



Evaluation of the Effect of Slack Wax and Polypropylene Wax on the Rutting Properties of Crumb Rubber Modified Binder

M. Ameri*, A. Afshin, M. Ebrahimzadeh Shiraz, A. Rahimi Yengejeh

School of Civil Engineering Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: The use of crumb rubber to modify the binders has been the interest of researchers for many years. It has been proven that the use of asphalt mixtures containing crumb rubber is leading to improve performance and increase durability of asphalt pavement. However, increasing the viscosity of crumb rubber modified (CRM) binder which increases mixing and compaction temperature of asphalt mixture, is known as one of the disadvantages of using crumb rubber. So, there is a good concept for using warm mix additives to besides improving the performance of asphalt mixture, reduce energy consumption and environmental pollution also be considered. On the other hand, the binder has an important role in the investigation of the performance of the asphalt mixture. It is also time-consuming and costly to evaluate the properties of asphalt mixtures. Hence, evaluating the performance characteristics of the binder helps in understanding the performance of asphalt mixtures against various types of damage. The main objective of this study is to investigate the effect of organic warm mix additives (waxes) on the rutting performance of CRM binders by using the multiple creep stress recovery (MSCR) test. It was found that the MSCR test results have a good correlation to rutting than SHRP criteria. The results of this study showed that the use of polypropylene wax in addition to increasing rutting resistance of CRM binder also will lead to an increase in pavement traffic level by one degree. Despite this, slack wax reduced the rutting resistance of the CRM binder by increasing the J_{nr} parameter.

Review History:

Received: Oct. 08, 2019
Revised: Nov. 21, 2019
Accepted: Dec. 02, 2019
Available Online: Dec. 13, 2019

Keywords:

Binder Rheology
Warm Mix Additives
Crumb Rubber Modified Binder
Rutting
Multiple Stress Creep Recovery Test

1- Introduction

Rutting is one of the most important failures that occur during the service life of asphalt pavements and significantly impacts its performance [1]. Among the asphalt components, Bitumen plays an important role in determining the viscoelastic behavior and performance of asphalt mixtures. The results of the researches show that the resistance of asphalt mixtures against rutting depends considerably on the rheological characteristics of Bitumen [2].

Researches results show that the use of crumb rubber results in longer service life, lower repair and maintenance costs, improve rutting resistance, lower road noise, and increase skid resistance for asphalt pavement [3,4]. However, crumb rubber leads to an increase in the viscosity of the modified binder. As a result, the mixing and compaction temperature of asphalt mixtures containing crumb rubber increases [5]. So, asphalt mixtures containing crumb rubber have great potential for using warm mix asphalt technology. Different types of warm mix additives can significantly reduce the mixing and compaction temperature of CRM asphalt mixtures by reducing the viscosity of CRM binder and increasing its workability [6].

In recent years, the effect of warm mix additives on the rheological properties of bitumen modified with crumb rubber has been studied [7,8]. Research findings to date indicate that in some cases, warm mix additives can be used without adversely affecting the performance properties of CRM binder [9]. However, there are conflicting results in the performance of warm rubberized binders, mainly due to the effects of different types of warm mix additives.

The main purpose of this study is to investigate the effect of warm mix additives on the rutting performance of CRM binders. In Iran, the relatively high costs of supplying commonly available warm mix additives, which are mainly imported, are recognized as one of the problems. For this reason, slack wax and polypropylene wax, which are both native and inexpensive are used in this study.

2- Methodology and Testing

2.1. Bitumen Modification

In this study, the neat 60/70 penetration Bitumen of Iran Pasargad Oil Company was used as a base binder. Also, 15% crumb rubber with mesh size 40 was used to obtain a CRM binder. Slack wax and polypropylene wax were used at 2, 4, and 6 % by weight of the neat binder.

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



Table 1. Performance graded asphalt binders based on traffic level

Binder type	$J_{nr@3.2}(\text{kPa}^{-1})$	$J_{nr-diff}\%$	Traffic Level
60-70	1.93	12.2	H
CR15	0.51	54.5	V
CR15S2	0.67	55.8	V
CR15S4	0.82	64	V
CR15S6	1.37	71.25	H
CR15P2	0.26	44.4	E
CR15P4	0.37	54.2	E
CR15P6	0.48	65.5	E

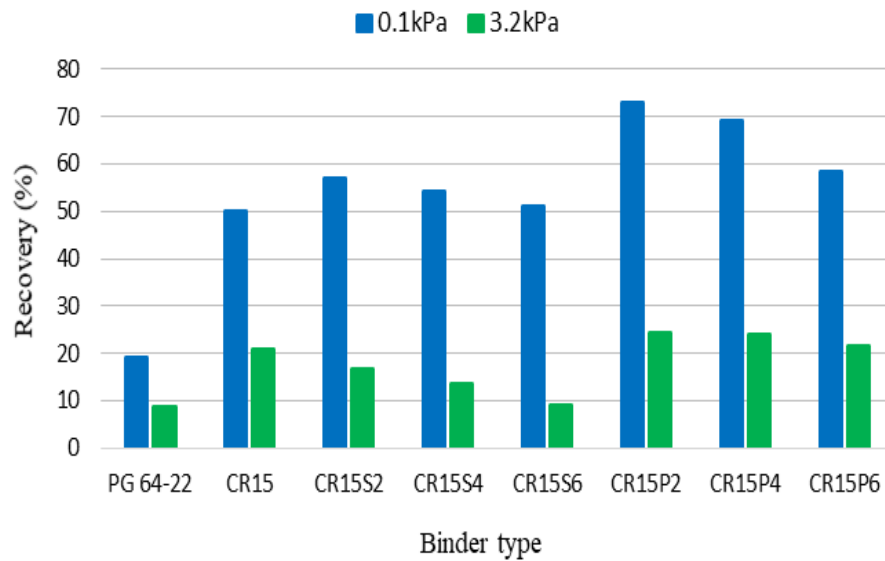


Fig. 1. The recovery percentage of asphalt binders at 100 and 3200 Pa stress levels

2.2. Testing Program

In this study, the rotational viscosity (RV) test, dynamic shear rheometer (DSR) test, and multiple stress recovery (MSCR) test were performed. The RV test was performed at temperatures of 135 (standard test temperature), 165 and 185 °C under AASHTO T316 [10]. Also, the DSR test was performed according to AASHTO T315 at a frequency of 10 rad/s [11]. MSCR tests were performed on RTFO-aged binders at 64°C (neat binder high performance temperature) to simulate short-term aging in accordance with AASHTO TP70 standard [12]. The validation of this test has been proven by many researchers to evaluate the performance of the binder at high temperatures. Zhou *et al.* also showed that the parameters obtained from the MSCR test, especially for polymer-modified binders, had better results than the SHRP parameter in ranking binders based on rutting criteria [13].

3- Results and Discussion

3.1. Mscr Test Results

Figs. 1 and 2 show the percent recovery ($R\%$) and non-recoverable creep compliance (J_{nr}) values for asphalt binders.

Polypropylene wax increased the amount of R parameter at both stress levels in general and thereby improved the rutting resistance of the CRM binder. The J_{nr} parameter is used to evaluate the resistance of the binder to permanent deformation under the influence of repetitive loading. Lower values of J_{nr} indicate greater resistance to permanent deformation and better performance against rutting. By adding slack wax to the CRM binder and increasing its percentage, the value of J_{nr} increases. Therefore, CRM binder containing slack wax has less resistance to rutting. However, polypropylene wax reduces the amount of J_{nr} compared to the CRM binder. The binder containing 2% polypropylene wax has the highest resistance to rutting at both stress levels. The performance classification of binders based on traffic level as recommended by the AASHTO M332 [14] is presented in Table 1.

4- Conclusion

The main objectives of this paper are as follows:
 -Slack wax and polypropylene wax reduce the viscosity of the CRM binder. Thus, one of the disadvantages of CRM binders, which is the increase in viscosity and consequently

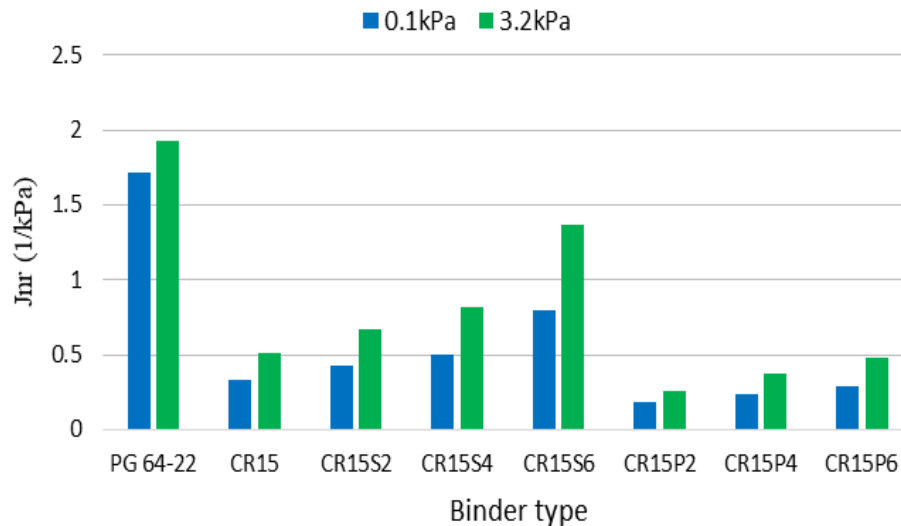


Fig. 2. Non-recoverable creep compliance (Jnr) of asphalt binders at 100 and 3200 Pa stress levels

the increase in the production and compaction temperature of asphalt mixture, is eliminated.

- 2% polypropylene wax increases the high-performance temperature of the CRM binder by one degree.
- Polypropylene wax resulted in the increased rutting resistance of the CRM binder with increasing percent recovery and decreasing J_{nr} . Although slack wax reduces the rutting resistance of CRM binder.
- In terms of performance grading based on AASHTO M332 and in comparison with the CRM binder, polypropylene wax led to an increase in traffic level from V to E.

References

- [1] Du, Y., Chen, J., Han, Z., and Liu, W., 2018. "A Review on Solutions for Improving Rutting Resistance of Asphalt Pavement and Test Methods," *Construction and Building Materials*, 168, pp. 893–905.
- [2] Radhakrishnan, V., Ramya Sri, M., and Sudhakar Reddy, K., 2018. "Evaluation of Asphalt Binder Rutting Parameters," *Construction and Building Materials*, 173, pp. 298–307.
- [3] Kaloush, K. E., 2014. "Asphalt Rubber: Performance Tests and Pavement Design Issues," *Construction and Building Materials*, 67, pp. 258–264.
- [4] Venudharan, V., and Biligiri, K. P., 2016. "Conceptualization of Permanent Deformation Characteristics of Rubber Modified Asphalt Binders: Energy-Based Algorithm and Rheological Modeling," *Construction and Building Materials*, 126, pp. 388–397.
- [5] Yu, H., Leng, Z., Dong, Z., Tan, Z., Guo, F., and Yan, J., 2018. "Workability and Mechanical Property Characterization of Asphalt Rubber Mixtures Modified with Various Warm Mix Asphalt Additives," *Construction and Building Materials*, 175, pp. 392–401.
- [6] Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Abreu, L. P. F., and Fernandes, S. R. M., 2013. "Use of a Warm Mix Asphalt Additive to Reduce the Production Temperatures and to Improve the Performance of Asphalt Rubber Mixtures," *Journal of Cleaner Production*, 41, pp. 15–22.
- [7] Akisetty, C., 2008. "Evaluation of Warm Asphalt Additives on Performance Properties of CRM Binders and Mixtures," *Clemson University*.
- [8] Yu, H., Leng, Z., Zhou, Z., Shih, K., and Xiao, F., 2017. "Optimization of Preparation Procedure of Liquid Warm Mix Additive Modified Asphalt Rubber," *Journal of Cleaner Production*, 141, pp. 336–345.
- [9] Wang, H., Liu, X., Apostolidis, P., and Scarpas, T., 2018. "Review of Warm Mix Rubberized Asphalt Concrete: Towards a Sustainable Paving Technology," *Journal of Cleaner Production*, 177, pp. 302–314.
- [10] 2010. "AASHTO Standard T316, Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, American Association of State and Highway Transportation Officials."
- [11] Subhy, A., 2017. "Advanced Analytical Techniques in Fatigue and Rutting Related Characterisations of Modified Bitumen: Literature Review," *Construction and Building Materials*, 156, pp. 28–45.
- [12] 2012. "AASHTO TP70, Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)."
- [13] Zhou, F., Li, H., Chen, P., and Scullion, T., 2014. *Laboratory Evaluation of Asphalt Binder Rutting, Fracture, and Adhesion Tests.*, Texas. Dept. of Transportation. Research and Technology Implementation Office.
- [14] 2014. "AASHTO M332, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, Washington."

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Ameri, A. Afshin, M. Ebrahimzadeh Shiraz, A. Rahimi Yengejeh, Evaluation of the Effect of Slack Wax and Polypropylene Wax on the Rutting Properties of Crumb Rubber Modified Binder. Amirkabir J. Civil Eng., 53 (5) 2021) 419-422

DOI: [10.22060/ceej.2019.17172.6484](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.17172.6484)





ارزیابی تأثیر افزودنی های اسلک وکس و پلی پروپیلن وکس بر خصوصیات شیارشدگی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک

محمود عامری^{*}، ابوالفضل افشین، مهدی ابراهیم زاده شیراز، آرش رحیمی ینگجه

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۳۰

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۲۲

کلمات کلیدی:

رئولوژی قیر

افزودنی نیمه گرم

قیر لاستیکی

شیارشدگی

آزمایش تنش خزشی چندگانه

برگشت پذیر

خلاصه: استفاده از پودر لاستیک به منظور اصلاح خواص عملکردی قیر، همواره مورد توجه محققین بوده است. نتایج نشان داده است که استفاده از پودر لاستیک در مخلوطهای آسفالتی منجر به بهبود عملکرد و افزایش دوام روسازی می‌گردد. با این وجود، افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح شده با پودر لاستیک که منجر به افزایش دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی می‌گردد، به عنوان یکی از معایب کاربرد پودر لاستیک شناخته می‌شود. بنابراین، زمینه مناسبی برای استفاده از افزودنی‌های نیمه گرم وجود دارد تا علاوه بر بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی، رویکرد کاهش مصرف انرژی و تولید آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز مورد توجه قرار گیرد. از طرف دیگر قیر نقش مهمی در تعیین عملکرد مخلوطهای آسفالتی دارد. همچنین بررسی خصوصیات مخلوطهای آسفالتی زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. بنابراین ارزیابی خصوصیات عملکردی قیرها کمک زیادی به شناخت عملکرد مخلوطهای آسفالتی در برابر انواع خرابی‌ها می‌کند. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی تأثیر افزودنی‌های نیمه گرم آلی (واکس‌ها) بر عملکرد شیارشدگی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک با استفاده از آزمایش تنش خزشی چندگانه برگشت پذیر می‌باشد. آزمایش تنش خزشی چندگانه برگشت پذیر روش جدیدی به منظور ارزیابی عملکرد شیارشدگی قیرها در چند سطح تنش می‌باشد که پارامترهای حاصل از آن در مقایسه با معیارهای شارپ همبستگی بهتری با نتایج آزمایش‌های شیارشدگی مخلوط آسفالتی دارند. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهند که استفاده از پلی پروپیلن وکس در هر دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال، مقاومت شیارشدگی قیر لاستیکی را افزایش می‌دهد؛ در حالی که اسلک وکس با افزایش مقدار پارامتر کرنش تجمعی غیرقابل برگشت قیر، منجر به کاهش مقاومت شیارشدگی قیر لاستیکی می‌گردد.

از مصرف انرژی و تولید آلودگیها در این بخش را به خود اختصاص

می‌دهد. با توجه به افزایش حجم ساخت و ساز راه‌ها و پیامدهایی که به دنبال دارد، توسعه فناوری‌های روسازی آسفالتی با توجه به مسائل زیست‌محیطی و منابع انرژی از اهمیت زیادی برخوردار است [۱].

در طی دو دهه گذشته، محققان و پژوهشگران در صنعت روسازی آسفالتی، به کمک فناوری آسفالت نیمه گرم و با کاهش دمای تولید و تراکم مخلوطهای آسفالتی، پاسخ مناسبی به گسترش نیازهای توسعه پایدار در صنعت داده‌اند [۲].

با افزایش تعداد وسایل نقلیه، تقاضا برای تایرهای لاستیکی و به دنبال آن تولید تایرهای ضایعاتی به طرز چشمگیری افزایش یافته

۱- مقدمه

تغییرات آب و هوایی و کمبود منابع انرژی در جهان به یکی از چالش‌های توسعه پایدار در جوامع بین‌المللی تبدیل شده است. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیازمند همکاری بین جوامع و صنایع مختلف می‌باشد. در سال‌های اخیر سازمان‌های حمل و نقل و پژوهشگران به دنبال راهکارهایی به منظور رسیدن به توسعه پایدار در زیرساخت‌های حمل و نقل می‌باشند. ساخت و توسعه راه‌ها به خصوص روسازیهای آسفالتی یکی از بخش‌های اصلی در صنعت حمل و نقل می‌باشد که مقدار زیادی



است. به دلیل حجم زیاد، تایرهای لاستیکی یکی از بزرگترین منابع تولید ضایعات در جهان می‌باشند؛ بطوری‌که امروزه دفع مناسب آن‌ها با توجه به خطرات بالقوه زیست‌محیطی که دارند، به یک چالش جدی تبدیل شده است [۳]. از این رو بازیافت و استفاده مجدد از این مواد راه حل مناسبی به نظر می‌رسد. استفاده از پودر لاستیک با بهبود پارامترهای عملکردی آسفالت، منجر به افزایش عمر بهره‌برداری و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌گردد [۴]. با این وجود، تحقیقات نشان داده است که در صورت ترکیب پودر لاستیک با قیر ویسکوزیته قیر لاستیکی افزایش و نهایتاً کارایی آن کاهش می‌یابد. افزایش ویسکوزیته قیر منجر به افزایش دمای تولید و تراکم در مخلوط آسفالتی می‌گردد [۵-۷]. افزایش دمای تولید آسفالت باعث افزایش مصرف سوخت و همچنین افزایش انتشار گازهای سمی و آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. علاوه بر این، چنان‌چه دمای تراکم به اندازه کافی نباشد، دستیابی به مشخصات حجمی مناسب (درصد هوا و تراکم) دشوار شده و عملکرد ضعیف در کوتاه مدت و بلند مدت در مخلوط‌های آسفالتی به وجود می‌آید [۸]. این موارد باعث شده است که استفاده از آسفالت لاستیکی علیرغم خواص عملکردی مناسبی که دارد، با تردیدهایی مواجه شده و در سالهای اخیر چندان مورد استقبال مهندسين قرار نگيرد. با توجه به این شرایط، مخلوط‌های آسفالت لاستیکی پتانسیل زیادی برای استفاده از فناوری آسفالت نیمه‌گرم دارند. این فناوری با کاهش ویسکوزیته قیر، دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالت لاستیکی را به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد [۹،۱۰]. از آن جایکه محققان و پژوهشگران همواره به دنبال راهکارهایی به منظور کاهش دمای تولید آسفالت و صرفه‌جویی در مصرف منابع با توجه به آثار زیست‌محیطی و اقتصادی آن بوده‌اند، ترکیب آسفالت لاستیکی با فناوری آسفالت نیمه‌گرم اهمیت زیادی می‌یابد. بنابراین مخلوط آسفالت نیمه‌گرم لاستیکی (Warm-RAC) به منظور رسیدن به نوعی از روسازی پایدار که منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی، حفظ محیط زیست، بهبود عملکرد و افزایش دوام مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد، پیشنهاد شده است [۱۱].

۱-۱- بیان مسأله و اهداف پژوهش

امروزه روسازی‌های آسفالتی بطور گسترده‌ای در سراسر جهان

مورد استفاده قرار می‌گیرند و هزینه‌های زیادی صرف احداث شبکه راه‌ها می‌شود. بنابراین حفظ و نگهداری این روسازی‌ها برای سال‌های طولانی اهمیت فراوانی می‌یابد. شیارشدگی یکی از مهمترین خرابی‌هایی است که در طول عمر مفید یک روسازی آسفالتی رخ می‌دهد و تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن دارد. این خرابی تا حدود زیادی وابسته به شرایط ترافیکی و آب و هوایی از جمله دمای بالای سطح روسازی، بارهای محوری سنگین، سرعت کم جریان ترافیک و حجم بالای ترافیک عبوری می‌باشد. علاوه بر این، کیفیت پایین مخلوط آسفالتی و معایب ایجاد شده در زمان ساخت نیز در ایجاد این نوع خرابی تأثیرگذار می‌باشند [۱۲]. بروز شیارشدگی علاوه بر اینکه منجر به کاهش عمر خدمت‌دهی و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی آسفالتی می‌گردد، با کاهش سطح ایمنی راه، خطرات جدی را برای رانندگان ایجاد می‌کند [۱۳].

از بین اجزای تشکیل دهنده آسفالت، قیر نقش مهمی در تامین رفتار ویسکوالاستیک و عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر انواع خرابی‌ها دارد. به همین دلیل بخش قابل توجهی از پژوهش‌های انجام شده بر روی توسعه آزمایش‌های قیر متمرکز شده است. این فرآیند با توجه به سهولت و سرعت آزمایش‌های قیر می‌تواند روش مناسبی برای پیش‌بینی رفتار مخلوط‌های آسفالتی باشد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی به میزان قابل توجهی به خصوصیات رئولوژیکی قیر بستگی دارد [۱۴]. بنابراین ارزیابی خصوصیات شیارشدگی قیر و بهبود آن با استفاده از افزودنی‌های مختلف، ضروری است و مورد توجه محققان بسیاری بوده است [۱۵-۲۰]. علاوه بر این، استفاده از پودر لاستیک به دلیل بهبود عملکرد قیر و افزودنی‌های نیمه‌گرم به منظور افزایش کارایی قیر لاستیکی و کاهش دمای تولید آسفالت، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین لازم است قیرهای لاستیکی نیمه‌گرم مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گیرند تا مشخص گردد که استفاده از افزودنی‌های نیمه‌گرم چه تأثیری بر خصوصیات عملکردی قیر لاستیکی دارد؛ به نحوی که استفاده از این نوع قیرهای اصلاح شده چه از لحاظ زیست‌محیطی و چه از لحاظ عملکردی توجیه‌پذیر باشد. بنابراین هدف اصلی در این پژوهش، بررسی تأثیر افزودنی‌های نیمه‌گرم بر خصوصیات شیارشدگی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک می‌باشد. از طرف دیگر، هزینه‌های نسبتاً بالای تهیه افزودنی‌های نیمه-

برابر شیارشدگی و ترک‌های انعکاسی، کاهش اثرات محیطی (تولید صدا) و افزایش مقاومت لغزشی از جمله مهمترین مزایای استفاده از پودر لاستیک است [۲۸-۳۲]. بطور کلی اصلاح قیر با پودر لاستیک، منجر به افزایش ویسکوزیته قیر و در نتیجه کاهش کارایی قیر در زمان ساخت می‌گردد. بنابراین تحقیقات بسیاری امکان ترکیب قیرهای لاستیکی با افزودنی‌های نیمه‌گرم را با هدف کاهش دمای تولید آسفالت مورد بررسی قرار داده‌اند. تأثیر فناوری نیمه‌گرم بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی نیز تا حدود بسیاری به نوع افزودنی‌های مورد استفاده بستگی دارد. نتایج تحقیقات انجام شده به منظور ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم نشان می‌دهند که کاهش دمای تولید آسفالت به دلیل پیرشدگی کمتر قیر در زمان اختلاط منجر به کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌گردد [۳۳]. با این وجود، آسفالت نیمه‌گرم فناوری نسبتاً جدیدی محسوب می‌شود که ترکیب آن با قیر لاستیکی در سال‌های اخیر اتفاق افتاده است و شناخت کمی در مورد عملکرد قیر لاستیکی حاوی افزودنی‌های نیمه‌گرم وجود دارد. ژیانو^۴ و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۰۹ و همچنین آکیستی^۵ و همکاران [۳۵،۳۶] در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ تحقیقات آزمایشگاهی جامعی را بر روی قیر PG ۶۴-۲۲ اصلاح شده با ۱۰ درصد پودر لاستیک و حاوی دو نوع افزودنی نیمه‌گرم (آسفامین و ساسوبیت) انجام دادند. از نظر عملکرد مکانیکی هر دو نوع افزودنی نیمه‌گرم منجر به بهبود مقاومت شیارشدگی هر دو نوع قیر پیرشده و پیرنشده بر اساس معیار سوپرپیو (G^*/sind) می‌گردند. با این وجود، نتایج آزمایش رنومتر برش دینامیکی در دمای ۲۵ درجه و سنجش معیار G^*/sind نشان داد که افزودنی‌های نیمه‌گرم منجر به کاهش مقاومت خستگی قیر لاستیکی می‌شوند. ضمن این‌که قیرهای لاستیکی حاوی ساسوبیت بطور قابل ملاحظه‌ای مقاومت کمتری در برابر ترک خوردگی در دماهای پایین از خود نشان می‌دهند، در حالی‌که آسفامین تأثیری بر عملکرد قیر لاستیکی در دمای پایین ندارد. علاوه بر این، نتایج آزمایشات نشان داد که افزودنی‌های نیمه‌گرم تأثیرات متفاوتی بر ویسکوزیته قیرهای لاستیکی داشته‌اند، به نحوی‌که آسفامین منجر به افزایش ویسکوزیته در هر دو دمای ۱۲۰ و ۱۳۵ درجه و ساسوبیت منجر به کاهش

گرم که عمدتاً از خارج از کشور فراهم میشوند، به عنوان یکی از مشکلات پیش رو شناخته میشود. به همین دلیل در این پژوهش از پلیپروپیلن وکس و اسلکوکس که هر دو بومی و ارزان قیمت هستند و تاکنون به عنوان یک افزودنی نیمه‌گرم مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، استفاده شده است.

۱-۲- پیشینه پژوهش

قیر یک ماده مرکب ویسکوالاستوپلاستیک است که رفتار آن تحت تأثیر دما و زمان بارگذاری است. در دماهای بالا و تحت تأثیر بارگذاری‌های با نرخ آهسته، قیر رفتاری کاملاً ویسکوز دارد که در این شرایط مصالح آسفالتی مستعد بروز شیارشدگی هستند [۲۱]. آزمایش‌ها و پارامترهای بسیاری به منظور ارزیابی مقاومت شیارشدگی قیرها توسعه داده شده است. پارامتر شیارشدگی سوپرپیو (G^*/sind) که به کمک آزمایش رنومتر برش دینامیکی اندازه‌گیری می‌شود، یکی از اولین پارامترهای رئولوژیکی به منظور ارزیابی و درجه‌بندی قیرها از نظر مقاومت شیارشدگی است. با این حال، به دلیل استفاده از قیرهای اصلاح شده و همچنین عدم همبستگی مناسب این پارامتر با عملکرد روسازی آسفالتی در برابر شیارشدگی، استفاده از آن با محدودیت‌هایی مواجه شده است. بنابراین، برخی از محققان اهمیت انجام آزمایش‌های قیر در ناحیه ویسکوالاستیک غیرخطی به منظور همبستگی بهتر با عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را مورد بررسی قرار دادند [۲۲]. در نتیجه این تحقیقات، دی‌آنجلو^۱ و همکاران آزمایش تنش خزشی چندگانه برگشت‌پذیر^۲ (MSCR) را برای ارزیابی عملکرد شیارشدگی قیرها در چند سطح تنش معرفی کردند [۲۳]. اعتبارسنجی این آزمایش به منظور ارزیابی عملکرد قیرها در دمای بالا توسط بسیاری از محققان ثابت شده است [۲۴-۲۶]. ژو^۳ و همکاران [۲۷] نیز نشان دادند که پارامترهای حاصل از آزمایش MSCR، به خصوص برای قیرهای اصلاح شده، نتایج بهتری از پارامتر سوپرپیو در ارزیابی عملکرد شیارشدگی قیرها دارند.

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی با پودر لاستیک نشان می‌دهند که افزایش مقاومت در برابر اکسیداسیون و پیرشدگی، افزایش عمر خستگی، افزایش مقاومت در

4 Xiao
5 Akisetty

1 D'Angelo
2 Multiple Stress Creep Recovery test
3 Zhou

نتایج تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که پودر لاستیک با اندازه مش ۴۰ در بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی لاستیکی مؤثرتر است [۴۰]. بنابراین در این پژوهش از پودر لاستیک مش ۴۰ استفاده شده است.

۳-۲- پلی پروپیلن وکس^۲

پلی پروپیلن یکی از پر مصرف‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در دنیا می‌باشد. این ماده غیرسمی و بی‌بو است. ویژگی‌هایی مانند سبکی، سختی، مقاومت شیمیایی و جلای سطحی موجب تنوع محصولات تهیه شده از این ماده و کاربرد فراوان آن گردیده است. قیمت نسبتاً ارزان آن در مقایسه با سایر ترموپلاستیکها نیز از مهمترین مزایای این ماده می‌باشد. پلی پروپیلن وکس نیز یک محصول جانبی از فرآیند تولید پلی پروپیلن می‌باشد که خواص مشابهی با آن دارد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ماده در جدول ۲ نشان داده شده است.

۴-۲- اسلک وکس^۴

اسلک وکس ماده‌ای مرکب از واکس و روغن می‌باشد که محصول جانبی پالایشگاه‌های تولید روغن موتور بوده و ماده اولیه تولید پارافین می‌باشد. این محصول در فرآیند تولید روغن‌های موتور و از پسماندهای نفتی بدست می‌آید. در فرآیند تولید پارافین، اسلک وکس به عنوان ماده اولیه وارد سیستم شده و پس از انجام فرایندهایی نظیر روغن‌گیری و رنگ‌زدایی تبدیل به محصول نهایی یعنی پارافین می‌گردد. این ماده در دمای محیط به حالت جامد می‌باشد. رنگ آن از زرد روشن تا قهوه‌ای متفاوت است و بر اساس نقطه ذوب آن به دو نوع سبک و سنگین تقسیم می‌شود. علاوه بر این درصد روغن موجود در آن نیز متفاوت بوده و از ۱۰ تا ۴۰ درصد تغییر می‌کند. مشخصات و ویژگی‌های اسلک وکس در جدول ۳ نشان داده شده است.

۳- برنامہ آزمایشگاهی

۱-۳- اصلاح قیر

مطابق با استاندارد ASTM D۶۱۱۴، قیر لاستیکی (AR) نوعی قیر اصلاح شده می‌باشد که از ترکیب قیر خالص با حداقل ۱۵ درصد پودر لاستیک (CR) بدست می‌آید

ویسکوزیته در این دماها شده است. رودریگز^۱ و همکاران [۳۶ و ۳۷] نیز در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر چهار نوع افزودنی نیمه‌گرم آلی (ساسوبیت، آسفالتن-آ، آسفالتن-بی و لیکومونت) بر خصوصیات قیر لاستیکی پرداختند. نتایج آزمایشات انجام شده نشان دادند که افزودنی‌های آلی منجر به کاهش ویسکوزیته قیر لاستیکی می‌گردند. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌ای بین قیر لاستیکی و واکس‌ها رخ می‌دهد که عمدتاً مربوط به خصوصیات تغییرپذیر ذوب و جامد شدن واکس‌ها در دماهای مختلف آزمایش می‌باشد. برخلاف یافته‌هایی که نشان دادند افزودنی‌های نیمه‌گرم آلی منجر به بهبود عملکرد شیارشدگی قیر لاستیکی می‌گردند، یو^۲ و همکاران [۳۹] در سال ۲۰۱۷ به این نتیجه دست یافتند که قیرهای لاستیکی حاوی افزودنی نیمه‌گرم شیمیایی (اووترم) عملکرد ضعیف‌تری در دمای بالا و در مقایسه با قیر لاستیکی کنترل از خود نشان می‌دهند. در حالی که در دماهای متوسط و پایین، تغییر قابل ملاحظه‌ای در عملکرد قیر مشاهده نمی‌شود. اگرچه که افزایش ویسکوزیته قیر و در نتیجه آن دمای اختلاط و تراکم ناشی از پودر لاستیک می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای با استفاده از افزودنی‌های نیمه‌گرم جبران گردد، اما برخی نتایج متناقض در آزمایش‌های قیرهای لاستیکی نیمه‌گرم در تحقیقات گذشته مشاهده می‌شود که عمدتاً ناشی از تأثیرات انواع مختلف این افزودنی‌ها می‌باشد. ضمن این‌که نتایج ارائه شده در این قسمت تأیید می‌کنند که امکان استفاده از افزودنی‌های نیمه‌گرم بدون تأثیرات منفی قابل ملاحظه بر خصوصیات عملکردی قیر لاستیکی و به منظور بهبود شرایط ساخت و بهره‌وری بیشتر انرژی وجود دارد. لازم به ذکر است که انواع مختلف افزودنی‌های نیمه‌گرم آلی و شیمیایی می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر خصوصیات رئولوژیکی قیر لاستیکی داشته باشند.

۲- مواد و افزودنی‌ها

۱-۲- قیر

در این پژوهش از قیر خالص ۶۰/۷۰ شرکت نفت پاسارگاد، به عنوان قیر پایه استفاده شده است. مشخصات و ویژگی‌های قیر مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- پودر لاستیک

3 Polypropylene wax

4 Slack wax

1 Rodriguez

2 Yu

جدول ۱. خصوصیات قیر پایه ۷۰/۶۰ مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. The properties of 60/70 Bitumen

حدود مشخصات قیر ۶۰/۷۰		نتیجه آزمایش	استاندارد	شرح آزمایش
حداکثر	حداقل			
-	-	۱/۰۱۶	ASTM D-70	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
۷۰	۶۰	۶۵	ASTM D-5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه (دهم میلی متر)
۵۶	۴۹	۵۱	ASTM D-36	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
-	۲۳۲	۳۰۶	ASTM D-92	نقطه اشتعال (درجه سانتی گراد)
-	۱۰۰	>۱۰۰	ASTM D-113	انگمی در دمای ۲۵ درجه (سانتی متر)
-	-	۱۷۷	ASTM D-2170	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه (ثانیه)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلی پروپیلن وکس مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Physical and chemical properties of Polypropylene wax used in this study

استاندارد	نتیجه آزمایش	مشخصات
ASTM D-445	حداکثر ۳۰	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد (cP)
ASTM D-1298	۰/۹۲±۰/۰۲	وزن مخصوص (gr/cm ³)
ASTM D-127	۱۱۰±۳	نقطه ذوب (°C)
ASTM D-92	حداقل ۲۵۰	نقطه اشتعال (°C)
-	نامحلول	انحلال پذیری در آب
-	سفید	رنگ

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی اسلک وکس مورد استفاده در این پژوهش

Table 3. Physical and chemical properties of Slack wax used in this study

استاندارد	نتیجه آزمایش	مشخصات
ASTM D-445	۲۰±۵	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد (cP)
ASTM D-1298	۰/۸۱-۰/۸۳	وزن مخصوص در دمای ۱۵ درجه (gr/cm ³)
ASTM D-127	۱۰۵±۵	نقطه ذوب (°C)
ASTM D-92	حداقل ۲۳۰	نقطه اشتعال (°C)
-	۷-۱۲	درصد روغن (%)
-	قهوه ای روشن	رنگ



شکل ۱. افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش، (الف) اسلک وکس (ب) پلی پروپیلن وکس

Fig. 1. Additives used in this study, a) Slack wax b) Polypropylene wax

پالایشگاه، کارخانه آسفالت و ارزیابی کارایی بتن آسفالتی کاربرد دارد و ویژگی‌های روانی قیر در دمای میانی و بالا را بررسی می‌کند. برخلاف آزمایش ویسکومتر سینماتیکی و دینامیکی که بر اساس جریان قیر در یک لوله موئین کار می‌کنند، این نوع ویسکومتر دارای محفظه بزرگتری است و برای قیرهای اصلاح شده و اصلاح نشده کاربرد دارد. حداکثر ویسکوزیته برای پمپاژ قیر طبق استاندارد شارپ ۳ پاسکال-ثانیه است. در این پژوهش آزمایش ویسکوزیته چرخشی در دماهای ۱۳۵ (دمای استاندارد آزمایش)، ۱۶۵ و ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد و مطابق با استاندارد AASHTO T316 [۴۴] انجام شده است. دماهای این آزمایش مطابق با دمای مورد انتظار تولید نمونه‌های قیر اصلاح شده انتخاب شده‌اند.

۳-۴- آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR)

آزمایش رئومتر برش دینامیکی با اندازه‌گیری پارامترهای مدول برشی مرکب (G^*) و زاویه فاز (δ) هم رفتار الاستیک و هم رفتار ویسکوز را توصیف می‌نماید. پارامتر G^* معرف مقاومت کلی مصالح در برابر تغییرشکل برشی بوده و شامل دو جزء الاستیک و ویسکوز می‌باشد. پارامتر δ نیز نشانه‌ای از مقادیر نسبی تغییرشکل برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر است. در این پژوهش آزمایش رئومتر برش دینامیکی بر اساس استاندارد AASHTO T315 و در فرکانس 10 rad/s انجام شده است. پارامتر $G^*/\sin\delta$ از طرف شارپ به عنوان شاخصی برای ارزیابی مقاومت قیر در برابر شیارشدگی معرفی شده است. هرچه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت قیر در برابر شیارشدگی نیز بیشتر است. مطابق با استاندارد شارپ به منظور جلوگیری از پدیده

[۴۱]. در این پژوهش نیز از ۱۵ درصد پودر لاستیک به منظور تهیه قیر لاستیکی استفاده شده است. ترکیب قیر و پودر لاستیک در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از مخلوط‌کن برش بالا (۳۶۰۰ دور در دقیقه) و به مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام می‌شود. با توجه به مطالعات قبلی [۴۲، ۴۳] و امکان مقایسه نتایج، اسلک وکس و پلی پروپیلن وکس هر کدام به میزان ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی قیر استفاده شده اند. برای تولید قیرهای اصلاح شده، ابتدا قیر لاستیکی تهیه شد و سپس عمل اختلاط با افزودنی‌های نیمه‌گرم به مدت ۱۵ دقیقه در مخلوط‌کن با سرعت ۳۶۰۰ دور در دقیقه انجام شد. بنابراین، ۸ ترکیب مختلف قیر به منظور انجام آزمایشات تهیه می‌شوند که علائم اختصاری هر کدام از آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

۳-۲- پیرشدگی قیر

با توجه به این‌که خواص رئولوژیکی قیر بطور مداوم و در طول زمان به دلیل فرآیند پیرشدگی ناشی از اکسیداسیون تغییر می‌یابد، لازم است نمونه‌های قیر قبل از انجام آزمایش در معرض پیرشدگی قرار گیرند. از آنجایی که پدیده شیارشدگی در آغاز عمر روسازی و در دماهای بالا رخ می‌دهد، بنابراین در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه مدت قیر در مرحله ساخت و پخش مخلوط آسفالتی، از آزمایش لعاب نازک چرخشی قیر (RTFO) مطابق با استاندارد AASHTO T240 استفاده شده است.

۳-۳- آزمایش ویسکوزیته چرخشی قیر (RV)

این آزمایش برای حصول اطمینان از قابلیت پمپاژ قیر در

جدول ۴. علائم اختصاری برای نام‌گذاری ترکیب‌های مختلف قیر

Table 4. Binder IDs and the type and dosage of modifiers used in the preparation of binders

CR15P6	CR15P4	CR15P2	CR15S6	CR15S4	CR15S2	CR15	BASE	نمونه‌های قیر نوع افزودنی
%۱۵	%۱۵	%۱۵	%۱۵	%۱۵	%۱۵	%۱۵	-	پودر لاستیک
-	-	-	%۶	%۴	%۲	-	-	اسلک‌وکس
%۶	%۴	%۲	-	-	-	-	-	پلی پروپیلن‌وکس

ترافیک سبک می‌باشد. برای ترافیک سنگین نیز تنش ۳۲۰۰ پاسکال انتخاب شد زیرا بر اساس تحقیقات دی‌ان‌جلو، با انجام آزمایش MSCR در دماهای بالای عملکردی قیرهای اصلاح شده، لغزش و جابجایی زنجیره پلیمری در این سطح تنش اتفاق می‌افتد [۲۱ و ۴۷]. یک نمونه از سیکل بارگذاری و باربرداری آزمایش MSCR در شکل ۲ نشان داده شده است. دو پارامتر اساسی شامل کرنش جمعی غیر قابل برگشت J_{nr} (درصد بازگشت الاستیک^۲ قیر R)؛ از این آزمایش بدست می‌آید. پارامتر J_{nr} به عنوان جایگزینی برای پارامتر شیارشدگی $G^*/\sin\delta$ پیشنهاد شده است. این پارامتر برای پیش‌بینی رفتار هر دو نوع قیر خالص و اصلاح شده مناسب است. به منظور محاسبه پارامتر J_{nr} بانگین کرنش غیرقابل برگشت بدست آمده از ۱۰ سیکل بارگذاری و باربرداری بر تنش برشی اعمال شده بر نمونه در طی آن ۱۰ سیکل تقسیم می‌شود. این پارامتر نشان دهنده مقاومت قیر در برابر تغییرشکل‌های دائمی می‌باشد. پارامتر R نیز نشان دهنده نسبت کرنش برگشتپذیر بر کرنش کل تعیین شده در هر سیکل می‌باشد [۴۵]. نحوه محاسبه این پارامترها در روابط (۱) تا (۳) نشان داده شده است.

recovery % at 100 Pa

$$or \ 3200 \ Pa = \frac{1}{10} \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{\gamma_{(r)i}}{\gamma_{(t)i}} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$J_{nr \ at \ 100 \ Pa} \ (1 / \ kPa) = \frac{1}{10} \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{\gamma_{(nr)i}}{0.1} \right] \quad (2)$$

2 Non-recoverable creep compliance

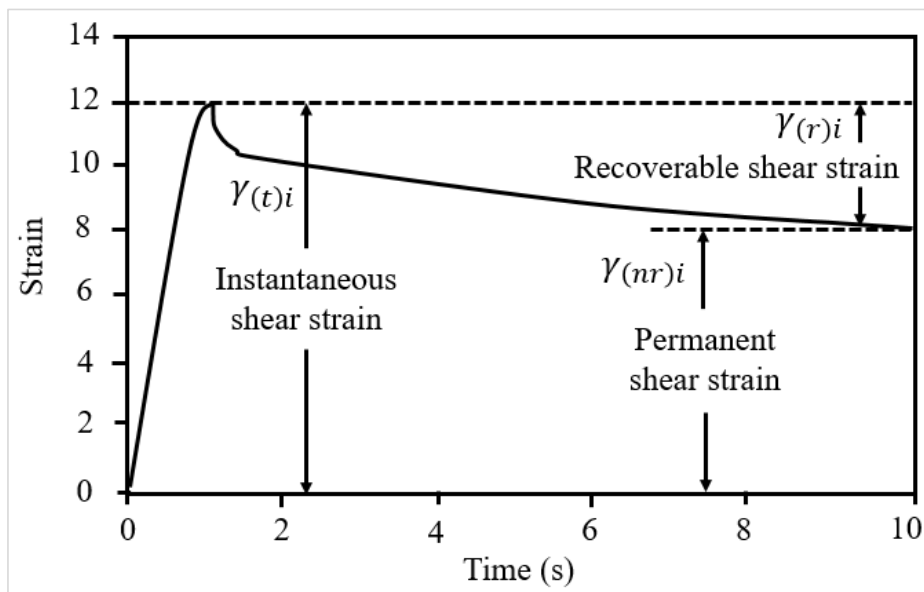
3 Percent recovery

شیارشدگی، مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ باید برای قیر پیرنشده بیشتر ۱ کیلوپاسکال و برای قیر بعد از فرآیند پیرشدگی RTFO بیشتر از ۲/۲ کیلوپاسکال باشد [۴۵].

۵-۳- آزمایش تنش خزشی چندگانه برگشت‌پذیر (MSCR)

تحقیقات انجام شده نشان داده است که تغییرشکل‌های برگشت‌ناپذیر قیرها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی دارد [۴۵]. آزمایش تنش خزشی چندگانه برگشت‌پذیر برای اولین بار توسط برنامه تحقیقاتی NCHRP ۹-۱۰ معرفی و سپس توسط دانگر^۱ و همکاران توسعه داده شده است [۴۶]. بر اساس استاندارد AASHTO TP ۷۰-۱۲ روند انجام آزمایش بدین صورت است که یک نمونه قیر به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در هر سطح تنش در معرض ۱۰ سیکل شامل یک ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت در دمای عملکردی بالا و با استفاده از دستگاه رنومتر برش دینامیکی قرار می‌گیرد. آزمایش از سطح تنش ۲۵ پاسکال آغاز و بلافاصله پس از انتهای هر ۱۰ سیکل بارگذاری، سطح تنش دو برابر می‌شود. این روند تکرار شده و بارگذاری نهایتاً در سطح تنش ۲۵۶۰۰ پاسکال پایان می‌یابد [۴۷]. در این پژوهش آزمایش تنش خزشی چندگانه برگشت‌پذیر در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد (دمای عملکردی بالای قیر خالص ۶۰/۷۰) و به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه مدت، بر روی نمونه‌های قیر پیرشده RTFO انجام می‌شود. دی‌ان‌جلو دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال را برای برقراری ارتباط بین رفتار شیارشدگی قیر و مخلوط آسفالتی انتخاب نمود. به این صورت تنش ۱۰۰ پاسکال به عنوان نماینده سطوح تنش پایین مقدار مناسبی برای مدل کردن

1 Dongre



شکل ۲. سیکل بارگذاری و باربرداری در آزمایش MSCR [۴۵]
 Fig. 2. A typical one cycle of load and recovery at MSCR test

نتایج آزمایشات ویسکوزیته و شیارشدگی پرداخته می‌شود.

۴-۱- تأثیر افزودنی‌های نیمه‌گرم بر ویسکوزیته قیر لاستیکی

شکل‌های ۳ و ۴ تأثیر افزودنی‌های نیمه‌گرم استفاده شده بر ویسکوزیته چرخشی قیر لاستیکی را نشان می‌دهند. با افزودن پودر لاستیک به قیر خالص، ویسکوزیته قیر در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد حدوداً سه برابر افزایش می‌یابد. دلیل افزایش ویسکوزیته، پیرشدگی کوتاه مدت قیر در حین اختلاط با پودر لاستیک و همچنین جذب مواد روغنی موجود در قیر (رزین) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر دو افزودنی نیمه‌گرم استفاده شده، ویسکوزیته قیر لاستیکی را کاهش می‌دهند؛ به نحوی که با افزایش درصد افزودنی‌های نیمه‌گرم، ویسکوزیته قیر لاستیکی کاهش بیشتری داشته و به ویسکوزیته قیر خالص نزدیک‌تر می‌شود.

۴-۲- نتایج آزمایش DSR

شکل‌های ۵ و ۶ تغییرات پارامتر شیارشدگی نمونه‌های قیر در دماهای مختلف را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزودن پودر لاستیک به قیر منجر به افزایش پارامتر شیارشدگی (G^*) می‌شود. علاوه بر این با افزایش دما نرخ تغییرات پارامتر G^* ($\sin \delta$) (حساسیت حرارتی قیر) برای قیر اصلاح شده لاستیکی نسبت

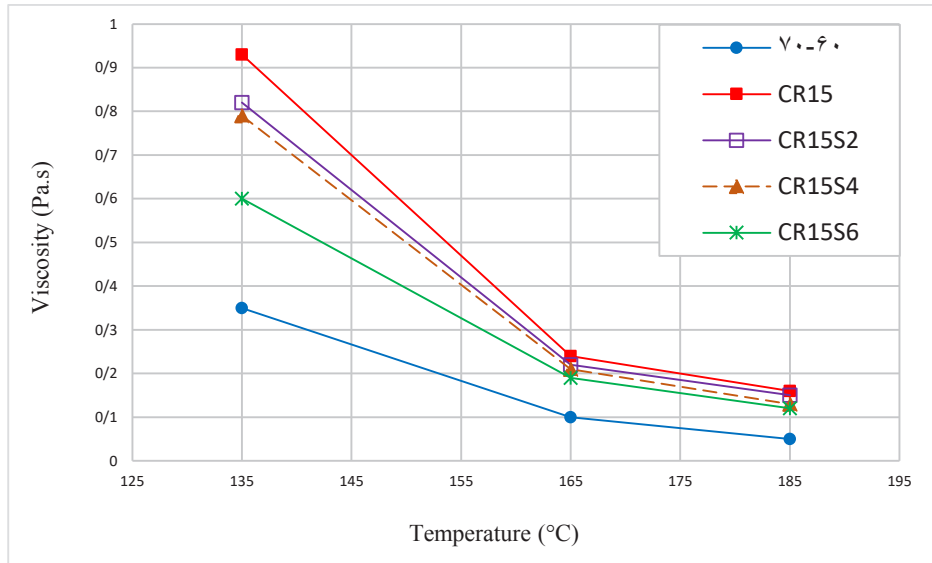
$$J_{nr \text{ at } 3200 \text{ Pa}} (1 / kPa) = \frac{1}{10} \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{\gamma_{nr(i)}}{3.2} \right] \quad (3)$$

در این روابط، $\gamma_{(r)_i}$ رنش برگشت‌پذیر و $\gamma_{(nr)_i}$ رنش غیر قابل بازگشت در پایان ۹ ثانیه استراحت و $\gamma_{(t)_i}$ کرنش خزشی در پایان زمان بارگذاری ۱ ثانیه‌ای در هر سیکل بارگذاری و باربرداری می‌باشند. به منظور محاسبه میزان حساسیت نمونه‌های قیر به تغییرات سطح تنش نیز پارامتر $J_{nr-diff}$ استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۴۵].

$$J_{nr(diff)} \% = \left[\frac{J_{nr3200Pa} - J_{nr100Pa}}{J_{nr100Pa}} \right] \times 100 \quad (4)$$

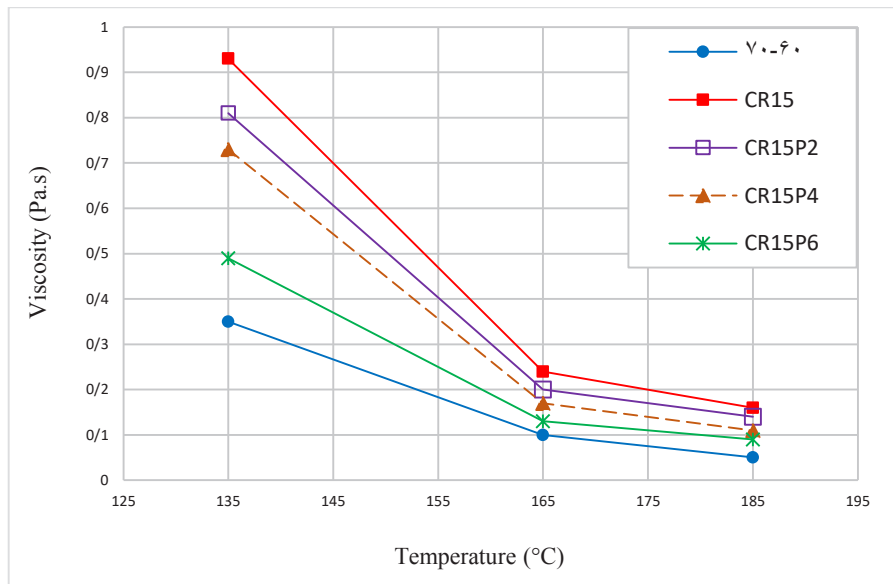
۴- نتایج و بحث

در این بخش تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده بر عملکرد شیارشدگی قیر و پارامترهای تأثیرگذار بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا تأثیر افزودنی‌های نیمه‌گرم بر ویسکوزیته قیر و درجه عملکردی قیرهای اصلاح شده مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس نتایج آزمایش MSCR ارائه خواهد شد. در بخش پایانی نیز با استفاده از آزمون تحلیل واریانس به تحلیل اثرهای اصلی متغیرهای تأثیرگذار بر



شکل ۳. تأثیر اسلک وکس بر ویسکوزیته چرخشی قیر لاستیکی

Fig. 3. Effect of Slack wax on rotational viscosity of rubberized binder



شکل ۴. تأثیر پلی پروپیلن وکس بر ویسکوزیته چرخشی قیر لاستیکی

Fig. 4. Effect of Polypropylene wax on rotational viscosity of rubberized binder

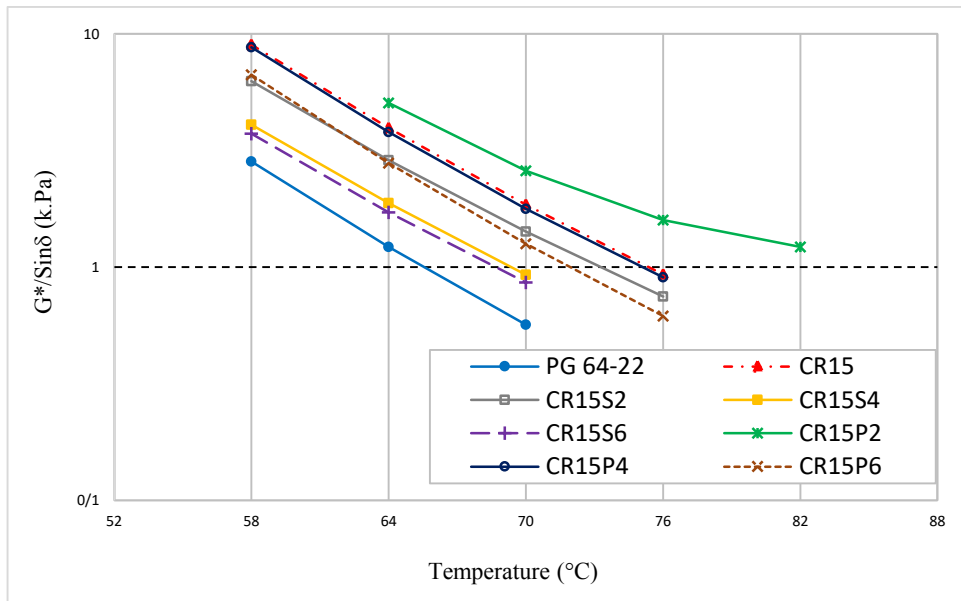
مثبتی بر عملکرد شیارشدگی قیر لاستیکی ندارد. با این حال مقاومت شیارشدگی نمونه‌های قیر لاستیکی حاوی اسلک وکس بیشتر از نمونه قیر خالص است.

درجه‌بندی عملکردی^۱ (PG) بالای نمونه‌های قیر در جدول ۵ نشان داده شده است. با افزودن ۱۵ درصد پودر لاستیک به قیر خالص،

به قیر خالص کاهش می‌یابد که نقش مهمی در بهبود عملکرد قیر در دمای بالا ایفا می‌کند.

برای نمونه‌های حاوی پلی پروپیلن وکس نیز مشاهده شد که بیشترین مقدار پارامتر شیارشدگی مربوط به نمونه قیر لاستیکی حاوی ۲ درصد از این افزودنی می‌باشد و با افزایش درصد آن، مقاومت در برابر شیارشدگی کاهش می‌یابد. ضمن این که اسلک وکس تأثیر

1 Performance graded



شکل ۵. پارامتر شیاردگی برای نمونه‌های قیر پیرنشده
Fig. 5. Rutting parameter for un-aged asphalt binders

نمونه قیر لاستیکی افزایش می‌یابد. در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال و با افزایش درصد این افزودنی مقدار پارامتر R کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، پلی‌پروپیلن‌وکس بطور کلی در هر دو سطح تنش منجر به افزایش مقدار پارامتر R در نتیجه بهبود قابلیت انعطاف‌پذیری قیر لاستیکی می‌گردد. بهترین عملکرد مربوط به نمونه قیر لاستیکی حاوی ۲ درصد پلی‌پروپیلن‌وکس است.

شکل ۸ مقادیر کرنش تجمعی غیرقابل برگشت را برای نمونه‌های قیر در دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال نشان می‌دهد. پارامتر J_{nr} نشان دهنده مقاومت قیر در برابر تغییرشکل‌های دائمی است. مقدار کمتر J_{nr} بیان‌کننده مقاومت بیشتر نمونه قیر در برابر تغییرشکل‌های دائمی و عملکرد بهتر آن در برابر شیاردگی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزودن پودر لاستیک مقدار این پارامتر نسبت به نمونه قیر خالص بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین پلی‌پروپیلن‌وکس نیز منجر به کاهش مقدار J_{nr} را مقایسه با نمونه قیر لاستیکی می‌گردد. قیر لاستیکی حاوی ۲ درصد پلی‌پروپیلن‌وکس در هر دو سطح تنش بیشترین مقاومت در برابر شیاردگی را دارد. از طرف دیگر، با افزودن اسلک‌وکس به قیر لاستیکی و افزایش درصد آن، مقدار پارامتر J_{nr} افزایش می‌یابد. بنابراین قیرهای لاستیکی حاوی اسلک‌وکس مقاومت کمتری در برابر شیاردگی

درجه عملکردی بالای قیر یک رده افزایش یافته است. ضمن این‌که اسلک‌وکس منجر به کاهش درجه عملکردی قیر لاستیکی می‌گردد، به نحوی که درجه عملکردی قیر لاستیکی حاوی ۶ درصد از این افزودنی با درجه عملکردی قیر خالص برابر می‌شود. از طرف دیگر، تأثیر پلی‌پروپیلن‌وکس به نحوی است که ۲ درصد از این افزودنی منجر به افزایش درجه عملکردی بالای قیر لاستیکی از ۷۰ به ۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌گردد. البته همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، ۴ و ۶ درصد پلی‌پروپیلن‌وکس تأثیری بر درجه عملکردی بالای قیر لاستیکی ندارد.

۳-۴- نتایج آزمایش MSCR

درصد بازگشت الاستیک R (رای نمونه‌های قیر در دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در شکل ۷ ارائه شده است. هر چه مقدار پارامتر R بیشتر باشد نشان می‌دهد که قیر توانایی بیشتری نسبت به بازگشت کرنش‌های اعمالی بعد از بارگذاری دارد. در این صورت سهم کرنش‌های الاستیک بیشتر بوده و مقدار تغییرشکل‌های پلاستیک بعد از بارگذاری کمتر می‌شود. قیرهای اصلاح شده با اسلک‌وکس در سطوح تنش پایین عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. بطوری که در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال، درصد بازگشت الاستیک نسبت به

جدول ۵. درجه عملکردی بالای نمونه‌های قیر پیرنشده و پیرشده

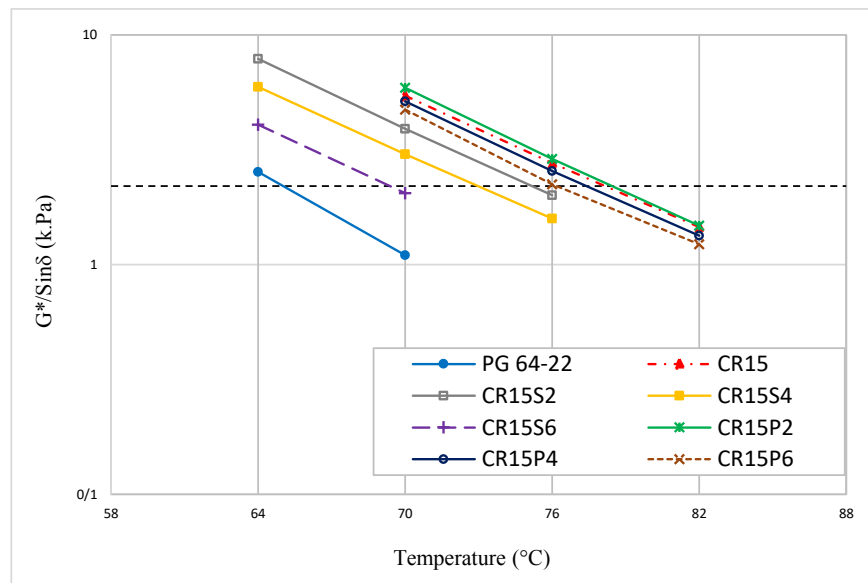
Table 5. High performance graded of un-aged and RTFO aged asphalt binders

درجه عملکردی بالا (°C)	RTFO (°C)	پیرنشده (°C)	نمونه‌های قیر
۶۴	۶۴	۶۴	60-70
۷۰	۷۶	۷۰	CR15
۷۰	۷۰	۷۰	CR15S2
۶۴	۷۰	۶۴	CR15S4
۶۴	۶۴	۶۴	CR15S6
۷۶	۷۶	۸۲	CR15P2
۷۰	۷۶	۷۰	CR15P4
۷۰	۷۶	۷۰	CR15P6

جدول ۶. مشخصات رده‌بندی عملکردی قیرها بر اساس استاندارد AASHTO M332 [۴۹]

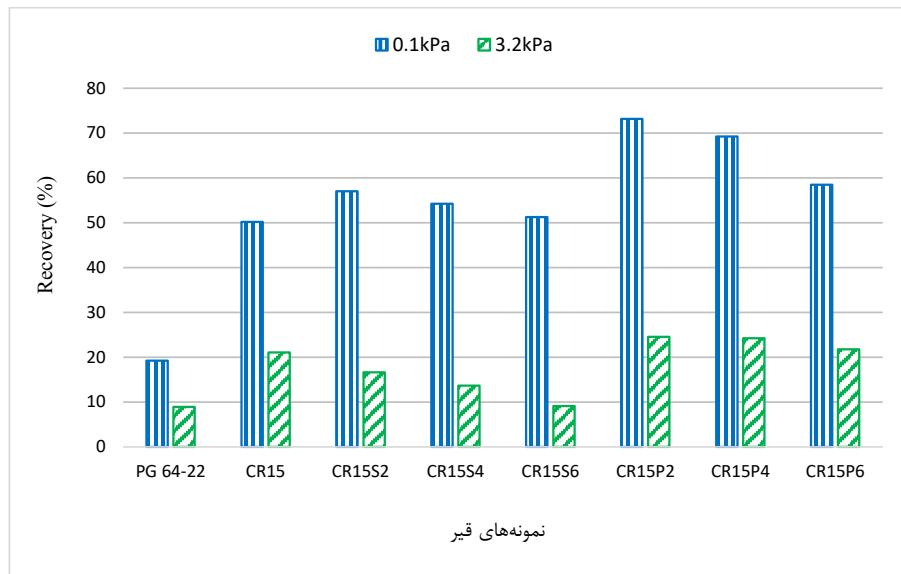
Table 6. Performance graded binders specification based on AASHTO M332 [49]

Limits $J_{nr@3200}$	MSCR class	ESAL
$\leq 4.5 \text{ kPa}^{-1}$	S - Standard	< 10 million and more than the standard traffic speed (> 70 Km/h)
$\leq 2 \text{ kPa}^{-1}$	H - Heavy	> 10 - 30 million or slow – moving traffic (20 – 70 Km/h)
$\leq 1 \text{ kPa}^{-1}$	V – Very heavy	> 30 million or standing traffic (< 20 Km/h)
$\leq 0.5 \text{ kPa}^{-1}$	E – Extremely heavy	> 30 million and standing traffic (< 20 Km/h)

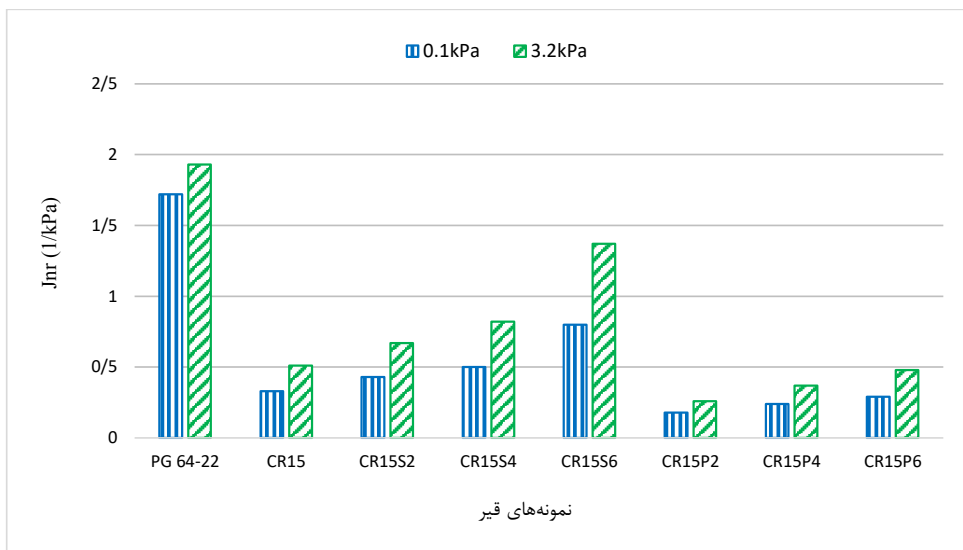


شکل ۶. پارامتر شیارشدگی برای نمونه‌های قیر پیرشده RTFO

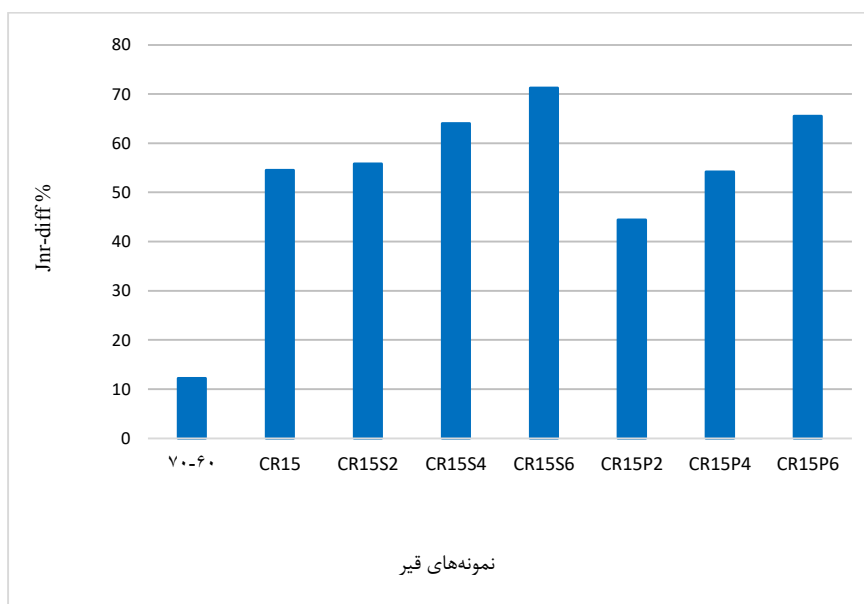
Fig. 6. Rutting parameter for RTFO-aged asphalt binders



شکل ۷. درصد بازگشت نمونه‌های قیر در سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال
Fig. 7. Recovery percentage of asphalt binders at 100 and 3200 Pa stress levels



شکل ۸. کرنش تجمعی غیرقابل برگشت نمونه‌های قیر در سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال
Fig. 8. Non-recoverable creep compliance (Jnr) of asphalt binders at 100 and 3200 Pa stress levels



شکل ۹. درصد تغییرات کرنش تجمعی غیر قابل برگشت نمونه‌های قیر
Fig. 9. The percent difference between Jnr 0.1 and Jnr 3.2 (Jnr-diff)

بالای عملکردی روسازی با استفاده از روش شارپ تعیین شده و سپس با کنترل کردن پارامترهای $J_{nr@3200}$ و $J_{nr-diff}$ طرح ترافیک پیشنهادی برای روسازی مورد نظر مشخص می‌گردد. نحوه طبقه‌بندی نمونه‌های قیر در جدول ۶ نشان داده شده است. ضمن اینکه نتایج رده‌بندی عملکردی قیرها بر اساس سطح ترافیک نیز در جدول ۷ ارائه شده است.

۴-۴- تحلیل آماری نتایج آزمایشات قیر با استفاده از آزمون تحلیل واریانس ANOVA

در این بخش، از آزمون تحلیل واریانس دو طرفه به منظور تشخیص پارامترهای تأثیرگذار و آنالیز حساسیت نتایج آزمایش‌های ویسکوزیته و شیارشدگی استفاده شده است. برای این منظور، میزان افزودنی‌های قیر و دمای آزمایش به عنوان متغیرهای تحلیل انتخاب شدند و آزمون در سطح معناداری ۰/۰۵ انجام شده است.

۴-۴-۱- آنالیز حساسیت نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی قیر

یکی از پیش فرض‌های آزمون تحلیل واریانس، نرمال بودن توزیع داده‌ها است. نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی مطابق با آزمون کای دو^۱ دارای توزیع نرمال نمی‌باشند. بنابراین ابتدا با لگاریتمی کردن

دارند. حساسیت قیرها نسبت به افزایش سطح تنش‌های اعمالی با استفاده از پارامتر $J_{nr-diff}$ نجیده می‌شود. مقادیر کمتر این پارامتر نشان دهنده حساسیت کمتر قیر به تغییر در سطح تنش می‌باشد. استاندارد AASHTO M ۳۳۲ مقدار تغییر در کرنش تجمعی غیر قابل برگشت بین دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال را به ۷۵ درصد محدود کرده است. این معیار استفاده از قیرهایی که نسبت به تغییرات تنش حساس می‌باشند و پتانسیل شیارشدگی بالایی دارند را با وجود اینکه الزامات درجه عملکردی را ارضا نمایند، محدود می‌سازد. شکل ۹ تغییرات پارامتر $J_{nr-diff}$ برای نمونه‌های قیر نشان می‌دهد. استفاده از پودر لاستیک میزان حساسیت قیر خالص نسبت به تغییر در سطح تنش را افزایش میدهد. با افزودن اسلک وکس نیز این روند افزایشی ادامه می‌یابد. با این وجود نتایج در محدوده قابل قبول (کمتر از ۷۵ درصد) قرار دارند. در بین تمامی نمونه‌های قیر، قیر لاستیکی حاوی ۶ درصد اسلک وکس بیشترین و قیر لاستیکی حاوی ۲ درصد پلیپروپیلن وکس کمترین مقدار $J_{nr-diff}$ دارند. این نتایج نشان می‌دهند که پلیپروپیلن وکس می‌تواند حساسیت قیر لاستیکی نسبت به افزایش سطح تنش را کاهش دهد.

استاندارد AASHTO M ۳۳۲-۱۴ روش جدید طبقه‌بندی عملکردی قیرها را ارائه می‌دهد. مطابق با این روش، ابتدا دمای

1 Chi-square

است. به منظور صرفه‌جویی در بیان مطالب، فقط نتایج آزمون برای پارامترهای R_{3200} $J_{nr@3200}$ ارائه شده است زیرا نتایج آزمون برای این پارامترها در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال نیز مشابه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد افزودنی‌ها تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای R J_{nr} در سطح معناداری ۰/۰۵ دارد. به عبارت دیگر استنباط می‌شود که پارامترهای R J_{nr} می‌توانند عملکرد شیارشدگی قیر را به خوبی ارزیابی کنند و افزودنی‌های مورد استفاده نیز تأثیر معناداری بر عملکرد قیر در دمای بالا دارند.

داده‌ها نسبت به پیروی کردن آن‌ها از توزیع نرمال اطمینان حاصل شد و سپس آزمون تحلیل واریانس در سطح معناداری ۰/۰۵ انجام گردید. نتایج تحلیل واریانس در جدول ۸ نشان داده شده است. با توجه به این‌که مقدار آماره آزمون (F) بسیار بزرگتر از یک و مقدار Sig . کمتر از ۰/۰۵ است، استنباط می‌شود که درصد افزودنی‌ها و دمای آزمایش تأثیر قابل توجهی بر ویسکوزیته قیر دارند.

۲-۴-۴- آنالیز حساسیت نتایج آزمایش MSCR

نتایج آزمون تحلیل واریانس در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده

جدول ۷. رده‌بندی عملکردی نمونه‌های قیر بر اساس سطح ترافیک
Table 7. Performance graded asphalt binders based on traffic level

سطح ترافیک	J _{nr} -diff %	J _{nr@3200} (kPa ⁻¹)	نمونه قیر
H	۱۲/۲	۱/۹۳	60-70
V	۵۴/۵	۰/۵۱	CR15
V	۵۵/۸	۰/۶۷	CR15S2
V	۶۴	۰/۸۲	CR15S4
H	۷۱/۲۵	۱/۳۷	CR15S6
E	۴۴/۴	۰/۲۶	CR15P2
E	۵۴/۲	۰/۳۷	CR15P4
E	۶۵/۵	۰/۴۸	CR15P6

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس بر روی نتایج ویسکوزیته چرخشی قیر
Table 8. The analysis of variance results of RV test

Slack wax modified asphalt binders						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Significant at 0.05 level
Slack_Dosage	0.031	3	0.010	8.774	7E-03	YES
Crumb_Dosage	0.286	1	0.286	242.305	2.9E-07	YES
Temperature	1.566	2	0.783	663.651	1.29E-09	YES
Polypropylene wax modified asphalt binders						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Significant at 0.05 level
P.P_Dosage	0.116	3	0.039	34.058	6.6E-05	YES
Crumb_Dosage	0.286	1	0.286	251.891	2.5E-07	YES
Temperature	1.673	2	0.837	737.113	8.5E-10	YES

جدول ۹. نتایج تحلیل واریانس درصد بازگشت قیر (%R)

Table 9. The analysis of variance results of recovery percentage (R %)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Significant at 0.05 level
Slack_Dosage	151.767	3	50.589	295.170	1.6E-08	YES
P.P_Dosage	20.209	3	6.736	39.304	3.9E-05	YES
Crumb_Dosage	152.857	1	152.857	891.874	1.7E-09	YES

جدول ۱۰. نتایج تحلیل واریانس کرنش تجمعی غیر قابل برگشت قیر (J_nr)

Table 10. The analysis of variance results of non-recoverable creep compliance (Jnr)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Significant at 0.05 level
Slack_Dosage	0.183	3	0.061	106.970	8.5E-07	YES
P.P_Dosage	0.102	3	0.034	59.488	8E-06	YES
Crumb_Dosage	0.313	1	0.313	548.272	1.2E-08	YES

۵- نتیجه گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های قیر، مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:

-اسلک‌وکس و پلی‌پروپیلن‌وکس منجر به کاهش ویسکوزیته قیر لاستیکی می‌شوند، به نحوی که با افزایش درصد این افزودنی‌ها، ویسکوزیته قیر لاستیکی کاهش بیشتری داشته و به ویسکوزیته قیر خالص نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین یکی از معایب قیر لاستیکی که افزایش ویسکوزیته و به دنبال آن افزایش دمای ساخت و تراکم مخلوط آسفالتی است، برطرف شده و مخلوط‌های آسفالت نیمه‌گرم لاستیکی در دماهای پایین‌تر و نزدیک به دمای قیر خالص تولید و متراکم می‌گردند.

-اسلک‌وکس منجر به کاهش دمای عملکردی بالای قیر لاستیکی می‌گردد. به نحوی که نمونه قیر لاستیکی حاوی ۶ درصد از این افزودنی، دمای عملکردی برابر با قیر خالص دارد. از طرف دیگر، ۲ درصد پلی‌پروپیلن‌وکس می‌تواند درجه عملکردی بالای قیر لاستیکی را یک رده افزایش دهد.

-استفاده از پلی‌پروپیلن‌وکس منجر به افزایش مقاوت شیارشدگی قیر لاستیکی می‌گردد. مقدار پارامتر R رای تمام درصد‌های این

افزودنی در مقایسه با نمونه قیر لاستیکی، در هر دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال، افزایش یافته است. ضمن این‌که پارامتر J_{nr} نیز با افزودن پلی‌پروپیلن و کس به قیر لاستیکی کاهش می‌یابد که نشان دهنده مقاومت بیشتر آن در برابر تغییر شکل‌های دائمی است. نمونه قیر لاستیکی حاوی ۲ درصد پلی‌پروپیلن‌وکس دارای بهترین عملکرد شیارشدگی و کمترین حساسیت نسبت به تغییر در سطح تنش می‌باشد.

-اسلک‌وکس منجر به کاهش مقاومت شیارشدگی قیر لاستیکی می‌گردد. پارامتر J_{nr} رای نمونه‌های حاوی این افزودنی در مقایسه با نمونه قیر لاستیکی در هر دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد. ضمن این‌که اسلک‌وکس با افزایش پارامتر $J_{nr-diff}$ باعث افزایش حساسیت قیر لاستیکی نسبت به تغییرات سطح تنش‌های اعمالی نیز می‌شود.

-از نظر رده‌بندی عملکردی بر مبنای سطح ترافیک پیشنهادی آیین‌نامه آشتو و در مقایسه با نمونه قیر لاستیکی، پلی‌پروپیلن‌وکس منجر به افزایش یک رده‌ای سطح ترافیک شده است. ضمن این‌که اسلک‌وکس تأثیر مثبتی نداشته و سطح ترافیکی نمونه قیر لاستیکی حاوی ۶ درصد اسلک‌وکس، یک رده کاهش یافته است.

- the performance of asphalt rubber mixtures, *Journal of Cleaner Production*, 41 (2013) 15–22.
- [10] Z. Leng, H. Yu, Z. Zhang, Z. Tan, Optimizing the mixing procedure of warm asphalt rubber with wax-based additives through mechanism investigation and performance characterization, *Construction and Building Materials*, 144 (2017) 291–299.
- [11] H. Wang, X. Liu, P. Apostolidis, T. Scarpas, Review of warm mix rubberized asphalt concrete: Towards a sustainable paving technology, *Journal of Cleaner Production*, 177 (2018) 302–314.
- [12] Y. Du, J. Chen, Z. Han, W. Liu, A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods, *Construction and Building Materials*, 168 (2018) 893–905.
- [13] J.B.S. Bastos, L.F.A.L. Babadopulos, J.B. Soares, Relationship between multiple stress creep recovery (MSCR) binder test results and asphalt concrete rutting resistance in Brazilian roadways, *Construction and Building Materials*, 145 (2017) 20–27.
- [14] V. Radhakrishnan, M. Ramya Sri, K. Sudhakar Reddy, Evaluation of asphalt binder rutting parameters, *Construction and Building Materials*, 173 (2018) 298–307.
- [15] E. Santagata, O. Baglieri, D. Dalmazzo, L. Tsantilis, Evaluation of the anti-rutting potential of polymer-modified binders by means of creep-recovery shear tests, *Materials and Structures*, 46 (2013) 1673–1682.
- [16] F. Cardone, G. Ferrotti, F. Frigio, F. Canestrari, Influence of polymer modification on asphalt binder dynamic and steady flow viscosities, *Construction and Building Materials*, 71 (2014) 435–443.
- [17] A. Subhy, D. Lo Presti, G. Airey, An investigation on using pre-treated tyre rubber as a replacement of synthetic polymers for bitumen modification, *Road Materials and Pavement Design*, 16 (2015) 245–264.
- [18] N. Saboo, P. Kumar, Analysis of Different Test Methods for Quantifying Rutting Susceptibility of Asphalt Binders, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (2016) 04016024.
- مطابق با نتایج آزمون تحلیل واریانس، اسلک وکس و پلی پروپیلن وکس از نظر آماری تأثیر معناداری بر مقدار پارامترهای J_{nr} و R دارند و این دو پارامتر به خوبی می‌توانند عملکرد نمونه‌های قیر اصلاح شده در دمای بالا را ارزیابی نمایند.
- مراجع**
- [1] T. Wang, F. Xiao, X. Zhu, B. Huang, J. Wang, S. Amirghanian, Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement, *Journal of Cleaner Production*, 180 (2018) 139–158.
- [2] A. Vaitkus, Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 800–806.
- [3] D. Lo Presti, Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review, *Construction and Building Materials*, 49 (2013) 863–881.
- [4] K.E. Kaloush, Asphalt rubber : Performance tests and pavement design issues, *Construction and Building Materials*, 67 (2014) 258–264.
- [5] S.J. Lee, C.K. Akisetty, S.N. Amirghanian, The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 1368–1376.
- [6] F.M. Nejad, P. Aghajani, A. Modarres, H. Firoozifar, Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods, *Construction and Building Materials*, 26 (2012) 481–489.
- [7] H. Yu, Z. Leng, Z. Dong, Z. Tan, F. Guo, J. Yan, Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix asphalt additives, *Construction and Building Materials*, 175 (2018) 392–401.
- [8] C. Akisetty, Evaluation of warm mix asphalt additives on performance properties of crm binder and mixtures, PhD Dissertation, Clemson University, (2008).
- [9] J.R.M. Oliveira, H.M.R.D. Silva, L.P.F. Abreu, S.R.M. Fernandes, Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve

- Implementation Office, 2014.
- [28] F.J. Navarro, P. Partal, F. Martínez-Boza, C. Gallegos, Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen, *Energy and Fuels*, 19 (2005) 1984–1990.
- [29] S.C. Huang, Rheological characteristics of crumb rubber-modified asphalts with long-term aging, *Road Materials and Pavement Design*, 7 (2006) 37–56.
- [30] G.H. Shafabakhsh, M. Sadeghnejad, Y. Sajed, Case study of rutting performance of HMA modified with waste rubber powder, *Case Studies in Construction Materials*, 1 (2014) 69–76.
- [31] V. Venudharan, K.P. Biligiri, Conceptualization of permanent deformation characteristics of rubber modified asphalt binders: Energy-based algorithm and rheological modeling, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 388–397.
- [32] V. Venudharan, K.P. Biligiri, Heuristic Principles to Predict the Effect of Crumb Rubber Gradation on Asphalt Binder Rutting Performance, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (2017) 04017050.
- [33] W. Zhao, F. Xiao, S.N. Amirkhani, B.J. Putman, Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 31 (2012) 265–272.
- [34] F. Xiao, P.E.W. Zhao, S.N. Amirkhani, Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 3144–3151.
- [35] C.K. Akisetty, S. Lee, S.N. Amirkhani, Laboratory investigation of the influence of warm asphalt additives on long-term performance properties of CRM binders, *International Journal of Pavement Engineering*, 11 (2010) 153–160.
- [36] C. Akisetty, F. Xiao, T. Gandhi, S. Amirkhani, Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 950–956.
- [37] A.M. Rodríguez-alloza, J. Gallego, I. Pérez, Study of [19] R. Kumar, N. Saboo, P. Kumar, S. Chandra, Effect of warm mix additives on creep and recovery response of conventional and polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 352–362.
- [20] R. Zhang, H. Wang, J. Gao, Z. You, X. Yang, High temperature performance of SBS modified bio-asphalt, *Construction and Building Materials*, 144 (2017) 99–105.
- [21] V. Venudharan, K.P. Biligiri, N.C. Das, Investigations on behavioral characteristics of asphalt binder with crumb rubber modification: Rheological and thermo-chemical approach, *Construction and Building Materials*, 181 (2018) 455–464.
- [22] H.U. Bahia, D.I. Hanson, M. Zeng, H. Zhai, M.A. Khatri, R.M. Anderson, NCHRP REPORT 459, Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., (2001).
- [23] J. D'Angelo, R. Kluttz, R.N. Dongre, K. Stephens, L. Zanzotto, Revision of the superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test (with discussion), *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 76 (2007).
- [24] T.L.J. Wasage, J. Stastna, L. Zanzotto, Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test, *International Journal of Pavement Engineering*, 12 (2011) 561–568.
- [25] S.E. Zoorob, J.P. Castro-Gomes, L.A. Pereira Oliveira, J. O'Connell, Investigating the Multiple Stress Creep Recovery bitumen characterisation test, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 734–745.
- [26] L. Zhang, C. Xing, F. Gao, T. shuai Li, Y. qiu Tan, Using DSR and MSCR tests to characterize high temperature performance of different rubber modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 127 (2016) 466–474.
- [27] F. Zhou, H. Li, P. Chen, T. Scullion, Laboratory evaluation of asphalt binder rutting, fracture, and adhesion tests, Texas. Dept. of Transportation. Research and Technology

- Congress Held Vienna, May 2004, 2 (2004) 1351–63.
- [44] AASHTO Standard T316, Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, American Association of State and Highway Transportation Officials, (2010).
- [45] A. Subhy, Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterisations of modified bitumen: Literature review, *Construction and Building Materials*, 156 (2017) 28–45.
- [46] R. Dongre, J. D'Angelo, G. Baumgardner, G. Reinke, New developments in refinement of the superpave high temperature specification parameter, In 40th Annual Meeting of the Petersen Asphalt Research Conference, Laramie, WY, (2003).
- [47] AASHTO, Multiple Stress Creep Recovery Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (MSCR), TP70-12, (2012).
- [48] J.A. D'Angelo, The relationship of the mscr test to rutting, *Road Materials and Pavement Design*, 10 (2009) 61–80.
- [49] AASHTO M332, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, Washington, (2014).
- the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15 % crumb rubber, *Construction and Building Materials*, 43 (2013) 300–308.
- [38] A.M. Rodríguez-alloza, J. Gallego, I. Pérez, A. Bonati, F. Giuliani, High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives, *Construction and Building Materials*, 53 (2014) 460–466.
- [39] H. Yu, Z. Leng, Z. Zhou, K. Shih, F. Xiao, Z. Gao, Optimization of preparation procedure of liquid warm mix additive modified asphalt rubber, *Journal of Cleaner Production*, 141 (2017) 336–345.
- [40] S. Amirkhanian, M. Corley, Utilization of rubberized asphalt in the United States - an overview, in: *Proceedings of 04 International Symposium on Advanced Technologies in Asphalt Pavements*, South Korea, 2004: pp. 3–13.
- [41] ASTM Standard D6114, Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder, American Society for Testing and Materials, (2009).
- [42] Y. Edwards, P. Redelius, Rheological effects of waxes in bitumen, *Energy & Fuels*, 17 (2003) 511–520.
- [43] X. Lu, H. Soenen, P. Redelius, Impact of Bitumen Wax on Asphalt Performance-Low Temperature Cracking, *Proceedings of the 3Rd Eurasphalt and Eurobitume*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ameri, A. Afshin, M. Ebrahimzadeh Shiraz, A. Rahimi Yengejeh, (2021). Evaluation of the Effect of Slack Wax and Polypropylene Wax on the Rutting Properties of Crumb Rubber Modified Binder. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 1835-1852

DOI: [10.22060/ceej.2019.17172.6484](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.17172.6484)

