

Investigation of the effect of long-term aging on the high- and low-temperature performance of bitumen

Mohammad Mehdi Dadaei¹, Pouria Hajikarimi^{2*} , Mohammad Rahi³, Mehdi Dastoori Razaz⁴, Behnoosh Tahmasbi⁵, Fereidoon Moghadas Nejad⁶

1. Ph.D. student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.
3. Director of Research and Development, Pasargad Oil Company, Tehran, Iran.
4. Manager, Dept. of Research and Development, Pasargad Oil Company, Abadan, Iran.
5. Laboratory Expert, Dept. of Research and Development, Pasargad Oil Company, Abadan, Iran
6. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Abstract

Accurately analyzing the behavior of bitumen as a viscoelastic material, along with its natural aging process, is crucial in pavement engineering. Bitumen, being a thermoplastic substance, exhibits mechanical properties that vary with temperature, significantly affecting the durability and overall performance of asphalt pavements. To ensure long-term serviceability, it is essential to control the high- and low-temperature properties of bitumen to prevent distress mechanisms such as rutting at high temperatures and cracking at low temperatures. This is particularly important in regions with extreme temperature fluctuations, where bitumen must remain stable under varying climatic conditions.

In this study, the effects of aging on the mechanical properties of bitumen were simulated using the Superpave testing system, a widely accepted approach in asphalt binder performance grading. Specifically, short-term aging was replicated using the Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT), which mimics the oxidation that occurs during the mixing and construction phases. Long-term aging was simulated using the Pressure Aging Vessel (PAV), which accelerates the oxidative hardening that takes place over the pavement's service life. Understanding the impact of these aging processes is essential for predicting the long-term behavior of asphalt pavements and developing strategies to improve their durability.

To evaluate the impact of repeated PAV aging cycles, three different penetration-grade bitumens were selected: 40-50 (PG70-16), 60-70 (PG64-22), and 85-100 (PG58-28). These grades reflect their resistance to temperature-induced distress. Each bitumen type was subjected to one, two, and three PAV aging cycles to provide insight into the progressive effects of oxidation on its rheological and mechanical properties. The gradual stiffening of bitumen due to oxidation can lead to increased brittleness, making it more susceptible to cracking under traffic loads and environmental stresses. Therefore, evaluating the extent of these changes is critical in designing pavements that can withstand long-term exposure to aging factors.

For low-temperature performance analysis, the Bending Beam Rheometer (BBR) test was conducted at 0°C, -6°C, and -12°C to assess the stiffness and susceptibility of the aged bitumen to thermal cracking. To evaluate high-temperature performance, the Dynamic Shear Rheometer (DSR) test was carried out at seven different temperatures, ranging from 46°C to 82°C. This test provided key data on the complex shear modulus and phase angle, which are critical indicators of bitumen's resistance to rutting and fatigue cracking. Additionally, the rheological data obtained from these tests help predict pavement performance under various climatic and loading conditions.

The results showed that with increased aging, the high-temperature performance of the bitumens improved by up to three PG grades, while the low-temperature performance increased by a maximum of two grades. After three PAV aging cycles, the performance grades of the tested bitumens shifted to PG82-4, PG82-10, and PG70-16, respectively. Additionally, the study examined the relationship between the high-temperature properties of aged bitumen and its chemical composition over different aging periods. A strong linear correlation was observed between the viscoelastic properties at high temperatures and the chemical aging index, with an R^2 value exceeding 0.9. These findings highlight the significant influence of aging on bitumen performance and emphasize the importance of considering aging resistance when selecting bitumen for pavement applications. Future research should focus on developing modification techniques to enhance bitumen's aging resistance and improve its long-term performance in diverse environmental conditions.

Review History

Received: Jul 22, 2024

Revised: Nov 08, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

Asphalt binder

Aging

Bending Beam Rheometer

Dynamic Shear

Rheometer

Performance Grading.

* Corresponding Author Email: phajikarimi@aut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-5621-7274



بررسی تأثیر پیرشدگی بلندمدت بر ویژگی‌های عملکردی دمای بالا و پایین قیر

محمد مهدی دادائی^۱، پوریا حاجی کریمی^{۲*} , محمد راهی^۳، مهدی دستوری رزاز^۴، بهنوش طهماسبی^۵، فریدون مقدس نژاد^۶

۱. دانشجوی دکتری تخصصی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
۳. مدیر تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، تهران، ایران.
۴. مدیر آزمایشگاه، واحد تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، آبادان، ایران.
۵. کارشناس آزمایشگاه، واحد تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، آبادان، ایران.
۶. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

تاریخچه داوری

- تحلیل دقیق رفتار قیر به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک و پدیده‌های طبیعی حاکم بر آن مانند پیرشدگی، از مسائل مهم مهندسی روسازی است. از این رو کنترل ویژگی‌های دمای پایین و بالای قیرها به منظور پیشگیری از ترک خوردگی‌های دمای پایین و آسیب‌های متداول دمای بالا به منظور خدمت‌دهی مناسب در طول عمر روسازی ضروری است. در این مطالعه شبیه‌سازی پدیده پیرشدگی و بررسی آثار آن روی ویژگی‌های مکانیکی قیرها با استفاده از روش دستورالعمل سوپریو یعنی روش RTFOT برای پیرشدگی کوتاه‌مدت و روش PAV برای پیرشدگی بلندمدت انجام شده است. به منظور بررسی تأثیر چرخه‌های مکرر PAV بر ویژگی‌های قیرها سه نوع قیر با درجات نفوذ مختلف ۴۰-۵۰ (PG۷۰-۱۶)، ۶۰-۷۰ (PG۲۲-۶۴) و ۸۵-۱۰۰ (PG۵۸-۲۸) انتخاب و از هر کدام سه نمونه تحت مراتب پیرشدگی یک الی سه بار PAV قرار گرفته‌اند. آزمون رئومتر تیر برشی (BBR) در سه دما از صفر تا ۱۲- درجه سانتی‌گراد و رئومتر برش دینامیکی (DSR) در هفت دما از ۴۶ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده دمای بالای عملکردی قیرها حداکثر سه رده و دمای پایین عملکردی آن‌ها حداکثر دو رده افزایش را متحمل شده‌اند. به عبارت دیگر درجه‌بندی قیرهای سه‌گانه، پس از سه مرتبه اعمال PAV به ترتیب به ۸۲-۱۰، ۸۲-۴ و ۷۰-۱۶ تبدیل است. همچنین ارتباط خصوصیات عملکردی دمای بالای قیرهای پیرشده با تغییرات شیمیایی آن‌ها در مراتب مختلف پیرشدگی بررسی و تغییرات آن‌ها به منظور نمایش همبستگی میان این ویژگی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که ویژگی‌های ویسکوالاستیک دمای بالا و شاخص پیرشدگی شیمیایی قیرهای مختلف دارای ارتباط خطی قوی با ضریب تعیین (R^2) بیش از ۰/۹ بوده است.

کلمات کلیدی

قیر پیرشدگی رئومتر تیر خمشی رئومتر برش دینامیکی رده‌بندی عملکردی قیر

۱- مقدمه

در سطح جهان هستند [1]. استفاده از قیر به عنوان یکی از اجزای اصلی این نوع روسازی در مناطق مختلف جهان وابسته به سیاست‌های توسعه زیرساختی آن‌ها بوده است و بر این اساس

روسازی‌های آسفالتی به سبب دارا بودن ویژگی‌های انعطاف‌پذیری و راحتی حرکت یکی از رایج‌ترین نوع رویه راه‌ها

* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - phajikarimi@aut.ac.ir :0000-0001-5621-7274

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت 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، بازنشر 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.



آمریکای شمالی ۲۵ درصد، اتحادیه اروپا ۱۷ درصد، سایر کشورهای اروپایی ۱۱ درصد، آسیا و اقیانوسیه ۳۷ درصد، آمریکای جنوبی ۷ درصد و آفریقا ۳ درصد از کل سهم استفاده از قیر را به خود اختصاص داده‌اند [2]. روسازی آسفالتی ۶۷ درصد از سطح راه‌های کشور ایران به طول بیش از ۲۲۰ هزار کیلومتر را پوشش داده‌اند [3]. قیر مانند هر ماده آلی تحت شرایط مختلف دمایی، واکنش با اکسیژن و نیز برخورد اشعه فرابنفش دچار تغییرات ساختاری به لحاظ شیمیایی می‌شود. به عبارت دیگر قیر در طول عمر طرح تحت تأثیر ترافیک و شرایط آب و هوایی دچار تغییرات فیزیوشیمیایی می‌شود که به این پدیده موثر بر ویژگی‌های مکانیکی قیر پیرشدگی گفته می‌شود [4]. عواملی مانند دمای بالا، اکسیژن، تابش نور خورشید و مواجهه با گونه‌های فعال اکسیژن مانند O_3 مسبب پدیده پیرشدگی شناخته شده‌اند [5]. پیرشدگی فرآیندی شیمیایی است که منجر به سخت شدن و افزایش گرانیوی قیر با گذشت زمان می‌شود و این پدیده از سال ۱۹۰۰ میلادی در ایالات متحده شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته است [6-7]. شش عامل اکسیداسیون، تبخیر، پلیمریزاسیون، تیکسوتروپی، سینریز و جداسازی به عنوان عوامل اصلی ایجاد پدیده پیرشدگی شناخته شده‌اند [8]. همچنین برخی از پژوهش‌ها فرآیند اکسیداسیون را عامل اصلی پیرشدگی قیر معرفی کرده‌اند [9-10]. از آنجا که پیرشدگی بر ویژگی‌های مکانیکی قیر و مخلوط‌های آسفالتی مانند مدول برجهندگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین اثرگذار است، شناخت رفتار قیر پس از پیرشدگی بلندمدت به منظور ارائه طرح‌های مناسب و اقتصادی روسازی‌ها ضروری است. به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی قیرها روش‌های مختلفی از جمله PAV [11]، UV [12]، PAV+UV، RTFO+PAV [13] و استفاده از آون به مدت‌های طولانی‌تر مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. هوفکو و همکاران [14] نیز با استفاده از گونه‌های فعال اکسیژن به شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت پرداخته‌اند و نتایج نشان داد که عمده پیرشدگی ناشی از حضور گونه NO_x است و متأثر از دیگر گونه‌ها نیست و تا حدودی با پیرشدگی PAV+RTFO تطابق دارد. همچنین پیرشدگی بلندمدت قیر می‌تواند ناشی از رطوبت و تغییرات شیمیایی ساختاری در اثر اشعه UV نیز باشد [15]. در این مطالعه به دلیل استفاده از

رایج‌ترین روش دارای استاندارد در آزمایشگاه‌های مختلف روسازی از روش RTFO و به دنبال آن PAV استفاده شده است. از آنجا که در پژوهش‌های مختلف مانند پژوهش براسول و همکاران [16] و ما و همکاران [17] بر کافی نبودن انجام یک مرتبه شبیه‌سازی بلندمدت به روش PAV تأکید شده است و در برخی از مطالعات به تکرار این روش تا دو یا سه مرتبه [15-16] و نیز در برخی موارد استفاده از تابش اشعه فرابنفش [20] علاوه بر یک مرتبه PAV مورد استفاده واقع شده است. از آنجا که تکرار چرخه‌های پیرشدگی نیازمند هزینه مالی و صرف زمان زیاد است، در این مطالعه به بررسی ضرورت چرخه‌های مکرر PAV و آثار آن بر ویژگی‌های عملکردی سه نوع قیر با درجات نفوذ مختلف پرداخته شده است. به این منظور پس از تهیه سه نوع قیر با درجات نفوذ ۴۰-۵۰، ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ و انجام شبیه‌سازی کوتاه‌مدت پیرشدگی به وسیله روش RTFO، یک الی سه مرتبه PAV روی نمونه‌ها انجام شده است. رتومتر تیر خمشی یکی از روش‌های طبقه‌بندی قیرها است که برای تعیین ویژگی‌های عملکردی دمای پایین قیرها با استفاده از پاسخ‌هایی مانند سختی خزشی خمشی، S، نرمی خزشی و نرخ خزش، m، مورد استفاده قرار گرفته است؛ S و m خروجی‌های اصلی آزمایش رتومتر تیر خمشی به شمار می‌روند [10-18]. نتایج این آزمون در سه دمای صفر، -۶ و -۱۲- درجه سانتی‌گراد در تحلیل‌های این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین آزمایش رتومتر برشی دینامیکی یکی از آزمایش‌های مورد تأیید پروتکل سوپرپیو برای تعیین و بررسی ویژگی‌های عملکردی قیر به ویژه در دماهای بالا است [22]. با استفاده از خروجی‌های این آزمایش یعنی مدول مختلط برشی (G^*) و نیز زاویه فاز (δ) بر اساس پروتکل سوپرپیو رده‌بندی عملکردی قیر نیز تعیین می‌شود. علاوه بر ضرورت تکرار چرخه‌های پیرشدگی، اهداف اصلی این مطالعه بررسی تغییرات رده‌بندی عملکردی قیرهای مختلف تحت مراتب مختلف پیرشدگی، ارائه منحنی‌های جامع دمایی و پیرشدگی قیر به وسیله مشخصه‌های دمایی بالا و پایین، و نیز بررسی همبستگی میان مراتب مختلف پیرشدگی میان ویژگی‌های ویکسوالاستیک دمای بالا و ویژگی‌های شیمیایی قیر است.

جدول ۱. مشخصات قیرهای مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1. Properties of asphalt binders used in this study

Property	Unit	Standard Method	Asphalt Binder		
			B40/50 (PG70-16)	B60/70 (PG64-22)	B85/100 (PG58-28)
Penetration at 25°C	dmm	ASTM D5	45	65	86
Softening point	°C	ASTM D36	58	54	49
Ductility at 25°C	cm	ASTM D113	>100	>100	>100
Flash point	°C	ASTM D92	>250	>250	>250

۲- مصالح و روش تحقیق

۱-۲- مصالح

این مطالعه روی سه نوع قیر خالص با درجات نفوذ مختلف ۵۰-۴۰، ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد واقع در شهر آبادان انجام شده است. مشخصات قیرهای استفاده شده در جدول (۱) ارائه شده است. این قیرها به ترتیب دارای رده‌بندی عملکردی ۱۶-۷۰، ۲۲-۶۴ و ۲۸-۵۸ بوده است که در بسیاری از مناطق آب و هوایی ایران کاربرد داشته‌اند.

۲-۲- آزمایش‌ها

۱-۲-۲- شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت

در این مطالعه شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر بر اساس استاندارد ASTM D2872 به روش RTFO انجام شده است. در این روش غشای نازکی از قیر درون محفظه دوار دستگاه قرار گرفته و تحت شرایط اکسیداسیون عمل پیرسازی در دمای بالای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۵ دقیقه انجام می‌شود.

۲-۲-۲- شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت

به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت قیر، نمونه‌های حاصل از آزمایش RTFO درون محفظه PAV مطابق پروتکل ASTM D6521 قرار گرفته‌اند و یک مرتبه مورد پیرشدگی واقع شده‌اند. همچنین از آنجا که به منظور تکرار چرخه‌های PAV پروتکل استاندارد وجود ندارد، عملیات به طور مشابه با همان استاندارد پیرسازی مرتبه اول ادامه یافته تا مراتب مکرر حاصل شوند.

۲-۲-۳- آزمایش رئومتر تیر خمشی^۱

در بسیاری از مطالعات پژوهشی و استانداردها آزمایش رئومتر تیرچه خمشی به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های خزشی قیر معرفی

شده است و آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D6648-08 انجام می‌شود [21]. سختی خزشی خمشی، S، و نرخ خزش، m، دو خروجی اصلی آزمایش رئومتر تیرچه خمشی هستند. در این آزمایش بار ثابت 980 ± 50 میلی نیوتن به صورت متمرکز به مدت ۲۴۰ ثانیه در بازه‌های زمانی ۵، ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰ ثانیه به وسط دهانه تیرچه ساخته شده از قیر مورد نظر با ابعاد مشخص وارد می‌شود و تغییر مکان عمودی وسط دهانه تیر در بازه‌های زمانی ۰/۵ ثانیه‌ای ثبت می‌شود. با توجه به آنچه در ادبیات مرتبط با تئوری ویسکوالاستیسیته کاملاً شناخته شده است، خروجی آزمایش خزش به صورت نرمی خزشی قابل محاسبه است [23]. به منظور محاسبه سختی خزشی خمشی، اصل مطابقت الاستیک - ویسکوالاستیک مورد استفاده قرار گرفته و پس از ساده‌سازی روابط معادله (۱) به منظور محاسبه سختی خزشی خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد [24]:

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (1)$$

در این رابطه $\delta(t)$ تغییر مکان وسط دهانه (برحسب میلی‌متر)، P بار متمرکز ثابت وسط دهانه (نیوتن)، L طول دهانه تیر (میلی‌متر) و b و h به ترتیب عرض و ارتفاع تیرچه (میلی‌متر) و t زمان (ثانیه) است.

نرخ خزش، m، قدر مطلق شیب نمودار $\log S(t)$ برحسب $\log(t)$ است که توسط رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$m = \left| \frac{d\{\log[S(t)]\}}{d\{\log(t)\}} \right| \quad (2)$$

در این مطالعه آزمایش رئومتر تیر خمشی روی هر یک از نمونه‌های حاصل از مراتب سه‌گانه پیرشدگی به روش PAV در سه دمای ۱۲-، ۶- و صفر درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

¹ Bending Beam Rheometer (BBR)

جدول ۲. برنامه آزمایشگاهی پژوهش.

Table 2. Research laboratory program.

FTIR Test	High Temperature Test	Low Temperature Test	Sample Condition	Bitumen Type	Sample Code
Using the device model IRTTracer-100	DSR Based on ASTM D7175-15 To calculate the complex shear modulus and phase angle	BBR Based on ASTM D6648 To calculate flexural stiffness and creep rate	0PAV	40-50	A0PAV
			1PAV		A1PAV
			2PAV		A2PAV
			3PAV		A3PAV
			0PAV		B0PAV
			1PAV	60-70	B1PAV
			2PAV		B2PAV
			3PAV		B3PAV
			0PAV		C0PAV
			1PAV	85-100	C1PAV
			2PAV		C2PAV
			3PAV		C3PAV

۴-۲-۲- آزمایش رئومتر برش دینامیکی^۱

به منظور بررسی ویژگی‌های عملکردی قیر در دمای بالا، پس از آماده‌سازی نمونه‌هایی با مراتب مختلف پیرشدگی به روش PAV از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی مطابق با استاندارد ASTM D7175-08 برای آماده‌سازی نمونه‌ها، چگونگی انجام آزمایش و نیز تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. آزمایش DSR روی تمامی ۱۲ نمونه قیر مورد نظر (حالت پیرنشده و ۳ حالت پیرشدگی از سه نوع قیر با درجات نفوذ مختلف) در بازه دمایی ۴۶ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد با گام‌های دمایی ۶ درجه‌ای انجام شده است. این بازه‌ها در مورد قیرهای خالص و پیرنشده از دمای ۴۶ تا ۸۲ در همان گام ۶ درجه‌ای و نیز از فرکانس ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است. در این مطالعه فرکانس زاویه‌ای از ۰/۶۲۸ تا ۶۲۸ رادیان بر ثانیه (۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز) در ۱۶ فرکانس مختلف تغییر داده شده و تغییرات پارامترهای دیگر سنجیده شده است. با استفاده از این آزمایش مدول مختلط برشی (G^*) و زاویه فاز (δ) قیر تعیین شده است که در مراحل بعد با استفاده از آن‌ها تحلیل‌های مختلفی از تأثیر پدیده پیرشدگی بر ویژگی‌های قیر در دمای بالا انجام و نتایج آن‌ها ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

استفاده از منحنی جامع برای نمایش اطلاعات آزمایش‌های متداول و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به فرکانس، دما و پارامترهای

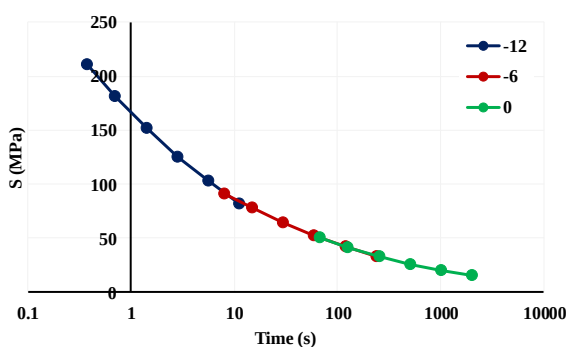
مکانیکی مواد یکی از روش‌های رایج در ویسکوالاستیسیته است که در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [25]. به منظور در نظر گرفتن آثار مربوط به شرایط دمایی و مراتب مختلف پیرشدگی به وسیله روش PAV در مدل‌سازی شکل‌پذیری خزشی نمونه‌ها در گام اول از مفهوم زمان کاهش‌یافته (از طریق جابه‌جایی افقی منحنی‌ها) و در گام دوم به عبارتی سختی کاهش‌یافته (از طریق جابه‌جایی قائم منحنی‌ها) استفاده شده است. سپس با استفاده از نتایج آزمایش BBR انجام شده در این مطالعه، منحنی‌های جامع دمایی سختی-زمان کاهش‌یافته برای قیر خالص و نیز هر مرتبه PAV در دمای مرجع ۶- درجه سانتی‌گراد تهیه شده است. در این روش از جابه‌جایی افقی منحنی‌ها با استفاده از اعداد دلخواه به منظور در امتداد یکدیگر قرار گرفتن منحنی‌های صفر و ۱۲- درجه سانتی‌گراد با منحنی ۶- درجه سانتی‌گراد (به عنوان دمای مرجع) استفاده شده است. ضرایب انتقال منحنی‌ها در امتداد محور زمان در جدول (۳) و نیز منحنی‌های مربوط به قیر ۴۰-۵۰ در شکل‌های (۱ تا ۴) ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است که از ارائه اطلاعات دیگر قیرها به دلیل تشابه بالا و جلوگیری از طولانی شدن مطالب خودداری شده است. حال با استفاده از یکپارچه‌سازی این منحنی‌ها و ترسیم آن‌ها برای هر نوع قیر در یک نمودار مانند شکل (۵) به ترسیم منحنی جامع پیرشدگی سختی کاهش‌یافته-زمان کاهش‌یافته هر نمونه قیر پرداخته می‌شود. در این قسمت از جابه‌جایی قائم نمودارهای مربوط به مراتب PAV به منظور قرار گرفتن روی منحنی قیر خالص (به عنوان مرجع) استفاده می‌شود. همچنین ضرایب انتقال قائم منحنی‌های مراتب مختلف PAV برای هم امتداد شدن با نمودار قیر پیرنشده در جدول (۴) آورده شده است.

¹ Dynamic Shear Rheometer (DSR)

جدول ۴. ضرایب انتقال قائم منحنی مراتب مختلف PAV قیر ۴۰-۵۰ در دمای ۶- درجه سانتی گراد.

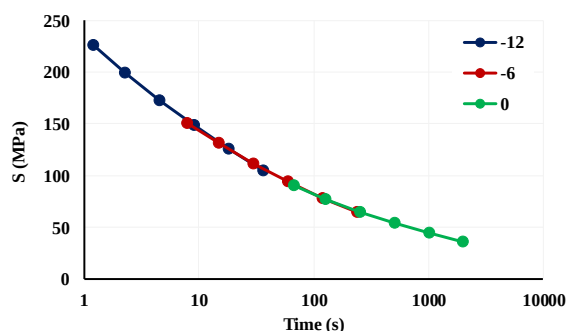
Table 4. Vertical shift factors of different PAV curves of bitumen 40-50 at -6°C.

Condition	Original	1PAV	2PAV	3PAV
Vertical Shift Factor	1.000000	0.0931108	0.683912	0.524807



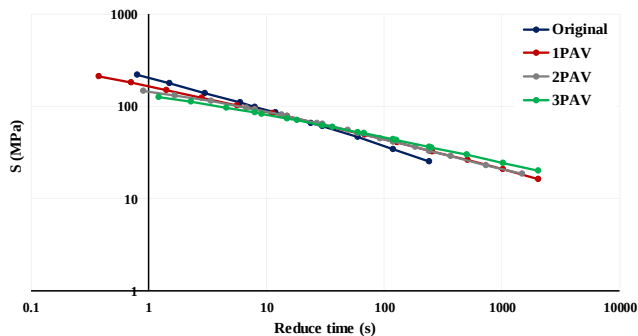
شکل ۲. منحنی جامع قیر ۴۰-۵۰ یک مرتبه PAV در دمای ۶- درجه سانتی گراد

Fig 2. Master curve of 40-50, 1st PAV at -6°C



شکل ۴. منحنی جامع قیر ۴۰-۵۰ سه مرتبه PAV در دمای ۶- درجه سانتی گراد

Fig. 4. Master curve of bitumen 40-50, 3rd PAV at -6°C



شکل ۶. منحنی جامع سختی برای مراتب پیرشدگی مختلف قیر ۴۰-۵۰

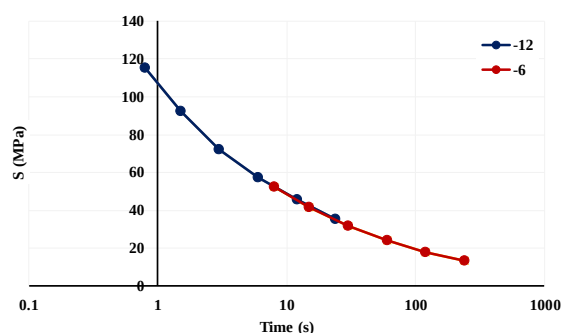
Fig. 6. Master curve of flexural creep stiffness for different aging levels of bitumen 40-50

جدول ۳. ضرایب انتقال افقی منحنی مراتب مختلف PAV از قیر ۴۰-۵۰ به

دمای مرجع ۶- درجه سانتی گراد.

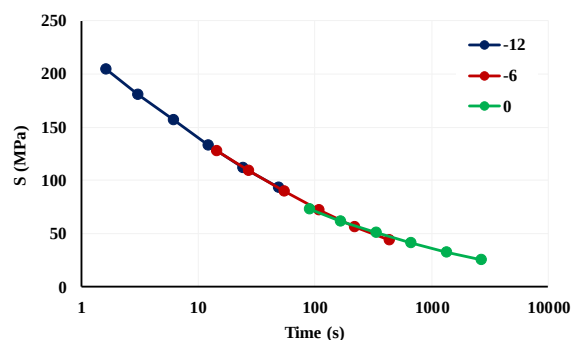
Table 3. Horizontal shift factors of different PAV curves from 40-50 bitumen to the reference temperature of -6°C.

a_T	Temp	Times of PAV	a_T	Temp	Times of PAV
0.112	-12	2 PAV	0.1000	-12	Original
1.000	-6		1.000	-6	
6.166	0		-	0	
0.152	-12	3 PAV	0.047	-12	1 PAV
1.000	-6		1.000	-6	
8.472	0		8.511	0	



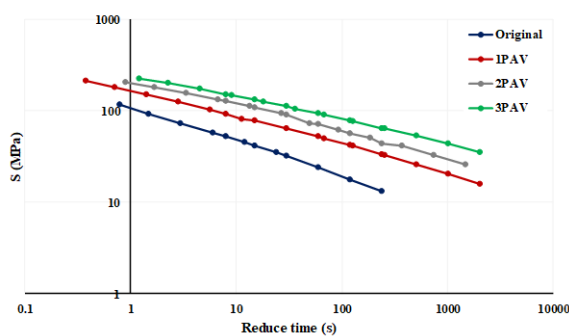
شکل ۱. منحنی جامع قیر ۴۰-۵۰ خالص در دمای ۶- درجه سانتی گراد

Fig 1. Master curve of pure bitumen 40-50 at -6°C



شکل ۳. منحنی جامع قیر ۴۰-۵۰ دو مرتبه PAV در دمای ۶- درجه سانتی گراد

Fig. 3. Master curve of bitumen 40-50, 2nd PAV at -6°C



شکل ۵. نمودار منحنی‌های جامع قیر ۴۰-۵۰ خالص و مراتب مختلف PAV شده

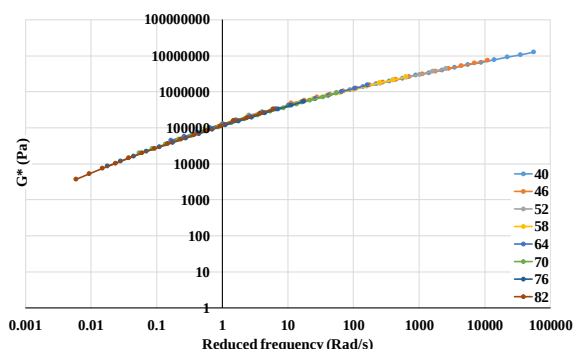
در دمای ۶- درجه سانتی گراد

Fig. 5. Master curves of bitumen 40-50 and different levels of PAV-aged bitumens at -6°C

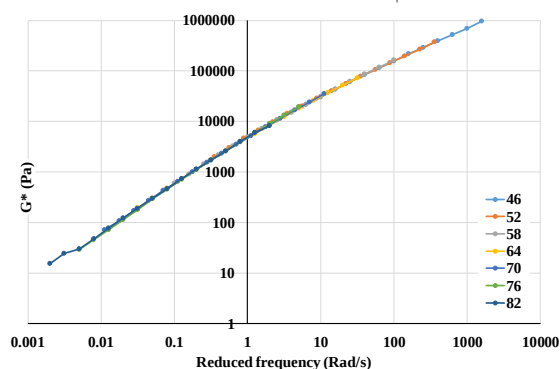
همان‌طور که ذکر شده است در ادامه منحنی‌های مربوط به قیر ۴۰-۵۰ از آزمایش BBR ارائه شده است. لازم به ذکر است در مورد قیر خالص، داده‌های آزمایش BBR در دمای صفر درجه سانتی‌گراد در دسترس وجود نداشته است. در شکل (۶) منحنی نهایی سختی-زمان برای قیر ۴۰-۵۰ ارائه شده است.

۲-۳- تحلیل نتایج آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

با استفاده از نتایج آزمایش DSR شامل مدول برشی مختلط (G^*) و نیز زاویه فاز (δ) منحنی‌های جامع مربوطه در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد ترسیم شده است. در این قسمت با استفاده از

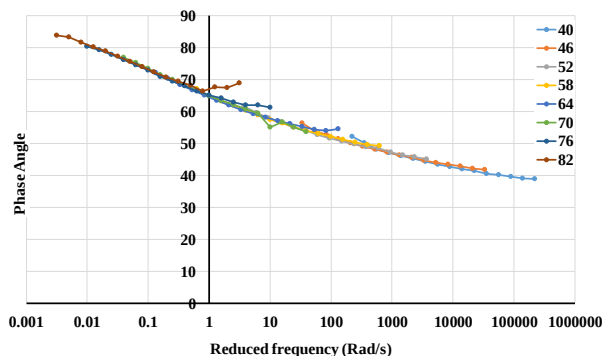


ب

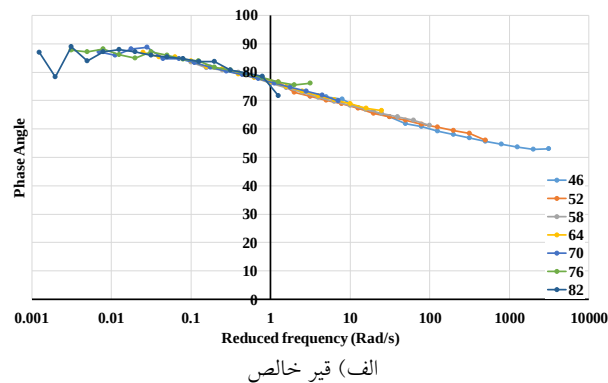


الف

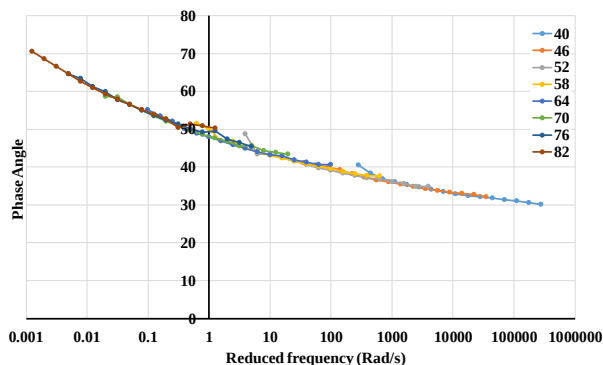
شکل ۷. منحنی جامع مدول مختلط برشی در برابر فرکانس زاویه‌ای برای قیر ۴۰-۵۰؛ الف) RTFO، ب) ۳ مرتبه PAV
Fig. 7. Master curve of complex shear modulus versus angular frequency for bitumen 40-50; a) RTFO, b) 3 PAV



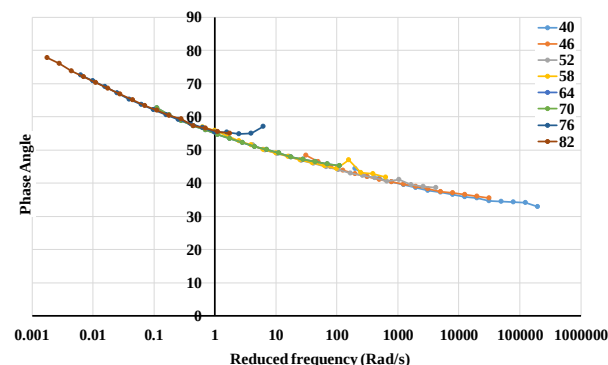
ب) قیر یک مرتبه PAV



الف) قیر خالص



د) قیر سه مرتبه PAV



ج) قیر دو مرتبه PAV

شکل ۸. منحنی‌های جامع زاویه فاز-فرکانس زاویه‌ای برای مراتب مختلف پیرشدگی قیر ۴۰-۵۰

Fig. 8. Master curve of phase angle versus angular frequency for different aging levels of bitumen 40-50

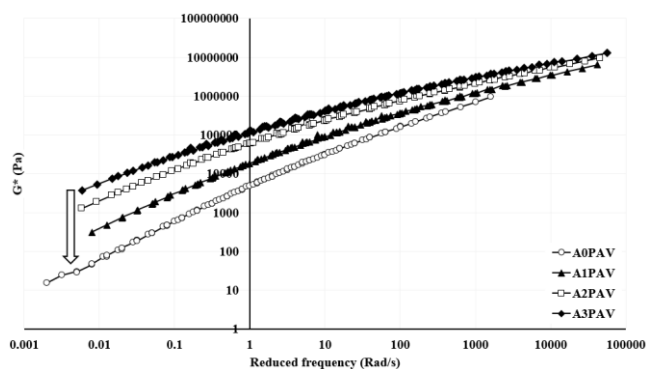
۵۰-۴۰، ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ و عدد دوم مرتبه پیرشدگی به روش PAV است.

همچنین مقادیر جابجایی قائم منحنی‌های جامع در جدول ۵ ارائه شده است.

۳-۳- تغییرات رده‌بندی عملکردی

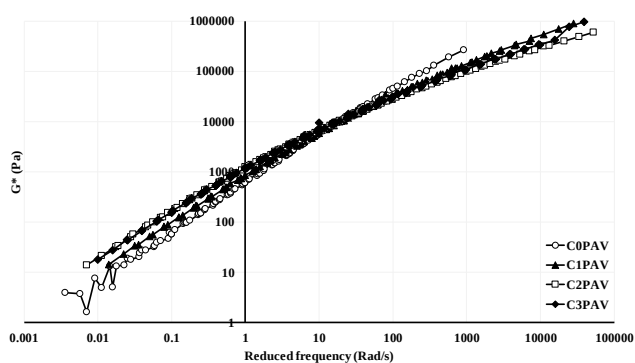
دستورالعمل سوپریپو به منظور طبقه‌بندی عملکردی قیرها در دمای پایین با استفاده از آزمایش BBR و در دمای بالا با استفاده از آزمایش DSR معیارهای معینی را ارائه کرده است. بر این اساس در تعیین رده‌بندی عملکردی قیر در دمای پایین سختی خمشی خزشی، S ، در ثانیه ۶۰ ام بارگذاری باید کمتر از ۳۰۰ مگاپاسکال

در ادامه با استفاده از منحنی‌های جامع ایجادشده در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد در بخش قبل و قرار دادن منحنی‌های مراتب مکرر پیرشدگی از یک نوع قیر درون یک نمودار می‌توان با جابه‌جایی قائم و استفاده از مفهوم مشابه با فرکانس زاویه‌ای کاهش یافته منحنی‌های جامع پیرشدگی را ایجاد کرد. در این صورت با استفاده از اعداد دلخواه به منظور جابه‌جایی عمودی منحنی‌های مراتب بالاتر پیرشدگی به منظور قرار گرفتن در راستای منحنی قیر RTFO، منحنی جامع سختی‌زمان برای مراتب مختلف پیرشدگی ایجاد می‌شود. روند این جابه‌جایی در شکل (۹) برای قیر با درجه نفوذ ۴۰-۵۰ نشان داده شده و در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نمودارهای نهایی قیرهای دارای درجه نفوذ ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ ارائه شده است. در شکل‌های (۹ الی ۱۱)، A تا B کد متناظر قیرهای



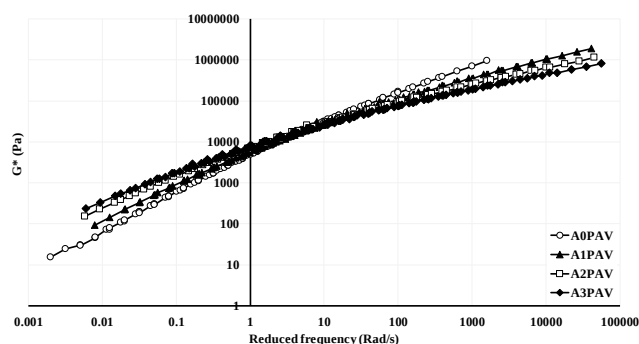
شکل ۹. منحنی جامع پیرشدگی قیر ۴۰-۵۰ و روند جابه‌جایی قائم

Fig. 9. Master curve of aging for bitumen 40-50 and vertical shift trend



شکل ۱۱. منحنی جامع پیرشدگی قیر ۸۵-۱۰۰

Fig. 11. Master curve of aging for bitumen 85-100



شکل ۱۰. منحنی جامع پیرشدگی قیر ۶۰-۷۰

Fig. 10. Master curve of aging for bitumen 60-70

جدول ۵. ضرایب جابه‌جایی قائم منحنی‌های جامع ۵۸ درجه سانتی‌گراد برای ایجاد منحنی‌های جامع پیرشدگی

Table 5. Vertical shift factors of master curves at 58°C to create master curves

Bitumen Type			
Times of PAV	40-50	60-70	85-100
Original	1.000	1.000	1.000
1PAV	-0.525	-0.625	-0.600
2PAV	-0.925	-0.925	-0.750
3PAV	-1.200	-1.075	-0.925

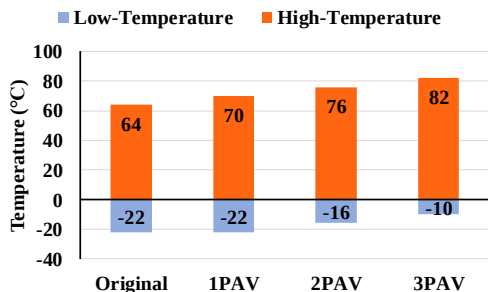
در دمای ۱۰ درجه سانتی گراد بالاتر از کمترین دمای روسازی باشد. همچنین مقدار نرخ خزش، m ، در ثانیه ۶۰ ام بارگذاری باید بزرگتر از ۰/۳ در دمای ۱۰ درجه سانتی گراد بالاتر از کمترین دمای محیط خدمت دهی روسازی آسفالتی باشد. کنترل این معیارها منجر به کاهش احتمال ترک خوردگی در دمای پایین عملکردی می شود.

به منظور رده بندی عملکرد قیر در دمای بالا با توجه به اینکه کلیه نمونه ها به روش PAV پیرشده اند، با استفاده از معیار مقایسه $G^* \times \sin(\delta) \leq 5000 \text{ (kpa)}$ به تعیین حدود عملکردی قیر براساس خرابی خستگی پرداخته می شود.

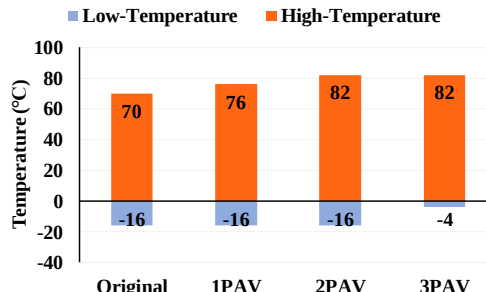
کنترل این معیار تضمین کننده استفاده از قیرهای منعطف تر در تغییر شکل های زیاد تحت بارگذاری محیط خدمت دهی است. شکل (۱۲)، نمایش بازه های دمایی عملکردی قیرهای با درجات نفوذ مختلف ۴۰-۵۰، ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ را ارائه داده است. همانطور که مشخص است در هر سه نوع قیر، حداکثر دو رده افزایش رده در دمای پایین عملکردی رخ داده است. البته این روند تغییر در قیرهای مختلف متفاوت بوده است و روند تغییر برای قیر

۴-۳- همبستگی تغییرات شیمیایی و ویسکوالاستیکی

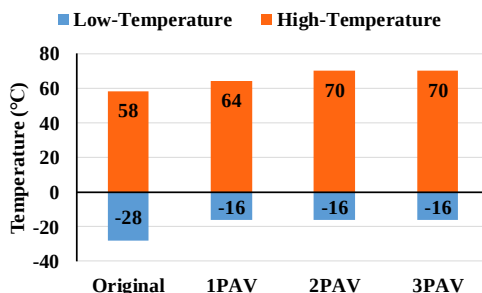
بررسی ارتباط میان رفتارهای مختلف قیر از جمله رفتار ویسکوالاستیک، فیزیکی و شیمیایی به منظور شناسایی بهتر این ماده و تغییراتش ضروری است. در این راستا نتایج مطالعه دادائی و همکاران [26]، نشان داده است که ارتباط خطی میان شاخص پیرشدگی محاسبه شده از طریق آنالیز طیف سنجی مادون قرمز و مقادیر ضرایب جابه جایی قائم منحنی جامع سختی خزشی-زمان بسیار معنادار بوده است. در این مطالعه با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش رئومتر برش دینامیکی، مقادیر جابه جایی قائم منحنی مدول مختلط برشی در برابر فرکانس زاویه ای با مرجعیت قیرهای پیرنشده محاسبه و با استفاده از مقادیر شاخص پیرشدگی شیمیایی ارتباط پارامترهای دمای بالا نیز بررسی شده است.



ب



الف



ج

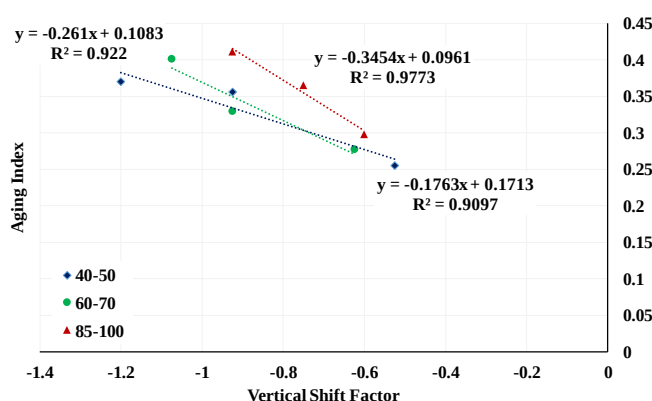
شکل ۱۲. تغییرات دمای بالا و پایین عملکردی قیر در مراتب مختلف پیرشدگی؛ الف) قیر ۴۰-۵۰، ب) قیر ۶۰-۷۰ و ج) قیر ۸۵-۱۰۰

Fig. 12. Changes of high and low performance temperature of bitumen in different times of aging; a) bitumen 40-50, b) bitumen 60-70 and c) bitumen 85-100

جدول ۶. مقادیر شاخص پیرشدگی حاصل از تحلیل شیمیایی با استفاده از نتایج آزمایش FTIR

Table 6. Aging index values obtained from chemical analysis using FTIR test results

Times of PAV	40-50	60-70	85-100
Original	0.132	0.114	0.153
1PAV	0.255	0.278	0.298
2PAV	0.356	0.330	0.365
3PAV	0.370	0.402	0.411



شکل ۱۳. همبستگی مقادیر جابه‌جایی قائم منحنی جامع مدول مختلط برشی در مقابل شاخص پیرشدگی

Fig. 13. Correlation of vertical shift factors of the complex shear modulus master curve versus aging index

برای قیر ۸۵-۱۰۰ بوده است و کندترین آن برای قیر ۴۰-۵۰ که مطابق با انتظار رخ داده است. هر سه قیر سه رده افزایش را تحت سه مرتبه PAV متحمل شده‌اند.

- در تغییرات دمای بالای عملکردی قیر ۶۰-۷۰ سه رده افزایش، و دو نوع دیگر دو رده افزایش دما را متحمل شده‌اند.
- بررسی تناسب میان ضرایب جابه‌جایی قائم منحنی جامع مدول مختلط برشی - فرکانس زاویه‌ای با مقادیر شاخص پیرشدگی حاصل از آزمایش آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) نشان داده است ارتباط پارامترهای ویسکوالاستیک دمای بالا با پارامترهای شیمیایی ارتباطی خطی با ضریب تعیین (R^2) بیش از ۰/۹ دارد.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان از "شرکت نفت پاسارگاد" به سبب در اختیار قرار دادن اطلاعات مربوط به آزمایش‌های قیر مورد استفاده در این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در ارتباط با انجام این پژوهش وجود ندارد.

نتایج نشان داده شده در شکل (۱۳) نشان‌دهنده آن است که ارتباط قوی خطی میان شاخص پیرشدگی شیمیایی و مقادیر جابه‌جایی قائم منحنی مدول مختلط برشی و فرکانس زاویه‌ای نیز وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

از آنجا که استفاده از روش‌های متداول برای شبیه‌سازی دوره بلندمدت پیرشدگی کافی نبوده است راهکارهای نوینی ارائه شده است که در این مطالعه از تکرار چرخه‌های شبیه‌سازی PAV استفاده شده است. در این مطالعه تأثیر استفاده مکرر از چرخه‌های فرآیند PAV بر ویژگی‌های مکانیکی دمای بالا و پایین قیرهای متداول مصرفی در کشور ایران (۴۰-۵۰، ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ذیل مهم‌ترین نتایج حاصل‌شده از این مطالعه به‌شمار می‌رود:

- چرخه‌های مکرر پیرشدگی به روش PAV نسبت به مرتبه اول آن دارای رفتار معناداری است و می‌توان با داده‌های بالاتر به پیش‌بینی پارامترهای این روند نیز دست یافت. براین اساس انجام مکرر PAV برای شبیه‌سازی بلندمدت ضرورتی ندارد و قابل معادل‌سازی است.
- سریع‌ترین تغییرات مربوط به رده‌بندی عملکردی دمای پایین

سهم نویسندگان

همچنین مرور، بازبینی و ارزیابی روش‌شناسی و کیفیت مقاله توسط فریدون مقدس‌نژاد انجام شده است.

منابع مالی

در نگارش این مقاله، از منابع مالی هیچ سازمانی استفاده نشده است.

References

- [1] Ma, L., Varveri, A., Jing, R. and Erkens, S., 2021. Comprehensive review on the transport and reaction of oxygen and moisture towards coupled oxidative ageing and moisture damage of bitumen. *Construction and Building Materials*, 283, p.122632.
- [2] Eurobitume, A., 2011. The bitumen industry-A global perspective. Production, chemistry, use, specification and occupational exposure. *Asphalt Institute*, p.7.
- [3] RMTO., 2022. Iran's Road Maintenance and Transportation Organization (RMTO). Retrieved from <http://www.rmto.ir>.
- [4] Arabani, M. and Majd Rahimabadi, M., 2023. Investigating the effects of aging on moisture damage of hot mix asphalt containing Wetfix additive and granite and limestone aggregates. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3), pp.23-38.
- [5] Siddiqui, M.N. and Ali, M.F., 1999. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts. *Fuel*, 78(9), pp.1005-1015.
- [6] Ma, B., Hu, Y., Si, W., Wei, K. and Chang, X., 2020. Study on the temperature control effects of an epoxy resin composite thermoregulation agent on asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 257, p.119580.
- [7] Al-Qadi, I.L., Ozer, H., Zhu, Z., Singhvi, P., Mohamed Ali, U., Sawalha, M., Espinoza Luque, A.F., Garcia Mainieri, J.J. and Zehr, T.G., 2019. Development of long-term aging protocol for implementation of the Illinois flexibility index test (I-FIT). *FHWA-ICT-19-009*.
- [8] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y. and Kennedy, T.W., 1996. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.
- [9] Soenen, H., Lu, X. and Laukkanen, O.V., 2016. Oxidation of bitumen: Molecular characterization and influence on rheological properties. *Rheologica acta*, 55, pp.315-326.
- [10] Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger, P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., Anderson, D.A., Christiansen, D.W. and Bahia, H.U., 1994. Binder characterization and evaluation. Volume 1. *Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC*.
- [11] Migliori, F. and Corté, J.F., 1998. Comparative study of RTFOT and PAV aging simulation laboratory tests. *Transportation research record*, 1638(1), pp.56-63.
- [12] Liu, H., Zhang, Z., Tian, Z. and Lu, C., 2022. Exploration for UV aging characteristics of asphalt binders based on response surface methodology: Insights from the UV aging influencing factors and their interactions. *Construction and Building Materials*, 347, p.128460.
- [13] Huang, S.C., Tia, M. and Ruth, B.E., 1996. Laboratory aging methods for simulation of field aging of asphalts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(3), pp.147-152.
- [14] Hofko, B., Maschauer, D., Steiner, D., Mirwald, J. and Grothe, H., 2020. Bitumen ageing-Impact of reactive oxygen species. *Case Studies in Construction Materials*, 13, p.e00390.
- [15] Xu, S., Huang, J., Tighe, S., Zhang, C., Ma, H., Jia, X. and Zhou, X., 2022. Aging evaluation of base and SBS modified bitumens under the coupling effect of multiple aging factors. *Construction and Building Materials*, 348, p.128670.
- [16] Braswell, E., Saleh, N.F., Elwardany, M., Yousefi Rad, F., Castorena, C., Underwood, B.S. and Kim, Y.R., 2021. Refinement of climate-, depth-, and time-based laboratory aging procedure for asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2675(2), pp.207-218.
- [17] Ma, J., Singhvi, P., Ozer, H., Al-Qadi, I.L. and Sharma, B.K., 2021. Brittleness progression for short- and long-term aged asphalt binders with various levels of recycled binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(11), pp.1399-1409.
- [18] Qian, Y., Guo, F., Leng, Z., Zhang, Y. and Yu, H., 2020. Simulation of the field aging of asphalt binders in different reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in Hong Kong through laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 265, p.120651.
- [19] Singhvi, P., García Mainieri, J.J., Ozer, H., Sharma, B.K. and Al-Qadi, I.L., 2020. Effect of chemical composition of bio- and petroleum-based modifiers on asphalt binder rheology. *Applied Sciences*, 10(9), p.3249.
- [20] Jamal, M. and Giustozzi, F., 2022. Enhancing the asphalt binder's performance against oxidative ageing and solar radiations by incorporating rubber from

- waste tyres. *Construction and Building Materials*, 350, p.128803.
- [21] ASTM, D., 2008. Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR). West Conshohocken, PA: ASTM.
- [22] Qiu, H., Tan, X., Shi, S. and Zhang, H., 2013. Influence of filler-bitumen ratio on performance of modified asphalt mortar by additive. *Journal of Modern Transportation*, 21, pp.40-46.
- [23] Aflaki, S. and Hajikarimi, P., 2012. Implementing viscoelastic rheological methods to evaluate low temperature performance of modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 36, pp.110-118.
- [24] Brinson, H.F. and Brinson, L.C., 2008. Polymer engineering science and viscoelasticity. *An Intro.*, 99, p. 157.
- [25] Zhang, F., Wang, L., Li, C. and Xing, Y., 2020. Predict the phase angle master curve and study the viscoelastic properties of warm mix crumb rubber-modified asphalt mixture. *Materials*, 13(21), p.5051.
- [26] Dadaei, M.M., Moghadas Nejad, F. and Hajikarimi, P., 2023. Investigation of the effect of global warming on the bitumen performance grading of Iran. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(2), pp.17-32.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Dadaei, M.M., Hajikarimi, P., Rahi, M., Dastoori Razaz, M., Tahmasbi, B. and Moghadas Nejad, F., 2025. Investigation of the effect of long-term aging on the high-and low-temperature performance of bitumen. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.61-72.

DOI: 10.22034/25.3.6

