



Evaluation of the long-term performance of naphthenic recycling agent in restoring the properties of aged bitumen

H. Ziari^{1*}, S. Bananezhad², M. A. Ziari³

¹Asphalt Mixtures and Bitumen Research Center (ABRC), Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

²Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

³Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: Investigating the performance of bitumen restored by recycling agents in maintaining or destroying the properties and characteristics of bitumen in the next period of pavement service is completely limited. The aim of this research was to evaluate the immediate and long-term effect of a naphthenic recycling agent in restoring the properties of aged bitumen. In this research, bitumen separation and infrared spectroscopy experiments to investigate the chemical properties of bitumen samples, Penetration, Softening Point, Rotational Viscometer, Multiple Stress Creep Recovery, and Linear Amplitude Sweep were used to evaluate the physical and rheological properties of bitumen samples. To evaluate the long-term performance of the recycling agent, the restored bitumen was long-term aged by an aging simulation test. The results show that the use of naphthenic recycling agent in the optimal amount has restored the chemical, physical and rheological properties of aged bitumen to the base bitumen level. The naphthenic recycling agent results in a 38% reduction in the CI of aged bitumen, which indicates that the aged bitumen is softer and its colloidal structure is stable. It also reduces the rutting resistance of aged bitumen to the level of base bitumen. The limited increase in CI due to aging in restored bitumen indicates that the naphthenic recycling agent has performed well in maintaining the stability of the colloidal structure of bitumen in the long term. The results also show that the use of naphthenic recycling agent improves the fatigue performance of restored bitumen in the long term compared to base bitumen.

Review History:

Received: Jun. 19, 2021

Revised: Oct. 18, 2021

Accepted: Dec. 09, 2021

Available Online: Dec. 20, 2021

Keywords:

Aging

Long-term performance

Recycling agent

Rutting

Fatigue

1- Introduction

Bitumen is exposed to various damages (such as aging) during the asphalt processing and paving service [1]. Bitumen aging is one of the most important problems related to the use of bitumen in road works [2]. Therefore, understanding the effect of bitumen aging in the design of asphalt mixtures is important to achieve proper longevity and durability [3]. During the aging process, the chemical properties of bitumen change, and the ratio of asphaltene to maltene increases. This change increases the viscosity and decreases the ductility of bitumen and the resistance of bitumen to thermal cracking, which reduces the durability of the pavement [4]. There are various methods to restore the properties of aged bitumen, such as the use of softer bitumen, recycling agents, polymers, etc. [5]. Haghshenas et al. [6] described the chemical properties of various recycling agents. The results showed that aromatic extracts are similar in chemical composition to fresh bitumen.

The chemical nature of Triglycerides/Fatty acids and tall oils may increase the moisture sensitivity and the rate of bitumen degradation. Also, the high oxygen content in these materials reduces the long-term performance of bitumen. The FTIR spectra of aromatic extracts, paraffinic oils, and naphthenic oils are similar to those of fresh bitumen. Mohammadafzali et al. [7] found that the effect of rejuvenators on the long-term performance of bitumens depends on the type and amount of rejuvenators.

Many studies have investigated the immediate effect of recycling agents on the properties of aged bitumen. However, understanding how the restored bitumens behave and characterize them in the next period of service is quite limited. Therefore, the aim of this study was to evaluate the immediate and long-term effect of a naphthenic recycling agent in restoring the properties of aged bitumen.

*Corresponding author's email: h.ziari@iust.ac.ir



2- Methodology

In this study, 60/70 penetration grade was used as the base bitumen. Aged bitumen was obtained by performing an aging simulator test (RTFO+PAV) on base bitumen in the laboratory. To restore the properties of aged bitumen, the naphthenic recycling agent has been used. To evaluate the long-term performance of the recycling agent, the restored bitumen was subjected to long-term aging using the aging simulator (RTFO + PAV) test.

In this study, the SARA fractionation test, according to ASTM D4124 was used to evaluate the stability of the colloidal structure of bitumen. FTIR test was used to investigate the chemical aging of bitumen by a carbonyl (C = O) and sulfoxide (S = O) indices. To evaluate the physical properties of bitumen samples, Penetration, softening point, and RV tests were used according to ASTM D5, ASTM D36, and ASTM D4402 standards, respectively. MSCR test according to AASHTO TP70 was performed to evaluate the high-temperature performance of bitumen samples at 64 °C. LAS test according to AASHTO TP101 was performed to measure bitumen fatigue resistance at 20 °C.

3- Results and Discussion

According to the results of the SARA test (Figure 1), the use of the naphthenic recycling agent has reduced the CI of PB bitumen by 38%, which indicates the stabilization of the colloidal structure and the restoration of the chemical composition of aged bitumen (PB). Evaluation of the long-term performance of bitumen samples shows that restored bitumen after aging has a stable colloidal structure and has better resistance to aging than base bitumen.

According to the results of the FTIR test (Figure 2), a comparison between PB and R_N shows that the presence of the naphthenic recycling agent reduces carbonyl and sulfoxide indices and this shows the effect of this agent on the chemical structure of aging bitumen and its anti-aging properties. Also, the carbonyl index of PR_N bitumen is lower than PB, which indicates that this bitumen has less oxidation potential than base bitumen.

According to the results of physical tests, the naphthenic recycling agent restored the physical properties of the aged bitumen to the base bitumen level, which indicates the high restoration properties of this substance.

According to the results of the MSCR test (Figures 3 and 4), adding the naphthenic recycling agent to the aged bitumen increased the J_{nr} value of R_N to level B. Therefore, it is observed that this agent results in the same rutting performance as the base bitumen. Investigation of the long-term performance of the recycling agent shows that the value of the R has increased with the aging of the restored bitumen.

According to the results of the LAS test (Figure 5), the use of the naphthenic recycling agent increases the fatigue life of aged bitumen to the base bitumen level. The results also show that the restored bitumen has better performance in the long-term than the base bitumen.

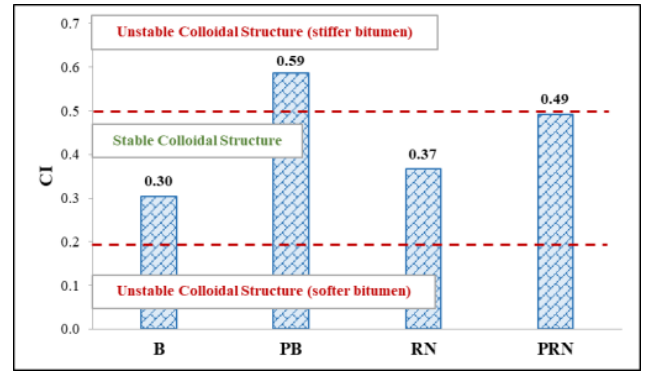


Fig. 1. Colloidal index of different bitumen samples

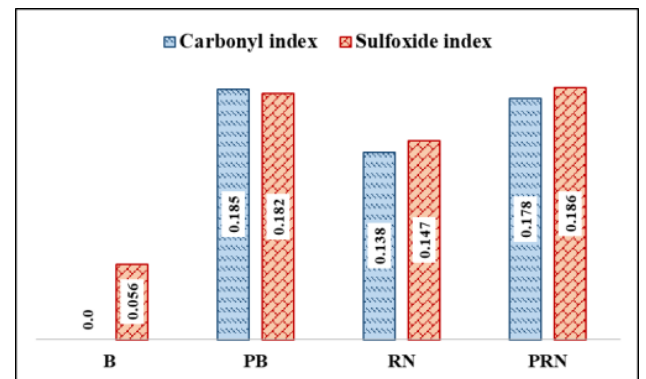


Fig. 2. Carbonyl and sulfoxide index for different types of bitumen samples

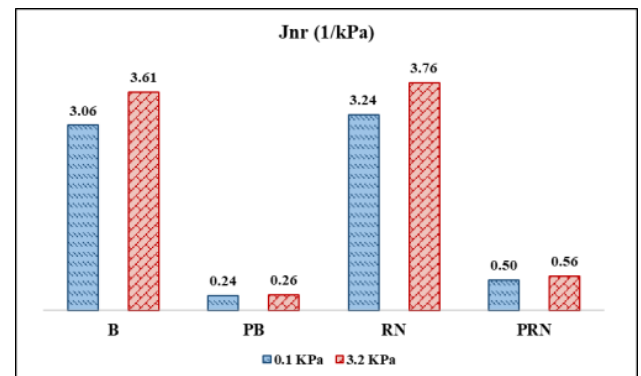


Fig. 3. Non-recoverable creep values (Jnr)

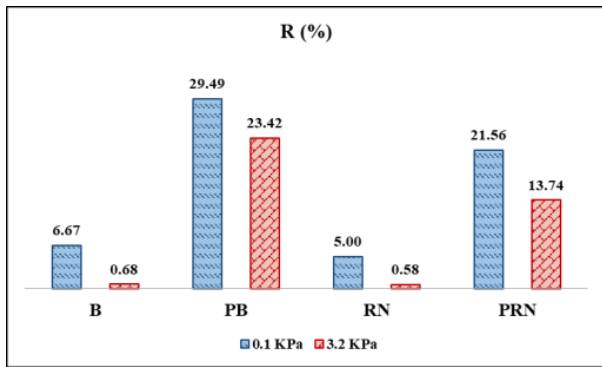


Fig. 4. Elastic recovery percentage values

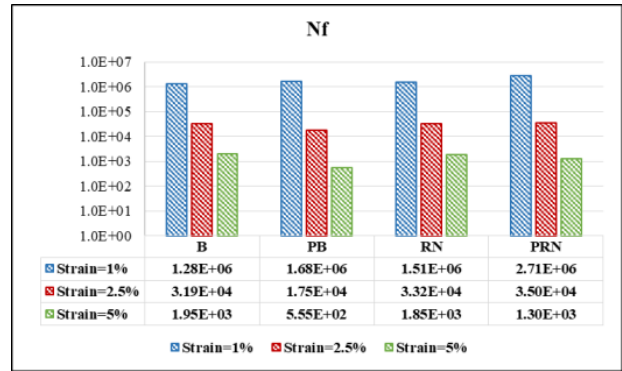


Fig. 5. Fatigue life diagram of bitumen samples at strain levels of 1, 2.5, and 5%

4- Conclusions

The most important results obtained in this study include the following:

The naphthenic recycling agent has led to the restoration of the chemical composition of aged bitumen, which is almost similar to base bitumen. The results indicate better resistance of restored bitumen than base bitumen against aging.

The carbonyl index of restored bitumen increased less in the long-term than the base bitumen, which indicates the lower oxidation potential of this bitumen than the base bitumen.

The addition of naphthenic recycling agent to the aged bitumen results in the same rutting performance as the base bitumen.

The bitumen restored by naphthenic recycling agent in the long-term had better fatigue performance than the base bitumen.

References

[1] M. Varaus, T. Koudelka, P. Sperka, Rejuvenator Influence on Aged Binder Material Properties, in: Key Engineering Materials, Trans Tech Publ, 2017, pp. 380-388.
 [2] J.-F. Su, J. Qiu, E. Schlangen, Y.-Y. Wang, Investigation

the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, Construction and Building materials, 74 (2015) 83-92.

[3] G. Xu, H. Wang, Molecular dynamics study of oxidative aging effect on asphalt binder properties, Fuel, 188 (2017) 1-10.
 [4] A. Mansourkhaki, M. Ameri, M. Habibpour, B. Shane Underwood, Chemical composition and rheological characteristics of binders containing RAP and rejuvenator, Journal of Materials in Civil Engineering, 32(4) (2020) 04020026.
 [5] A. Behnood, Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review, Journal of cleaner production, 231 (2019) 171-182.
 [6] H.F. Haghshenas, R. Rea, G. Reinke, D.F. Haghshenas, Chemical Characterization of Recycling Agents, Journal of Materials in Civil Engineering, 32(5) (2020) 06020005.
 [7] M. Mohammadafzali, H. Ali, J.A. Musselman, G.A. Sholar, W.A. Rilko, Aging of rejuvenated asphalt binders, Advances in Materials Science and Engineering, 2017 (2017).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Ziari, S. Bananezhad, M. A. Ziari, Evaluation of the long-term performance of naphthenic recycling agent in restoring the properties of aged bitumen, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 519-522.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20188.7365





ارزیابی عملکرد بلند مدت عامل بازسازی کننده نفتتیک در بازیابی خصوصیات قیر پیر شده

حسن زیاری^{*}، صادق بنازاد، محمد علی زیاری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

کلمات کلیدی:

قیر شدگی
عملکرد بلند مدت
عامل بازسازی کننده
شیار شدگی
خستگی

خلاصه: بررسی عملکرد قیرهای بازیابی شده توسط عوامل بازسازی کننده در حفظ و یا تخریب خواص و ویژگی‌های قیر در دوره بعدی خدمت‌دهی روسازی کاملاً محدود می‌باشد. هدف این تحقیق، ارزیابی تأثیر آبی و بلند مدت عامل بازسازی کننده نفتتیک در برگشت خصوصیات قیر پیر شده می‌باشد. در این تحقیق از آزمایش‌های جداسازی اجزاء قیر و طیف‌سنج مادون قرمز جهت بررسی خصوصیات شیمیایی، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته چرخشی جهت بررسی خصوصیات فیزیکی و آزمایش‌های خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش و جاروب دامنه خطی جهت بررسی خصوصیات رئولوژیکی نمونه‌های قیر استفاده شد. جهت ارزیابی عملکرد بلند مدت عامل بازسازی کننده، قیر بازیابی شده توسط آزمایش شبیه‌ساز پیر شدگی تحت پیر شدگی بلند مدت قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عامل بازسازی کننده نفتتیک در مقدار بهینه باعث بازیابی خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و رئولوژیکی قیر پیر شده تا سطح قیر پایه شده است. عامل بازسازی کننده نفتتیک کاهش ۳۸ درصدی شاخص کلئیدی قیر پیر شده را نتیجه می‌دهد که نشان دهنده نرم‌تر شدن قیر پیر شده و پایداری ساختار کلئیدی آن می‌باشد. همچنین این ماده مقاومت شیار شدگی قیر پیر شده را تا سطح قیر پایه کاهش می‌دهد. افزایش محدود CI ناشی از پیرشدگی در قیر بازیابی شده، بیانگر آن است که عامل بازسازی کننده نفتتیک عملکرد مناسبی در حفظ پایداری ساختار کلئیدی قیر در بلند مدت داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عامل بازسازی کننده نفتتیک باعث بهبود عملکرد خستگی قیر بازیابی شده در بلند مدت نسبت به قیر پایه شده است.

۱- مقدمه

روسازی می‌گردد. بنابراین پس از مدت زمان معینی از خدمت‌دهی روسازی، حذف آن مورد نیاز است [۲]. امروزه استفاده از مصالح آسفالت بازیافتی^۱ (RAP) در ساخت روسازی‌های جدید دارای مزایای مهم اقتصادی و زیست محیطی می‌باشد. با این حال، نگرانی‌هایی در مورد استفاده از مصالح RAP وجود دارد، مانند کیفیت پایین و سفتی این مواد، که بر دوام و خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالت تأثیر می‌گذارد [۶]. همچنین قیر پیر شده موجود در مصالح RAP باعث کاهش ویژگی‌های عملکردی (عمدتاً خستگی و ترک خوردگی برودتی) مخلوط‌های آسفالت حاصل می‌شود [۷]. روش‌های مختلفی برای بازیابی خصوصیات قیر پیر شده و بهبود رفتار خستگی و ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی وجود دارد، مانند استفاده از قیر نرم‌تر، عوامل بازسازی کننده، پلیمرها و غیره [۸]. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی عوامل بازسازی کننده، اثر بخشی و پراکندگی

قیر، به عنوان یکی از مواد پایه در ساخت مخلوط آسفالتی، نقش مهمی در روسازی‌های آسفالتی و عملکرد آن‌ها دارد [۱]. عملکرد قیر به مقدار و خصوصیات مواد شیمیایی تشکیل دهنده آن بستگی دارد [۲]. قیر در طول فرآیند پردازش آسفالت و خدمت‌دهی روسازی در معرض خرابی‌های متعددی (مانند پیر شدگی) قرار دارد [۳]. پیر شدگی قیر یکی از مهم‌ترین مشکلات مرتبط با استفاده از قیر در کارهای جاده‌ای است [۴]. بنابراین، درک اثر پیر شدگی قیر در طراحی مخلوط آسفالتی برای دستیابی به طول عمر و دوام مناسب مهم است [۵]. در طی فرآیند پیر شدگی خصوصیات شیمیایی قیر تغییر کرده و نسبت آسفالتن به مالتن آن افزایش می‌یابد. این تغییر باعث افزایش ویسکوزیته (سختی) و کاهش شکل‌پذیری قیر و همچنین کاهش مقاومت قیر در برابر ترک خوردگی برودتی شده، که منجر به کاهش دوام

1 Reclaimed Asphalt Pavement

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.ziari@iust.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



کننده باشد با این حال، سطح اکسیژن در این روغن‌ها کم بود و این مواد حاوی پیوندهای شیمیایی حساس به رطوبت و پیر شدگی نبودند. طیف‌های FTIR عوامل بازسازی کننده آروماتیک، پارافینیک و نفتنیک مشابه طیف قیر تازه می‌باشد. علی^۸ و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۶ توانایی ۵ نوع جوان‌ساز مختلف (روغن نفتنیک، روغن پارافینیک، عصاره آروماتیک، روغن چوب و اولئیک اسید) را در بازیابی درجه عملکردی دمای بالا و پایین قیر پیر شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که روغن پارافینیک در کاهش درجه عملکردی دمای بالا قیر پیر شده، بهترین عملکرد را داشت و پس از آن عصاره‌ی آروماتیک، روغن چوب، روغن نفتنیک و اولئیک اسید به ترتیب عملکرد بهتری داشتند. روغن پارافینیک همچنین در کاهش درجه عملکرد دمای پایین عملکرد بهتری داشت و به دنبال آن اولئیک اسید، روغن نفتنیک، روغن چوب و در نهایت روغن آروماتیک به ترتیب عملکرد بهتری داشتند. یوان^۹ و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۹ تأثیر روغن نفتنیک بر روی قیر اصلاح شده با SBS را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که روغن نفتنیک استحکام، حساسیت برودتی و خاصیت ضد پیری قیر اصلاح شده با SBS را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که روغن نفتنیک باعث توزیع یکنواخت SBS در قیر می‌شود. ژانگ^{۱۰} و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۱۹ عملکرد روغن زیستی^{۱۱} تولید شده از خاک اره را به عنوان یک عامل جوان‌ساز قیر پیر شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که جوان‌ساز روغن زیستی می‌تواند مقاومت در برابر ترک خوردگی دمای پایین قیرهای پیر شده را به سطح قیر تازه یا حتی بهتر از آن بازگرداند. ژانگ و همکارانش از سه شاخص ساختاری (کربونیل، آروماتیک و سولفوکسید) برای ارزیابی درجه پیر شدگی و جوان‌سازی قیرهای بازیابی شده توسط جوان‌ساز زیستی استفاده کردند. تغییرات در گروه‌های عملکردی نشان دهنده‌ی واکنش‌های شیمیایی در طی فرآیند پیر شدگی قیر و واکنش‌های بین قیر و جوان‌ساز می‌باشد. نتایج نشان داد که شاخص سولفوکسید و شاخص آروماتیک با افزایش مقدار جوان‌ساز زیستی کاهش می‌یابد. با این حال، روند ثابتی برای تغییرات در شاخص کربونیل وجود ندارد. نایاک^{۱۲} و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۱۷ تأثیر ترکیبات روغن‌های مختلف مانند روغن کرچک و... را بر عملکرد قیر بازیافتی از مصالح RAP بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزودن ۱۰ درصد از این جوان‌ساز، مقاومت شیار شدگی شبیه به قیر اولیه

یکنواخت آن‌ها را در قیر پیر شده کنترل می‌کنند. این نشان می‌دهد که انواع مختلف عوامل بازسازی کننده با مکانیسم‌های مختلف عمل می‌کنند [۹]. عوامل بازسازی کننده برای بازیابی ترکیب قیر پیر شده و پراکنده کردن آسفالت‌ها، باید حاوی مقدار زیادی از ترکیبات آروماتیک و مقدار کمی از ترکیبات اشباع باشند [۱۰]. یو^۱ و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۴ قابلیت جوان‌سازی قیر پیر شده را توسط دو نوع جوان‌ساز (عصاره آروماتیک^۲ و روغن گیاهی پسماند) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با مقایسه عملکرد هر یک از جوان‌سازها بر روی قیرهای مختلف دریافتند که اثر جوان‌سازی هم به نوع و درصد جوان‌ساز و هم به منبع قیر بستگی دارد.

مرکز ملی فناوری آسفالت (NCAT) عوامل بازسازی کننده را بر اساس منشأ آن‌ها به پنج گروه عمده طبقه‌بندی می‌کند: (۱) روغن پارافینیک^۳، (۲) عصاره آروماتیک، (۳) روغن نفتنیک^۴، (۴) تری گلیسیرید / اسیدهای چرب^۵ و (۵) روغن چوب^۶ [۱۲]. روغن‌های پارافینیک، روغن‌های روانکاری شده دوباره تصفیه شده هستند. مقادیر زیاد هیدروکربن‌های آروماتیک و غلظت کم آسفالت‌ها روغن پارافینیک را به عنوان جوان‌سازی جذاب تبدیل می‌کند. عصاره‌های آروماتیک، فرآورده‌های نفتی تصفیه شده‌ای هستند که ترکیب شیمیایی آن‌ها حاوی حلقه‌های آروماتیک قطبی است که سرطان‌زا می‌باشند. روغن‌های نفتنیک، هیدروکربن‌های طراحی شده برای اصلاح قیر می‌باشند [۸].

حقوق‌شناس و همکارانش [۹] در سال ۲۰۲۰ به کمک آزمایش‌های مختلف شیمیایی (FTIR، SARA و آنالیز عنصری^۷) به توصیف خصوصیات شیمیایی عوامل بازسازی کننده مختلف در طبقه‌بندی NCAT پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که عصاره‌های آروماتیک از نظر ترکیب شیمیایی مشابه قیر تازه هستند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که ماهیت شیمیایی تری گلیسیریدها / اسیدهای چرب و روغن‌های چوب ممکن است حساسیت رطوبتی را افزایش داده و باعث افزایش سرعت تخریب قیر شوند. محتوای اکسیژن بالای تری گلیسیریدها / اسیدهای چرب و روغن‌های چوب ممکن است باعث کاهش عملکرد بلند مدت قیر و مخلوط اصلاح شده توسط این مواد شود. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش SARA نشان داد که سازگاری بین روغن‌های پارافینیک و نفتنیک با قیر ممکن است نگران

8 Ali
9 Yuan
10 Zhang
11 Bio-oil
12 Nayak

1 Yu
2 Aromatic extract
3 Paraffinic oils
4 Naphthenic oils
5 Triglycerides/Fatty acids
6 Tall Oil
7 Elemental analysis

قیر پیر شده با قیر تازه و ارزیابی تاثیر آنی و بلند مدت عامل بازسازی کننده نفتنیک در بازیابی خصوصیات قیر پیر شده می‌باشد. در این تحقیق، قیر پیر شده از طریق انجام آزمایش شبیه‌ساز پیر شدگی (RTFO+PAV) بر روی قیر پایه تهیه شد. سپس از عامل بازسازی کننده نفتنیک در مقدار بهینه جهت بازیابی خصوصیات قیر پیر شده استفاده شد. جهت ارزیابی عملکرد بلند مدت عامل بازسازی کننده، قیر بازیابی شده در آزمایشگاه به کمک آزمایش شبیه‌ساز پیر شدگی (RTFO+PAV) تحت پیر شدگی بلند مدت قرار گرفت. در این تحقیق برای ارزیابی خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و رئولوژیکی مخلوط‌های قیر، آزمایش‌های جداسازی اجزاء قیر^۲ (SARA)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^۳ (FTIR)، درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته چرخشی^۴ (RV)، آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش^۵ (MSCR) و جاروب دامنه خطی^۶ (LAS) استفاده شد.

۲- مصالح مورد استفاده

۲-۱- قیر پایه

در این تحقیق قیر ۶۰/۷۰ به عنوان قیر پایه انتخاب شد زیرا قیر رایجی است که برای روسازی آسفالتی در ایران استفاده می‌شود. این قیر از شرکت پالایش نفت جی تهیه شده است. مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی قیر ۶۰/۷۰ در جدول ۱، بیان شده است.

۲-۲- قیر پیر شده

قیر پیر شده با انجام آزمایش قشر نازک دوار قیر^۷ (RTFO) و آزمایش محفظه تسریع پیری تحت فشار^۸ (PAV) بر روی قیر پایه در آزمایشگاه به دست آمد. از آزمایش RTFO و PAV می‌توان برای شبیه‌سازی پیر شدگی قیر در هنگام ساخت و خدمت‌دهی روسازی از ۵ تا ۱۰ سال استفاده کرد. آزمایش RTFO طبق استاندارد ASTM D2872 در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۵ دقیقه با نرخ جریان هوا ۴۰۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه انجام شد [۲۱]. آزمایش PAV نیز طبق استاندارد ASTM D6521 در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، تحت فشار ۲/۱ مگاپاسکال و به مدت ۲۰ ساعت انجام شد [۲۲]. مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی قیر پیر شده در

و عمر خستگی بالاتری نسبت به قیر اولیه به دست آمد. کائو^۱ و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۱۸ تاثیر روغن گیاهی پسماند را به عنوان جوان‌ساز بر خواص رئولوژیکی و شیمیایی قیر مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد روغن گیاهی پسماند، کارایی و مقاومت در برابر خستگی قیر پیر شده افزایش یافته است. قیر جوان شده با ۵ درصد روغن گیاهی پسماند، عمر خستگی مشابه قیر تازه پیدا کرد و با افزایش درصد جوان‌ساز، عمر خستگی قیر نیز افزایش یافته است. منصور خاکی و همکارانش [۱۸] در سال ۲۰۱۹ تاثیر سه نوع اصلاح کننده مختلف (قیر نرم‌تر، جوان‌ساز rapoil و پلیمر ضایعاتی اصلاح کننده قیر) را بر خصوصیات فیزیکی - رئولوژیکی و شیمیایی مخلوط‌های قیر حاوی قیر پیر شده بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عامل جوان‌ساز و قیر نرم‌تر به ترتیب بیشترین تاثیر را در بهبود خصوصیات فیزیکی - رئولوژیکی و شیمیایی مخلوط‌های قیر حاوی قیر پیر شده داشتند. محمد افضلی و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۱۷ عملکرد بلند مدت دو جوان‌ساز مختلف را بر خصوصیات رئولوژیکی قیرهای پیر شده ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که تاثیر جوان‌سازها بر عملکرد بلند مدت قیرها به نوع و مقدار جوان‌سازها بستگی دارد. حق‌شناس و همکارانش [۲۰] در سال ۲۰۱۸ به بررسی خصوصیات بلند مدت دو نوع عامل جوان کننده (عامل جوان‌ساز بر پایه گیاهی و نفتی) در قیرهای اصلاح شده پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که اثرات جوان‌سازها در بازیابی و ترمیم قیر پیر شده کاملاً وابسته به ترکیبات شیمیایی مختلف جوان‌سازها و فعل و انفعالات شیمیایی - مولکولی آن‌ها با قیر است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که عامل جوان‌ساز بر پایه نفتی با حفظ ترکیبات شیمیایی و حفظ پایداری، عملکرد قیر را در دوره بعدی خدمت‌دهی بهبود می‌بخشد.

۱-۱- هدف و روش تحقیق

بسیاری از مطالعات به بررسی تاثیر آنی عوامل بازسازی کننده بر خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و رئولوژیکی قیر پیر شده پرداخته‌اند. با این حال، درک مهم چگونگی رفتار قیرهای بازیابی شده و بررسی خصوصیات آن‌ها در دور بعدی خدمت‌دهی، کاملاً محدود است. در نتیجه بررسی و مقایسه تاثیر آنی و بلند مدت عوامل بازسازی کننده مختلف بر خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و رئولوژیکی قیرهای پیر شده، ما را در رسیدن به این هدف کمک می‌کند.

هدف این تحقیق، مقایسه خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و رئولوژیکی

2 Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions

3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

4 Rotational Viscometer

5 Multiple Stress Creep Recovery

6 Linear Amplitude Sweep

7 Rolling Thin Film Oven

8 Pressure Aging Vessel

جدول ۱. خصوصیات قیر پایه و قیر پیر شده

Table 1. Characteristics of base bitumen and aged bitumen

نتیجه آزمایش		استاندارد	شرح آزمایش
قیر پایه ۶۰/۷۰	قیر پیر شده		
۲۸	۶۵	ASTM D5	درجه نفوذپذیری (dmm)
۶۳/۵	۴۹/۸	ASTM D36	نقطه نرمی قیر (°C)
۰/۷۹۰	۰/۳۳۸	ASTM D4402	ویسکوزیته چرخشی در دمای ۱۳۵ °C (Pa.s)
۳۴۲	۳۳۲	ASTM D92	نقطه اشتعال (°C)
۱۴	۱۵۰	ASTM D113	کشش پذیری در دمای ۲۵ °C (cm)

جدول ۲. مشخصات عوامل بازسازی کننده

Table 2. Characteristics of recycling agent

مقدار	خصوصیات
۰/۰۹	ویسکوزیته چرخشی در دمای ۱۳۵ °C (Pa.s)
۵۷۵	ویسکوزیته در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس (cst)
۰/۹	وزن مخصوص
۳۲۰	نقطه اشتعال (°C)
سیاه	رنگ
ندارد	حلالیت در آب
۲/۲	آسفالتن ها (%)
۱۱/۸	رزین ها (%)
۷۹/۸	آروماتیک ها (%)
۶/۲	ترکیبات اشباع (%)

اجزاء شیمیایی
تشکیل دهنده

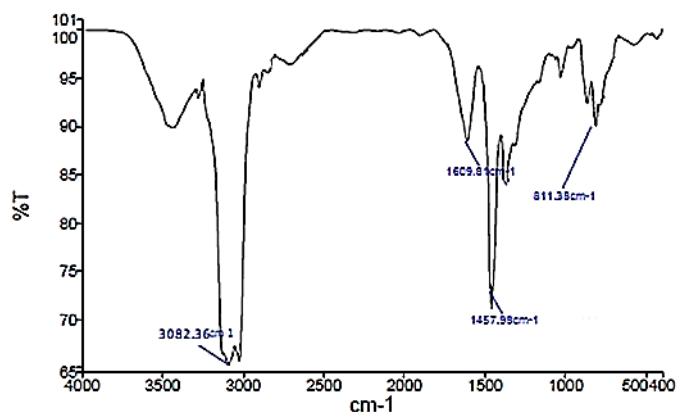
جدول ۱، بیان شده است. منبع قابل اعتماد و قیمت نسبتاً پایینی هستند. برخی از مزایای شناخته شده روغن های نفتتیک قابلیت پرداخت بالا، عملکرد رضایت بخش در دمای پایین، سازگاری عالی با رزین و پلیمرها، نقطه ریزش پایین تر نسبت به روغن های پارافینیک به دلیل نداشتن واکس، خاصیت حل کنندگی بهتر نسبت به روغن های پارافینیک، ویسکوزیته پایین تر نسبت به روغن های پارافینیک و مقاومت بالا در برابر اکسید شدن به علت ساختار شیمیایی اشباع آن ها می باشد [۲۳ و ۱۴]. مشخصات عامل بازسازی کننده در جدول ۲، بیان شده است. همچنین طیف FTIR این عامل بازسازی کننده در شکل ۱ نشان داده شده است.

طیف مشخصه‌ی ترکیبات نفتتیک را می توان بر اساس وجود ارتعاش

جدول ۱، بیان شده است.

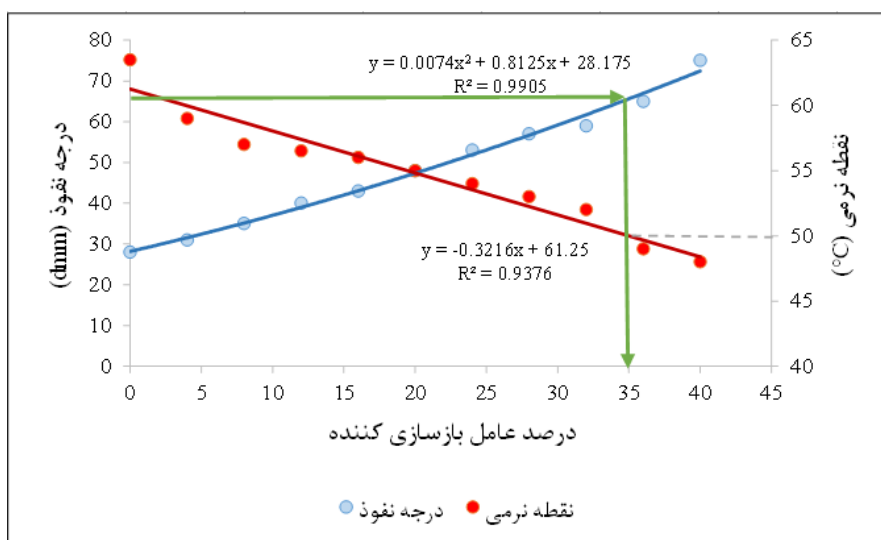
۲-۳ عامل بازسازی کننده

در این تحقیق به منظور بازیابی خصوصیات قیر پیر شده از عامل بازسازی کننده نفتتیک، محصول شرکت پالایش نفت جی استفاده شده است. در این هیدروکربن ها پیوندهای کربن-کربن یگانه است اما نحوه اتصال اتم های کربن طوری است که تشکیل حلقه های اشباع می دهند. بنابراین، نسبتاً پایدار هستند، سمی نبوده، دارای چگالی و ویسکوزیته بالایی می باشند و برخی خواص روغن های آروماتیک و پارافینیک زنجیره ای مستقیم را دارا می باشند. روغن های نفتتیک با توجه به اینکه از نفت خام به دست می آیند دارای



شکل ۱. طیف FTIR عامل بازسازی کننده نفتتیک

Fig. 1. FTIR spectrum of naphthenic recycling agent



شکل ۲. منحنی تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی مخلوط قیر پیر شده حاوی عامل بازسازی کننده نفتتیک

Fig. 2. Chart of changes of the penetration and softening point of aged bitumen mixture containing naphthenic recycling agent

جوان‌سازی که بتواند درجه نفوذ قیر پیر شده را به درجه نفوذ قیر کنترل برساند، با درصد جوان‌سازی که درجه عملکردی قیر پیر شده را به درجه عملکردی قیر کنترل می‌رساند، هم‌خوانی خوبی دارد. همچنین در مطالعات دیگری همچون منصورخاکی و همکارانش [۲] در سال ۲۰۲۰ از آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی جهت تعیین مقدار بهینه استفاده شده است. بنابراین در این تحقیق برای تعیین مقدار بهینه عامل بازسازی کننده، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تغییرات در درجه نفوذ و نقطه نرمی به ازاء درصدهای مختلف عامل بازسازی کننده تعیین شد. بر اساس معادله رگرسیون ارائه شده در شکل ۲، مشخص شد که برای دستیابی به درجه نفوذ

کششی C-H در عدد موج ۲۹۹۰-۳۱۰۰، ارتعاش خمشی C-H در عدد موج ۱۴۰۰-۱۴۵۰ و ارتعاش ضعیف کششی C-C در عدد موج ۸۰۰-۱۲۰۰ تشخیص داد [۲۴]. بنابراین همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود عامل بازسازی کننده استفاده شده در این تحقیق دارای ساختار شیمیایی نفتتیک می‌باشد.

۲-۴- تعیین مقدار بهینه

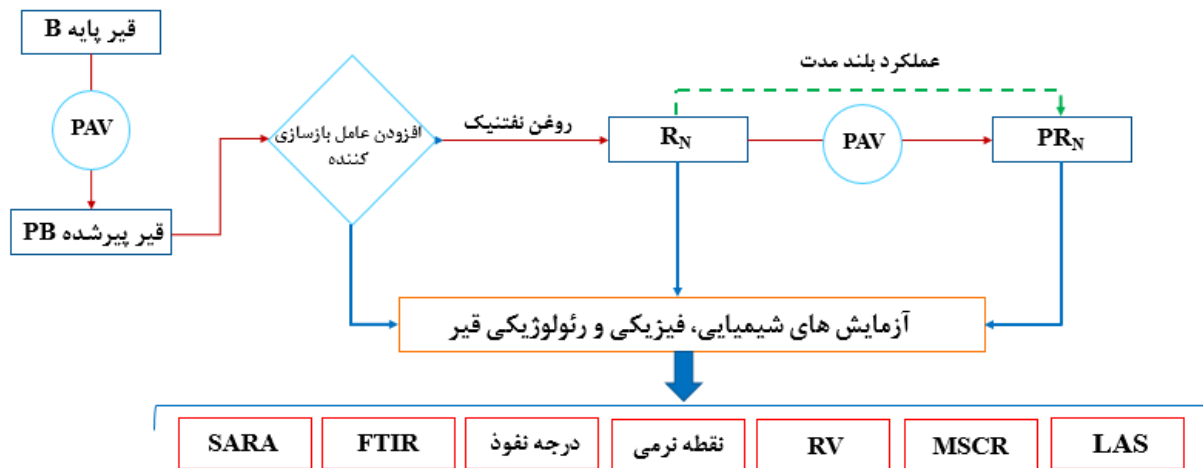
زائومانیس^۱ و همکارانش [۲۵] در سال ۲۰۱۵ دریافتند که درصد

1 Zaumanis

جدول ۳. مشخصات نمونه‌های قیر

Table 3. Specifications of bitumen samples

شناسه (ID)	نمونه قیر
B	قیر پایه ۶۰/۷۰
PB	قیر ۶۰/۷۰ پیر شده (RTFO+PAV)
R _N	قیر پیر شده + عامل بازسازی کننده نفتنیک
PR _N	قیر حاصل از انجام تست پیر شدگی روی نمونه R _N



شکل ۳. فلوچارت مراحل تحقیق

Fig. 3. Flowchart of research steps

۳- برنامه انجام آزمایش‌ها

۳-۱- آزمایش استاندارد جداسازی قیر به چهار بخش (SARA)

آزمایش جداسازی SARA طبق استاندارد ASTM D4124، برای به دست آوردن درصد اجزاء شیمیایی مختلف موجود در قیر استفاده می‌شود. در این روش قیر به چهار جزء آسفالتن، ترکیبات اشباع، آروماتیک و رزین تفکیک می‌شود. طبق استاندارد ابتدا با اضافه کردن هپتان نرمال به قیر، آسفالتن به صورت رسوب جامد سیاه رنگی جدا می‌شود. در مرحله بعد محلول بدون آسفالتن باقی‌مانده (مالتن) بر روی ستون کروماتوگرافی اضافه می‌شود. سپس حلال‌های مختلف به ترتیب قطبیت شامل هپتان نرمال، تولوئن، متانول و تری کلرواتیلن به ستون اضافه می‌گردد. اولین جزء خروجی از ستون که کاملاً شفاف و بی رنگ است، جزء اشباع می‌باشد. جزء دوم که رنگ آن از زرد تا قرمز پررنگ متغیر است، آروماتیک نامیده می‌شود. پس از آن جزء سوم که به رنگ سیاه است و آروماتیک قطبی (رزین) نامیده می‌شود،

هدف (۶۵ دهم میلی‌متر)، مقدار بهینه عامل بازسازی کننده ۳۵ درصد جرم قیر پیر شده، است.

۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های قیر

برای اضافه کردن عامل بازسازی کننده به قیر پیر شده، قیر پیر شده به مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد گرم شده و سپس با عامل بازسازی کننده مورد نظر به مدت ده دقیقه مخلوط می‌شود [۱۸]. مخلوط قیر بلافاصله به مدت ۱۰ دقیقه دوباره گرم شده تا حباب‌های هوای درون نمونه از بین برود. در ادامه، به منظور ارزیابی عملکرد بلند مدت عامل بازسازی کننده، نمونه قیر بازیابی شده با استفاده از آزمایش شبیه‌ساز پیر شدگی (RTFO+PAV) تحت پیر شدگی قرار می‌گیرد. مشخصات نمونه‌های قیر و نام اختصاری آن‌ها در جدول ۳ بیان شده است. همچنین فلوچارت مراحل تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

مقایسه‌ای فراهم کند. شاخص‌های ساختاری مطابق روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند [۱۰]:

$$\text{Carbonyl index } (C=O) = \frac{A_{1700}}{A_{1460} + A_{1375}} \quad (2)$$

$$CI = \frac{X_{\text{Asphaltene}} + X_{\text{Saturate}}}{X_{\text{Resin}} + X_{\text{Aromatic}}} \quad (3)$$

که در آن A_1 مساحت سطح زیر طیف FTIR در عدد موج i است.

۳-۳- آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی

آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی بر روی نمونه‌های قیر جهت ارزیابی خصوصیات فیزیکی آن‌ها مطابق با استانداردهای ASTM D5، ASTM D36 انجام شد [۲۹ و ۲۸].

۳-۴- آزمایش ویسکوزیته چرخشی (RV)

آزمایش ویسکوزیته چرخشی طبق استاندارد ASTM D4402، جهت تعیین ویسکوزیته قیر استفاده می‌شود. در این آزمایش تعیین ویسکوزیته قیر از طریق اندازه‌گیری گشتاور مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن سرعت دورانی یک سیلندر استوانه‌ای غوطه‌ور در یک نمونه قیر در دمای ثابت انجام می‌شود [۳۰]. در این تحقیق آزمایش RV در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

۳-۵- آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش (MSCR)

آزمایش MSCR طبق استاندارد AASHTO TP70 جهت تعیین تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر در دماهای بالای عملکردی قیر بر روی نمونه‌های قیر پیر شده RTFO انجام می‌گردد. این آزمایش توسط دستگاه DSR و بر روی نمونه‌های قیر با قطر ۲۵ میلی‌متر و با ضخامت ۱ میلی‌متر در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. در این آزمایش بار ۱ ثانیه بر نمونه اعمال و ۹ ثانیه استراحت داده می‌شود. ابتدا ۱۰ سیکل بارگذاری تحت بار برشی ۰/۱ kPa بر نمونه وارد و سپس بار برشی kPa ۳/۲ برای ۱۰ سیکل دیگر بر نمونه اعمال می‌شود [۳۲ و ۳۱]. پارامترهای آزمایش MSCR شامل خزش‌پذیری برگشت‌ناپذیر (J_{nr}) و درصد بازیابی (R) طبق روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند [۲].

شسته شده و از ستون خارج می‌گردد. هر یک از این سه جزء در بشرهای متفاوت جمع‌آوری شده و پس از تبخیر حلال آن‌ها، وزن هر جزء مشخص می‌شود [۲۶].

تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی و تغییرات ساختاری قیر بسیار پیچیده است. شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی نسبت اجزای شیمیایی قیر معرفی شده است. در سیستم کلئیدی قیر، از شاخص کلئیدی برای توصیف پایداری ساختار قیر استفاده می‌شود. شاخص کلئیدی به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۲۷]:

$$\text{Sulfoxide index } (S=O) = \frac{A_{1030}}{A_{1460} + A_{1375}} \quad (1)$$

که در آن X_1 درصد هر جزء شیمیایی قیر است.

این شاخص به عنوان نسبت مجموع آسفالتن و ترکیبات اشباع (بخش‌های لخته شده) به مجموع بخش‌های آروماتیک و رزین (پراکنده کننده‌ها) محاسبه می‌شود. شرط پایداری ساختار کلئیدی قیر در این شاخص، داشتن CI بین ۰/۲ تا ۰/۵ می‌باشد. اگر CI بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد ساختار کلئیدی ناپایدار (ساختار سخت) و اگر CI کمتر از ۰/۲ باشد ساختار کلئیدی ناپایدار (ساختار نرم) برای قیر در نظر گرفته می‌شود [۲۷].

۳-۲- آزمایش طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

از طیف‌سنجی FTIR غالباً به عنوان ابزاری برای تعیین کمیت غلظت نسبی گروه‌های عامل شیمیایی موجود در قیر استفاده شده است. FTIR درک معقولی از روند پیر شدگی شیمیایی و فعل و انفعالات بین مواد افزودنی (مانند عوامل بازسازی کننده) و قیر را فراهم می‌کند. تحقیقات نشان داده است که می‌توان میزان جذب و غلظت نسبی دو گروه عاملی کربونیل (C=O) و سولفوکسید (S=O) را به عنوان شاخص‌های پیر شدگی شیمیایی اندازه‌گیری و استفاده کرد. تشکیل این گروه‌های عاملی قطبی همراه با افزایش سطح مولکول‌های بزرگ / سنگین به دلیل ارتباط مولکولی منجر به افزایش ویسکوزیته و افزایش نیروهای بین مولکولی بین اجزاء قیر می‌شود [۲۰]. در این تحقیق مساحت سطح زیر هر عدد موج مشخصه (مربوط به گروه‌های عاملی) برای تجزیه و تحلیل نتایج FTIR مرتبط با پیر شدگی و بازیابی قیر استفاده شد. جذب نسبی هر گروه عاملی منجر به شاخص‌های ساختاری می‌شود که می‌تواند اطلاعات مفیدی را برای اهداف

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N \left[\pi \gamma_0^2 (C_i - C_{i-1}) \right]^{1+\alpha} (t_i - t_{i-1})^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (۶)$$

$$J_{nr} = \frac{\varepsilon_{nr}}{\sigma} \quad (۴)$$

$$\%R = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t} \quad (۵)$$

که در آن γ_0 کرنش برشی در هر زمان بر حسب درصد، t زمان بر حسب ثانیه و $C(t)$ نسبت مقدار G^* در زمان t به مقدار G^* اولیه است. در نهایت عمر خستگی قیر طبق رابطه γ محاسبه می‌شود [۳۳].

که در آن ε_{nr} کرنش برگشت ناپذیر، ε_t کرنش برگشت‌پذیر، ε_r کرنش کل و σ سطح تنش است.

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

که در آن N_f عمر خستگی قیر، γ_{max} کرنش برشی حداکثر و مقادیر A و B ثابت‌های مدل هستند.

۳-۶- آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)

آزمایش جاروب دامنه خطی طبق استاندارد AASHTO TP101 جهت اندازه‌گیری مقاومت خستگی قیر را در برابر بارگذاری سیکلی برشی انجام می‌شود. آزمایش LAS توسط دستگاه DSR و بر روی نمونه‌های قیر پیر شده (RTFO+PAV) با قطر ۸ میلی‌متر در دمای متوسط ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. آزمایش LAS شامل دو مرحله می‌باشد:

۴- نتایج و بحث ۴-۱- آزمایش SARA

آزمایش SARA برای به دست آوردن اجزاء و ترکیبات شیمیایی نمونه‌های قیر و بررسی تاثیر عامل بازسازی کننده بر ترکیب شیمیایی قیر پیر شده، طبق استاندارد ASTM D4124 انجام شد.

در طول پروسه پیر شدگی قیر به علت حضور اکسیژن یک سری تبدیل‌ها مانند تبدیل آروماتیک‌ها به رزین و سپس تبدیل رزین به آسفالتن صورت می‌گیرد. در طی این فرآیند نسبت مالتن به آسفالتن کاهش پیدا کرده و بنابراین مقدار کمی مالتن برای معلق و پخش کردن آسفالتن باقی می‌ماند. این عامل باعث افزایش ویسکوزیته، کاهش شکل‌پذیری و افزایش مقدار CI می‌شود [۲۰]. شکل ۴ اجزاء شیمیایی تفکیک شده قیر بعد از آزمایش SARA را برای نمونه‌های مختلف در این تحقیق نشان می‌دهد. همچنین شاخص کلئیدی برای نمونه‌های مختلف قیر در شکل ۵ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۴، مقایسه قیر B و PB نشان می‌دهد که پیر شدگی باعث افزایش نسبت آسفالتن به مالتن در قیر می‌شود. قیر PB بالاترین محتوای آسفالتن را دارد. استفاده از عامل بازسازی کننده باعث کاهش درصد آسفالتن و افزایش محتوای مالتن نسبت به قیر PB شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عامل بازسازی کننده نفتتیک در درصد بهینه توانایی بازبایی ترکیب شیمیایی قیر پیر شده را داشته است. مقایسه نمونه قیر PR_N و قیر PB نشان می‌دهد که نسبت آسفالتن به مالتن قیر بازبایی شده توسط عوامل

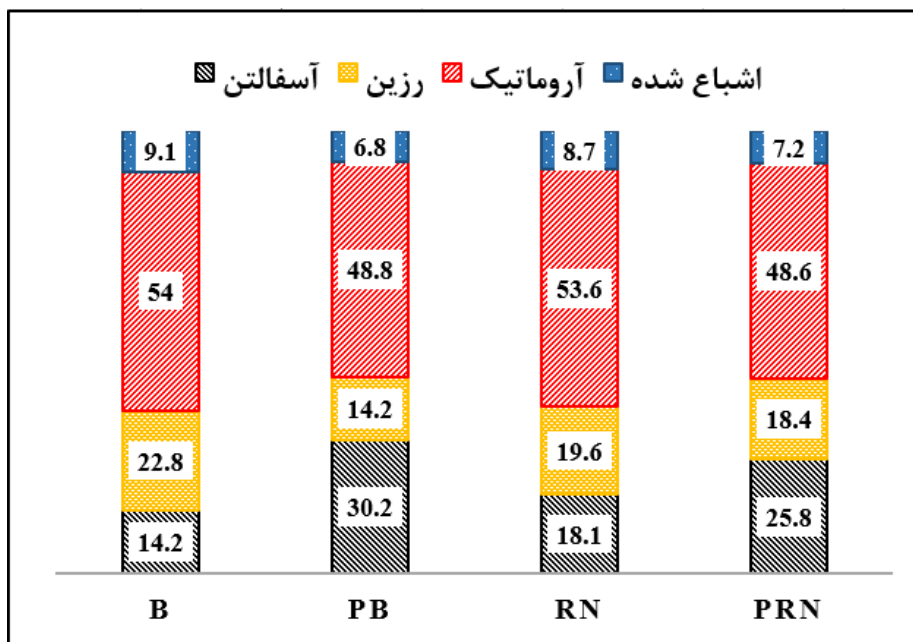
مرحله اول: منحنی جاروب فرکانس^۱

این مرحله برای تعیین پارامتر α ، جهت تجزیه و تحلیل آسیب‌ها استفاده می‌شود. آزمایش جاروب فرکانس بر اساس دمای انتخاب شده و اعمال بارگذاری برشی نوسانی با دامنه ثابت (کرنش ۰/۱ درصد) و فرکانس متغیر (۰/۲ تا ۳۰ هرتز) انجام می‌گردد. سپس برای هر فرکانس مقدار δ و G^* اندازه‌گیری و ثبت می‌شود [۳۳].

مرحله دوم: جاروب دامنه^۲

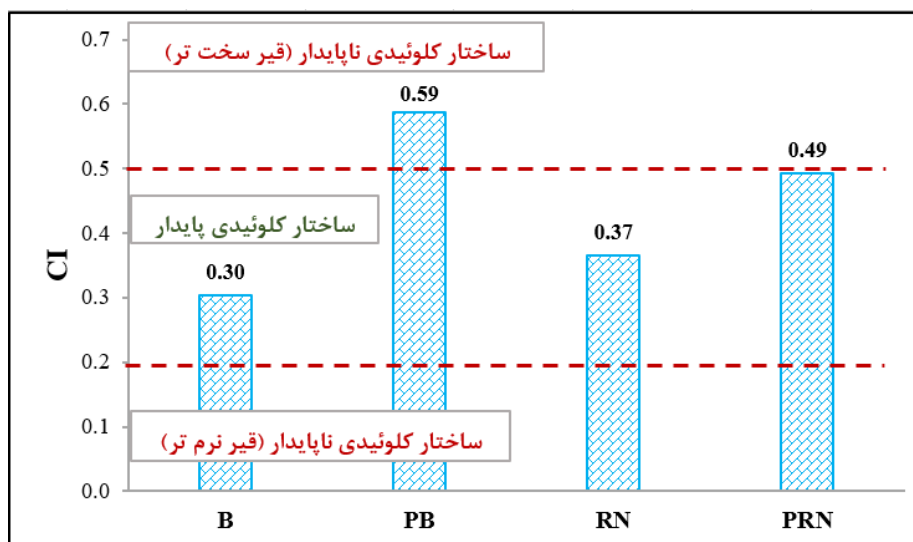
در این مرحله، آزمایش در دمای مورد نظر و در فرکانس ۱۰ هرتز انجام می‌شود. بارگذاری به صورت خطی از کرنش ۰ تا ۳۰ درصد اعمال می‌شود. مقدار حداکثر تنش برشی، حداکثر کرنش برشی، δ و G^* در هر ثانیه ثبت می‌شود. پس از انجام آزمایش، برای آنالیز نتایج از تئوری خرابی محیط‌های پیوسته ویسکوالاستیک (VECD) استفاده می‌شود. مقدار تجمعی خرابی‌ها که نشان دهنده ویژگی حساسیت قیر در برابر تنش خستگی است، طبق رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

- 1 Frequency Sweep
- 2 Amplitude Sweep



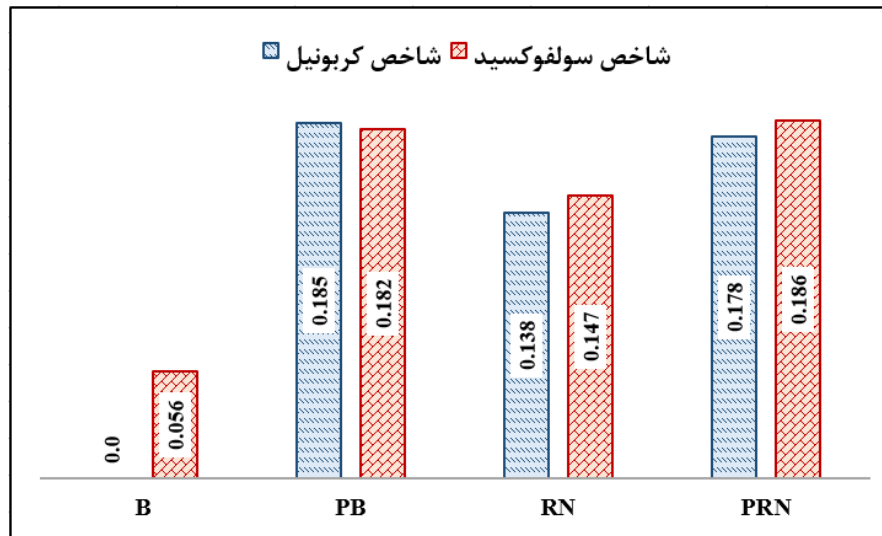
شکل ۴. اجزاء تفکیک شده قیر بعد از آزمایش SARA برای نمونه‌های مختلف قیر

Fig. 4. Separate bitumen components after SARA test for different bitumen samples



شکل ۵. شاخص کلوئیدی نمونه‌های مختلف قیر

Fig. 5. Colloidal index of different bitumen samples



شکل ۶. شاخص کربونیل و سولفوکسید برای انواع نمونه‌های قیر

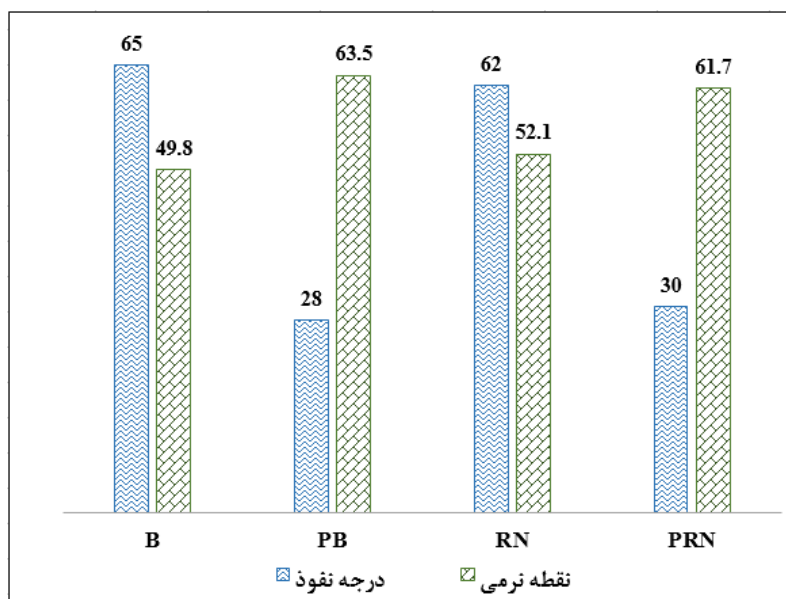
Fig. 6. Carbonyl and sulfoxide index for different types of bitumen samples

۴-۲- آزمایش FTIR

در این تحقیق از نرم افزار OMNIC برای محاسبه مساحت سطح زیر منحنی طیف‌های FTIR استفاده شده است. به منظور تجزیه و تحلیل کمی طیف‌های FTIR و توصیف پیر شدگی نمونه‌های قیر، از دو شاخص کربونیل و سولفوکسید استفاده شد. این شاخص‌ها بر اساس معادلات ۲ و ۳ محاسبه شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پیر شدگی باعث افزایش شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید می‌شود. مقایسه بین قیر B و PB نشان می‌دهد که در اثر پیر شدگی شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید افزایش می‌یابد. مقایسه بین قیر PB و RN نشان می‌دهد که حضور عامل بازسازی کننده باعث کاهش شاخص‌های پیر شدگی کربونیل و سولفوکسید شده است و این نشان دهنده تاثیر عامل بازسازی کننده نفتتیک بر ساختار شیمیایی قیر پیر شده و خاصیت ضد پیر شدگی این ماده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید قیر بازبازی شده پس از پیر شدگی بلند مدت (PR_N)، تا سطح قیر PB افزایش یافته است. شاخص کربونیل قیر PR_N کمتر از قیر PB می‌باشد که بیانگر آن است که قیر بازبازی شده توسط عامل بازسازی کننده نفتتیک در بلند مدت پتانسیل اکسیداسیون کمتری نسبت به قیر پایه دارد.

بازسازی کننده، پس از پیر شدگی بلند مدت افزایش کمتری نسبت به قیر PB داشته است.

تحقیقات نشان داده است که هر چه مقدار CI کمتر باشد مقاومت قیر در برابر پیر شدگی بهتر است [۲۰]. مطابق شکل ۵، در اثر پیر شدگی قیر B، CI آن از ۰/۳ به ۰/۵۹ افزایش یافته و ساختار کلئیدی قیر PB ناپایدار می‌شود. با مقایسه قیر PB و نمونه RN مشاهده می‌شود که عامل بازسازی کننده باعث کاهش مقدار آسفالتن و افزایش سهم آروماتیک نسبت به قیر PB شده است. با افزایش مقدار ترکیبات آروماتیک، شناور شدن آسفالتن در درون ساختار کلئیدی قیر بهتر شده و پایداری کلئیدی قیر بهبود می‌یابد. استفاده از عامل بازسازی کننده نفتتیک باعث کاهش ۳۸ درصدی شاخص کلئیدی قیر PB شده است که نشان دهنده‌ی پایدار شدن ساختار کلئیدی و بازبازی ترکیب شیمیایی قیر پیر شده (PB) می‌باشد. مقایسه نتایج قیر PB و PR_N نشان می‌دهد که میزان افزایش CI قیر بازبازی شده در اثر پیر شدگی بلند مدت، کمتر از قیر پایه است. همچنین CI قیر PR_N همچنان در محدوده ۰/۲ تا ۰/۵ می‌باشد و ساختار کلئیدی آن پس از پیر شدگی همچنان پایدار باقی مانده است که بیانگر مقاومت بهتر قیر بازبازی شده نسبت به قیر پایه در برابر پیر شدگی می‌باشد.



شکل ۷. مقایسه بین درجه نفوذ و نقطه نرمی انواع نمونه‌های قیر

Fig. 7. Comparison between penetration and softening point of different types of bitumen samples

پایین تری نسبت قیر PB می‌باشد. با توجه به اینکه وجود آسفالتن باعث سفتی ساختار قیر می‌گردد بنابراین علت بیشتر بودن درجه نفوذ در نمونه قیر PR_N می‌تواند در کمتر بودن درصد آسفالتن آن باشد.

همچنین نتایج آزمایش نقطه نرمی، نشان می‌دهد که در اثر پیر شدگی به علت افزایش مقدار آسفالتن در قیر، نقطه نرمی قیر افزایش می‌یابد. با افزودن عامل بازسازی کننده به قیر پیر شده (PB)، مقدار نقطه نرمی آن به سطح قیر B کاهش یافته که نشان دهنده‌ی خاصیت بازسازی کننده زیاد این ماده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نمونه قیر بازیابی شده در بلند مدت عملکرد مشابهی با قیر B دارد.

۴-۴-۴- آزمایش ویسکوزیته چرخشی

آزمایش ویسکوزیته چرخشی (RV) برای اندازه‌گیری ویسکوزیته قیر و ارزیابی قدرت پمپاژ و کارایی قیر در دماهای بالا در مرحله ساخت آسفالت به کار می‌رود. شکل ۸، نتایج آزمایش RV را برای انواع نمونه‌های قیر نشان می‌دهد. بر اساس معیار سوپریو، ویسکوزیته چرخشی قیر نباید بیشتر از ۳۰۰۰ میلی پاسکال-ثانیه باشد.

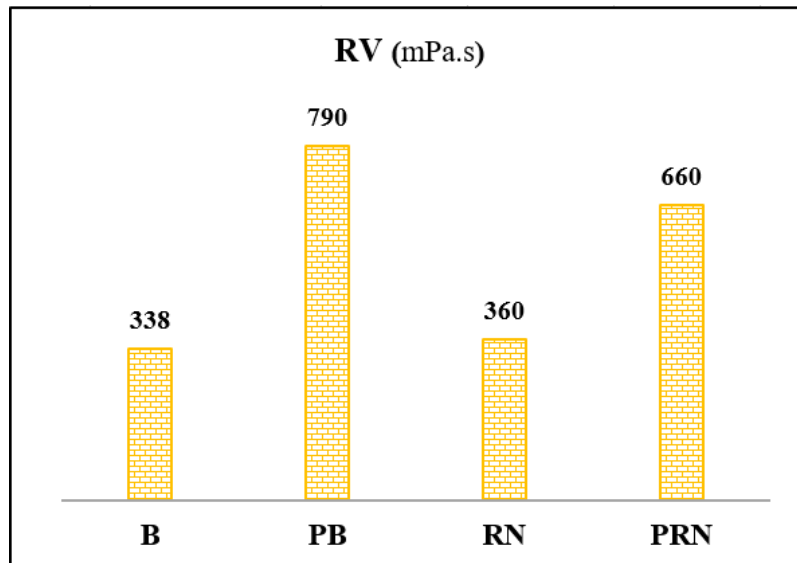
همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزودن عامل بازسازی

۴-۳- نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر

شکل ۷ مقایسه بین درجه نفوذ و نقطه نرمی را برای انواع نمونه‌های قیر نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مطابق انتظار با پیر شدن قیر پایه (B)، مقدار درجه نفوذ آن به علت واکنش اکسیداسیون و افزایش جزء آسفالتن، کاهش یافته است (۵۷ درصد). با افزودن عامل بازسازی کننده نفتتیک به قیر پیر شده (PB)، درجه نفوذ قیر PB تا سطح قیر پایه (B) افزایش یافته است که نشان دهنده‌ی نرم شدن و بازیابی قیر پیر شده می‌باشد. در ادامه جهت بررسی عملکرد بلند مدت عامل بازسازی کننده، نمونه قیر بازیابی شده (R_N) تحت آزمایش پیر شدگی (RTFO+PAV) قرار گرفت. همانطور که مشاهده می‌شود درجه نفوذ قیر بازیابی شده پس از پیر شدگی بیشتر از درجه نفوذ قیر پیر شده پایه (PB) می‌باشد که نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب عامل بازسازی کننده در کاهش سخت شدگی قیر در بلند مدت است.

قیر بازیابی شده توسط عامل بازسازی کننده نفتتیک در بلند مدت کاهش ۵۲ درصدی درجه نفوذ را داشته است. همانطور که در نتایج آزمایش SARA مشاهده شد، قیر PR_N دارای درصد آسفالتن و مقدار CI



شکل ۸. مقایسه RV انواع نمونه‌های قیر

Fig. 8. Comparison of RV of bitumen samples

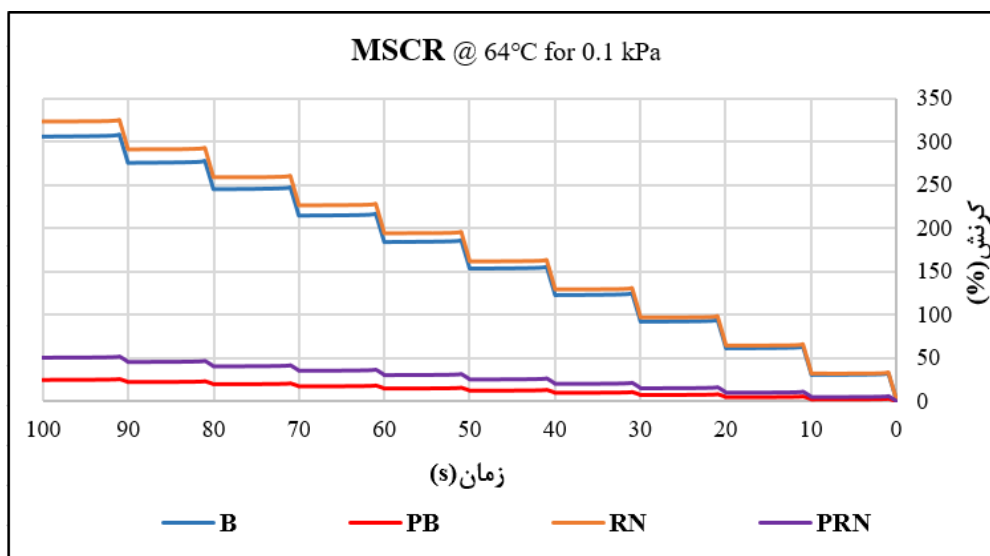
همانطور که در نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، میزان کرنش تجمعی قیر پایه پس از پیر شدگی کاهش زیادی پیدا می‌کند. با افزودن عامل بازسازی کننده نفتنیک به قیر PB، کرنش تجمعی آن تا سطح قیر پایه افزایش می‌یابد. میزان کرنش تجمعی قیر پیر شده حاوی عامل بازسازی کننده نفتنیک در بلند مدت (PR_N) در مقایسه با قیر PB، بیشتر می‌باشد. پارامتر J_{nr} به منظور بررسی مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی تحت بارگذاری تکراری استفاده می‌شود. مقادیر کمتر J_{nr} بیانگر مقاومت بیشتر قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی و عملکرد بهتر آن در برابر شیار شدگی می‌باشد. در شکل ۱۱، مقادیر پارامتر J_{nr} نمونه‌های قیر در دو سطح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال بیان شده است.

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مقدار J_{nr} در قیر پایه (B) پس از پیر شدگی به شدت کاهش یافته است و مقاومت آن در برابر شیار شدگی افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. با افزودن عامل بازسازی کننده نفتنیک به قیر پیر شده، مقدار J_{nr} قیر R_N افزایش می‌یابد که این میزان افزایش تا سطح قیر B است. بنابراین مشاهده می‌شود که عامل بازسازی کننده مورد استفاده در این تحقیق، عملکرد شیار شدگی مشابه قیر پایه را نتیجه می‌دهد. نمونه قیر پیر شده حاوی عامل بازسازی کننده نفتنیک در بلند مدت میزان J_{nr} بالاتری نسبت به قیر PB دارد.

کننده نفتنیک به قیر پیر شده (PB)، مقدار ویسکوزیته چرخشی قیر پیر شده ۵۴ درصد کاهش یافته و به سطح ویسکوزیته قیر پایه B رسیده است. مقدار ویسکوزیته چرخشی نمونه قیر بازیابی شده، پس از پیر شدگی بلند مدت افزایش یافته است. مقایسه نتایج RV نمونه‌های قیر PB و PR_N نشان می‌دهد که عامل بازسازی کننده نفتنیک تاثیر بیشتری در جلوگیری از افزایش ویسکوزیته قیر در بلند مدت داشته است و میزان ویسکوزیته قیر PR_N کمتر از قیر PB است. از نظر ساختار شیمیایی هر چه ماده تحرک پذیری ساختاری بالاتری داشته باشد، ویسکوزیته ماده کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه روغن نفتنیک دارای ساختار شیمیایی کاملاً اشباع شده می‌باشد، می‌توان گفت تحرک پذیری اجزاء سازنده آن‌ها زیاد بوده و در نتیجه ویسکوزیته نمونه قیر PR_N در مقایسه به قیر PB کمتر می‌باشد.

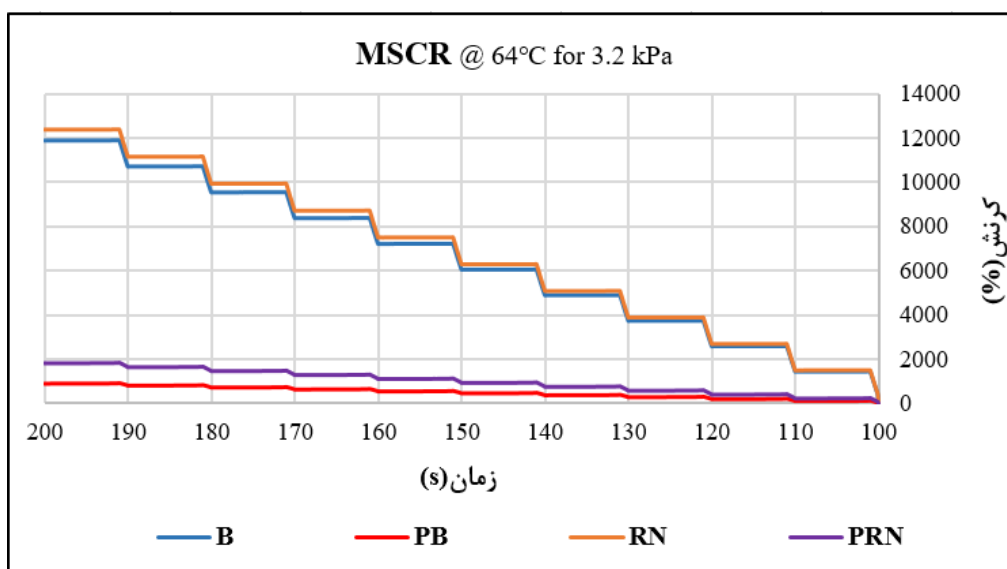
۴-۵- آزمایش MSCR

آزمایش MSCR برای بررسی رفتار دمای عملکردی بالای قیر و تعیین مقاومت شیار شدگی نمونه‌های قیر، در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد و در دو سطح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال انجام شد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودارهای کرنش - زمان نمونه‌های قیر در دو سطح تنش نشان داده شده است.



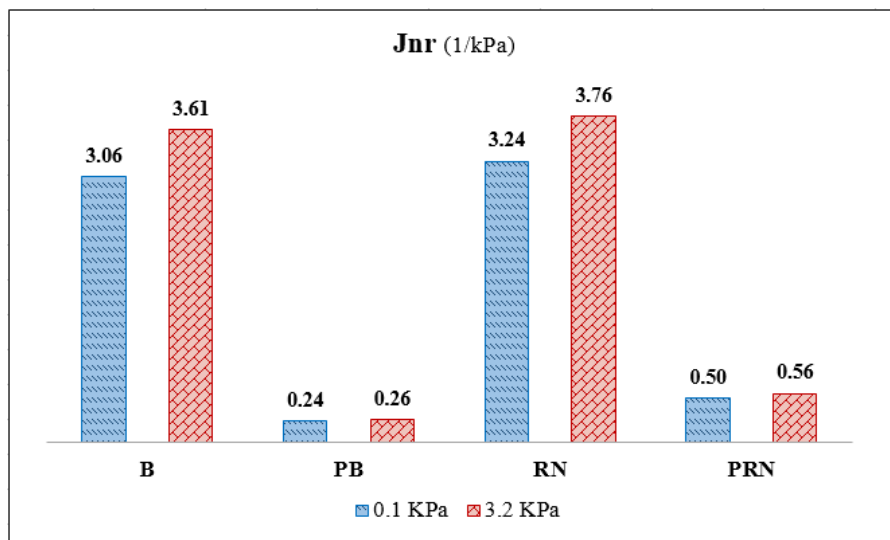
شکل ۹. نمودار کرنش - زمان در سطح تنش ۰/۱ کیلو پاسکال

Fig. 9. The chart of strain – time at the stress level of 0.1 kPa



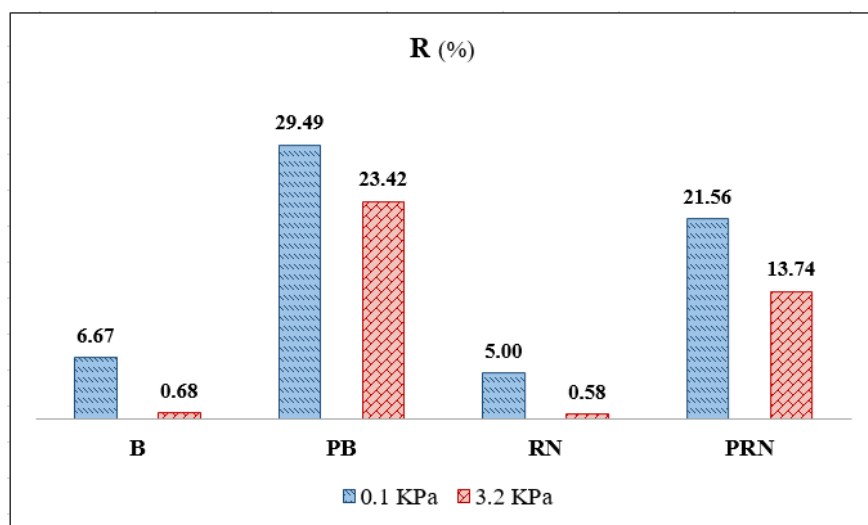
شکل ۱۰. نمودار کرنش - زمان در سطح تنش ۳/۲ کیلو پاسکال

Fig. 10. The chart of strain – time at the stress level of 3.2 kPa



شکل ۱۱. مقادیر خزش پذیری برگشت ناپذیر (Jnr)

Fig. 11. Non-recoverable creep values (Jnr)



شکل ۱۲. مقادیر درصد بازیابی الاستیک

Fig. 12. Elastic recovery percentage values

پلاستیک (برگشت ناپذیر) بعد از بارگذاری کمتر می‌شود. بنابراین قیرها با درصد بازیابی الاستیک بیشتر، خاصیت الاستیسیته بیشتری داشته و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر شیار شدگی از خود نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در اثر پیر شدگی درصد بازیابی الاستیک قیر پایه (B) افزایش می‌یابد. افزودن عامل بازسازی کننده

تأثیرات روند پیر شدگی و بازیابی قیر، در پارامتر بازیابی الاستیک (R) در دو سطح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال در شکل ۱۲ نشان داده شده است. چنانچه مقدار پارامتر R زیاد باشد نشان می‌دهد که قیر توانایی بازیابی بیشتری نسبت به کرنش‌های اعمالی بعد از بارگذاری دارد. در این صورت سهم کرنش‌های الاستیک (برگشت‌پذیر) بیشتر بوده و مقدار تغییر شکل‌های

جدول ۴. طبقه‌بندی قیر بر اساس استاندارد AASHTO MP19 [۳۲]

Table 4. Bitumen classification according to AASHTO MP19

J_{nr_diff}	MAX $J_{nr} @ 3.2 \text{ kPa}^{-1}$	سطح ترافیک (ESAL) و نرخ بار	سطح ترافیکی طرح
	۴	<10 million and >70 km/h	S (Standard)
حداکثر	۲	10–30 million or 20–70 km/h	H (High)
٪۷۵	۱	>30 million or <20 km/h	V (Very High)
	۰/۵	>30 million and <20 km/h	E (Extremely High)

جدول ۵. رده‌بندی عملکردی نمونه‌های قیر بر اساس سطح ترافیک

Table 5. Functional classification of bitumen samples based on the traffic level

نمونه قیر	$J_{nr} @ 3.2 \text{ kPa}^{-1}$	J_{nr_diff}	سطح ترافیک
B	۳/۶۱	۱۷/۹۲	S
PB	۰/۲۶	۹/۳۹	E
R_N	۳/۷۶	۱۶/۲۶	S
PR_N	۰/۵۶	۱۱/۳۰	V

دست آمده در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که استفاده از عامل بازسازی کننده باعث کاهش سطح ترافیک قیر PB به مقدار مشابه با قیر B شده است. همچنین بررسی عملکرد بلند مدت قیر بازیابی شده نشان می‌دهد که قیر PR_N سطح ترافیک پایین‌تری را نسبت به قیر PB تحمل می‌کند.

۴-۶- آزمایش LAS

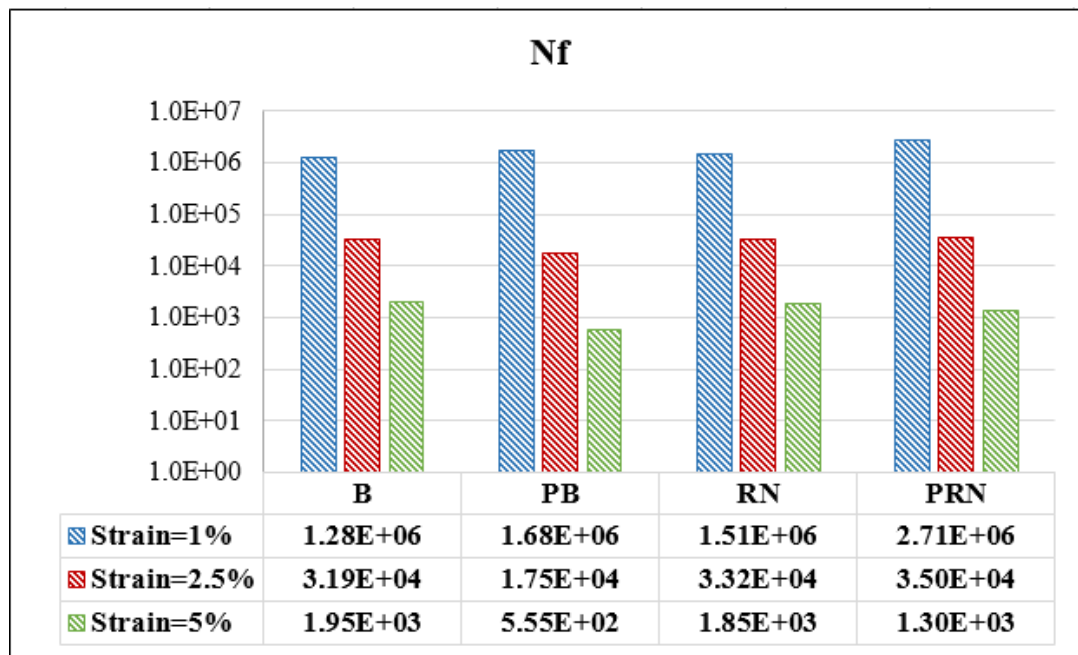
در این تحقیق آزمایش LAS جهت اندازه‌گیری مقاومت خستگی نمونه‌های قیر در دمای ۲۰ °C انجام شد. روند تغییرات عمر خستگی نمونه‌های قیر به ازاا کرنش‌های مختلف و همچنین مقدار پارامتر A و B در شکل ۱۳ نشان داده شده است. پارامتر A نشان دهنده توانایی قیر در حفظ انسجام خود در برابر خرابی است. پارامتر B مرتبط با حساسیت قیر به تغییرات سطح کرنش است. مقادیر بالاتر B نشان دهنده افزایش شیب منحنی و کاهش بیشتر عمر خستگی با افزایش سطح کرنش است.

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، عمر خستگی قیر پایه در اثر پیر شدگی کاهش یافته است و قیر PB کمترین عمر خستگی را در میان

به قیر پیر شده، منجر به کاهش قابل توجه درصد بازیابی الاستیک می‌گردد. مقدار پارامتر R در نمونه قیر R_N در سطح قیر پایه B می‌باشد. بررسی عملکرد بلند مدت عامل بازسازی کننده نشان می‌دهد که با پیر شدگی بلند مدت نمونه قیر بازیابی شده مقدار پارامتر R در آن افزایش یافته است. اما میزان افزایش پارامتر R پس از پیر شدگی در قیر بازیابی شده توسط عامل بازسازی کننده نفتتیک کمتر از قیر پایه می‌باشد.

در آزمایش MSCR با استفاده از پارامتر J_{nr} در سطح تنش ۳/۲ kPa و محدود ساختن مقدار پارامتر J_{nr-diff} به ۷۵ درصد به کمک استاندارد AAS- HTO MP19، سطح ترافیک مناسب روسازی را می‌توان تعیین نمود. در جدول ۴ نحوه‌ی طبقه‌بندی عملکردی قیر بر اساس استاندارد AAS- HTO MP19 بیان شده است. با توجه به نتایج آزمایش MSCR، نتایج رده‌بندی عملکردی نمونه‌های قیر بر اساس سطح ترافیک در جدول ۵ ارائه شده است.

مطابق نتایج به دست آمده در جدول ۵، پیر شدگی باعث افزایش سطح ترافیک روسازی در دمای عملکردی بالا می‌گردد. بررسی نتایج به

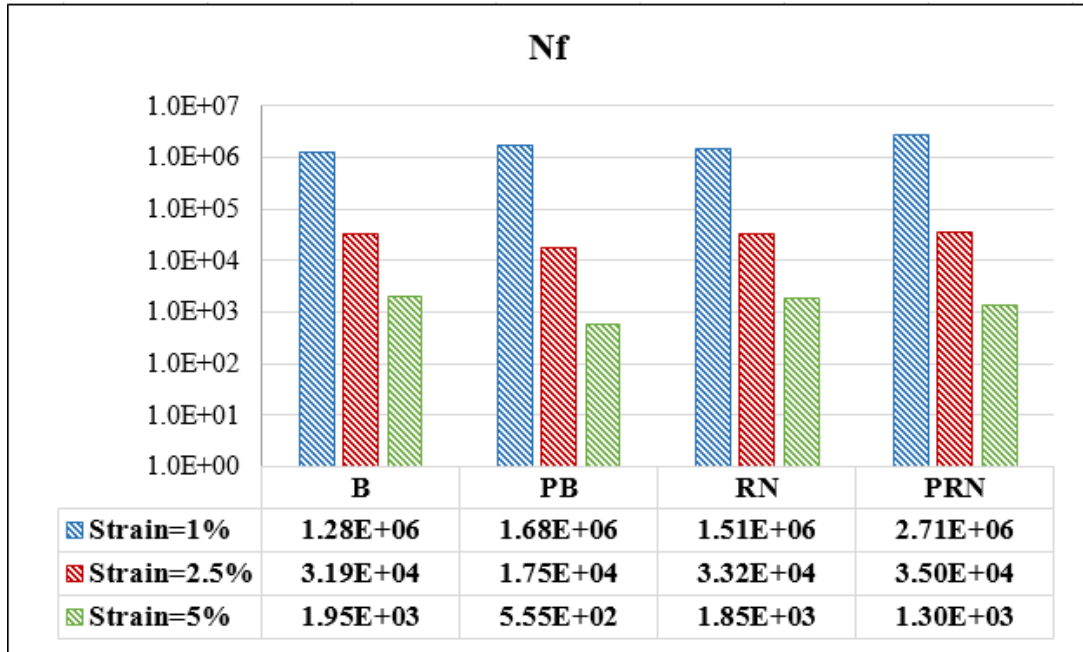


شکل ۱۳. منحنی عمر خستگی نمونه‌های قیر

Fig. 13. Fatigue life curve of bitumen samples

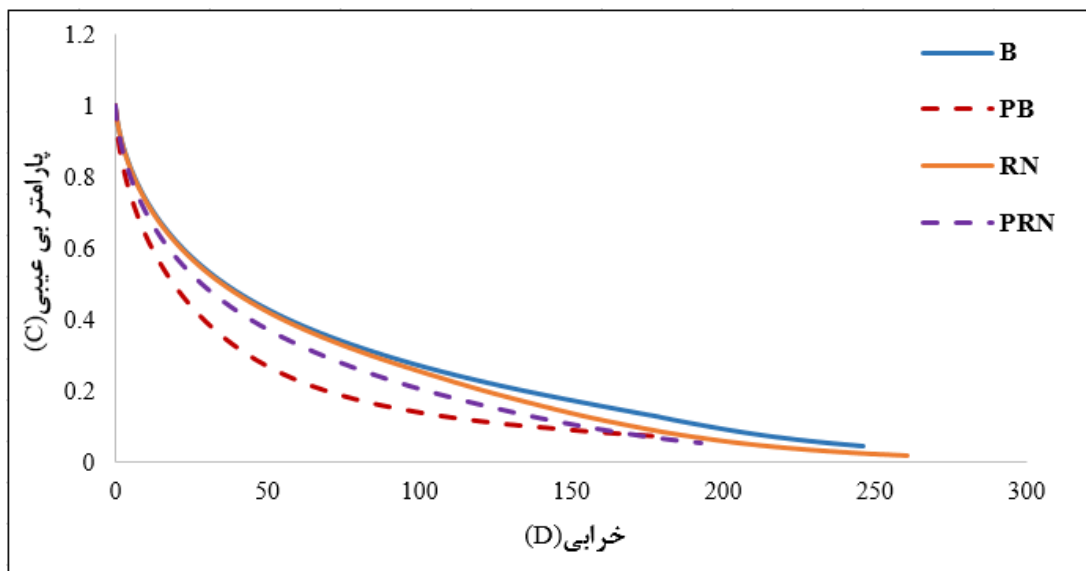
آن‌ها در سطوح کرنش ۱، ۲/۵ و ۵ درصد در شکل ۱۴ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۴، مشاهده می‌شود که استفاده از عامل بازسازی کننده باعث افزایش عمر خستگی قیر پیر شده تا سطح قیر پایه می‌شود. همچنین استفاده از عامل بازسازی کننده باعث افزایش عمر خستگی قیر در بلند مدت می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که عمر خستگی قیر در سطح کرنش ۵ درصد بیشترین ارتباط را با ویژگی‌های خستگی مخلوط آسفالتی در محل دارد [۳۴]. بررسی نتایج آزمایش LAS در سطح کرنش ۵ درصد نشان می‌دهد که عامل بازسازی کننده نفتتیک باعث افزایش عمر خستگی قیر PB، به مقداری نزدیک به قیر B شده است. همچنین بررسی عملکرد بلند مدت قیر بازیابی شده، نشان می‌دهد که در اثر پیر شدگی مجدد، عمر خستگی قیر بازیابی کاهش پیدا کرده است اما همچنان نمونه قیر حاوی عامل بازسازی کننده عملکرد بهتری در بلند مدت نسبت به قیر پایه دارد. منحنی پارامتر بی عیبی به ازای شدت خرابی (C-D) یکی دیگر از خروجی‌های آزمایش LAS است. پس از تعیین مقدار C و D در هر لحظه از آزمایش LAS منحنی C-D برای هر یک از نمونه‌های قیر ترسیم شد. شکل ۱۵ منحنی‌های C-D نمونه‌های قیر را نشان می‌دهد. مقدار C برابر یک، نشان دهنده بی‌عیبی کامل قیر و مقدار C برابر

سایر نمونه‌های قیر دارد. استفاده از عامل بازسازی کننده نفتتیک باعث افزایش عمر خستگی قیر پیر شده (PB) و کاهش پارامتر B در آن تا سطح قیر پایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه قیر R_N دارای عمر خستگی مشابهی با قیر B است. نمونه قیر پیر شده حاوی عامل بازسازی کننده در بلند مدت (PR_N) عمر خستگی بالاتری نسبت به قیر پیر شده پایه (PB) دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل بازسازی کننده مورد استفاده در این تحقیق در بلند مدت دارای عملکرد بهتری نسبت به قیر پایه می‌باشد. محققان در مطالعات گذشته دریافته‌اند که قیرهای پیر شده به علت افزایش سفتی ناشی از پیر شدگی ممکن است در سطوح کرنش پایین (۲/۵ درصد)، عمر خستگی بالاتری نسبت به نمونه قیرهای پیر نشده داشته باشند [۳۴]. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در سطوح کرنش پایین قیر PR_N عمر خستگی بالاتری را نسبت به نمونه قیر پیر نشده خود دارند. اما با افزایش سطح کرنش عمر خستگی آن نسبت به نمونه قیر پیر نشده کاهش یافته است. این بیانگر آن است که نمونه‌های قیر پیر شده در روسازی‌های ضخیم‌تر یا با بارگذاری کم عملکرد خستگی بهتری دارند، در حالی که قیرهای بازیابی شده در روسازی‌های نازک‌تر و یا با بارگذاری بالا بهتر عمل می‌کنند. برای مقایسه بهتر بین عمر خستگی نمونه‌های قیر، عمر خستگی



شکل ۱۴. نمودار عمر خستگی نمونه‌های قیر در سطح کرنش ۱، ۲/۵ و ۵ درصد

Fig. 14. Fatigue life diagram of bitumen samples at strain levels of 1, 2.5, and 5%



شکل ۱۵. منحنی $C(t)-D(t)$ برای نمونه‌های قیر

Fig. 15. Curve $C(t)-D(t)$ for bitumen samples

نفتنیک به قیر پیر شده، مقدار ویسکوزیته چرخشی قیر پیر شده ۵۴ درصد کاهش می‌یابد و به سطح ویسکوزیته قیر پایه می‌رسد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که قیر بازیابی شده در بلند مدت مانع افزایش زیاد ویسکوزیته قیر در مقایسه با قیر پایه می‌گردد.

- در آزمایش $MSCR$ ، با توجه به مقادیر J_{nr} و R می‌توان نتیجه گرفت که افزودن عامل بازسازی کننده مورد استفاده در این تحقیق به قیر پیر شده، عملکرد شیار شدگی مشابهی با قیر پایه را نتیجه می‌دهد.
- بر اساس نتایج آزمایش LAS ، عامل بازسازی کننده نفتنیک عمر خستگی قیر پیر شده را تا سطح قیر پایه افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که قیر بازیابی شده توسط عامل بازسازی کننده در بلند مدت و پس از پیر شدگی مجدد عملکرد خستگی بهتری نسبت به قیر پیر شده پایه داشت.

- با توجه به نتایج فوق مشخص شد که استفاده از عامل بازسازی کننده نفتنیک باعث بازیابی خصوصیات شیمیایی، فیزیکی - رئولوژیکی قیر پیر شده تا سطح قیر پایه شده است. همچنین استفاده از عامل بازسازی کننده نفتنیک باعث بهبود عملکرد بلند مدت قیر بازیابی شده در مقایسه با قیر پایه می‌شود.

منابع

- [1] H. Asli, E. Ahmadinia, M. Zargar, M.R. Karim, Investigation on physical properties of waste cooking oil-Rejuvenated bitumen binder, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 398-405.
- [2] A. Mansourkhaki, M. Ameri, M. Habibpour, B. Shane Underwood, Chemical composition and rheological characteristics of binders containing RAP and rejuvenator, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(4) (2020) 04020026.
- [3] M. Varaus, T. Koudelka, P. Sperka, Rejuvenator Influence on Aged Binder Material Properties, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2017, pp. 380-388.
- [4] J.-F. Su, J. Qiu, E. Schlangen, Y.-Y. Wang, Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, *Construction and Building materials*, 74 (2015) 83-92.
- [5] G. Xu, H. Wang, Molecular dynamics study of oxidative

صفر نشان دهنده‌ی خرابی کامل قیر می‌باشد. با توجه به شکل ۱۵، قیر PB دارای شیب کاهشی بالاتری از منحنی $C-D$ نسبت به سایر نمونه‌های قیر می‌باشد که بیانگر آن است که با افزایش شدت خرابی پارامتر C در این قیر کاهش بیشتری پیدا می‌کند. همین امر باعث کاهش عمر خستگی این قیر نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. استفاده از عوامل بازسازی کننده نفتنیک باعث کاهش شیب منحنی $C-D$ و بهبود عملکرد قیر پیر شده (PB) تا سطح قیر پایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود قیر PR_N دارای شیب کاهشی کمتری نسبت به قیر PB می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل بازسازی کننده نفتنیک باعث افزایش عمر خستگی قیر در بلند مدت نسبت به قیر PB می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد آنی و بلند مدت عامل بازسازی کننده نفتنیک در بازیابی خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و رئولوژیکی قیر پیر شده مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این تحقیق شامل موارد زیر است:

- با توجه به نتایج آزمایش $SARA$ ، عامل بازسازی کننده مورد استفاده در این تحقیق منجر به ترمیم اجزاء شیمیایی و بازیابی ترکیب شیمیایی قیر پیر شده تقریباً مشابه قیر پایه شده است. CI قیر بازیابی شده پس از پیر شدگی بلند مدت برابر با ۰/۴۹ است و ساختار کلئیدی این قیر با وجود پیر شدگی همچنان پایدار باقی‌مانده است. که نتایج بیانگر مقاومت بهتر قیر بازیابی شده توسط عامل بازسازی کننده نفتنیک نسبت به قیر پایه در برابر پیر شدگی می‌باشد.
- نتایج آزمایش $FTIR$ نشان داد که روند پیر شدگی و بازیابی قیرها را می‌توان به وضوح با تغییر شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید تشخیص داد. شاخص کربونیل قیر بازیابی شده در بلند مدت افزایش کمتری نسبت به قیر پایه داشت که بیانگر پتانسیل اکسیداسیون کمتر این قیر نسبت به قیر پایه می‌باشد.
- نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی نشان می‌دهد که استفاده از عامل بازسازی کننده نفتنیک باعث بازیابی خصوصیات فیزیکی قیر پیر شده می‌شود. میزان کاهش درجه نفوذ قیر بازیابی شده توسط عامل بازسازی کننده نفتنیک در بلند مدت کمتر از قیر پایه بوده که بیانگر عملکرد مناسب عامل بازسازی کننده در کاهش سخت شدگی قیر در بلند مدت می‌باشد.
- با توجه به نتایج آزمایش RV ، با افزودن عامل بازسازی کننده

- Construction and building materials, 196 (2019) 134-143.
- [16] P. Nayak, U.C. Sahoo, A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil, *International Journal of Pavement Engineering*, 18(7) (2017) 595-607.
- [17] X. Cao, H. Wang, X. Cao, W. Sun, H. Zhu, B. Tang, Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil, *Construction and building materials*, 180 (2018) 455-463.
- [18] A. Mansourkhaki, M. Ameri, D. Daryaei, Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder, *Construction and Building Materials*, 203 (2019) 83-94.
- [19] M. Mohammadafzali, H. Ali, J.A. Musselman, G.A. Sholar, W.A. Rilko, Aging of rejuvenated asphalt binders, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017 (2017).
- [20] H.F. Haghshenas, Y.-R. Kim, S.R. Kommidi, D. Nguyen, D.F. Haghshenas, M.D. Morton, Evaluation of long-term effects of rejuvenation on reclaimed binder properties based on chemical-rheological tests and analyses, *Materials and Structures*, 51(5) (2018) 1-13.
- [21] D. ASTM, Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test), USA: Annual Book of ASTM Standards, (2012).
- [22] A. D-13, Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV), USA: Annual Book of ASTM Standards, (2013).
- [23] Y.-h. Wang, W. Wang, Application of domestic naphthenic oil in environmental friendly tire compound, *Tire Ind.*, 32(2) (2012) 93-97.
- [24] E. De Hoffmann, V. Stroobant, *Mass spectrometry: principles and applications*, John Wiley & Sons, 2007.
- [25] M. Zaumanis, R.B. Mallick, R. Frank, Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications, *Construction and Building Materials*, 69 (2014) 159-166.
- aging effect on asphalt binder properties, *Fuel*, 188 (2017) 1-10.
- [6] A. Yousefi, A. Behnood, A. Nowruzzi, H. Haghshenas, Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP), *Construction and Building Materials*, 268 (2021) 121200.
- [7] A. Mansourkhaki, M. Ameri, M. Habibpour, B.S. Underwood, Relations between colloidal indices and low-temperature properties of reclaimed binder modified with softer binder, oil-rejuvenator and polybutadiene rubber, *Construction and Building Materials*, 239 (2020) 117800.
- [8] A. Behnood, Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review, *Journal of cleaner production*, 231 (2019) 171-182.
- [9] H.F. Haghshenas, R. Rea, G. Reinke, D.F. Haghshenas, Chemical Characterization of Recycling Agents, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5) (2020) 06020005.
- [10] H. Jiang, J. Zhang, C. Sun, S. Liu, M. Liang, Z. Yao, Experimental assessment on engineering properties of aged bitumen incorporating a developed rejuvenator, *Construction and Building Materials*, 179 (2018) 1-10.
- [11] X. Yu, M. Zaumanis, S. Dos Santos, L.D. Poulidakos, Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders, *Fuel*, 135 (2014) 162-171.
- [12] NCAT, NCAT researchers explore multiple uses of rejuvenators, *Asphalt Technol. News*, 26(1) (2014) 7-8.
- [13] A.W. Ali, Y.A. Mehta, A. Nolan, C. Purdy, T. Bennert, Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators, *Construction and Building Materials*, 110 (2016) 211-217.
- [14] J. Yuan, H. Lu, W. Yin, Y. Wu, Influences of naphthenic oil on SBS-modified asphalt binder, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8) (2019) 04019162.
- [15] R. Zhang, Z. You, H. Wang, M. Ye, Y.K. Yap, C. Si, The impact of bio-oil as rejuvenator for aged asphalt binder,

- creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, (2009).
- [32] A.S. MP19, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, American Association of State and Highway Transportation Officials: Washington, DC, USA, (2010).
- [33] T. AASHTO, Standard method of test for estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep, (2014).
- [34] Y. Qiu, H. Ding, A. Rahman, W. Wang, Damage characteristics of waste engine oil bottom rejuvenated asphalt binder in the non-linear range and its microstructure, *Construction and Building Materials*, 174 (2018) 202-209.
- [26] D. ASTM, 4124, Standard Test Method for separation of asphalt into four fractions, American Society for Testing and Material: Philadelphia, (1988).
- [27] H.A. Tabatabaee, T.L. Kurth, Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen, *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup2) (2017) 131-140.
- [28] D. ASTM, Standard test method for penetration of bituminous materials, USA, ASTM International, (2013).
- [29] D. ASTM, Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus), Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA, USA, (2014).
- [30] D. ASTM, Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer, in: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [31] T. AASHTO, Standard method of test for multiple stress

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Ziari, S. Bananezhad, M. A. Ziari, *Evaluation of the long-term performance of naphthenic recycling agent in restoring the properties of aged bitumen*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(7) (2022) 2569-2588.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20188.7365

