی مطلوب افزایش می‌یابد.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی قیرهای پژوهش

Table 4. Physical Properties of research asphalt binders

Tests	Penetration Grade (@25 °C, dmm)	Softening Point (°C)	Viscosity (@60 °C, Pas)	Viscosity (@135 °C, cSt)
No.				
Control	90	46.2	111	276
1	90	46.4	111	269
2	89	46.6	114	277
3	88	46.8	121	278
4	55	54.6	388	852
5	52	56.2	592	1060
6	52	56.2	589	1026
7	53	56	555	999
8	50	58.4	824	1765
9	47	59.6	1015	2103
10	47	60	1013	2203
11	48	59.2	992	2226
12	45	63.7	2181	4959
13	43	65	2397	5852
14	43	65.2	2589	5968
15	43	65.8	2532	5936

استفاده از ترکیب نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده در قیر نتایج بهتری از استفاده از نانورس و پودر لاستیک به طور جداگانه در قیر دارد. به طوری که در دمای زیاد (که قیر به شکل روان است) این ترکیب موجب کاهش ویسکوزیته و افزایش کارایی قیر می‌شود. در دمای محیط، قیر حاوی این ترکیب دارای درجه نفوذ کمتر و نقطه نرمی بیشتر از نمونه شاهد است.

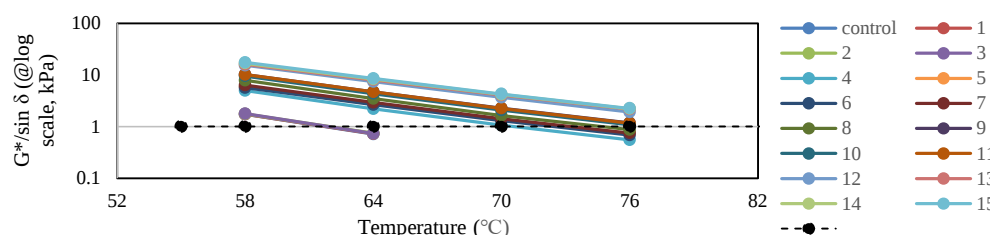
۳-۲- تحلیل جدایش فازی

پایداری قیر اصلاح شده با پودر لاستیک فرآوری شده و نانورس به توانایی قیر و ذرات اصلاح کننده در حفظ توزیع یکنواخت و جلوگیری از بروز جدایش فازی در شرایط دمای بالا و دوره‌های نگهداری طولانی اشاره دارد. تفاوت در چگالی و کندروانی میان قیر و ذرات اصلاح کننده منجر به ناپایداری و در نهایت جدایش بین دو فاز می‌شود.

نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی نشان داد که به دلیل وزن مخصوص بالاتر ذرات نسبت به قیر، نقطه نرمی بخش پایین در تمام نمونه‌ها بیشتر از بخش بالا است که حاکی از حرکت ذرات به سمت پایین نمونه است. در این پژوهش نمونه اصلاح شده با پودر لاستیک بیشترین (۱۴٪) و نمونه اصلاح شده با پودر لاستیک فرآوری شده و نانورس مونت موریلونیت کمترین (۷٪) جدایش را نتیجه داد. همانطور که مشخص است هم افزایش و تشکیل شبکه پایدار بین نانورس و RAR باعث بهبود پایداری و کاهش خطر جدایش فازی شده است.

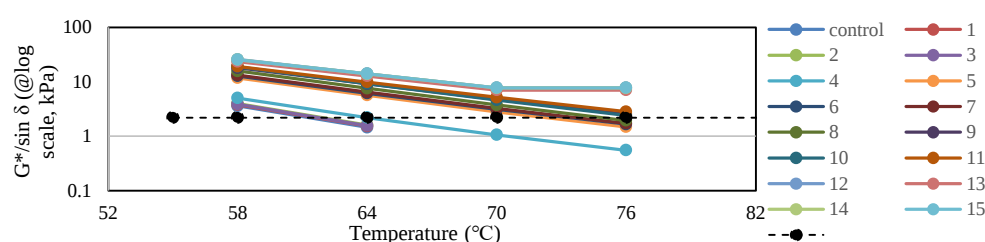
۳-۳- پارامتر تغییر شکل دائمی قیر

در مشخصات روسازی ممتاز پارامتر $G^*/\sin\delta$ برای مشخص کردن مقاومت در برابر شیارشدگی بتن آسفالتی انتخاب شده است. هرچه این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت در برابر مشخصه تغییر شکل دائمی بهتر است. در این بخش به بررسی نتایج پارامترهای شیارشدگی نمونه‌های قیر اصلاح شده با ۲، ۴ و ۵ درصد نانورس مونت موریلونیت و ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد پودر لاستیک فرآوری شده پرداخته شده است و امکان سنجی این پارامتر برای ارزیابی عملکرد دمای بالای قیر اصلاح شده با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای شیارشدگی انواع قیرها در دماهای مختلف در دو حالت قبل از پیرشدگی و بعد از پیرشدگی به ترتیب در شکل (۳ و ۴) نشان داده شده است.



شکل ۳. تاثیر دما بر پارامتر تغییر شکل دائمی قبل از پیرشدگی قیر

Fig. 3. Effect of temperature on the permanent deformation parameter before asphalt binder aging



شکل ۴. تاثیر دما بر پارامتر تغییر شکل دائمی بعد از پیرشدگی قیر

Fig. 4. Effect of temperature on the permanent deformation parameter after asphalt binder aging

تر از تابع سینوس است، به ویژه هنگامی که به ۹۰ درجه نزدیک می‌شود.

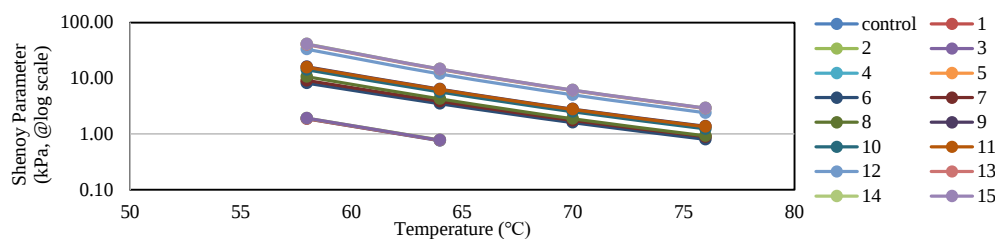
این پارامتر که نماینده معکوس کرنش برگشت ناپذیر است، از ارتباط بین پاسخ کرنش در آزمون خزش و مدول برشی مختلط حاصل از آزمایش‌های برشی نوسانی در بازه‌های زمانی متناظر به دست می‌آید. در مقایسه با پارامتر Superpave، این پارامتر حساسیت بیشتری به زاویه فاز دارد پس شاخص بهتری برای تغییرات خواص الاستیک در حضور افزودنی‌های لاستیکی فراهم می‌کند.

$$\text{Shenoy's rutting parameter} = \frac{G^*}{[1 - (\sin \delta \cdot \tan \delta)^{-1}]} \quad (V)$$

شکل (۵) رابطه بین این پارامتر و دما را نشان می‌دهد. تغییرات در بین نمونه‌ها با روند تغییرات مدول برشی مختلط همخوانی دارد. مقدار این پارامتر در نمونه‌های حاوی نانورس و RAR از مقادیر مربوط به نمونه‌های دیگر بالاتر است که نشان دهنده بهبود عملکرد قیر در دمای بالا با این این افزودنی‌ها است.

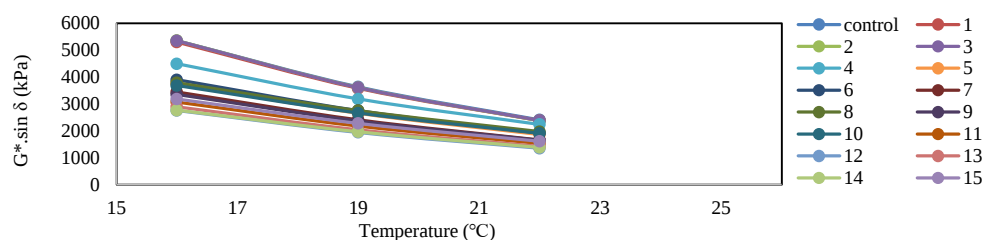
افزون بر این، قیرهای اصلاح شده با RAR در مقایسه با قیرهای حاوی نانورس بهبود قابل توجهی نشان دادند که حاکی از آن است که ترکیب نانورس و RAR موجب افزایش پایداری حرارتی و مقاومت شیارشدگی در دمای بالا می‌شود.

همانطور که نشان داده شده است، افزودن نانورس به تنهایی تغییر چشم گیری در مقدار پارامتر شیارشدگی ایجاد نکرده است اما زمانی که پودر لاستیک همراه نانورس استفاده می‌شود به دلایل ترمودینامیکی، بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا به دلیل ایجاد شبکه پیوسته مواد افزودنی در فاز پیوسته قیر و ارتباط سه گانه پیوندهای شیمیایی کانی رس، ذرات لاستیک و مولکول‌های قیر این پارامتر افزایش می‌یابد و نرخ کاهش این پارامتر در قیر اصلاح شده با افزایش دما نسبت به قیر شاهد کمتر است. اتصال قوی بین ذرات نانورس و پودر لاستیک در فاز پیوسته قیر باعث می‌شود تا ویژگی‌های الاستیک قیر اصلاح شده نسبت به قیر خالص افزایش یابد که این موضوع دلیل آن است که اختلاف فاز بین تنش و کرنش در قیرهای اصلاح شده کاهش یابد و رفتار قیر به رفتار ماده الاستیک خالص نزدیک‌تر شود. این امر نشان می‌دهد افزودن ترکیب نانورس و پودر لاستیک می‌تواند حساسیت دمایی قیر را بهبود بخشد که نقش مثبتی در بهبود عملکرد دمای بالا ایفا می‌کند. برای بررسی بهتر عملکرد شیارشدگی قیرهای اصلاح شده Shenoy و همکاران رابطه (V) را پیشنهاد دادند [30]. این رابطه به صورت نیمه تجربی و با در نظر گرفتن ضریب میرایی ($\tan \delta$) توسعه یافته است؛ ضریبی که نسبت به تغییرات زاویه فاز حساس



شکل ۵. نتایج پارامتر Shenoy

Fig. 5. Shenoy Parameter results



شکل ۶. تاثیر دما بر پارامتر خستگی بعد از پیرشدگی قیر

Fig. 6. Effect of temperature on the fatigue parameter after asphalt binder aging

۳-۴- تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت بر شیارشدگی قیر

با توجه به شکل (۴) عمر شیارشدگی در نتیجه پیرشدگی کوتاه مدت افزایش می‌یابد. دلیل این امر نیز افزایش نسبت آسفالتن به مالتن در مولکول‌های قیر در اثر حرارت و گردش هوا در طی آزمایش است که نمودی از پیرشدگی قیر در هنگام تهیه مخلوط آسفالتی را دارد. در سطوح کرنش کم، شدت افزایش عمر شیارشدگی ناشی از پیرشدگی در قیرهای مختلف تقریباً یکسان است، اما در سطوح کرنش بالا به دلایل خرابی‌های ناشی از بارهای ترافیکی و تغییر شکل دائمی شدت کاهش عمر شیارشدگی ناشی از پیرشدگی در قیرهای حاوی پودر لاستیک و نانورس مونت موریلونیت نسبت به قیر پایه کمتر است.

۳-۵- پارامتر خستگی قیر

طبق روش روسازی ممتاز پارامتر $G^*. \sin \delta$ نمود خوبی از خستگی قیر به دست می‌دهد. بیشترین مقدار مجاز این پارامتر مطابق آیین‌نامه AASHTO M332 عددی مابین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ مشخص شده است. مطابق شکل (۶) در تمام نمونه‌ها این مقدار رعایت شده و با افزودن نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده در محدوده دمایی ۱۶ الی ۲۲ درجه سانتی‌گراد این پارامتر به کمتر از ۶۰۰۰ رسیده است. قیرهای دارای پارامتر $G^*. \sin \delta$ کمتر مقاومت

بهتری در برابر ترک‌های دمای میانی دارند بنابراین با توجه به نتایج می‌توان عنوان کرد که نمونه قیر با ۲۵ درصد پودر لاستیک بهترین نتیجه را نشان داد اما نمونه قیر با ۲۵ درصد پودر لاستیک و ۴ درصد نانورس نیز نتیجه نزدیک به این مقدار را ارائه نمود. استفاده از ترکیب نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده موجب کاهش نرخ پیرشدگی در قیر می‌شود. دلیل این پدیده نیز این است که این مواد مانعی در برابر تبخیر ذرات سبک قیر و تغییر در نسبت مالتن به آسفالتن کلویید قیر است این موضوع سبب کاهش پتانسیل ترک خوردگی در قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای خالص می‌شود. همچنین پیوند خوب بین نانورس و پودر لاستیک در فاز پیوسته قیر سبب می‌شود تا فاصله زمانی بین اعمال تنش و ایجاد کرنش کاهش یافته و ویژگی الاستیک قیر افزایش یابد.

۳-۶- نتایج آزمایش خزش و بازبایی قیر در چند سطح تنش

بر اساس استاندارد AASHTO M332 (2014)، قیرها بر مبنای نتایج آزمایش MSCR و به ویژه مقدار J_{nr} 3.2 در چهار سطح عملکرد ترافیکی طبقه بندی می‌شوند:

- S (Standard) برای ترافیک معمولی با $J_{nr} 3.2 \leq 4.0 \text{ kPa}^{-1}$
- H (Heavy) برای ترافیک سنگین با $J_{nr} 3.2 \leq 2.0 \text{ kPa}^{-1}$
- V (Very Heavy) برای ترافیک بسیار سنگین با

حساسیت کمتر مواد به تنش است. استاندارد AASHTO T283 مقدار درصد تغییر در مدول غیرقابل برگشت را به ۷۵ درصد محدود کرده است. این معیار می‌تواند استفاده از قیرهایی که نسبت به تغییرات بار ترافیکی یا دمایی حساس می‌باشند و پتانسیل شیارشدگی مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهد محدود نماید.

با توجه به جداول (۵ تا ۷) مشخص است که استفاده از قیرهای حاوی صرفاً نانورس از لحاظ این بند از آیین نامه بلامانع است اما اضافه شدن پودر لاستیک به قیر به طور قابل ملاحظه‌ای معیار $J_{nr,diff}$ را افزایش می‌دهد. به طور کلی استفاده از اصلاح کننده‌ها نسبت به حساسیت قیرها به تغییر شکل دائمی در شرایط دمایی غیرقابل پیش بینی و یا شرایط بارگذاری مختلف بحرانی است.

جدول ۵. پارامترهای آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش برای قیر حاوی نانورس

Table 5. MSCR testing Parameters of Asphalt binder with Nanoclay

Sample Code	R 3.2	R 0.1	$J_{nr,diff}$	$J_{nr} 3.2$	$J_{nr} 0.1$
Control	0.92	8.4	23	2.64	2.14
1	0.78	7.9	21.48	2.69	2.20
2	1.06	8.24	22.3	2.42	1.98
3	0.85	8	23	2.50	2.05

جدول ۶. پارامترهای آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش برای قیر حاوی پودر لاستیک فرآوری شده

Table 6. MSCR testing Parameters of Asphalt binder with RAR

Sample Code	R 3.2	R 0.1	$J_{nr,diff}$	$J_{nr} 3.2$	$J_{nr} 0.1$
4	16.29	63.69	1.24	1.24	0.45
5	20.2	57.15	0.8	0.8	0.369
6	57.44	91.79	0.161	0.161	0.027

جدول ۷. پارامترهای آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش برای قیر حاوی نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده

Table 7. MSCR testing Parameters of Asphalt binder with Nanoclay and RAR

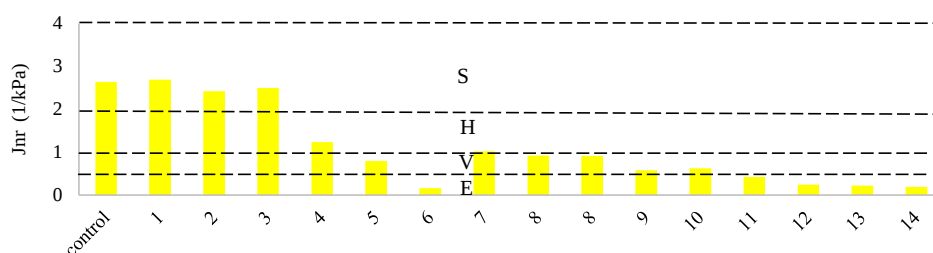
Sample Code	R 3.2	R 0.1	$J_{nr,diff}$	$J_{nr} 3.2$	$J_{nr} 0.1$
7	24.67	67.56	173.01	1.024	0.0375
8	24.14	67.54	175.9	0.922	0.339
9	23.54	66.21	165.96	0.915	0.344
10	29.31	73.87	220.02	0.581	0.182
11	25.9	63.61	132.55	0.628	0.27
12	35.34	82.35	333.23	0.422	0.097
13	50.32	86.08	306.08	0.243	0.060
14	48.69	90.14	514.51	0.225	0.037
15	53.84	87.26	309.48	0.194	0.047

$J_{nr} 3.2 \leq 1.0 \text{ kPa}^{-1}$
 • E (Extreme Heavy) برای ترافیک فوق سنگین با $J_{nr} 3.2 \leq 0.5 \text{ kPa}^{-1}$
 در این پژوهش، از مقادیر $J_{nr} 3.2$ و درصد بازیابی کرنش (R%) به منظور تعیین سطح عملکردی قیر و تحلیل اثر افزودنی‌ها بر مقاومت در برابر شیارشدگی استفاده شده است (شکل ۱۰).

با توجه به جداول (۵ تا ۷) نتایج حاکی از این است که استفاده از افزودنی نانورس تغییر زیادی در رفتار قیر در دماهای بالا ندارد اما زمانی که پودر لاستیک در قیر استفاده می‌شود نتایج بهتر شده و درصد بازگشت کرنش که نشان دهنده قدرت قیر در بازگشت بعد از باربرداری است افزایش یافته است. قیرهای اصلاح شده با نانورس، دارای درصد بازگشت کرنش کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده در دو سطح تنش می‌باشد. این موضوع ناشی از سختی و رفتار الاستیک کمتر این نمونه‌ها دارد. قیر اصلاح شده با ۲۵ درصد پودر لاستیک فرآوری شده و ۴ درصد نانورس بیشترین درصد بازگشت در هر دو سطح تنش را دارد که نشان دهنده این موضوع است که این نوع نمونه‌ها دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائمی می‌باشند.

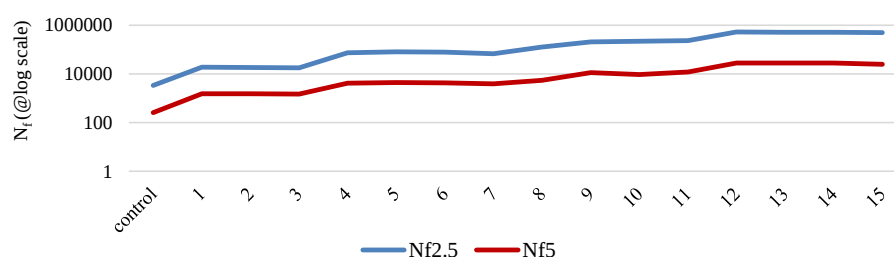
مقادیر مدول غیرقابل برگشت (J_{nr}) در جدول‌های (۵ تا ۷) در سطوح کرنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال آورده شده است. نتایج حاکی از این است که این پارامتر با افزودن اصلاح کننده کاهش پیدا کرده است، اما این پارامتر برای قیر حاوی نانورس تفاوت زیادی با قیر خالص ندارد. مقادیر کمتر این پارامتر نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط به تغییر شکل دائمی قیر است. نتایج مقادیر بهتری را برای ترکیب پودر لاستیک فرآوری شده و نانورس به دست داد. نمونه دارای ۲۵ درصد پودر لاستیک فرآوری شده بهترین نتیجه را در این پارامتر داشته است. این مورد نشان دهنده این است افزودن پودر لاستیک فرآوری شده به قیر حساسیت آن نسبت به تغییر شکل دائمی را به طور چشمگیری (حدود ۸۰ برابر) کاهش می‌دهد.

حساسیت قیر نسبت به تنش‌های وارد شده که از تغییر ترافیک یا تغییر دمای سطح روسازی ایجاد می‌شود در جداول (۵ تا ۷) با پارامتر $J_{nr,diff}$ آورده شده است. درصد اختلاف نشان دهنده حساسیت قیر به افزایش سطح تنش می‌باشد. بنابراین مقادیر کمتر نشان دهنده



شکل ۷. نمودار مقایسه عملکردی بر اساس سطوح ترافیکی استاندارد AASHTO M332 در دمای ۵۸ درجه سانتی گراد

Fig. 7. Performance comparison diagram based on AASHTO M332 standard traffic levels at 58 °C



شکل ۸. عمر خستگی قیر در سطح کرنش ۲.۵ و ۵ درصد

Fig. 8. Fatigue life of asphalt binders at 2.5 and 5% strain level

۳-۷- نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی

در این بخش نتایج عمر خستگی نمونه‌های قیر بر اساس تحلیل VCED ارائه شده است. دو پارامتر A و B خروجی اصلی آزمایش جاروب دامنه خطی می‌باشند. مقدار A هر چقدر بیشتر باشد به این معناست که مصالح مقاومت بیشتری در برابر تجمع خرابی دارند. بنابراین عمر خستگی نمونه‌های قیر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر پارامتر B مرتبط با حساسیت نمونه‌های قیر در برابر تغییرات سطح کرنش است. مقدار B هر چقدر بیشتر باشد به این معناست که با افزایش سطح کرنش عمر خستگی کاهش بیشتری دارد. نتایج آزمایش بر اساس شکل (۸) نشان داد که قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر پایه مقاومت خستگی بالاتری دارند، به طوری که تعداد سیکل شکست در سطوح مختلف کرنش افزایش یافته است. از آنجایی که رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی تا حد زیادی توسط قیر تعیین می‌شود، این نتایج نشان دهنده پتانسیل افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این قیر است. با این حال رابطه دقیق بین مقاومت خستگی قیر و عمر خستگی مخلوط به ترکیب آن، درصد قیر، تراکم و شرایط بارگذاری بستگی دارد و برای تایید کمی این تاثیر نیاز به آزمایش‌های خستگی روی

شایان ذکر است که آزمایش MSCR اساساً برای قیرهای پلیمری همگن طراحی شده است و کاربرد آن برای قیرهای اصلاح شده با نانورس و پودر لاستیک با محدودیت‌هایی روبرو است. مقادیر بالای $J_{nr, diff}$ در این نمونه‌ها ممکن است بازتاب دقیقی از حساسیت واقعی به تغییر شکل دائمی نباشد. بنابراین نتایج MSCR برای چنین قیرهایی باید با احتیاط تفسیر شوند و محدودیت‌ها و پیامدهای آن در تحلیل نتایج مدنظر قرار گرفته است.

برای تفسیر بهتر روند تغییرات R و J_{nr} نتایج در قالب نمودار مقایسه‌ای سطح عملکردی قیر (S, H, V, E) نیز تحلیل شدند. همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، افزودن نانورس باعث عدم کاهش محسوس مقدار $J_{nr, 3.2}$ و ثبات سطح عملکردی قیر در S شده است. در مقابل RAR ضمن افزایش خاصیت بازیابی کرنشی، سبب شده قیر اصلاح شده در محدوده H تا V طبقه بندی شود. اما ترکیب نانورس و پودر لاستیک فرآوری شده موجب ارتقای چشمگیری شده که به بالاترین سطح عملکردی قیر رسیده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که ترکیب نانورس و RAR می‌توانند عملکرد رئولوژیکی قیر را در برابر بارگذاری‌های سنگین به طور چشمگیری بهبود دهند.

نمونه‌های مخلوط آسفالتی وجود دارد.

۴- یافته‌های آزمایش‌ها نشان داد که عمر خستگی قیر اصلاح شده نسبت به قیر پایه افزایش یافته است که منجر به افزایش دوام مخلوط آسفالتی در دوره بهره‌برداری و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود.

برای پژوهش‌های آتی بررسی عملکرد دمای پایین در مقیاس ماکروسکوپی، مدلسازی رئولوژیکی دقیق تر و تحلیل انرژی شکست می‌تواند به درک عمیق تری از سازوکارهای بهبود عملکرد منجر شود.

قدردانی و تشکر

بدین وسیله از شرکت نفت جی و جناب آقای مهندس سیروان اوسطی به دلیل فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی و تجهیزات لازم برای انجام آزمایش‌ها کمال تشکر را داریم.

تعارض منافع

برای نویسندگان این مقاله جهت انتشار آن تعارض منافعی وجود ندارد.

نقش نویسندگان

نقش هر یک از نویسندگان در مقاله مشخص شود.

منابع مالی

در صورت استفاده یا عدم استفاده از منابع مالی، نیز ذکر شود.

هوش مصنوعی

در صورت استفاده یا عدم استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی به آن اشاره شود.

افزودن نانورس به تنهایی عمر خستگی قیر را به صورت چشمگیری در هر دو سطح کرنش افزایش نداده است اما قرارگیری نانورس در کنار پودر لاستیک فراوری شده به خصوص در درصد‌های بیشتر پودر لاستیک موجب تقویت عمر خستگی قیر شده و بهینه‌ترین نمونه از لحاظ خستگی نمونه قیر حاوی ۲۵ درصد پودر لاستیک و ۴ درصد نانورس می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی اثر هم افزایی نانورس مونت موریلونیت و پودر لاستیک فراوری شده بر عملکرد رئولوژیکی قیر در دماهای بالا و میانی انجام شد. نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- ترکیب بهینه شامل ۴٪ نانورس و ۲۵٪ پودر لاستیک فراوری شده، بیشترین اثر هم افزایی را نشان داد. افزایش مدول برشی و کاهش زاویه فاز در این ترکیب، بیانگر تقویت رفتار الاستیک قیر و بهبود پایداری آن در شرایط بارگذاری و دمای بالا است.
- ۲- از منظر فنی، حضور همزمان نانورس و RAR، موجب تشکیل شبکه‌های نانو ساختاری پایدار در ماتریس قیر شده که علاوه بر بهبود چسبندگی داخلی، از جدایش فازی و افت عملکرد در طی ذخیره سازی جلوگیری می‌کند.

۳- افزودن نانورس به ترکیب پودر لاستیک و قیر سبب افزایش بازگشت کرنش و کاهش چشمگیر مدول غیرقابل بازگشت شد که در عمل منجر به افزایش طول عمر روسازی تحت بارهای ترافیکی متغیر خواهد شد. همچنین قیرهای اصلاح شده موجب بهبود سطح ترافیکی معمولی به سطح فوق سنگین شد.

References

- [1] Zhang, H. and Yu, J., 2010. Rheological properties of asphalt modified with nanoclay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), pp.689–694.
- [2] Sousa, J.B., Vorobiev, A., Rowe, G.M. and Ishai, I., 2013. Reacted and activated rubber: Elastomeric asphalt extender. *Transportation Research Record*, 2371(1), pp.32–40. doi: 10.3141/2371-04.
- [3] Xiao, F. and Amirkhanian, S.N., 2009. Rheology of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(12), pp.758–764.
- [4] Aflaki, S. and Tabatabaee, N., 2009. Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. *Construction and Building Materials*, 23(6), pp.2141–2150. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.014.
- [5] Anderson, R.M. and Goetz, W.H., 1973. Mechanical properties of bituminous mixtures at low temperatures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 42, pp.1–25.
- [6] You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S., 2011. Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp.1072–1078. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.070.
- [7] Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza, F.J. and Gallegos, C., 2007. Influence of processing conditions on the rheological behavior of crumb tire rubber-modified bitumen. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(3),

pp.1683–1691. doi: 10.1002/app.25800.

- [8] Liang, M., Xin, X., Fan, W., Wang, H. and Jiang, H., 2015. Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 84, pp.399–408. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.082.
- [9] Behnood, A. and Olek, J., 2017. Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials*, 151, pp.464–478. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.115.
- [10] Zhang, Y. et al., 2022. Enhancement of asphalt binder rheology using nanoclay: A DSR-based study. *Construction and Building Materials*, 340, p.127832.
- [11] Golestani, B. et al., 2021. Nanoclay-modified asphalt: Intercalation effects and rheological behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(6), p.0402112.
- [12] Wang, L. et al., 2023. Chemical treatment of crumb rubber for enhanced asphalt performance. *Materials & Design*, 225, p.11547.
- [13] You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S., 2011. Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp.1072–1078. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.070.
- [14] Jahromi, S.G. and Khodaii, A., 2009. Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 23(8), pp.2894–2904. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.027.
- [15] Ouyang, C. et al., 2018. Improving the dispersion of nanoclay in asphalt binder by surface modification. *Journal of Materials Science*, 53(12), pp.8976–8988.
- [16] Norouzi, M. et al., 2020. Aging resistance of rubberized asphalt binders: A DSR analysis. *Fuel*, 278, p.118365.
- [17] Ishai, I., Amit, M., Kesler, T. and Peled, R., 2015. New advancements in rubberized asphalt using an elastomeric asphalt extender: Three case studies. *6th Rubberized Asphalt Rubber Conference (RAR2015)*, Las Vegas, 4–7 October 2015.
- [18] Chen, X. et al., 2021. Synergistic effects of nanoclay and crumb rubber on asphalt binder properties. *Applied Sciences*, 11(15), p.7043.
- [19] Al-Mansoori, T. et al., 2022. Dynamic shear rheometer evaluation of hybrid modified asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, 23(4), pp.923–941.
- [20] Kök, B.V. et al., 2023. UV aging resistance of nanoclay-rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 367, p.130321.
- [21] Mirsepahi, M. et al., 2023. Frequency-dependent behavior of hybrid modified asphalt binders. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 10(2), pp.245–256.
- [22] Sun, D. et al., 2017. Laboratory evaluation of nanocomposite-modified asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), p.04017181.
- [23] Farouk, A.I.B. et al., 2022. Aging resistance of hybrid-modified bitumen with nanoclay and crumb rubber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(3), p.04021489.
- [24] Sousa, J.B., Vorobiev, A., Rowe, G.M. and Ishai, I., 2013. Reacted and activated rubber: Elastomeric asphalt extender. *Transportation Research Record*, 2371(1), pp.32–40. doi: 10.3141/2371-04.
- [25] Fang, C., Zhang, M., Chen, Z., Yu, R., Liu, Q. and Xie, J., 2020. Recycling waste tire rubber in asphalt using dry process: A review of best practices and perspectives. *Materials*, 13(21), p.4864. doi: 10.3390/ma13214864.
- [26] Wang, T., Liu, H., Li, N. and Zhang, Y., 2022. Improving compatibility and storage stability of crumb rubber modified asphalt by chemical activation. *Construction and Building Materials*, 329, p.127157. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127157.
- [27] Zhang, H., Liu, G. and Wu, S., 2023. Effect of desulfurized crumb rubber powder on the rheological properties and microstructure of modified bitumen. *Coatings*, 13(5), p.607.
- [28] Liu, Y., Zhang, C. and Chen, J., 2024. Performance evaluation of asphalt binder modified with processed rubber powder under different aging conditions. *Materials*, 17(3), p.512.
- [29] Genan A/S, 2024. *Rubber modifier for asphalt applications: Technical report on processed rubber powders*. Technical Bulletin. Viborg, Denmark: Genan A/S.
- [30] Shenoy, A., 2002. Model-fitting the master curves of the dynamic shear rheometer data to extract a rut-controlling term for asphalt pavements. *Journal of Testing and Evaluation*, 30, pp.95–102.
- [31] B. Surfacing and A. Group, n.d. *Commentary to AG: Pt/T108 – Segregation of polymer modified binders*, pp.1–6.
- [32] Austroads, 2019. *Specification framework for polymer modified binders*. Sydney, NSW: Austroads.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Reference

Comment [WU]: عنوان،

نویسندگان و صفحات به قالب
Harvard تنظیم شد و DOI رسمی مقاله
اضافه گردید. توجه شد که مقاله در
جلد ۶۴ منتشر شده و صفحات آن
۳۱۶–۳۲۳ است؛ بنابراین اطلاعات
اولیه ارسالی از نظر جلد و صفحات
با رکورد مقاله مطابقت نداشت.

(ScienceDirect)

بررسی کنید