



Semnan University



Research Article

Investigation of the Chemical Effects of Polarity-Optimized Rejuvenators on Aged Binders

Mansour Fakhri^{a*} , Alireza Alavi^b , Morteza Ghanbari^b

^a Professor, Department of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University, Tehran, I. R. Iran.

^b Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-10-03

Revised: 2025-03-08

Accepted: 2025-04-05

Keywords:

Oxidation;

Maltene-to-asphaltene - ratio;

Sulfoxide index;

Carbonyl index;

RSM;

FTIR.

ABSTRACT

The aging mechanism of asphalt binder is one of the most important challenges in pavement structures, which causes hardening and oxidation of the binder. Although the incorporation of rejuvenators is the well-known method to mitigate this problem, finding optimal dosage of rejuvenators is an important challenge. Previous studies mainly determined the suitable dosages of rejuvenators based on penetration grade and softening point values, without paying attention to the chemical characteristics of the binder and rejuvenators. In this study, three different rejuvenators including waste cooking oil (WCO), waste engine oil (WEO), and aromatic extract oil were used. This approach aimed to restore the aged binder's properties and address the existing environmental concerns regarding the disposal of waste oils. The polar components of surface free energy (SFE) were evaluated alongside penetration index and penetration grade values to calculate the accurate dosages of these rejuvenators. The optimal dosages were also determined by employing the response surface methodology (RSM). After identifying the optimal dosages, the resulting samples were analyzed by using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). At this stage, four chemical indices were used to measure the influence of polarity of rejuvenators on binder. The results showed that aromatic extract oil could reduce the carbonyl index by about 60% and the sulfoxide index by 67%, as the most effective rejuvenator for decreasing these indices. Waste cooking oil showed the highest performance for modifying maltene-to-asphaltene parameters and oxidation, for increasing the maltene-to-asphaltene ratio by 114% and reducing the oxidation ratio by 68%. In contrast, waste engine oil, as the least effective rejuvenator, increased the maltene-to-asphaltene ratio by 74% and reduced oxidation by 55%. These results revealed that optimization based on rejuvenator polarities has significant effects on resorting the binder characteristics.

* Corresponding author.

E-mail address: fakhri@kntu.ac.ir

How to cite this article: Fakhri, M. , Alavi, A. and Ghanbari, M. (2025). Investigation of chemical impacts of polar optimization of rejuvenators on aged binder. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(1), 1-20. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35346.1692>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات شیمیایی قیر پیر شده بر اثر افزودن مقادیر بهینه‌سازی شده جوان‌سازها با توجه به قطبیت جوان‌سازها

منصور فخری^{۱*}، علیرضا علوی^۲، مرتضی قنبری^۲

^۱ استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
^۲ دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

چکیده

مکانیزم پیرشدگی قیر یکی از مشکلاتی است که در قیر به وجود می‌آید و باعث سخت‌شدگی و اکسیداسیون قیر می‌شود. یکی از روش‌های جلوگیری از پیرشدگی، استفاده از جوان‌سازهای مختلف در قیر است. از طرف دیگر، محاسبه میزان دقیق مواد افزودنی در قیر یکی از چالش‌های موجود شناخته می‌شد چرا که در مطالعات گذشته، درصد مناسب مواد افزودنی عمدتاً بر اساس مقادیر نفوذ و نقطه نرمی تعیین می‌شد که هیچگونه مشخصه قیر و جوان‌ساز را در نظر نمی‌گیرد و همچنین دقت کافی برای استفاده در قیر را ندارد. در مطالعه پیش رو، سه جوان‌ساز مختلف شامل روغن ضایعات پخت‌وپز (WCO)، روغن ضایعات موتور خودرو (WEO) و روغن آروماتیک استفاده شده است تا علاوه بر بازیابی بخشی از خواص از دست رفته قیر، برخی از نگرانی‌های محیط‌زیستی موجود مبنی بر دفع روغن ضایعات موتور خودرو و روغن ضایعات پخت‌وپز را حل کند. همچنین، برای محاسبه دقیق مقادیر جوان‌سازها با بهره‌گیری از مقادیر جزء قطبی آزمایش انرژی آزاد سطحی (SFE)، شاخص نفوذپذیری و درجه نفوذ قیر، نتایج متفاوتی حاصل شد. برای محاسبه مقادیر بهینه جوان‌سازها از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. پس از مشخص شدن مقادیر بهینه، نمونه‌های بهینه‌سازی شده ساخته و با استفاده از طیف‌سنج فرسرخ تبدیل فوریه (FTIR) بررسی شدند. در این مرحله، با محاسبه چهار شاخص مهم و حیاتی برای قیر، میزان تأثیر قطبیت جوان‌سازها بر قیر مشخص شد. روغن آروماتیک حدود ۶۰ درصد شاخص کربونیل و ۶۷ درصد شاخص سولفوکسید را کاهش داد و بیشترین تأثیر را در بهبود شاخص‌های ذکر شده ایجاد کرد. روغن ضایعات پخت‌وپز با افزایش ۱۱۴ درصدی بیشترین افزایش نسبت مالین به آسفالتین و با ۶۸ درصد بیشترین کاهش در نسبت اکسیداسیون را داشت، در حالی که روغن ضایعات موتور خودرو با ۷۴ درصد افزایش نسبت مالین به آسفالتین و ۵۵ درصد کاهش اکسیداسیون کمترین تأثیر را نشان داد. نتایج موجود نشان‌دهنده تأثیر زیاد پارامتر قطبیت بر اصلاح خواص قیر است. لذا باید تأثیرات قطبیت جوان‌سازهای موجود پیش از استفاده آن‌ها در قیر مورد بررسی قرار بگیرد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

واژگان کلیدی:

اکسیداسیون،

نسبت مالین به آسفالتین،

شاخص سولفوکسید،

شاخص کربونیل،

روش سطح پاسخ،

طیف‌سنج فرسرخ تبدیل

فوریه.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fakhri@kntu.ac.ir

استناد به این مقاله: فخری، منصور، علوی، علیرضا و قنبری، مرتضی. (۱۴۰۴). بررسی تغییرات شیمیایی قیر پیر شده بر اثر افزودن مقادیر بهینه سازی

شده جوان‌سازها با توجه به قطبیت جوان‌سازها. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۱)، ۲۰-۱

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35346.1692>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

۱-۱. تاریخچه

سالانه بیش از ۱۲۰ میلیون تن آسفالت در سراسر جهان اصلاح و مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد (ای ای پی، ۲۰۱۸). با توجه به اینکه ساخت روسازی آسفالتی مستلزم حجم عظیمی از قیر و سنگدانه است، در صورت استفاده نکردن از مصالح بازیافتی، مقدار بسیار زیادی از منابع اولیه از بین می‌روند (آنگل و همکاران، ۲۰۱۵؛ لو و همکاران، ۲۰۲۲). از طرف دیگر، اگرچه افزودن خرده آسفالت‌های بازیافتی می‌تواند مزایای اقتصادی زیادی به همراه داشته باشد و تأثیر مثبتی روی پایداری و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را به همراه دارد، از بین رفتن برخی اجزای شیمیایی در قیرها پس از پیرشدگی باعث سختی بیش از اندازه و کاهش عملکرد در مقابل ترک‌های حرارتی می‌گردد (موگاور و همکاران، ۲۰۱۶؛ لوی و همکاران، ۲۰۲۳).

پیرشدگی به عنوان یکی از مشخصه‌های اجتناب‌ناپذیر قیرها شناخته می‌شود که باعث ایجاد تغییر در عملکرد آسفالت می‌شود (سینگ و کومار، ۲۰۱۹). این فرایند با افزایش مقادیر آسفالتین و رزین و کاهش آروماتیک و اشباع همراه است. لذا پس از طی شدن دوره‌های پیرشدگی، درجه نقطه نرمی و ویسکوزیته افزایش می‌یابد و درجه نفوذ قیر روند نزولی را در پیش خواهد گرفت. از طرف دیگر و با توجه به تغییرات ذکر شده، پیرشدگی مقاومت شیارشدگی را بهبود می‌بخشد و مقاومت در مقابل خستگی آن کاهش می‌یابد (ماتولیا و همکاران، ۲۰۲۰؛ آکینلی و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژانگ و

همکاران، ۲۰۲۴، مرکادو و همکاران، ۲۰۱۸؛ هو و همکاران، ۲۰۲۴). لذا، برای تعدیل خواص مقاومتی قیرهای پیرشده، استفاده از جوان‌سازها مطرح می‌شود تا بدین وسیله مقادیر اجزای اشباع و آروماتیک افزایش یافته و نسبت مالتین به آسفالتین افزایش یابد دوولاپالی و همکاران، ۲۰۲۰). تأثیرگذارترین پارامتر پس از شرایط پیرشدگی، درصد جوان‌ساز مورد استفاده در قیر است که معمولاً بر اساس توصیه‌های تولیدکنندگان یا تحقیقات قبلی انتخاب می‌شود (کاسیر و همکاران، ۲۰۱۷؛ بین و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال، عواملی مانند منبع و مقدار قیر مورد استفاده در مخلوط آسفالتی و مقدار پیرشدگی قیر بازیافت شده بر خواص مختلف ترکیب تأثیر می‌گذارند (آرامبولا و همکاران، ۲۰۱۸).

اگرچه مطالعات زیادی در مورد استفاده از افزودنی‌های مختلف، مانند اصلاح‌کننده‌های پلیمری و روغن‌های جوان‌ساز برای بهبود عملکرد قیرهای پیرشده انجام شده است، اما هیچ مطالعه‌ای تا به امروز در مورد بهینه‌سازی درصد جوان‌ساز با توجه به قطبیت جوان‌ساز و قیر صورت نگرفته است. علاوه بر این، در حال حاضر، برای تعیین درصد مواد افزودنی تنها از آزمایش‌های کلاسیک استفاده می‌شود که از دقت و کارایی نرم‌افزارها بهره‌مند نیستند. هدف این تحقیق، پیدا کردن راه‌حلی مناسب برای بررسی درصد بهینه جوان‌سازهای مختلف بر اساس خواص قطبی آن‌ها است تا ضمن تعیین تأثیر قطبیت جوان‌سازها، به کمک نتایج آزمایش انرژی سطح آزاد (SFE)^۱ در قیر، خواص شیمیایی آن‌ها به وسیله آزمایش FTIR^۲ بررسی شود. همچنین، در مطالعه پیش رو از نرم‌افزار بهینه‌سازی و روش سطح پاسخ (RSM)^۳

4- Waste Cooking Oil
5- Waste Engine Oil
6- Thin Film Oven Test

1- Surface Free Energy
2- Fourier Transform Infrared Spectroscopy
3- Response Surface Method

عملکردی ۱۶-۶۴ PG بود. این قیر به مدت ۵ ساعت در یک محفظه استوانه‌ای تحت شرایط پیری مصنوعی کوتاه‌مدت (TFOT) بر اساس روش آزمون استاندارد ASTM D1754 قرار گرفت (ASTM D1754، ۲۰۰۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۱؛ وو و همکاران، ۲۰۱۲؛ سنگز و همکاران، ۲۰۰۸). سپس نمونه‌ها به مدت ۲۰ ساعت در یک محفظه شرایط پیری مصنوعی بلندمدت (PAV) با فشار ۲/۱ مگاپاسکال و دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس طبق استاندارد EN 14769 پیر شدند (آنون و همکاران، ۲۰۱۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۱). جدول ۱، خواص قیر پایه را نشان می‌دهد.

برای بهینه‌سازی نتیجه آزمایش‌های متفاوت روغن‌های جوان‌ساز، شامل روغن ضایعاتی خوراکی (WCO)، روغن ضایعاتی موتور (WEO) و روغن آروماتیک مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که این روش تحقیق، که شامل استفاده همزمان از چند نوع جوان‌ساز و تحلیل نتایج آزمایش‌های مختلف بر اساس قطبیت جوان‌سازها است، رویکردی نوین محسوب می‌شود و در تحقیقات پیشین مورد استفاده قرار نگرفته است.

۲. مواد و مصالح مصرفی

۲-۱. قیر

در این مطالعه، قیر مورد استفاده دارای درجه

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده در مطالعه

آزمایش	واحد	قیر خالص	قیر پیر شده
نفوذ	۰/۱ میلی متر	۶۷	۳۳
نقطه نرمی	درجه سلسیوس	۴۸	۶۵

۲-۲. جوان‌سازها

برای بازگرداندن خواص قیر پایه استفاده شد. مشخصات جوان‌سازها مطابق جدول ۲ است.

در این مطالعه، از روغن ضایعات پخت‌وپز، روغن ضایعات موتور و روغن آروماتیک به عنوان جوان‌ساز

جدول ۲. مشخصات جوان‌سازهای مورد استفاده در مطالعه

آزمایش	روغن ضایعات پخت‌وپز	روغن ضایعات موتور	روغن آروماتیک
وزن مخصوص (g/m ³)	۰/۹۲	۰/۸۹	۱/۰۱۰
نقطه اشتعال (°C)	۱۵۶	۱۹۳	۲۶۵

۲-۲-۲. روغن ضایعات موتور (WEO)

میزان گوگرد روغن را افزایش دهد. مطالعات گذشته نشان دادند که ارتباط وسیع‌تری بین باقی‌مانده کربن و نسبت اتمی محتوای هیدروژن (H=C)، محتوای نیتروژن و محتوای گوگرد وجود دارد (نادکاری، ۲۰۰۰). روغن موتور ضایعاتی مورد استفاده در این مطالعه از مراکز تعویض روغن گردآوری و بعد از صاف کردن از الک

بر اساس تحقیق زائومانیس و همکاران (۲۰۱۵) و وانگ و همکاران (۲۰۲۵)، روغن ضایعات موتور از روغن‌های پایه پارافینی تولید می‌شود تا ویسکوزیته قیر را کاهش و پایداری قیر را افزایش دهد. اگرچه، تعاملات پیچیده بین اسید سولفوریک و اجزای روغن ممکن است

۲۰۰ به منظور جداسازی ذرات معلق، مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳-۲. روغن آروماتیک

روغن آروماتیک یک جوان‌ساز قدیمی و کاربردی بوده که به قیرهای پیرشده کمک می‌کند تا خواص اولیه خود را بازیابی کنند. با این حال، تحقیقات قبلی نشان دادند که آروماتیک ممکن است منجر به اختلالات ارگانیک مانند سرطان شود (زائومانس و همکاران، ۲۰۱۵). در این مطالعه، از جوانساز صنعتی بر پایه آروماتیک استفاده گردید.

۲-۳-۳. ساخت نمونه

به منظور ساخت نمونه‌های قیر، ابتدا قیر پیرشده در آون تا دمای ۱۴۰ درجه گرم و بعد از افزودن مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد جوان‌ساز روغن ضایعات پخت‌وپز و همچنین، مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد از جوان‌سازهای روغن ضایعات موتور و آروماتیک را به طور جداگانه، به مدت ۳۰ دقیقه تحت اختلاط یک همزن برش پایین با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفته و سپس نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۴. شاخص نفوذپذیری PI^۱

حساسیت دمایی قیر و سختی آسفالت با شاخص نفوذپذیری اندازه‌گیری می‌شود (قاسمی و مرندي، ۲۰۱۳). شاخص نفوذپذیری با افزایش غلظت آسفالتین در قیر افزایش می‌یابد (فیروزفر و همکاران، ۲۰۱۱). در نتیجه، اصلاح نسبت آسفالتین به مالتین در قیر می‌تواند حساسیت دمایی را تغییر دهد. بر اساس تحقیقات گذشته، شاخص نفوذپذیری یک شاخص مؤثر برای بررسی

سخت شدن اکسیداتیو و تشکیل ساختار ژلی است. شاخص نفوذپذیری قیر با پیرشدگی آن افزایش می‌یابد (بورک و حسپ، ۲۰۱۱). این فرآیند باید با جوان‌سازی ویژگی‌های قیر پیرشده تعدیل شود. لذا کاهش شاخص نفوذپذیری به وسیله جوان‌سازها، معیار مناسبی برای کیفیت جوان‌سازی خواهد بود (رید و همکاران، ۲۰۰۳). دانستن این نکته قابل توجه است که قیرها به سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند (بنمازی و همکاران، ۱۹۹۹):

- ویسکوز: سل
- الاستیک: ژل
- ویسکوالاستیک: سل-ژل

حالت سل-ژل به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد و محتوای آسفالتین کم، بیشتر از حالات دیگر برای ساخت روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حالت ژل آسفالت با بیش از ۲۰ درصد آسفالتین، انعطاف‌پذیری ضعیف و سرعت زیاد سخت شدن دارای بیشترین پتانسیل برای پیرشدگی است. حالت سل آسفالت با درصد بسیار کم آسفالتین و انعطاف‌پذیری بیش از اندازه زیاد اجرا می‌شود که سرعت سفت شدن بسیار کم و ویسکوزیته خیلی کمی دارند. لذا، باعث از بین رفتن خواص مکانیکی و استحکام در برابر تغییرات دمایی قیر در آسفالت می‌شود (آلفسار و همکاران، ۲۰۲۰؛ بهنود و مدیری قره‌وران، ۲۰۱۹).

بر اساس مطالعات قبلی، شاخص نفوذپذیری (PI) از حدود ۳- برای قیر حساس به دمای زیاد تا ۷+ برای قیر اکسید شده متغیر است. مقادیر بین ۲- و ۲+ مربوط به قیر با درجه معمولی برای استفاده در آسفالت است؛ مقادیر PI کمتر از صفر به عنوان قیر سل طبقه‌بندی می‌شوند و مقادیر PI بیشتر از ۲+ به عنوان قیر ژل دسته‌بندی می‌شوند (منگیا فیکو و همکاران، ۲۰۱۶). فرمول شاخص نفوذپذیری قیر به شرح معادله (۱) است:

Penetration Index⁻¹

مقدار نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (P) و نقطه نرمی قیر (TR&B) است.

$$PI = \frac{1952 - 500 \log(P) - 20 TR\&B}{50 \log(P) - TR\&B - 120} \quad (1)$$

۲-۵. انرژی آزاد سطحی (SFE)

انرژی آزاد سطحی (SFE) روشی است که اغلب برای توضیح پارامترهای یکپارچگی قیرها و سنگدانه‌ها استفاده می‌شود. نظریه اسید-باز یکی از تأثیرگذارترین نظریه‌هایی است که برای شرح مؤلفه‌های SFE به کار می‌رود و بر اساس ساختار مولکولی قیرها ایجاد شده است. بر اساس این نظریه، SFE شامل سه مؤلفه است:

- مؤلفه غیرقطبی یا مؤلفه لیفشیتز-ون دروالس (LW)

- مؤلفه اسیدی لوئیس
- مؤلفه بازی لوئیس

مقدار کل انرژی آزاد سطحی با نماد γ نشان داده می‌شود که شامل اجزایی مانند γ^{LW} است که نمایانگر مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی است؛ در حالی که γ^{AB} نمایانگر مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی است. همچنین، مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی (γ^{AB}) توسط پارامتر بازی لوئیس (γ) و پارامتر اسیدی لوئیس (γ^+) تشکیل می‌شود و مقدار کل انرژی آزاد سطح (γ) با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود. همچنین، خواص شناساگرهای مورد استفاده در این آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$\gamma = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-} = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} \quad (2)$$

جدول ۳ جزئیات شناساگرهای آزمون انرژی سطح آزاد انجام شده در مطالعه

نوع شناساگر	جزء قطبی	جزء غیر قطبی
آب مقطر	۵۱/۰	۲۱/۸
دی‌وودمتان	۰	۵۰/۸

۲-۶. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

(FTIR)

اویانگ و همکاران (۲۰۰۶) این گونه بیان کردند که مقدار آسفالتین باعث استحکام پیوندهای سولفوکسید و کربونیل خواهد شد. همچنین، در تحقیقی دیگر وانگ و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که ترکیبات سولفوکسید و کربونیل معمولاً طی تغییرات شیمیایی به دلیل پیرشدگی اکسیداتیو ایجاد می‌شوند. جینگ و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کردند که کربونیل‌ها دیرتر از سولفوکسیدها به وجود می‌آیند. آن‌ها تأکید کردند که سولفوکسیدها در

شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت افزایش می‌یابند؛ در حالی که تولید کربونیل تحت شرایط پیرشدگی بلندمدت آغاز می‌شود.

لیو و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که روغن ضایعات موتور می‌تواند شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید را کاهش دهد. از طرف دیگر، شوکت و یو (۲۰۱۸) معتقد بودند که روغن ضایعات موتور می‌تواند شاخص کربونیل را افزایش دهد. لی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که روغن ضایعات پخت‌وپز به‌عنوان یک جوان‌ساز، در بهبود قابلیت شکل‌پذیری قیر پیرشده عملکرد بهتری نسبت به

$$(3) \quad \frac{\text{شاخص کربونیل}}{\text{شاخص کربونیل}} = \frac{\text{ناحیه } 1700}{\text{بین ناحیه } 2000 \text{ و } 600}$$

$$(4) \quad \frac{\text{شاخص کربونیل}}{\text{شاخص کربونیل}} = \frac{\text{ناحیه } 1030}{600}$$

$$(5) \quad \frac{\text{شاخص اکسیداسیون}}{\text{نسبت مالتن}} = \frac{\text{ناحیه } 1700}{\text{ناحیه } 1455}$$

$$(6) \quad \frac{\text{نسبت مالتن به آسفالتن}}{\text{نسبت مالتن}} = \frac{\text{ناحیه } 3000}{700}$$

به طور کلی، قیرها با افزایش مولکول‌های قطبی و آروماتیک، به دلیل واکنش دادن با اکسیژن، تبدیل به جسمی سخت و شکننده می‌شوند (تارسی و همکاران، ۲۰۱۸). در مطالعات مختلف، پیرشدگی اکسیداتیو به عنوان عاملی برای افزایش قطبیت مولکول‌های قیر و همچنین نسبت اجزای آسفالتین به مالتن معرفی شدند (هوانگ و فینی، ۲۰۱۹). علاوه بر این، پژوهش‌های محققان نشان داده است که با پیرشدگی، اجزای با قطبیت کم (آروماتیک) به اجزای با قطبیت زیاد (رزین‌ها) تبدیل می‌شوند و با ادامه این فرآیند، رزین‌ها به اجزایی با بیشترین قطبیت (آسفالتین‌ها) تبدیل می‌شوند (لسور، ۲۰۰۹؛ ورکوویتس و همکاران، ۲۰۲۲). لذا، می‌توان نتیجه گرفت که این تغییرات می‌توانند در ابتدا منجر به افزایش موقت رزین‌ها شوند که ممکن است بهبود موقت چسبندگی قیر را نشان دهند. اما در نهایت، با تبدیل رزین‌ها به آسفالتین‌ها، کاهش چسبندگی قیر به دلیل کاهش خاصیت چسبندگی آسفالتین‌ها اتفاق می‌افتد. لذا، اکسیداسیون قیر شامل تبدیل اولیه روغن‌ها به رزین‌ها بوده و تبدیل ثانویه رزین‌های اولیه به آسفالتین‌ها را در پی خواهد داشت. ترکیب رزین ابتدا کاهش می‌یابد، سپس افزایش یافته و به طور مداوم کاهش می‌یابد (تیریون، ۲۰۰۰).

روغن ضایعات موتور دارد. این بهبود به دلیل توانایی روغن ضایعات پخت‌وپز در اصلاح خواص شیمیایی قیر با درصد کمتری از افزودنی است، که در نتیجه آن ویژگی‌های مختلف قیر پیرشده به شکل مؤثرتری ارتقا می‌یابد. ساتوس و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که روغن آروماتیک می‌تواند شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید را در پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت افزایش دهد. پی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که جوان‌سازی قیر به وسیله روغن آروماتیک تأثیر کمتری را در کاهش شاخص سولفوکسید قیر پیرشده در مقایسه با جوان‌سازی به وسیله روغن ضایعات پخت‌وپز دارد.

نسبت $\text{cm}^{-1} 1455/1700$ برای اندازه‌گیری اکسیداسیون نسبی قیر توسط جیا و همکاران (۲۰۱۴) پیشنهاد شد. همچنین، نگولسکو و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که قله $\text{cm}^{-1} 1700$ در ناحیه کربونیل (C=O) و قله $\text{cm}^{-1} 1455$ در ناحیه C-C اشباع قرار دارد. شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید بر اساس معادلاتی از مطالعات گذشته محاسبه شدند (چن و همکاران، ۲۰۱۴؛ ددن و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به نسبت‌های معرفی شده در نتایج FTIR در تحقیق دوولاپالی و همکاران (۲۰۲۰) می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه $\text{cm}^{-1} 3000$ به حضور C-H و هیدروکربن‌های اشباع سبک مرتبط است، به مالتن نسبت داده می‌شود. از سوی دیگر، نواحی $\text{cm}^{-1} 700$ و $\text{cm}^{-1} 1700$ که به ترتیب نمایانگر حلقه‌ها و ترکیبات سنگین آروماتیک و همچنین حضور گروه‌های کربونیل هستند، به عنوان عوامل مؤثر بر آسفالتین در نظر گرفته می‌شوند. معادلات (۳) تا (۶) بر اساس روابط ارائه شده از مطالعات دوولاپالی و همکاران (۲۰۲۰) محاسبه و ارائه شد.

۷-۲. روش سطح پاسخ (RSM)

۳. تحلیل داده‌های آزمایشگاهی

۳-۱. آزمایش‌های اولیه

جدول ۴ و شکل ۱ نشان‌دهنده اثر درصدهای مختلف هر سه جوان‌ساز بر درجه نفوذ و مقادیر نقطه نرمی است. خواص قیر خالص نشان می‌دهد که درجه نفوذ بین ۶۰ و ۷۰ و نقطه نرمی برابر ۴۸ درجه سلسیوس است. جدول ۴ و شکل ۱ نشان می‌دهند که با افزایش مقدار هر کدام از جوان‌سازها، درجه نفوذ افزایش و نقطه نرمی آن کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۵، روغن ضایعات پخت‌وپز بیشترین تأثیر و روغن آروماتیک کمترین تأثیر را بر تغییر درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر پیرشده را دارند. در گذشته، به تنهایی درجه نفوذ و نقطه نرمی برای تعیین درصدهای مناسب جوان‌سازها استفاده می‌شد. در این روش، مقادیر جوان‌سازهای مد نظر، به علت در نظر نگرفتن خواص شیمیایی جوان‌سازها و قیر به طور دقیق پیش‌بینی نمی‌شوند. جدول ۵ و شکل ۱ حدود بالایی و پایینی برای هر نمونه جوان‌ساز و تنها بازه قابل اطمینان استفاده از این جوان‌سازها را معین می‌کنند.

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های اولیه قیر

نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)	نوع قیر
۴۸	۶۷	قیر خالص
۷۱	۳۵	قیر پیرشده
۵۵	۴۵	۲ درصد WCO
۴۹	۵۸	۴ درصد WCO
۴۴	۸۱	۶ درصد WCO
۵۸	۴۱	۳ درصد WEO
۵۲	۵۱	۶ درصد WEO
۴۶	۷۴	۹ درصد WEO
۶۰	۳۶	۳ درصد آروماتیک
۵۳	۴۸	۶ درصد آروماتیک
۴۷	۷۱	۹ درصد آروماتیک

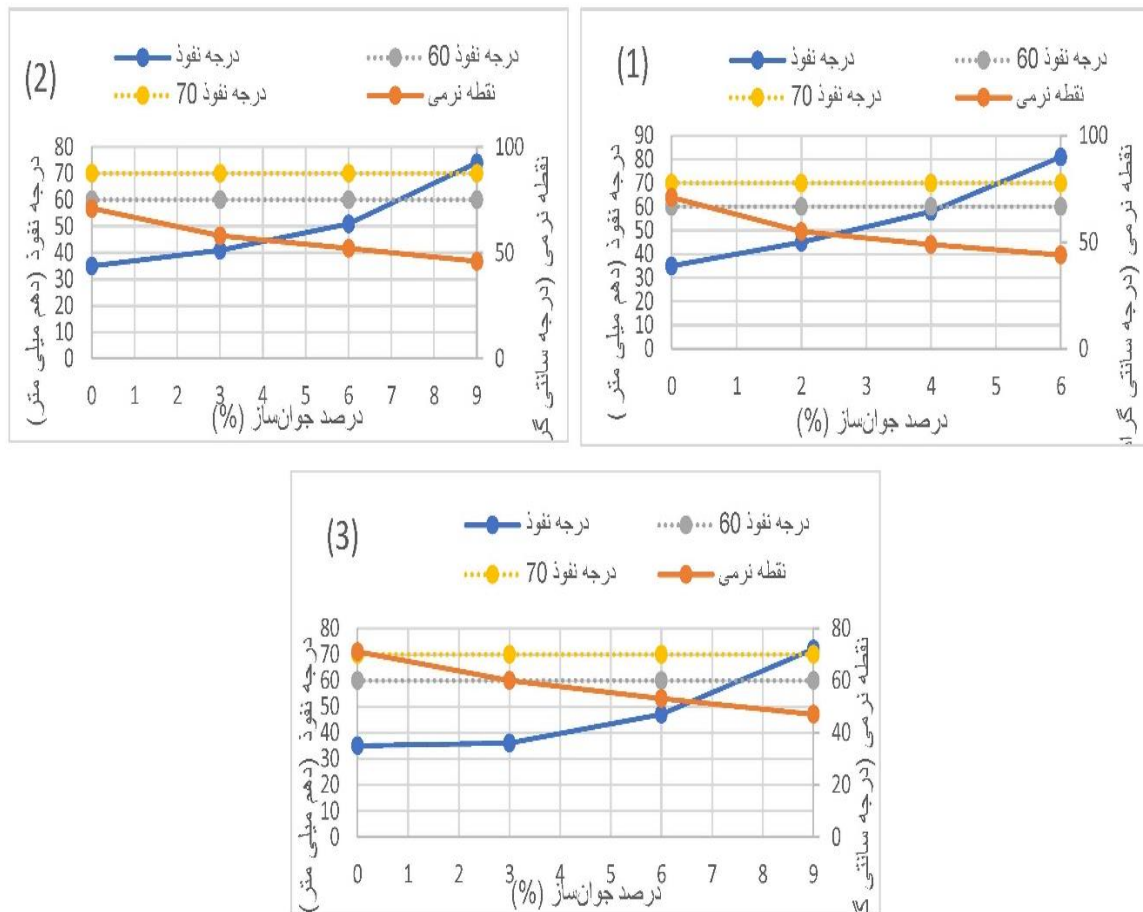
جدول ۵. حدود بالا و پایین جوان‌سازها

حد بالا	حد پایین	نوع جوان‌ساز
۵	۴	روغن ضایعات پخت‌وپز
۸/۵	۷	روغن ضایعات موتور خودرو
۹	۷/۵	روغن آروماتیک

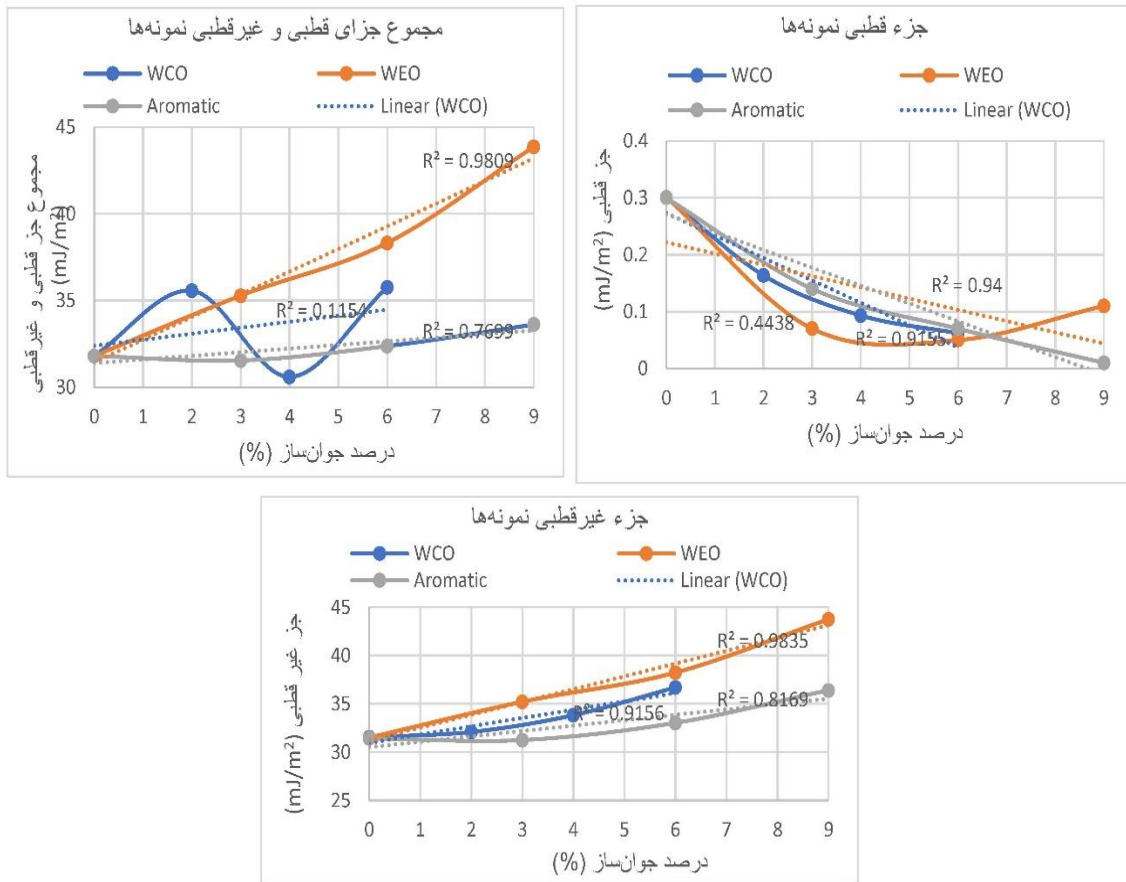
۲-۳. انرژی آزاد سطحی (SFE)

شناساگرهای قطبی و غیرقطبی در آزمایش انرژی سطح آزاد استفاده شدند و مشخصات این شناساگرها در جدول ۳ قابل مشاهده است. انرژی آزاد سطحی هر جوان‌ساز نیز در جدول ۶ نشان داده شده است. انرژی آزاد سطحی هر جوان‌ساز نیز در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین، مقادیر اجزای مختلف آن به تفکیک در شکل ۲ و جدول ۶ قابل مشاهده است.

هدف از انجام این آزمایش، پیدا کردن رابطه‌ای مشخص بین افزایش درصد جوان‌سازها و روند جزء قطبی SFE بوده است، که با توجه به گزارش‌های اعلام شده در مطالعات گذشته، افزایش تجمع آسفالتین‌ها در قیرهای پیرشده مربوط به روند جزء قطبی است (ماتولیا و همکاران، ۲۰۲۰) آب و دی‌یودومتان به عنوان



شکل ۱. مقادیر درجه نفوذ و نقطه نرمی در درصد‌های مختلف: (۱) روغن ضایعات پخت‌وپز، (۲) روغن ضایعات موتور و (۳) روغن آروماتیک



شکل ۲. تأثیر افزایش درصد جوان‌ساز بر تغییرات اجزای قطبی و غیرقطبی آزمایش انرژی آزاد سطح

ضایعات پخت‌وپز رابطه متعادلی در نتایج دو جزء نشان داد که نمایانگر قابلیت استفاده آن در شرایط متفاوت و سازگاری آن با هر دو محیط قطبی و غیرقطبی است. باید یاد آور شد که افزایش اجزای غیرقطبی باعث شد اشباع‌ها و آروماتیک‌های قیرهای اصلاح شده افزایش یابند (ماتولیا و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۶ مقادیر R^2 برای روغن‌های آروماتیک و ضایعات پخت‌وپز نشان دهنده وجود روند مشخص جزء قطبی این جوان‌سازها با تغییر درصد جوان‌سازها است. همچنین، نشان می‌دهد که روغن ضایعات موتور خودرو هیچ روند مشخص و مرتبطی با متغیر قطبی ندارد.

شکل ۲ تأثیر افزایش جوان‌سازها بر نتایج اجزای انرژی آزاد سطحی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شکل ۲، جزء ۷ (مجموع جزء قطبی و غیرقطبی) برای قیر جوان‌سازی شده با روغن ضایعات پخت‌وپز نوسانات زیادی نشان داد. لذا می‌توان نتیجه گرفت این پارامتر قابلیت اطمینان کمی خواهد داشت. همچنین، نتایج موجود در شکل ۲ و جدول ۶ نشان‌داد که روغن آروماتیک به علت دارا بودن بیشترین شیب خط و عدم وجود رفتار غیر خطی در آزمون جزء قطبی بیشترین ارتباط را با این جزء داراست. در عین حال، روغن ضایعات موتور خودرو در نمودار مربوط به جزء غیرقطبی شیب بیشتری داشته و بیش از سایر جوان‌سازها تحت تأثیر این جزء قرار گرفته است. همچنین، روغن

جدول ۶. مقدار R^2 نمونه‌ها

جوان‌ساز مورد استفاده	R^2 نمونه‌ها
روغن ضایعات پخت‌وپز	۰/۹۱۵۵
روغن ضایعات موتور خودرو	۰/۴۴۳۸
روغن آروماتیک	۰/۹۴

۳-۳ شاخص نفوذپذیری

اصلاح‌شده با ۴ درصد روغن ضایعات پخت‌وپز، نزدیک‌ترین شاخص نفوذپذیری به قیر خالص را دارد. پس از آن، نمونه اصلاح‌شده با ۹ درصد روغن آروماتیک قرار می‌گیرد و در آخر نمونه اصلاح‌شده با ۹ درصد روغن ضایعات موتور خودرو قرار دارد. این روند با استفاده از جوان‌سازهای مختلف تغییر می‌کند تا قیر پیرشده را از نوع ژل، که قیری شکننده و کم‌انعطاف است، به نوع سل-ژل که شکل استاندارد قیر است تبدیل کند (الصفار و همکاران، ۲۰۲۰).

شاخص نفوذپذیری (PI) بر اساس مقادیر درجه نفوذ و نقطه نرمی در فرمول (۱) تعیین شده است و مقادیر PI در جدول ۸ محاسبه و در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این روش، از سه پارامتر در هر مدل بهینه‌سازی برای تعیین درصد جوان‌سازها استفاده شد، از جمله درجه نفوذ، جزء قطبی انرژی آزاد سطحی و شاخص نفوذ. همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، نمونه

جدول ۷. شاخص نفوذپذیری نمونه‌های قیر

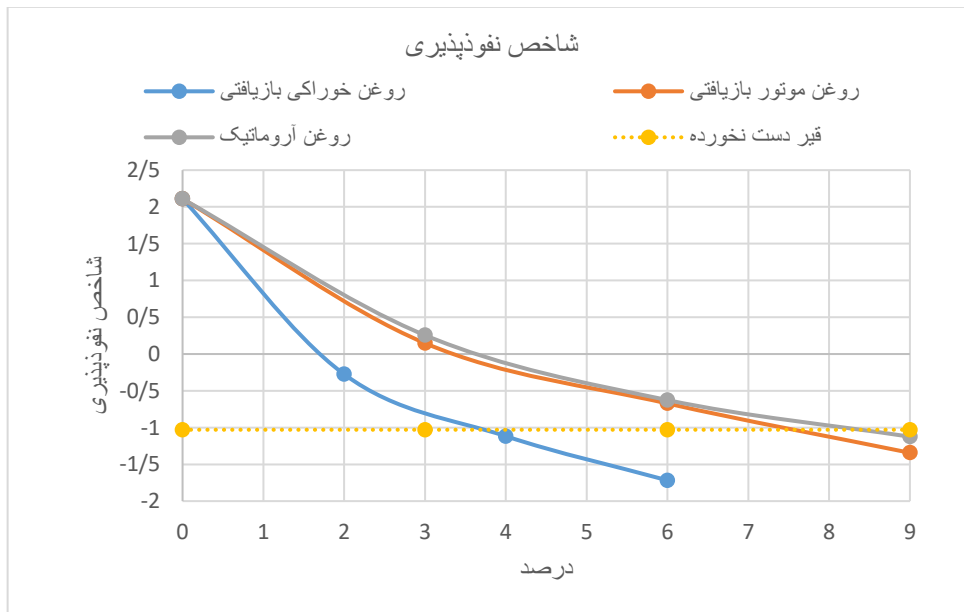
شاخص نفوذپذیری (PI)	نوع قیر
-۱/۰۲۹	قیر خالص
۲/۱۱	قیر پیرشده
-۰/۲۷۵	۲ درصد WCO
-۱/۱۱۷	۴ درصد WCO
-۱/۷۲۸	۶ درصد WCO
۰/۱۴۷	۳ درصد WEO
-۰/۶۷۲	۶ درصد WEO
-۱/۳۴۲	۹ درصد WEO
۰/۲۵۶	۳ درصد آروماتیک
۰/۶۲۵	۶ درصد آروماتیک
-۱/۱۲۴	۹ درصد آروماتیک

شاخص نفوذپذیری واکنش مشابهی دارند. نتایج نزدیک قیرهای جوان‌سازی شده با روغن ضایعات موتور خودرو

شکل ۳ نشان می‌دهد که روغن ضایعات موتور خودرو و جوان‌سازهای آروماتیک نسبت به نتایج

(۲۰۱۱) و نتایج نمایش داده شده در شکل ۳، روغن ضایعات پخت‌وپز بیشترین تأثیر را در کاهش شاخص نفوذپذیری داشت. جدول ۷ و شکل ۳ نشان می‌دهند که نزدیک‌ترین مقدار شاخص نفوذپذیری با استفاده از حدود ۴ درصد روغن ضایعات پخت‌وپز و ۷/۵ درصد روغن ضایعات موتور خودرو و یا ۸ درصد آروماتیک به دست می‌آید. بنابراین، استفاده بیشتر از این جوان‌سازها باید قیر جوان‌سازی شده‌ای تولید کند که در نهایت در برابر اکسیداسیون قوی‌تر از قیر خالص باشد (زائومانیس و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده بیش از حد از جوان‌سازها باعث کاهش بیش از حد ویسکوزیته و عملکرد قیرها می‌شود (الصفار و همکاران، ۲۰۲۰).

و آروماتیک از ترکیب شیمیایی آن‌ها ناشی می‌شود که تأثیر کمتری بر تغییر حالت قیر دارند. از طرفی، روغن ضایعات پخت‌وپز بیشترین تأثیر را با کاهش نتایج شاخص نفوذپذیری برای رسیدن به مقدار شاخص نفوذپذیری قیر خالص دارد که باعث بهبود عملکرد قیرهای پیرشده می‌شود. ندکارنی و همکاران (۲۰۰۰) در تحقیقات خود نشان داده‌اند که افزایش ناگهانی در مقادیر اجزای قطبی روغن ضایعات پخت‌وپز به رشد اجزای کربن و گوگرد در مواد تشکیل‌دهنده آن مربوط می‌شود. افزایش شیب نمودار شاخص نفوذپذیری نشانه مهمی برای کاهش تأثیرات جوان‌سازها بر قیرها در درصدهای زیاد است. بر اساس یافته‌های فیروزفر و همکاران



شکل ۳. تأثیر افزایش درصد جوان‌سازهای روغن ضایعات پخت‌وپز، روغن ضایعات موتور و روغن آروماتیک بر روند شاخص نفوذپذیری

جوان‌سازها به دست آمد. نتایج بهینه‌سازی، که در شکل ۴ و جدول ۸ نمایش داده شده‌اند، نشان می‌دهند که استفاده از ۴/۷ درصد روغن ضایعات پخت‌وپز یا ۷/۶ درصد روغن ضایعات موتور خودرو و یا ۸/۱ درصد روغن آروماتیک در قیرهای پیرشده بیشترین تأثیر خود

۳-۴. بهینه‌سازی توسط پارامتر قطبی به وسیله

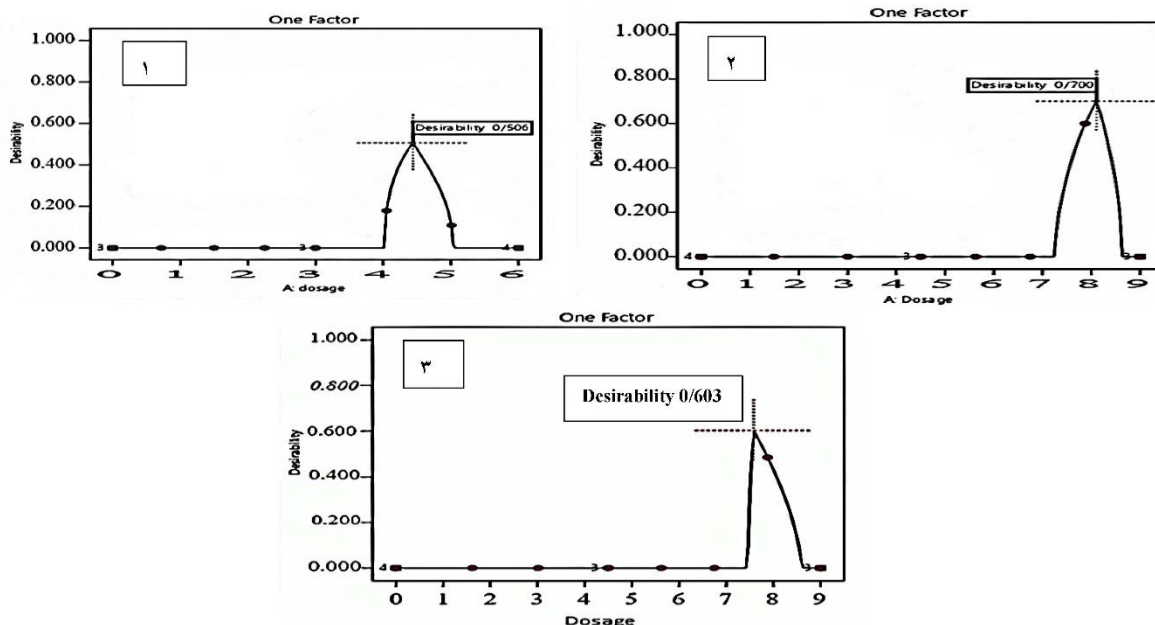
RSM

با استفاده از سه پارامتر درجه نفوذ، جزء قطبی انرژی آزاد سطحی و شاخص نفوذپذیری، مدل‌های بهینه برای هر جوان‌ساز محاسبه شد و درصدهای مناسب

بررسی تغییرات شیمیایی قیر پیرشده بر اثر افزودن مقادیر بهینه‌سازی شده جوان‌سازها با توجه به قطبیت جوان‌سازها

محاسبه شده در محیط نرم‌افزار ANOVA محاسبه شده‌اند.

را ایجاد می‌کنند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که افزودن این مواد به قیرهای پیرشده می‌تواند عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد. نتایج ارائه شده در شکل ۴ با توجه به داده‌های



شکل ۴. نتایج به دست آمده از نرم‌افزار بهینه‌سازی: (۱) روغن ضایعات پخت‌وپز، (۲) روغن ضایعات موتور و (۳) روغن آروماتیک

اصلاح را انجام داد و پس از آن روغن ضایعات پخت‌وپز اصلاح زیادی را در شاخص‌های سولفوکسید و کربونیل به وجود آورد. روغن ضایعات موتور خودرو کمترین اصلاح را ایجاد کرد و در اصلاح این شاخص‌ها موفقیت چندانی را ایجاد نکردن.

۳-۵. تحلیل نتایج بهینه‌سازی به وسیله FTIR

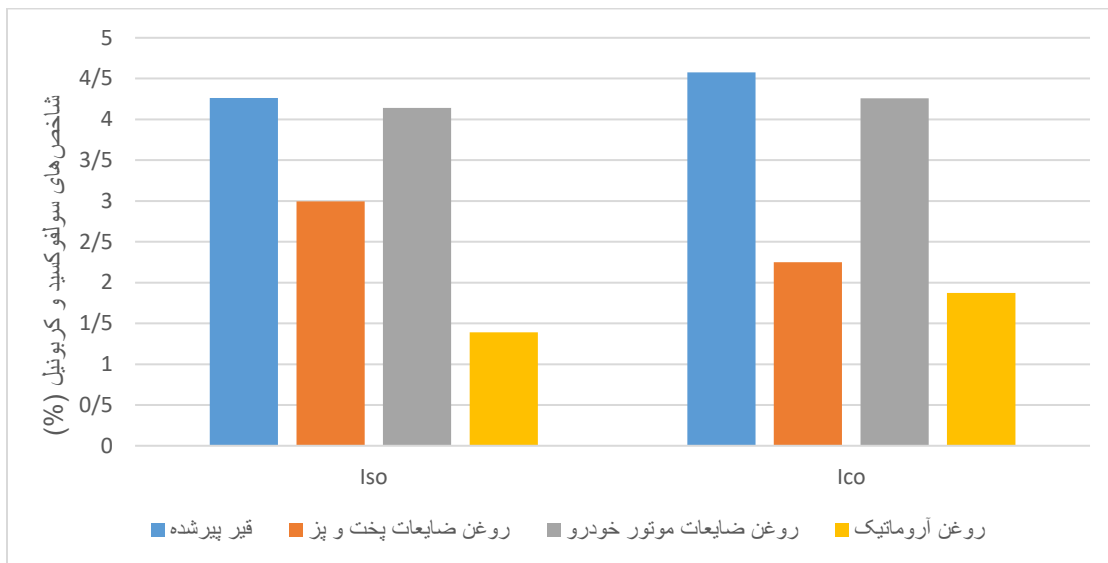
جدول ۹ و شکل ۵ بیانگر تغییرات شاخص‌های سولفوکسید و کربونیل بر اساس مقادیر بهینه‌سازی شده جوان‌سازها است. روغن آروماتیک در هر دو شاخص بیشترین

جدول ۸. مشخصه‌های آماری قیرهای اصلاح شده

	روغن ضایعات پخت‌وپز			روغن ضایعات موتور خودرو			روغن آروماتیک		
	شاخص نفوذپذیری	درجه نفوذ پذیری	مقدار پارامتر قطبی	شاخص نفوذپذیری	درجه نفوذ پذیری	مقدار پارامتر قطبی	شاخص نفوذپذیری	درجه نفوذ پذیری	مقدار پارامتر قطبی
Method	quadratic	quadratic	cubic	quadratic	quadratic	cubic	quadratic	quadratic	cubic
P-value	<0/1000	<0/1000	<0/1000	<0/1000	<0/1000	<0/1000	<0/1000	<0/1000	<0/1000
R ²	0/9994	0/9988	0/9999	0/9993	0/9867	0/9996	0/9994	0/9781	0/9960
predicted R ²	0/9990	0/9982	0/9937	0/9989	0/9760	0/8636	0/9988	0/9549	0/9931
adjusted R ²	0/9993	0/9986	0/9998	0/9992	0/9823	0/9992	0/9995	0/9708	0/9946

جدول ۹. تأثیر انواع جوان‌سازها بر اصلاح شاخص‌های سولفوکسید و کربونیل

نوع قیر	کربونیل (%)	سولفوکسید (%)	اصلاح کربونیل (%)	اصلاح سولفوکسید (%)
قیر پیر شده	۴/۵۷۷	۴/۲۶۱	-	-
بهینه شده با روغن ضایعات پخت‌وپز	۲/۲۵۱	۱/۷۹۵	۵۰/۸۱	۳۴/۴۱
بهینه شده با روغن ضایعات موتور خودرو	۴/۲۵۷	۴/۱۴۱	۶/۹۹	۲/۸۱
بهینه شده با روغن آروماتیک	۱/۸۷۴	۱/۳۹۲	۵۹/۰۵	۶۷/۳۳



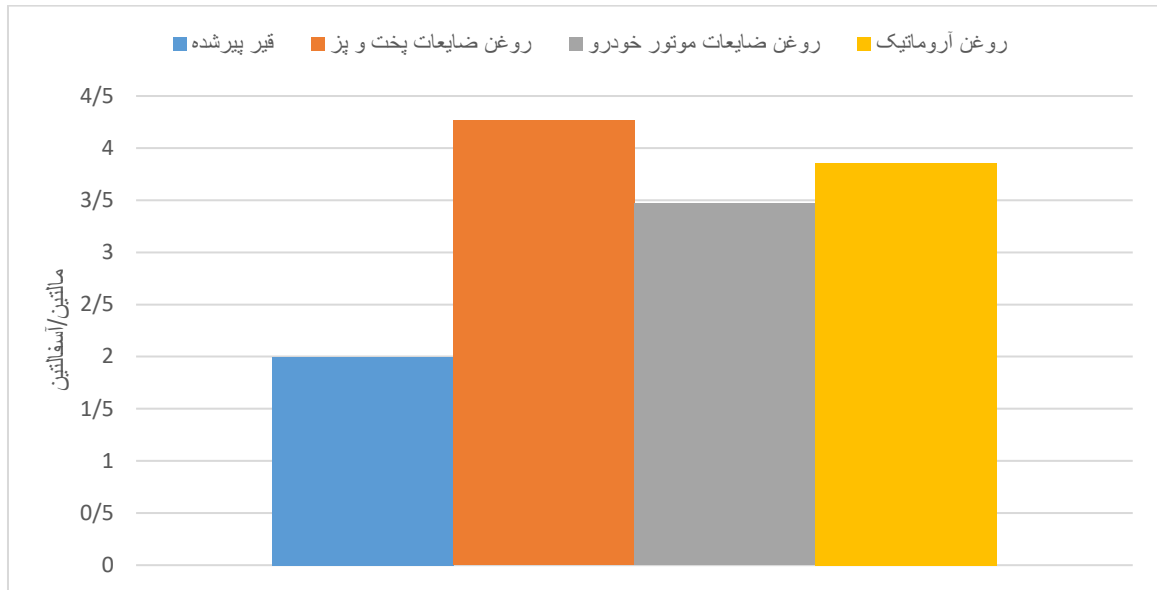
شکل ۵. تأثیر انواع جوان‌سازها بر اصلاح شاخص‌های سولفوکسید و کربونیل

جوان‌سازها کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. بر اساس تحقیق انجام شده توسط آلفسار و همکاران (۲۰۲۳)، نسبت بهینه مالتین به آسفالتین مقدار ۴/۲۴ معرفی شده است که با مقدار به‌دست‌آمده پس از بهینه‌سازی با روغن ضایعات پخت‌وپز در این تحقیق تطابق زیادی دارد.

جدول ۱۰ و شکل ۶ نشان‌دهنده نسبت مالتین به آسفالتین مخلوط‌های متفاوت جوان‌سازی شده است. بیشترین تغییر را روغن ضایعات پخت‌وپز ایجاد کرد و روغن آروماتیک در جایگاه دوم اصلاح این نسبت قرار گرفت. روغن ضایعات موتور خودرو نیز تغییر زیادی در نسبت مالتین به آسفالتین به‌وجود آورد اما در بین سایر

جدول ۱۰. تأثیر جوان‌سازهای مختلف بر اصلاح نسبت مالتین به آسفالتین

نوع قیر	نسبت مالتین به آسفالتین	مقدار افزایش نسبت مالتین به آسفالتین (%)
قیر پیر شده	۱/۹۹	-
بهینه شده با روغن ضایعات پخت‌وپز	۴/۲۶	۱۱۳/۷۴
بهینه شده با روغن ضایعات موتور خودرو	۳/۴۶	۷۳/۸۷
بهینه شده با روغن آروماتیک	۳/۸۵	۹۳/۳۲



شکل ۶. تأثیر جوان‌سازهای متفاوت بر اصلاح نسبت مالتین به آسفالتین

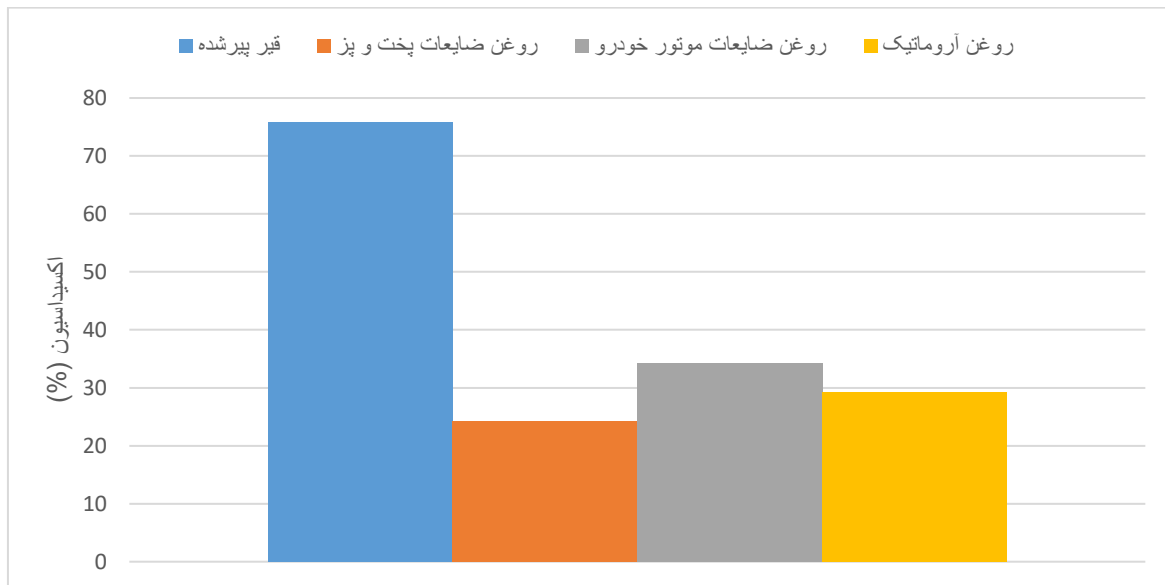
و گوگرد در ساختار روغن ضایعات موتور منجر به افزایش شاخص‌های سولفوکسید و کربونیل می‌شود (ندکارنی و همکاران، ۲۰۰۰) که می‌تواند باعث کاهش نسبت مالتین به آسفالتین و افزایش اکسیداسیون شود. با این حال، کربن و گوگرد باعث ایجاد یک ناحیه قطبی در قیر اصلاح شده به وسیله روغن ضایعات موتور می‌شوند و در نهایت بهینه‌سازی قطبی در کاهش اکسیداسیون کارآمد نیست (آلصفار و همکاران، ۲۰۲۱).

جدول ۱۱ و شکل ۷ تغییرات درصد اکسیداسیون در مخلوط‌های جوان‌سازی شده متفاوت را مقایسه کردند. براساس نتایج بیشترین اصلاح را روغن ضایعات پخت‌وپز به‌وجود آورد. روغن آروماتیک و روغن ضایعات موتور خودرو نیز باعث کاهش چشم‌گیر اکسیداسیون شدند.

به علت وجود ترکیبات پارافینی در ساختار روغن ضایعات موتور (زائومانیس و همکاران، ۲۰۱۵)، استفاده بیش از حد از روغن ضایعات موتور بخاطر وجود کربن

جدول ۱۱. تأثیر انواع جوان‌سازها بر اصلاح درصد اکسیداسیون

نوع قیر	اکسیداسیون (%)	میزان اصلاح اکسیداسیون (%)
قیر پیرشده	۷۵/۸۴	-
بهینه شده با روغن ضایعات پخت‌وپز	۲۴/۲۱	۶۸/۱
بهینه شده با روغن ضایعات موتور خودرو	۳۴/۱۵	۵۴/۹
بهینه شده با روغن آروماتیک	۲۹/۳۲	۶۱/۳



شکل ۷. تأثیر انواع جوان‌سازها بر اصلاح درصد اکسیداسیون

درصدهای بالاتری به وجود آوردند که به ترتیب برابر ۷/۶ درصد و ۸/۱ درصد بودند.

- انرژی آزاد سطحی کل روغن ضایعات پخت‌وپز نتایج ناپایدار و متغیری را نشان می‌دهد، که بر لزوم جداسازی بهینه‌سازی بر اساس قطبیت تأکید می‌کند. گوگرد و کربن در ساختار روغن ضایعات موتور خودرو تأثیر معکوس بر نتایج اجزای قطبی آزمایش انرژی آزاد سطحی دارند که به علت وجود افزایش مولفه آسفالتین در ساختار قیر اصلاح شده خواهد بود و باعث ایجاد پیرشدگی زود هنگام می‌گردد. مقدار بهینه گوگرد و کربن موجود در ساختار روغن ضایعات موتور خودرو مانع از تغییرات زیاد در شاخص‌های سولفوکسید و کربونیل می‌شود و تنها باعث کاهش جزئی این شاخص‌ها می‌گردد، به طوری که حدود ۷ درصد کاهش در شاخص کربونیل و ۳ درصد کاهش در شاخص سولفوکسید مشاهده می‌شود. این در حالی است که روغن آروماتیک حدوداً ۶۰ درصد کربونیل و ۶۷ درصد سولفوکسید را کاهش داد و روغن ضایعات پخت‌وپز ۵۱ درصد کربونیل و ۳۴ درصد سولفوکسید را اصلاح کرد.

وجود حلقه‌های آروماتیک در ترکیب روغن‌های ضایعات پخت‌وپز و آروماتیک، منجر به ایجاد رفتاری غیرقطبی در این مواد می‌شود. این حلقه‌های آروماتیک که به عنوان اجزایی با قطبیت کم شناخته می‌شوند، باعث شکل‌گیری ماتریسی غیرقطبی در ساختار قیر می‌گردند. با این حال، با وجود رفتار غیرقطبی، بهینه‌سازی این ترکیبات از طریق تعاملات قطبی می‌تواند نتایج بسیار مطلوبی به همراه داشته باشد. علاوه بر این، نسبت معرفی شده برای بررسی نسبت مالتن به آسفالتن، در معادله (۶)، در جهت یافته‌های زائومانیس و همکاران (۲۰۱۵) نیز است و صحت آن با توجه به مشابهت نتایج این مطالعه با مطالعات گذشتگان تأیید می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

- روغن ضایعات پخت‌وپز قادر است انتقال حالت ژل به سل-ژل را با حداقل درصد ممکن (۴/۷ درصد) تسهیل کند؛ در حالی که روغن ضایعات موتور خودرو و روغن آروماتیک نتایج مشابه را با

- بیشترین افزایش نسبت مالتین به آسفالتین مربوط به روغن ضایعات پخت‌وپز با حدود ۱۱۴ درصد بود. روغن آروماتیک نیز قادر به اصلاح ۹۳ درصدی این نسبت بود و کمترین مقدار افزایش را روغن ضایعات موتور خودرو با حدود ۷۴ درصد به خود اختصاص داد.
- همچنین، روغن ضایعات پخت‌وپز با مقدار حدودی ۶۸ درصد کاهش اکسیداسیون، باعث بیشترین کاهش در شاخص اکسیداسیون می‌شود و روغن ضایعات موتور خودرو با مقدار تقریبی ۵۵ درصد کمترین اصلاح را در اکسیداسیون قیر ایجاد کرد. این در حالی است که روغن آروماتیک رفتار میانی داشت و حدود ۶۱ درصد اکسیداسیون را اصلاح کرد.
- نسبت بالاتر مالتین به آسفالتین می‌تواند به‌طور قابل توجهی نتایج اکسیداسیون را تحت تأثیر قرار دهد. به این صورت که برای نسبت بالاتر مالتین به آسفالتین، روغن ضایعات پخت‌وپز، باعث بیشترین اصلاح اکسیداسیون شد و پس از آن به ترتیب روغن‌های آروماتیک و روغن ضایعات مقادیر اکسیداسیون را کاهش دادند. با این وجود مقدار نسبت مالتین به آسفالتین لزوماً بر شاخص‌های سولفوکسید و کربونیل تأثیر مستقیمی نمی‌گذارد.
- بر اساس نتایج به‌دست آمده، روغن ضایعات پخت‌وپز به دلیل بیشترین میزان بازیابی شیمیایی و ایجاد حالت سل-ژل با کمترین درصد مورد نیاز، بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر جوان‌سازهای بررسی‌شده ارائه کرد. علاوه بر این، استفاده از این جوان‌ساز نه تنها خواص مکانیکی و شیمیایی قیر را بهبود می‌بخشد، بلکه مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجهی نیز به همراه دارد.

۵. مراجع

- Akinleye, M., Jimoh, Y. A. and Abdulrahman, L. 2020. "A performance characteristic models of properties of dissolved plastic bottle modified bitumen for hot mix asphalt production". *Global J. Eng. Technol. Adv.* 05(02): 047-056. doi: 10.30574/gjeta.
- Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Satar, M. K. I. M., Saleem, M. K., Jaya, P., Lai, C. J. and Shaffie, E. 2020. "Evaluating the chemical and rheological attributes of aged asphalt: Synergistic effects of maltene and waste engine oil rejuvenators". *Arab. J. Sci. Eng.*, 45(10): 8685-8697. doi: 10.1007/s13369-020-04842-7.
- Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Satar, M. K. I. M., Kamarudin, S. N. N., Mahmud, M. Z. H., Ismail, C. R., Hassan, S. A. and Mashros, N. 2021. "A review on the usage of waste engine oil with aged asphalt as a rejuvenating agent". *Mater. Today: Proc.*, 42: 2374-2380.
- Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Al Jawahery, M. S., Yousif, S. T., Satar, M. K. I. M., Jaya, R. P., Radeef, H. R., Eltwati, A. S. and Shaffie, E. 2023. "Extraction and characterisation of maltene from virgin asphalt as a potential rejuvenating agent". *Sustainability*, 15(2): 909. doi: 10.3390/su15020909.
- Anon. 2012. "Bitumen and bituminous binders, accelerated long-term ageing conditioning by a pressure ageing vessel (PAV)". Anon. n. d. NII-Electronic Library Service.
- Arámbula-Mercado, E., Kaseer, F., Martin, A. E., Yin, F. and Cucalon, L. G. 2018. "Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents". *Constr. Build. Mater.*, 158: 432-442. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.024.
- ASTM D1754. 2009. "Standard test method for effects of heat and air on asphaltic materials (Thin-film oven test)". *Annual Book of ASTM Standards 09 (Reapproved)*: 1-7. doi: 10.1520/D1754.
- Bardella, N., Facchin, M., Fabris, E., Baldan, M. and Beghetto, V. 2024. "Waste cooking oil as eco-friendly rejuvenator for reclaimed asphalt pavement". *Mater.*, 17(7): 1477. doi: 10.3390/ma17071477.
- Behnood, A. and Modiri Gharehveran, M. 2019. "Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders". *Eur. Polym. J.*, 112: 766-791. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049.
- Bonemazzi, F. and Giavarini, C. 1999. "Shifting the bitumen structure from sol to gel". *J. Petrol. Sci. Eng.*, 22(1-3): 17-24. doi: 10.1016/S0920-4105(98)00052-7.

- Burke, K. and Hesp, S. A. M. 2011. "Penetration testing of waste engine oil modified asphalt cements". First Conference of Transportation Research Group of India, Bangalore, India.
- Chen, M., Leng, B., Wu, S. and Sang, Y. 2014. "Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 66: 286-298. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.033.
- Chung, T. Y., Eiserich, J. P. and Shibamoto, T. 1993. "Volatile compounds identified in headspace samples of peanut oil heated under temperatures ranging from 50 to 200 degree C". *J. Agric. Food Chem.*, 41(9): 1467-1470. doi: 10.1021/jf00033a022.
- Dedene, C. D. 2011. "Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed asphalt materials to improve pavement recyclability. Master of Science Thesis, Civil Engineering, Michigan Technological University".
- Devulapalli, L., Kothandaraman, S. and Sarang, G. 2020. "Microstructural characterisation of reclaimed asphalt pavement with rejuvenators". *Int. J. Pavement Eng.*, 23(4): 1038-1049. doi: 10.1080/10298436.2020.1788027.
- EAPA. 2018. "Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production". European Asphalt Pavement Association.
- Erickson, M. D. 2007. *Deep Frying Chemistry, Nutrition, and Practical Applications*. Academic Press and AOCS Press; 2nd edition, 464 p.
- Firoozifar, S. H., Foroutan, S. and Foroutan, S. 2011. "The effect of asphaltene on thermal properties of bitumen." *Chem. Eng. Res. Des.*, 89(10): 2044-2048. doi: 10.1016/j.cherd.2011.01.025
- Ghasemi, M. and Marandi, S. M. 2013. "Laboratory studies of the effect of recycled glass powder additive on the properties of polymer modified asphalt binders". *Int. J. Eng., Trans. A: Basics*, 26(10): 1183-1190. doi: 10.5829/idosi.ije.2013.26.10a.08
- Gökalp, İ. and Uz, V. E. 2019. "Utilizing of waste vegetable cooking oil in bitumen: Zero tolerance aging approach". *Constr. Build. Mater.*, 227: 116695. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116695.
- Hu, Z., Wei, Z., Zhao, X., Zhang, M., Zhang, J., Pei, J., Wang, Q. and Lyu, L. 2024. "Foamed waste oil-activated rubberized asphalt binder: A sustainable recycling approach for improving foaming effect and performance". *Constr. Build. Mater.*, 423: 135889. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135889.
- Hung, A. M. and Fini, E. H. 2019. "Absorption spectroscopy to determine the extent and mechanisms of aging in bitumen and asphaltenes". *Fuel*, 242: 408-415. doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.085.
- Jia, X., Huang, B., Bowers, B. F. and Zhao, S. 2014. "Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues". *Constr. Build. Mater.*, 50: 683-691. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.012.
- Jing, R., Varveri, A., Liu, X., Scarpas, A. and Erkens, S. 2021. "Ageing effect on chemo-mechanics of bitumen". *Road Mater. Pavement Des.* 22(5): 1044-1059. doi: 10.1080/14680629.2019.1661275.
- Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E. and Martin, A. E. 2017. "Stiffness characterization of asphalt mixtures with high recycled material content and recycling agents". *Transport. Res. Record*, 2633(1): 58-68. doi: 10.3141/2633-08.
- Lesueur, D. 2009. "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification". *Adv. Colloid Interface Sci.*, 145(1-2): 42-82. doi: 10.1016/j.cis.2008.08.011.
- Li, H., Dong, B., Wang, W., Zhao, G., Guo, P. and Ma, Q. 2019. "Effect of waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt". *Appl. Sci. (Switzerland)*, 9(9). doi: 10.3390/app9091767.
- Li, H., Zhang, F., Feng, Z., Li, W. and Zou, X. 2021. "Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 276: 122138. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122138.
- Liu, S., Peng, A., Zhou, S., Wu, J., Xuan, W. and Liu, W. 2019. "Evaluation of the ageing behaviour of waste engine oil-modified asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 223: 394-408. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.020.
- Liu, F., Zhou, Z., Zhang, X. and Wang, Y. 2021. "On the linking of the rheological properties of asphalt binders exposed to oven aging and PAV aging". *Int. J. Pavement Eng.*, 22(3): 331-340. doi: 10.1080/10298436.2019.1608992.
- Lu, H. T., Li, X. and Yuen, K. F. 2023. "Digital transformation as an enabler of sustainability innovation and performance – information processing and innovation ambidexterity perspectives". *Technol. Forecasting*

- Soc. Change, 196: 122860. doi: 10.1016/j.techfor e.2023.122860.
- Lv, Q., Huang, W., Zheng, M., Hu, Y., Yan, C. and Wang, J. 2022. "Understanding the particle effects and interaction effects of crumb rubber modified asphalt regarding bonding properties." *Constr. Build. Mater.*, 348. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128716.
- Mangiafico, S., Di Benedetto, H., Olard, C. S. F., Pouget, S. and Planque, L. 2016. "Effect of colloidal structure of bituminous binder blends on linear viscoelastic behaviour of mixtures containing reclaimed asphalt pavement". *Mater. Des.*, 111: 126-139. doi: 10.1016/j.mat des.2016.07.124.
- Matolia, S., Guduru, G., Gottumukkala B. and Kuna, K. K. 2020. "An investigation into the influence of aging and rejuvenation on surface free energy components and chemical composition of bitumen". *Constr. Build. Mater.*, 245: 118378. doi: 10.1016/j.conbuil dmat.2020.118378.
- Mogawer, W. S., Fini, E. H., Austerman, A. J., Booshehrian, A. and Zada, B. 2016. "Performance characteristics of high reclaimed asphalt pavement containing bio-modifier". *Road Mater. Pavement Des.*, 17(3): 753-767. doi: 10.1080/14680629.2015.1096820.
- Nadkarni, R. A. 2000. "Guide to ASTM test methods for the analysis of petroleum products and lubricants". ASTM.
- Negulescu, I., Mohammad, L., Daly, W., Abadie, C., Cueto, R., Daranga, C. and Glover, I. 2006. "Chemical and rheological characterization of wet and dry aging of SBS copolymer modified asphalt cements: Laboratory and field evaluation". Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Retrieved March 2, 2022. <https://trid.trb.org/view/798168>.
- Ongel, A. and Hugener, M. 2015. "Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen". *Constr. Build. Mater.*, 94: 467-474. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.030.
- Ouyang, C., Wang, S. Zhang, Y. and Zhang, Y. 2006. "Improving the aging resistance of asphalt by addition of zinc Dialkyldithiophosphate". *Fuel*, 85(7-8): 1060-1066. doi: 10.1016/j.fuel.2005.08.023.
- Read, J. and Whiteoak, D. 2003. "The shell bitumen handbook". Fifth Ed., Shell Bitumen.
- Santos, F. B., Faxina, A. L. and Soares, S. de A. 2021. "Soy-based rejuvenated asphalt binders: Impact on rheological properties and chemical aging indices". *Constr. Build. Mater.*, 300 (August 2020). doi: 10.1016/j.conbuildmat.202 1.124220.
- Sengoz, B. and Isikyakar, G. 2008. "Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen". *Constr. Build. Mater.* 22(9): 1897-1905. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013.
- Shoukat, T. and Yoo, P. J. 2018. "Rheology of asphalt binder modified with 5w30 viscosity grade waste engine oil". *Appl. Sci.*, (Switzerland) 8(7). doi: 10.3390/app8071194.
- Singh, B. and Kumar, P. 2019. "Effect of polymer modification on the ageing properties of asphalt binders: Chemical and morphological investigation". *Constr. Build. Mater.*, 205: 633-641. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.050.
- Tarsi, G., Varveri, A., Lantieri, C., Scarpas, A. and Sangiorgi, C. 2018. "Effects of different aging methods on chemical and rheological properties of bitumen". *J. Mater. Civ. Eng.*, 30(3). doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943.
- Thyrion, F. C. 2000. "Chapter 16 asphalt oxidation". *Develop. Petrol. Sci.*, 40(Part B): 445-474. doi: 10.1016/S0376-7361(09)70287-0.
- Wang, H., Liu, X., Apostolidis, P., van de Ven, M., Erkens, S. and Skarpas, A. 2020. "Effect of laboratory aging on chemistry and rheology of crumb rubber modified bitumen". *Mater. Struct. / Mater. Constr.*, 53(2). doi: 10.1617/s11 527-020-1451-9.
- Wang, T., Riccardi, C. and Jiang, W. 2025. "From waste to sustainable pavement: Rejuvenation of asphalt binder using waste engine oil residue and crumb rubber". *Chem. Eng. J.*, 505: 159523. doi: 10.1016/j.cej.2025.159523.
- Werkovits, S., Bacher, M., Theiner, J., Rosenau, T. and Grothe, H. 2022. "Multi-spectroscopic characterization of bitumen and its polarity-based fractions". *Constr. Build. Mater.*, 352. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128992.
- Wu, S., Han, J., Pang, L., Yu, M. and Wang, T. 2012. "Rheological properties for aged bitumen containing ultraviolet light resistant materials". *Constr. Build. Mater.*, 33: 133-138. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.019.
- Yi, T., Dong, R. and Tang, N. 2020. "Development of a novel binder rejuvenator composed by waste cooking oil and crumb tire rubber". *Constr. Build. Mater.*, 236: 117621. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117621.

- Yin, F., Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E. and Martin, A. E. 2017. "Characterising the long-term rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents". *Road Mater. Pavement Des.*, 18: 273-292. doi: 10.1080/14680629.2017.1389074.
- Zaumanis, M., Mallick, R. and Frank, R. 2013. "Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures". *Transport. Res. Record*, 2370: 17-25. doi: 10.3141/2370-03.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B. and Frank, R. 2015. "Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt". *Mater. Struct. / Mater. Constr.*, 48(8): 2475-2488. doi: 10.1617/s11527-014-0332-5.
- Zhang, Y., Zhou, C., Zou, P., Hu, M. and Cao, P. 2024. "A novel WCO-MDI reactive rejuvenation method for aged SBS modified asphalt toward sustainable asphalt pavements". *J. Clean. Prod.*, 434: 140199. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140199.
- Zhao, K., Wang, Y. and Li, F. 2021. "Influence of ageing conditions on the chemical property changes of asphalt binders". *Road Mater. Pavement Des.*, 22(3): 653-681. doi: 10.1080/14680629.2019.1637771.