



## Effect of Long-Term Aging on Low-Temperature Cracking of Asphalt Mixtures using Mechanical and Thermodynamic Methods

P. Moradi<sup>1</sup>, H. Shirmohammadi<sup>1</sup>, Gh. H. Hamed<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

**ABSTRACT:** One of the common phenomena in the cracking of asphalt pavements is thermal cracks or cracks due to low temperature, which occur in cold regions and accelerate the distresses of road structures. Numerous different factors can affect the behavior of asphalt mixtures at low temperatures. The factors affecting heat cracking in asphalt concrete pavements are generally divided into three categories: materials, environment, and geometry of the pavement structure. Factors related to materials in the occurrence of thermal cracks include bitumen, type and aggregate granulation, percentage of bitumen, and percentage of air pores. One of the most important factors affecting the occurrence of thermal cracks in bitumen is its aging or the age of pavement. As a result, bitumen aging has a direct effect on pavement performance. In most existing studies to investigate the aging performance of asphalt mixes, the results of mechanical tests are used to investigate the thermal cracking potential of an asphalt mix and less attention is paid to the basic properties of materials that are important in the event of this cracking. Accordingly, the present study investigates the effect of aging on thermal cracking of 12 different compositions of asphalt mixtures through mechanical methods and surface free energy (SFE), which is based on the main properties of the material. Thermal cracking of asphalt mixtures has been evaluated by performing semi-circular bending mechanical tests and thermodynamic tests by determining the SFE components of bitumen and aggregates. The results showed that the parameters of fracture energy and fracture toughness, which are known as indicators of sensitivity of asphalt mix to thermal cracking, for aged asphalt mixtures between 6.3-13.7% and between 6.5-10.7%, respectively. The results of SFE tests showed that aging causes an increase in the non-polar component between 1.3-1.5% and a decrease in the acidic and basic free energy components of bitumen between 41.1-53.4% and between 334.2-349.6%, respectively. These results have increased the amount of free cohesive energy from 0.63 to 1.03 (ergs/cm<sup>2</sup>). Also, aging reduces the free energy of bitumen-aggregate adhesion with a maximum reduction of 2.61 (ergs/cm<sup>2</sup>). This means that aging reduces the cover-ability of bitumen on the aggregate surface and the resistance to fracture at the bitumen-aggregate interface.

### Review History:

Received: Jun. 05, 2020

Revised: Nov. 13, 2020

Accepted: Nov. 15, 2020

Available Online: Nov. 18, 2020

### Keywords:

Hot asphalt mix

Thermal cracking

Aging

Semi-circular bending test

Surface free energy.

### 1- Introduction

The aging of bitumen occurs during the production process of asphalt mix and during operation, which is exposed to environmental conditions [1]. The first stage of aging, called short-term aging, usually occurs at a high rate. Short-term aging occurs when bitumen and aggregates are heated to high temperatures and mixed. At the end of this stage, the asphalt mixture is moved to the project site, spread, and compacted, which is considered as part of short-term aging. The second stage of aging, known as long-term aging, occurs much faster than the first stage during the operation period. After applying the asphalt mixture, aging usually occurs for 2-3 years so that the specific gravity of the asphalt mixture reaches its maximum and after this time no more compaction occurs. Most of the aging occurs at this time, but usually, the aging process continues between 8 and 12 years

[2]. Aging significantly affects the mechanical properties of asphalt mixtures (including hardness modulus, phase angle, etc.) and consequently the performance of asphalt mixtures. Therefore, it is necessary to know the characteristics of the aged asphalt mixture to properly plan the mixing of asphalt layers and pavement structures [3].

In recent years, the use of surface free energy (SFE) method as one of the valid methods in the science of adhesion in the occurrence and modeling of moisture failure of asphalt mixtures has been used, which has interesting results about the process of this failure and the role of effective parameters in it [4, 5]. However, the use of this theory to investigate the occurrence of low-temperature cracking has not been considered. Given the close relationship between the occurrence of thermal cracking and the theory of thermodynamics, it can be expected that its use can be useful

\*Corresponding author's email: hamed@guilan.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

in identifying the effective parameters in the occurrence of cracking of asphalt mixtures. Accordingly, in this study, using the SFE method, the effect of long-term aging on the thermal cracking potential of asphalt mixtures is investigated and the results of this theory are compared with the results of mechanical tests. The most important objectives of the present study are as follow:

- The effect of aging on bitumen SFE components and cracking in mastic.
- The effect of aging on the free energy of bitumen-aggregate adhesion and cracking at the bitumen-aggregate contact surface.
- Investigation of the effect of aging on the results of performance tests of asphalt mixtures at low temperatures.
- Relationship between the results of thermodynamic parameters and semicircular bending of asphalt mixtures.

## 2- Methodology

In this study, two types of bitumen with a degree of performance of PG 58-22 and PG 64-16 and a polymer additive called polyethylene with very high molecular weight (UHMWPE) in two percent of bitumen mass, along with two types of base aggregates (limestone and granite) Used. experiments to determine the SFE of bitumen and aggregates are performed separately in different states, and mechanical tests are performed to determine the potential for low-temperature cracking on asphalt mixtures.

In this research, UHMWPE polymer has been used to improve bitumen. For this purpose, a high-speed agitator was used. The mixing process was continued for 25 minutes to modify the bitumen so that the additive particles were evenly distributed in the bitumen space. To prevent the temperature of the bitumen from decreasing next to the bitumen container, the heater surrounding the bitumen container has been used. Because the modified bitumens may have suffered some aging at the mentioned temperature and time, this process has also been performed for the control bitumens so that the effect of aging in analyzing the results and comparing the results does not cause errors.

## 3- Results and Discussion

The results of measurements of SFE components of the base and modified bitumens in the form of unaged and aged are presented in Table 1. The results related to the acidic components and the SFE base in Table 1 show that the bitumens in the ground state shows more acidic properties compared to the basic properties. The use of UHMWPE has increased the free energy component of the surface and decreased its acid component. The aging process has caused the acidic component of SFE to increase significantly and its alkaline component to decrease slightly. This can have a negative effect on the adhesion due to the polar cohesions formed between the aged bitumen and the aggregates such as limestone.

The results related to the polar SFE component of aged and aged bitumens in Table 1 show that PG 28-22 bitumen has a higher polarity component compared to PG bitumen

16-64. Polar cohesions usually do not have good strength against moisture but have good resistance to environmental conditions. Oxidation with high temperatures increases the polarity of molecules and thus increases the aggregation and cohesion of these molecules. The use of the UHMWPE additive also increases the polar SFE component of the modified bitumen. The increasing polar SFE component is also observed due to aging in the modified bitumens.

The results show that the polar cohesion of bitumen plays a very important role in the performance of bitumen against its failure. Non-polar cohesions are usually due to the cohesion between aromatic oils and bitumen saturation. As a result of aging, it is observed that the percentage of these oils in bitumen decreases. This reduces the non-polar SFE component of the aged bitumen. Reduction in the non-polar SFE component of bitumen, in addition to increasing the viscosity and hardness, reduces the non-polar cohesions formed between the bitumen and the aggregates. These joints are very effective in the resistance of the asphalt mixture to exposure.

The results related to the failure parameter in different asphalt mixtures at low, medium, and high temperatures are presented in Figs. 1 to 3, respectively. The results showed that aging has significantly reduced the fracture energy in samples of asphalt mixtures. In fact, the aging of bitumen increases the amount of bitumen cohesion energy but decreases the bitumen-aggregate adhesion energy. Given that the fracture energy is the sum of the absorbed energy from the moment of loading to the moment of failure, it can be said that aging has caused the ability to absorb stress by the asphalt mixture. This is present in all samples of asphalt mixtures, where aging causes a reduction in the amount of fracture energy, but in samples made with bitumen PG 58-22 is more. In fact, these bitumens have better performance in cold weather conditions than PG bitumen 16-64. On the other hand, the amount of oil in these bitumens is more than PG bitumen 16-64. This causes the aging to cause a greater performance difference between the control and aged bitumens in samples containing PG 58-22 bitumen than PG 64-6 bitumen.

By comparing the results of the amount of fracture toughness in the aged and aged samples, it can be seen that aging has caused the value of the fracture toughness parameter to be significantly reduced. In fact, aging causes the percentage of asphaltene in the bitumen structure to increase and the lighter parts of the bitumen to evaporate or become larger molecules. These changes cause the aged bitumens to have less flexibility. Cold weather also intensifies the brittleness properties of bitumen. The result is low-temperature cracking in pavements that are several years old and exposed to thermal cycles or a very short cold period. Also, the comparison of the results between PG 58-22 and PG 64-6 bitumens shows that the use of PG 58-22 bitumen has caused the asphalt mixtures to have a better performance against low-temperature cracking. This can be attributed to the higher percentage of oils in the bitumen structure of PG 58-22.

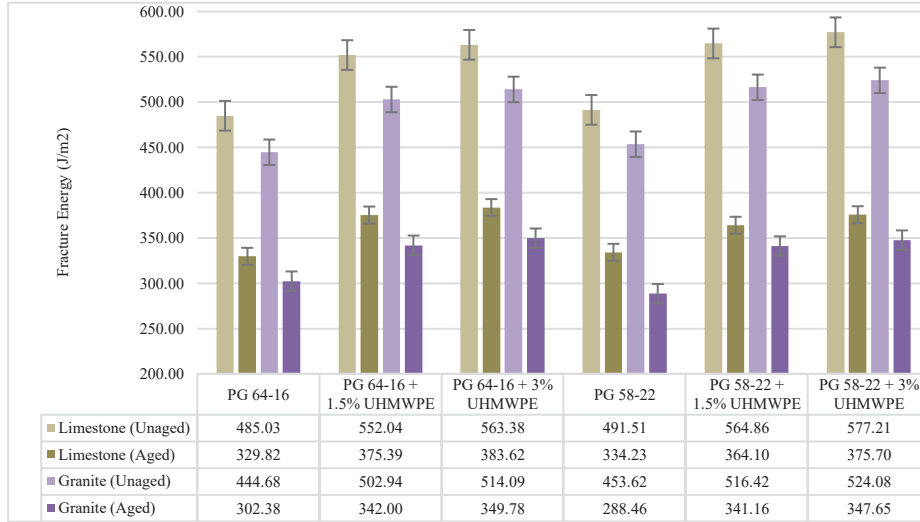


Fig. 1. Fracture energy in controlled and aged samples (temperature -20 °C)

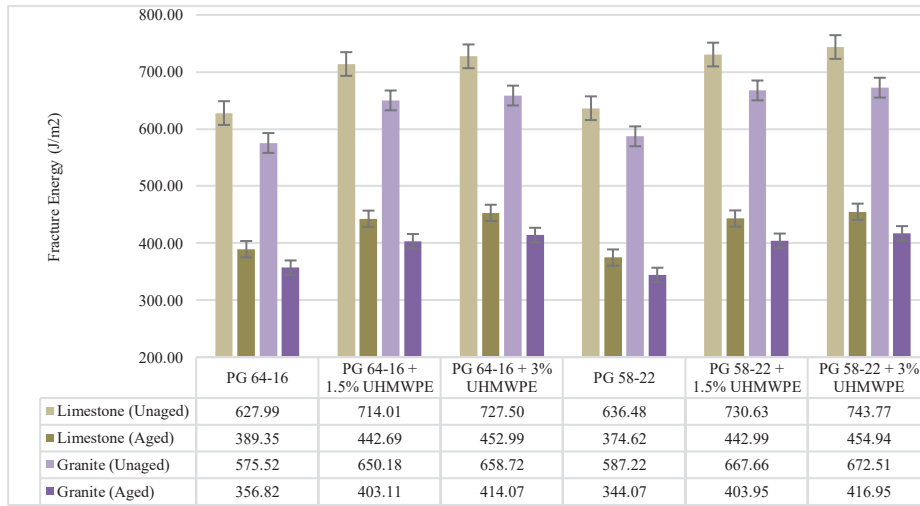


Fig. 2. Fracture energy in controlled and aged samples (temperature -10 °C)

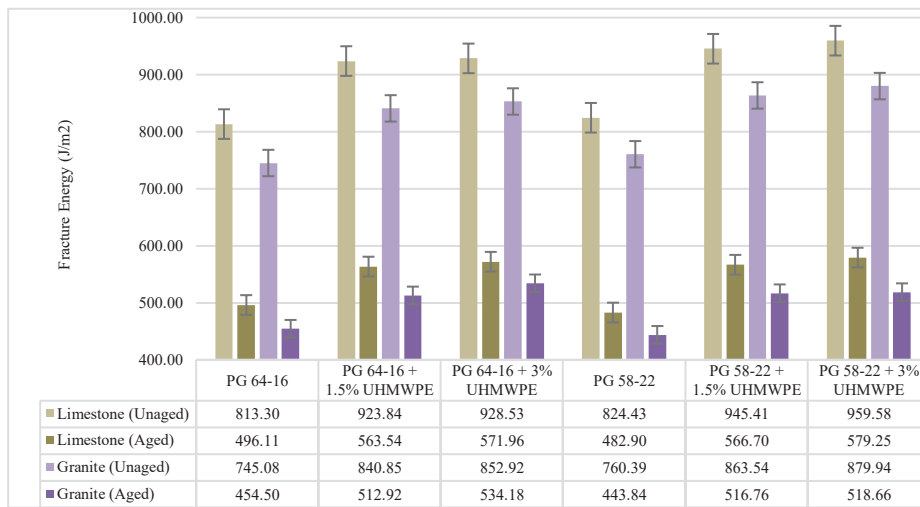


Fig. 3. Fracture energy in controlled and aged samples (temperature 0 °C)

#### 4- Conclusion

The aging process and its effect on the properties of asphalt mixtures have been studied in several studies. However, the study of the effect of aging on the basic properties of materials based on the concepts of the SFE method can provide results that provide a better view of the process of various failures in asphalt mixtures and provide methods to prevent these failures for researchers and design engineers. Accordingly, in this study, the role of long-term aging on bitumen SFE parameters and its effect on cohesion failure in bitumen and adhesion failure at the bitumen-aggregate contact surface has been investigated. Also, an attempt has been made to investigate the cracking potential of low temperature at three different temperatures using the semicircular bending method and the results of this experiment are compared with the results of the SFE method. The most important results obtained in this study are:

- Aging has caused the volatile oils of bitumen to evaporate and the concentration of heavy and polar parts such as asphalt to increase. This has led to an increase in the polar and non-polar SFE components of aged bitumens compared to unaged bitumens. Also, aging has caused an increase in the acidic component and a decrease in the SFE component of the bitumen used in this study.

- The aging of bitumen has caused a significant increase in

the amount of free cohesive energy of this material. The main reason for this can be a decrease in the percentages of aged bitumen oil and an increase in its asphaltene concentration.

#### References

- [1] E. Brown, P.S. Kandhal, F.L. Roberts, Y.R. Kim, D.-Y. Lee, T.W. Kennedy, Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction, NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD, (2009).
- [2] C.J. Glover, A.E. Martin, A. Chowdhury, R. Han, N. Prapaitrakul, X. Jin, J. Lawrence, Evaluation of binder aging and its influence in aging of hot mix asphalt concrete: literature review and experimental design, Texas Transportation Institute, 2009.
- [3] D.K. Paul, O. Sirin, E. Kassem, Laboratory investigation of asphalt mixture aging, in: Proceedings of 6th Euraspahlt & Eurobitume Congress, 2016.
- [4] N. Esmacili, G.H. Hamedi, M. Khodadadi, Determination of the stripping process of asphalt mixtures and the effective mix design and SFE parameters on its different phases, Construction and Building Materials, 213 (2019) 167-181.
- [5] Abdelaziz, C.-H. Ho, M. Snyder, Evaluating the Influence of Polymer Modified Asphalt Binders on Low Temperature Properties, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018, pp. 05012.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

P. Moradi, H. Shirmohammadi, Gh. H. Hamedi, *Effect of Long-Term Aging on Low-Temperature Cracking of Asphalt Mixtures using Mechanical and Thermodynamic Methods*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 1045-1048.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18548.6897](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18548.6897)





## تأثیر پیرشدگی بلندمدت بر ترک خوردگی دمایی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش‌های مکانیکی و ترمودینامیکی

پویا مرادی<sup>۱</sup>، حمید شیرمحمدی<sup>۱</sup>، غلام‌حسین حامدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۶

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸

### کلمات کلیدی:

مخلوط آسفالت گرم

ترک خوردگی حرارتی

پیرشدگی

آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای

انرژی آزاد سطحی

**خلاصه:** در اکثر پژوهش‌های موجود به منظور بررسی پیرشدگی بر عملکرد مخلوط آسفالتی از نتایج آزمایش‌های مکانیکی به منظور بررسی پتانسیل ترک خوردگی حرارتی یک مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود و به خصوصیات پایه‌ای مصالح که در رخداد ترک خوردگی دمایی مهم هستند، کمتر توجه می‌شود. بر این اساس، مطالعه حاضر به بررسی تأثیر پیرشدگی بر ترک خوردگی دمایی ۱۲ ترکیب مختلف مخلوط آسفالتی از طریق روش‌های مکانیکی و انرژی آزاد سطحی، که بر پایه خصوصیات اصلی مواد است، پرداخته است. ارزیابی ترک خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی از طریق انجام آزمایش مکانیکی خمش نیم‌دایره‌ای و آزمایش‌های ترمودینامیکی از طریق تعیین مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که پارامترهای انرژی شکست و چقرمگی شکست که به عنوان شاخص تعیین حساسیت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی دمایی شناخته می‌شوند، برای مخلوط‌های آسفالتی پیر شده به ترتیب بین ۶/۳ تا ۱۳/۷ درصد و بین ۶/۵ تا ۱۰/۷ درصد کمتر از مخلوط‌های کنترل می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی نشان می‌دهد پیرشدگی باعث افزایش در مؤلفه غیرقطبی بین ۳/۱-۵/۱ درصد و کاهش در مؤلفه‌های اسیدی و بازی انرژی آزاد سطحی قیر به ترتیب بین ۴۱/۲-۵۲/۴ درصد و بین ۳۳۴/۲-۳۴۹/۶ درصد می‌شود. این نتایج باعث شده است تا مقدار انرژی آزاد پیوستگی از ۰/۶۳ تا ۱/۰۳ (ergs/cm<sup>2</sup>) افزایش یابد. همچنین، پیرشدگی باعث کاهش در انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه می‌شود که مقدار حداکثر کاهش ۲/۶۱ (ergs/cm<sup>2</sup>) بوده است. این بدان معناست که پیرشدگی باعث کاهش پوشش‌پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه و مقاومت در برابر گسیختگی در سطح تماس قیر-سنگدانه می‌شود.

### ۱- مقدمه

یک فرآیند اکسید شدن شیمیایی است که منجر به تشکیل اجزای کربونیل و اکسید سولفور می‌گردد که همین امر خصوصیات سختی، چسبندگی و انعطاف‌پذیری قیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، پیرشدگی قیر اثر مستقیمی بر عملکرد روسازی می‌گذارد [۴].

پیرشدگی قیر در طی روند تولید مخلوط آسفالتی و در هنگام بهره‌برداری که تحت شرایط محیطی قرار می‌گیرد، ایجاد می‌شود [۵]. مرحله اول پیرشدگی که به آن پیرشدگی کوتاه‌مدت گفته می‌شود، معمولاً با سرعت بالایی رخ می‌دهد. پیرشدگی کوتاه‌مدت هنگامی رخ می‌دهد که قیر و سنگدانه تا دمای بالایی گرم شده و با هم مخلوط می‌شوند. در انتهای این مرحله، جابه‌جایی مخلوط آسفالتی به محل پروژه، پخش و تراکم آن اتفاق می‌افتد که به عنوان بخشی از پیرشدگی کوتاه‌مدت در نظر گرفته می‌شود. مرحله دوم پیرشدگی که به پیرشدگی بلندمدت معروف است، با سرعت بسیار کمتری نسبت به مرحله اول و در دوره‌ی بهره‌برداری اتفاق می‌افتد. بعد از

یکی از پدیده‌های رایج در ترک خوردگی روسازی‌های آسفالتی، ترک‌های حرارتی یا ترک‌های ناشی از دمای پایین است که در مناطق سردسیر به وقوع می‌پیوندد و باعث تسریع در خرابی سازه‌های راه می‌گردد [۱]. عوامل متعدد مختلفی بر رفتار مخلوط آسفالتی در دمای پایین اثرگذار هستند. بر اساس گزارش SHRP-A-400 عوامل مؤثر بر ترک حرارتی در روسازی‌های بتن آسفالتی بطور کلی به سه دسته مصالح، محیط و هندسه سازه روسازی تقسیم می‌گردند. از عوامل مربوط به مصالح در بروز ترک‌های حرارتی می‌توان به قیر، نوع و دانه بندی سنگدانه، درصد قیر و درصد منافذ هوا اشاره کرد [۲]. یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار قیر بر وقوع ترک‌های حرارتی، پیرشدگی قیر و یا به عبارت دیگر سن روسازی است [۳]. هرچه سن روسازی بیشتر باشد، ترک‌های حرارتی بیشتری بر روی آن ایجاد می‌گردد. پیرشدگی قیر

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hamed@guilan.ac.ir





با پیرشدگی کوتاه‌مدت به شدت پتانسیل بیشتری در برابر ترک‌خوردگی دماپایین دارند. ژانگ<sup>۵</sup> و همکاران [۱۲] به بررسی تأثیر پیرشدگی ۱۲ مخلوط آسفالتی با شرایط آزمایشگاهی مختلف پرداختند تا تأثیر عمر روسازی را بر خصوصیات مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار دهند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از روش‌های مختلف پیرشدگی باعث می‌شود تا نتایج عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی بسیار متفاوت باشد.

مطالعات محدودی به استفاده از مفاهیم روش انرژی آزاد سطحی در پتانسیل ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. این مطالعات عمدتاً در زمینه ترک‌خوردگی در دماهای میانی بوده است. آذرهوش و همکاران [۱۳] به اندازه‌گیری پارامترهای انرژی آزاد سطحی و ارتباط آن با نتایج آزمایش‌های مکانیکی ترک‌خوردگی در دمای پایین و میانی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مخلوط‌های آسفالتی با سنگدانه سنگ‌آهک به علت مساحت سطح ویژه بزرگتر و بالابودن مقادیر انرژی آزاد چسبندگی نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سیلیسی عمر خستگی بیشتری دارند. همچنین، نمونه‌های مخلوط آسفالتی با درجه نفوذ بیشتر دارای عمر خستگی بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها هستند. کنگ<sup>۶</sup> و همکاران [۱۴] از مفاهیم روش انرژی آزاد سطحی و اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه به منظور پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد. در این مطالعه، با استفاده از انرژی تلف‌شده تجمعی<sup>۷</sup> مواد با رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی و مدل‌های میکرومکانیک ترک‌خوردگی<sup>۸</sup>، تأثیر انرژی آزاد سطحی بر روی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد انرژی آزاد سطحی مواد با افزایش در دما کاهش می‌یابد. آذرهوش [۱۵] به مطالعه جامعی بر روی مفاهیم، اندازه‌گیری و عملکرد انرژی آزاد سطحی بر خرابی خستگی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. این پژوهش تلاشی برای ارائه مدل پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای ترمودینامیک و طرح اختلاط مخلوط آسفالتی بوده است که این مدل بتواند عملکرد یک مخلوط آسفالتی در برابر خستگی را با استفاده از پارامترهای انرژی آزاد سطحی و طرح اختلاط پیش‌بینی و تحلیل کند.

چندین مطالعه در سال‌های اخیر به منظور بررسی تأثیر استفاده از افزودنی‌های مختلف بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده

اجرای مخلوط آسفالتی، پیرشدگی معمولاً به مدت ۲-۳ سال اتفاق می‌افتد تا وزن مخصوص مخلوط آسفالتی به حداکثر خود برسد و بعد از این زمان تراکم بیشتری رخ ندهد. قسمت عمده‌ی پیرشدگی در این زمان رخ می‌دهد، اما معمولاً روند پیرشدگی بین ۸ تا ۱۲ سال نیز ادامه دارد [۶]. پیرشدگی به میزان قابل‌توجهی بر روی خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی (شامل مدول سختی، زاویه فاز و ...) و به تبع آن بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی تأثیرگذار است. بنابراین، نیاز است تا مشخصات مخلوط آسفالتی پیر شده را شناخت تا طرح اختلاط لایه‌های آسفالتی و سازه‌ای ساختار روسازی به درستی انجام شود [۷].

### ۱-۱- مطالعات پیشین

چنگ<sup>۱</sup> [۸] رفتار ترک‌خوردگی و خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی را براساس قانون پایه شاپری<sup>۲</sup> [۹] برای مکانیک شکست مواد ویسکوالاستیک و مفهوم انرژی آزاد سطحی مورد بررسی قرار داد. چنگ عنوان داشت که ترک‌های خستگی به دو دلیل گسیختگی پیوستگی و چسبندگی که به ترتیب در قیر و در سطح تماس قیر و سنگدانه اتفاق می‌افتند، ناشی می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد؛ در صورتی که سایر مشخصات مصالح مشابه باشند، با افزایش انرژی آزاد پیوستگی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی بیشتر می‌شود. همچنین، چنگ نشان داد، در صورتی که سایر خصوصیات مصالح مشابه باشد، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی رابطه مستقیمی با انرژی آزاد چسبندگی در سطح تماس قیر و سنگدانه دارد. ادوارد اوفوری<sup>۳</sup> [۱۰] پژوهشی را به منظور رسیدن به یک روش فرآیندی کلی که بتواند وقوع این خرابی را پیش‌بینی کند، انجام داد. اوفوری از روش مکانیستیک کالیبره شده با انرژی آزاد سطحی (بر اساس قانون پایه شاپری برای مکانیک شکست مواد ویسکوالاستیک) برای تخمین مقاومت در برابر ترک‌خوردگی خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده استفاده کرد. در مدل ارائه شده به روش مکانیستیک کالیبره شده علاوه بر پارامترهای انرژی آزاد سطحی، پارامترهای بنیادی مصالح از قبیل کشش غیر مستقیم، بازیابی و پیرشدگی مدنظر قرار گرفت. لی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت بر روی پتانسیل ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای پایین پرداختند. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهد مخلوط‌های آسفالتی با پیرشدگی بلندمدت نسبت به مخلوط‌های آسفالتی

5 Zhang  
6 Cong  
7 Dissipated pseudostrain energy  
8 Micromechanics cracking model

1 Cheng  
2 Schapery  
3 Ofori  
4 Li

- بررسی تأثیر پیرشدگی بر نتایج پارامترهای آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با UHMWPE
- ارتباط بین نتایج پارامترهای ترمودینامیک و خمش نیم‌دایره مخلوط‌های آسفالتی

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- طراحی برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش دو نوع قیر درجه عملکردی PG ۵۸-۲۲ و PG ۶۴-۱۶ و یک افزودنی پلیمری به نام پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا (UHM-WPE) در دو درصد جرم قیر، به همراه دو نوع سنگدانه پایه (سنگ‌آهک و گرانیت) استفاده شده است. الگوریتم روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آزمایش‌هایی به منظور تعیین انرژی آزاد سطحی بر روی قیر و سنگدانه در حالت‌های مختلف به صورت جداگانه انجام می‌شود و آزمایش‌های مکانیکی به منظور تعیین پتانسیل ترک‌خوردگی دماپایین بر روی مخلوط‌های آسفالتی انجام می‌شود.

در جدول ۱ نوع، هدف و تعداد آزمایش‌های مورد استفاده در این پژوهش مطابق با روش تحقیق ترسیم شده در شکل ۱ ارائه شده است.

#### ۳-۲- مصالح

#### ۳-۲-۱- سنگدانه

در این پژوهش از دو نوع سنگدانه ی گرانیتی و آهکی استفاده شده است. دلیل اصلی انتخاب این نوع سنگدانه‌ها تفاوت در خصوصیات کانی‌شناسی و چسبندگی با قیر، جهت ارزیابی اثرات نوع سنگدانه روی چسبندگی قیر-سنگدانه می‌باشد. دانه بندی سنگدانه‌های استفاده شده در این پژوهش، دانه بندی میانه استاندارد ASTM D3515 برای مصالح با دانبندی متراکم می‌باشد که حداکثر اندازه و اندازه ی اسمی سنگدانه‌های این دانه بندی به ترتیب برابر ۱۹ و ۱۲/۵ میلی‌متر است [۲۰]. همچنین، آنالیز کانی‌شناسی بر روی دو نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش انجام شده است که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، خصوصیات فیزیکی دو نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است.

#### ۳-۲-۲- قیر

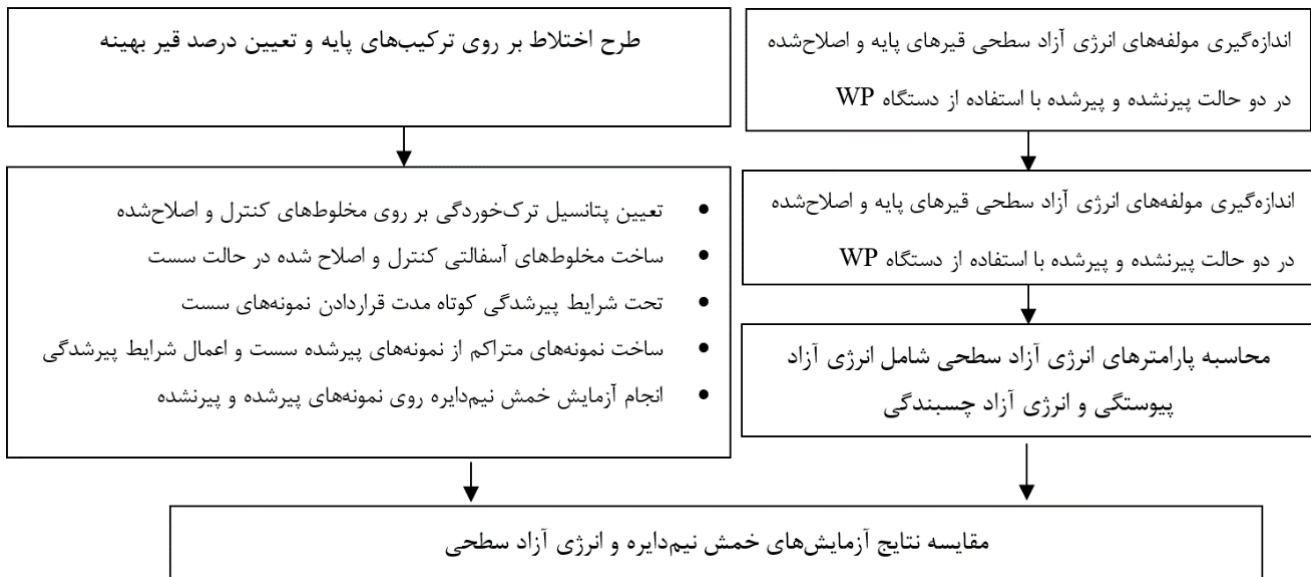
در این پژوهش، از دو نوع قیر عملکردی PG ۶۴-۱۶ و PG ۵۸-۲۲

از روش‌های انرژی آزاد سطحی در کنار آزمایش‌های مکانیکی و میدانی انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان داده است که پارامترهای انرژی آزاد پیوستگی و افزایش چسبندگی که با استفاده از روش‌های ترمودینامیکی اندازه‌گیری شده است، به صورت مستقیم با عمر خستگی نمونه‌های آزمایشگاهی یا عملکرد میدانی مخلوط‌های آسفالتی ارتباط دارد [۱۶، ۱۷]. با وجود اهمیت تأثیر پیرشدگی بر رخداد ترک‌خوردگی دماپایین، مطالعات محدودی به منظور درک و کمی‌سازی تأثیر پیرشدگی بر این نوع ترک‌خوردگی بر اساس خصوصیات پایه مواد انجام شده است. از این رو، در این پژوهش سعی شده است تا تأثیر پیرشدگی بلندمدت بر خصوصیات پایه قیر و نقش آن در ترک‌خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مفاهیم ترمودینامیکی بر اساس روش انرژی آزاد سطحی پرداخته شود.

### ۲- بیان مسأله و اهداف پژوهش

در سال‌های اخیر، استفاده از روش انرژی آزاد سطحی به عنوان یکی از روش‌های معتبر در علم چسبندگی در رخداد و مدل‌سازی خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است که نتایج جالبی در مورد روند این خرابی و نقش پارامترهای مؤثر در آن را به همراه داشته است [۱۸، ۱۹]. با این وجود، استفاده از این تئوری به منظور بررسی رخداد ترک‌خوردگی دماپایین مورد توجه نبوده است. با توجه به ارتباط نزدیکی که بین رخداد ترک‌خوردگی حرارتی و تئوری ترمودینامیک وجود دارد می‌توان انتظار داشت استفاده از آن می‌تواند در زمینه شناسایی پارامترهای مؤثر در رخداد ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی مفید باشد. بر این اساس، در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی به بررسی تأثیر پیرشدگی بلندمدت بر پتانسیل ترک‌خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شود و نتایج حاصل از این تئوری با نتایج آزمایش‌های مکانیکی مورد مقایسه قرار گیرد. مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از:

- بررسی تأثیر پیرشدگی بر مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و ترک‌خوردگی در ماستیک
- بررسی تأثیر پیرشدگی بر انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه و ترک‌خوردگی در سطح تماس قیر-سنگدانه
- بررسی تأثیر پیرشدگی بر نتایج آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین
- بررسی تأثیر افزودنی UHMWPE بر روی مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده



شکل ۱. روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 1. Research method used in this research

جدول ۱. تعداد نمونه‌های قیر، سنگدانه و مخلوط آسفالتی

Table 1. Number of bitumen, aggregate and asphalt mixture samples

| ردیف | آزمایش                                | هدف                                 | تعداد نمونه                      | توضیحات                                |
|------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|
| ۱    | طرح اختلاط مخلوط آسفالتی              | تعیین درصد قیر بهینه                | ۶۰                               | دو ترکیب اصلی و برای هر ترکیب ۳۰ نمونه |
| ۲    | آزمایش پیرشدگی R30                    | پیرشدگی بلندمدت قیر                 | ۶ نمونه                          | ۲ قیر پایه و ۴ قیر اصلاح شده           |
| ۳    | آزمایش صفحه ویلهلمی <sup>۱</sup>      | مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر       | ۶ نمونه                          | ۲ قیر پایه و ۴ قیر اصلاح شده           |
| ۴    | آزمایش دستگاه جذب همگانی <sup>۲</sup> | مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه   | ۲ نمونه                          | سنگدانه‌های سنگ‌آهک و گرانیت           |
| ۵    | آزمایش خمش نیم‌دایره                  | پارامترهای انرژی شکست و چقرمگی شکست | ۲۴ ترکیب و برای هر ترکیب ۳ تکرار | دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد               |
| ۶    | آزمایش خمش نیم‌دایره                  | پارامترهای انرژی شکست و چقرمگی شکست | ۲۴ ترکیب و برای هر ترکیب ۳ تکرار | دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد               |
| ۷    | آزمایش خمش نیم‌دایره                  | پارامترهای انرژی شکست و چقرمگی شکست | ۲۴ ترکیب و برای هر ترکیب ۳ تکرار | دمای ۰ درجه سانتی‌گراد                 |

<sup>۱</sup> Wilhelmy Plate (WP)

<sup>۲</sup> Universal Sorption Device (USD)



جدول ۲. مقدار کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش (%)

Table 2. The amount of minerals that make up the aggregates used in this study (%)

| Calcium oxide, CaO | Sodium Oxide, Na <sub>2</sub> O | Magnesium oxide, MgO | Ferric oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Aluminium oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub> | سنگدانه |
|--------------------|---------------------------------|----------------------|--|---|-----------------------------------|---------|
| ۶۵/۸۱              | ۲/۷۹                            | ۱/۲۶                 | ۴/۹۴   | ۳/۲۸  | ۱۲/۴۴                             | سنگ آهک |
| ۲۹/۹۰              | ۴/۶۴                            | ۴/۵۴                 | ۵/۷۰   | ۷/۱۱  | ۴۲/۱۳                             | گرانیت  |

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

Table 3. Physical properties of aggregates used in this research

| حدود آیین‌نامه     | گرانیت    | سنگ آهک   | استاندارد   | آزمایش                               |
|--------------------|-----------|-----------|-------------|--------------------------------------|
| درشت‌دانه          |           |           |             |                                      |
| -----              | ۲/۵۶      | ۲/۴۱      |             | وزن مخصوص حجمی                       |
| -----              | ۲/۶۰      | ۲/۴۹      | ASTM C 127  | وزن مخصوص مؤثر                       |
| -----              | ۲/۶۲      | ۲/۵۲      |             | وزن مخصوص ظاهری                      |
| حداکثر ۲۵          | ۲۳        | ۲۰        | ASTM C 131  | حداکثر سایش لس‌انجلس                 |
| حداکثر ۸           | ۳         | ۷         | ASTM C 88   | حداکثر افت وزنی در برابر سولفات سدیم |
| حداکثر ۲/۵         | ۱/۶       | ۲/۲       | ASTM C 127  | حداکثر جذب آب                        |
| حداکثر ۱۵          | ۷         | ۶         | ASTM D 4791 | ذرات سوزنی و پولکی                   |
| براساس ترافیک      | ۱۰۰       | ۱۰۰       | ASTM D 5821 | مشخصات شکستگی مصالح سنگی             |
| وزن ویژه (ریزدانه) |           |           |             |                                      |
|                    | ۲/۶۱      | ۲/۴۵      |             | حجمی                                 |
| -----              | ۲/۵۸      | ۲/۴۸      | ASTM C 128  | مؤثر                                 |
| -----              | ۲/۶۱      | ۲/۴۹      |             | ظاهری                                |
| غیر خمیری          | غیر خمیری | غیر خمیری | ASTM D 4318 | حداکثر دامنه‌ی خمیری                 |
| حداکثر ۸           | ۲         | ۷         | ASTM C 88   | حداکثر افت وزنی در برابر سولفات سدیم |
| حداکثر ۲/۵         | ۱/۲       | ۱/۴       | ASTM C 127  | حداکثر جذب آب                        |
| حداقل ۵۰           | ۶۴        | ۶۷        | ASTM D 2419 | حداقل ارزش ماسه                      |
| براساس ترافیک      | ۵۲        | ۵۷        | ASTM D 5821 | مشخصات گوشه‌داری مصالح سنگی          |
| حداکثر ۸           | ۲         | ۶         | ASTM C 88   | دوام در برابر سولفات سدیم            |
|                    | ۲/۴۸      | ۲/۳۸      | ASTM D 242  | وزن مخصوص حجمی فیلر                  |

جدول ۴. خصوصیات رئولوژیکی قیرهای پایه مورد استفاده

Table 4. Rheological properties of the base bitumens used

| PG ۵۸-۲۲   | PG ۶۴-۱۶ | مقدار                      | روش آزمایش   |
|--|----------|----------------------------|--|
| ۲۹۵  | ۳۰۴      | حداقل ۲۳۰                  | نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)                          |
| ۰/۳۲   | ۰/۳۳     | حداکثر ۳                   | ویسکوزیته چرخشی در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد (پاسکال، ثانیه) |
| رئومتر برش دینامیکی بدون پیرشدگی                   |          |                            |  |
| پارامتر شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ )              |          | حداقل ۱ کیلوپاسکال         | دمای آزمایش  |
| ۱/۸  | ۳/۱      |                            | ۶۴ درجه سانتی‌گراد                                     |
| رئومتر برش دینامیکی با پیرشدگی کوتاه‌مدت           |          |                            |  |
| پارامتر شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ )              |          | حداقل ۲/۲ کیلوپاسکال       | دمای آزمایش  |
| ۴/۵  | ۳/۹      |                            | ۶۴ درجه سانتی‌گراد                                     |
| رئومتر برش دینامیکی با پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت |          |                            |  |
| پارامتر خستگی ( $G^*\sin\delta$ )                  |          | حداکثر ۵۰۰۰ کیلوپاسکال     | دمای آزمایش  |
| ۲۹۵۰   | ۲۶۵۰     |                            | ۲۵ درجه سانتی‌گراد                                     |
| رئومتر تیرچه خمشی                                  |          |                            |  |
| ۱۰۱  | ۱۰۹      | سختی حداکثر ۳۰۰ مگاپاسکال  | دمای آزمایش  |
| ۰/۳۴   | ۰/۳۲     | نرخ تغییرات سختی حداقل ۰/۳ | ۲۵ درجه سانتی‌گراد                                     |

جدول ۵. ویژگی‌های UHMWPE مورد استفاده در این پژوهش

Table 5. Features of UHMWPE used in this research

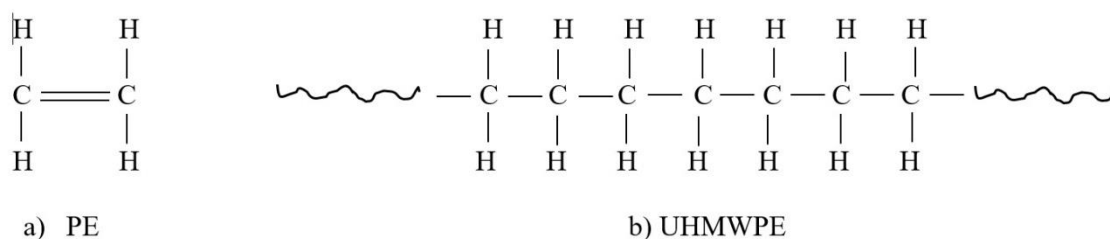
| UHMWPE | ویژگی   |
|--------|---|
| ۳/۷    | وزن مولکولی ( $10^6$ بر مول)                            |
| ۱۳۲    | دمای ذوب (سانتی‌گراد)                                   |
| ۰/۴۶   | نسبت پواسون   |
| ۰/۹۳۸  | جرم مخصوص نسبی  |
| ۱/۱    | مدول کششی الاستیسیته در ۲۳ درجه سانتی‌گراد (گیگاپاسکال) |
| ۴۳     | تنش کششی نهایی در ۲۳ درجه سانتی‌گراد (مگاپاسکال)        |
| ۴۴۸    | افزایش طول کششی نهایی در ۲۳ درجه سانتی‌گراد (%)         |

استفاده شده است. خصوصیات رئولوژی دو نوع قیر پایه مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است.

ماده دارای زنجیره‌های بسیار بلند و جرم مولکولی آن معمولاً بین ۳/۵-۷/۵ میلیون آمو (amu) است. این ماده به صورت پودری سفید رنگ و نرم است. ویژگی‌های فیزیکی این ماده در جدول ۵ ارائه شده است.

UHMWPE نوعی پلی‌لیفین است که شامل ۲۰۰۰۰۰ واحد اتیلن با زنجیره بالا متشکل از کربن و هیدروژن است. این زنجیره‌های پلی‌اتیلن طولانی ساختاری کاملاً اشباع دارند و در حین مخلوط کردن با قیر پایدار

۳-۲-۳- افزودنی پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا زیرمجموعه‌ای از پلی‌اتیلن‌های ترموپلاستیک است که به نام پلی‌اتیلن با مدول بالا نیز شناخته می‌شود. این



شکل ۲. ساختار UHMWPE مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 2. Structure of UHMWPE used in this research

درجه سانتی‌گراد گرم کرده و افزودنی‌ها به آرامی و به تدریج به آن اضافه شده است. عمل اختلاط به مدت ۲۵ دقیقه به منظور اصلاح قیر ادامه داشته است تا ذرات افزودنی به صورت همگن در فضای قیر پخش شوند. به منظور جلوگیری از کاهش دمای قیر در کنار ظرف قیر، از گرم‌کن احاطه‌کننده ظرف قیر استفاده شده است. با توجه به اینکه ممکن است قیرهای اصلاح شده در دما و زمان ذکر شده دچار مقداری پیرشدگی شده باشند، این فرآیند برای قیرهای کنترل نیز انجام شده است تا تأثیر پیرشدگی در آنالیز نتایج و مقایسه نتایج سبب خطا نشود.

### ۳-۳- آزمایش‌ها

#### ۳-۳-۱- طرح اختلاط

هدف از طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی، ارائه بهترین مخلوط قیر و مصالح سنگی می‌باشد که در این پژوهش از طرح اختلاط به روش مارشال بر اساس دستورالعمل MS-۲ انستیتو اسفالت [۲۶] برای تعیین درصد قیر بهینه استفاده شده است.

### ۳-۳-۲- پیرشدگی کوتاه‌مدت مخلوط آسفالتی

برای ایجاد پیرشدگی در مخلوط‌های آسفالتی از استاندارد آستو R۳۰ استفاده شده است. طبق این استاندارد، پیرشدگی بلندمدت باید بر روی نمونه‌هایی انجام شود که قبلاً تحت شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت قرار گرفته‌اند. به منظور پیرشدگی کوتاه‌مدت بایستی نمونه‌های سست مخلوط آسفالتی به مدت ۴ ساعت بر روی ظرف با ضخامت ۱ تا ۲ اینچ پخش شود و در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار گیرد. به منظور پیرشدگی بلندمدت، باید نمونه‌های که قبلاً شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت را تجربه کرده‌اند، طبق

می‌مانند. وجود این هیدروکربن‌های زنجیره‌ای طولانی منجر به تشکیل تعداد زیادی از پیوندهای وان‌دروالس در بین آنها می‌شود [۲۱]. پیوندهای شیمیایی ایجاد شده بین مولکول‌های پلی‌اتیلن در محیط قیر، در برابر تنش‌های اعمال شده مانند اسکلت مقاومت می‌کنند و نقش مهمی در افزایش مقاومت قیر اصلاح شده دارند. علاوه بر این، استفاده از این ماده باعث می‌شود تغییر در ساختار قیر ناشی از پیرشدگی به سختی صورت پذیرد و بر این اساس، می‌توان عملکرد بهتری از مخلوط آسفالتی اصلاح شده در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین متصور بود.

نکته قابل ذکر این است که نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد استفاده از این ماده باعث می‌شود تا فرآیند پیرشدگی قیر اصلاح شده نسبت به نمونه‌های کنترل دارای تفاوت معناداری باشد [۲۲، ۲۳]. این مطلب بدان معناست که این ماده پتانسیل استفاده به عنوان یک افزودنی اصلاح‌کننده‌ی قیر در دمای پایین را داراست، زیرا استفاده از آن می‌تواند باعث کاهش شکنندگی قیر و مخلوط آسفالتی ناشی از پیرشدگی شود.

### ۳-۲-۴- اصلاح قیر

بر اساس پژوهش‌های پیشین مشاهده شده است که درصد ماده افزودنی‌های پلیمری مخصوصاً مواد با ساختار شبیه UHMWPE به منظور بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در حدود ۰/۵ تا ۸ درصد است [۲۴، ۲۵]. در این پژوهش از مقدار ۱/۵ و ۳ درصد جرم قیر UHMWPE به منظور اصلاح قیر استفاده شده است. به این منظور از دستگاه همزن با دور بالا استفاده شده است. این همزن توانایی چرخش تا ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه را دارد که در این پژوهش از سرعت چرخشی ۵۰۰۰ دور بر دقیقه برای اصلاح قیر با UHMWPE استفاده شده است. به این منظور قیر را تا دمای ۱۵۵

در رابطه بالا؛  $K_c$  چقرمگی شکست ( $\text{Mpa}\cdot\text{mm}^{0.5}$ )،  $a$  طول ترک و  $\sigma$  تنش اعمالی،  $p_{Cr}$  بار بحرانی،  $R$  شعاع و  $t$  ضخامت نمونه می‌باشد.

### ۳-۳-۴- آزمایش پیرشدگی

در این پژوهش آزمایش‌های پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت قیر به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D2867 و ASTM D 6521 [۳۱، ۳۰] انجام شده است.

### ۳-۳-۵- اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی

بر اساس تئوری اسید-بازی، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده بر اساس نوع نیروهای مولکولی سطحی به سه جزء شامل؛ الف) جزء غیر قطبی که به آن جزء لیفشیتز-وندروالز (LW) یا جزء پراکنده، ب) جزء اسیدی لوئیس و ج) جزء بازی لوئیس تقسیم می‌شوند [۳۲]. انرژی آزاد سطحی طبق این تئوری برای همه مواد با استفاده از رابطه (۳) تعیین می‌شود:

$$\Gamma^{\text{Total}} = \Gamma^{\text{LW}} + \Gamma^{\text{AB}} = \Gamma^{\text{LW}} + 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (3)$$

که در این رابطه؛  $\Gamma^{\text{Total}}$  انرژی آزاد سطحی کل،  $\Gamma^{\text{LW}}$  مؤلفه غیر قطبی،  $\Gamma^{\text{AB}}$  مؤلفه اسیدی-بازی،  $\Gamma^+$  مؤلفه اسیدی لوئیس و  $\Gamma^-$  مؤلفه بازی لوئیس می‌باشد. همان‌طور که مشاهده شد انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای می‌تواند با اندازه‌گیری پارامترهای انرژی آزاد سطحی و جای‌گذاری آن در معادله (۵) محاسبه شود. به همین ترتیب انرژی آزاد پیوستگی و چسبندگی را می‌توان بر حسب مؤلفه‌های قطبی و غیر قطبی بیان نمود.

$$\Delta G_i^c = -2\Gamma_i = \Delta G_i^{cLW} + \Delta G_i^{cAB} \quad (4)$$

$$\Delta G_{ij}^a = \Gamma_{ij} - \Gamma_i - \Gamma_j = \Delta G_{ij}^{aLW} + \Delta G_{ij}^{aAB} \quad (5)$$

مؤلفه LW فعل و انفعالات بین مولکول‌های متقارن را توصیف میکند. در نتیجه میانگین حسابی برای تخمین آن بیان می‌شود. همچنین، مؤلفه AB از اسید و باز تشکیل شده است.

استاندارد AASHTO T312 به منظور رسیدن به میزان فضای خالی مورد نظر متراکم کرد. این نمونه‌ها پس از تراکم نباید از قالب جدا شوند. سپس، نمونه‌ها به همراه قالب به مدت ۱۲۰ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد قرار گیرد [۲۷].

### ۳-۳-۳- آزمایش خمش نیم دایره (SCB)

در این قسمت آزمایش ترک‌خوردگی حرارتی بر روی مخلوط‌های آسفالتی با ترکیب‌های مختلفی از سنگدانه-قیر با استفاده از روش Semi-Circular Bending (SCB) انجام خواهد شد. آزمایش بر روی نمونه‌های نیم دایره قاچ شده استفاده شده است که در گزارش NDOR ۱۲-۲۰۱۵ توصیه شده است [۲۸]. بر اساس پیشنهادات گزارش ذکر شده و همچنین گزارش موسسه حمل و نقل مینه‌سوتا این آزمایش با مشخصات زیر انجام خواهد شد:

- ضخامت: یک اینچ
- نرخ بارگذاری: ۰/۰۳ میلی‌متر بر دقیقه (۰/۰۰۵ میلی‌متر بر ثانیه)
- طول بازشدگی: ۱۵ میلی‌متر
- دهانه بازشدگی: ۲ میلی‌متر

برای انجام آزمایش و بارگذاری، نرخ ثابت CMOD برابر ۰/۰۰۵ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود و پس از ثبت جابه‌جایی خطوط بار، برای محاسبه چقرمگی شکست  $K_{IC}$  و انرژی شکست  $G_f$  استفاده می‌شود [۲۹]. محققان دانشگاه مینه‌سوتا متوسط زمان آزمایش هر نمونه را در محدوده ۱۰ تا ۱۵ دقیقه تعیین کرده اند [۲۹]. انرژی شکست ( $G_f$ ) و چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) با استفاده از روابط زیر قابل تخمین می‌باشد.

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{Alig} \quad (1)$$

در رابطه بالا؛  $G_f$  انرژی شکست ( $\text{J/m}^2$ )،  $W_0$  کار شکست، که ناحیه زیر منحنی بار-تغییر مکان اندازه‌گیری شده می‌باشد،  $m$  وزن نمونه،  $g$  شتاب گرانش (که برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه است)،  $\delta_0$  تغییر مکان در شکست نهایی نمونه و  $Alig$  ناحیه شکاف می‌باشد.

$$k_{Ic} = \sigma\sqrt{\pi a} = \frac{P_{Cr}}{2Rt}\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

زاویه تماس اندازه‌گیری شده مایع تحقیق با قیر و اجزای انرژی آزاد سطحی مایعات تحقیق که معلوم هستند، تشکیل یک معادله و سه مجهول را می‌کنند. اگر سه مایع تحقیق متفاوت را با یک قیر مشخص مورد بررسی قرار داده شوند، سه معادله و سه مجهول تشکیل می‌شود که می‌توان سه مجهول مورد نظر که اجزای انرژی آزاد سطحی قیر هستند را بدست آورد. در این پژوهش از روش WP برای تعیین زاویه تماس بین قیر و سه مایع آزمایش استفاده شده است. برای تعیین اجزای انرژی آزاد سطحی قیر نیاز به سه مایع تحقیق مختلف است که اجزای انرژی آزاد سطحی آنها معلوم باشد.

رابطه بین فشار بخار یک بخار ماده تحقیق به جرم بخار جذب شده بر روی سطح یک سنگدانه نمونه‌ای از یک جذب سطحی همدمای است. رابطه بین کار چسبندگی و جذر مربعات اجزای انرژی آزاد سطحی (معادله (۱۱)) خطی است. بنابراین، برای ایجاد یک مجموعه از سه معادله و سه مجهول (سه جزء انرژی آزاد سطحی ماده جامد) نیاز به سه معادله می‌باشد که برای هر معادله یک ماده تحقیق مورد نیاز است. پس می‌توان گفت برای بدست آوردن اجزای انرژی آزادی سطحی یک جسم جامد نیاز به سه ماده تحقیق است که اجزای انرژی آزاد سطحی این سه ماده مشخص باشد.

$$W_{S,V}^a = \pi_e + 2\Gamma_v^{total} = -2 \left[ \sqrt{\Gamma_s^{LW} \Gamma_l^{LW}} + \sqrt{\Gamma_s^+ \Gamma_l^-} + \sqrt{\Gamma_s^- \Gamma_l^+} \right] \quad (11)$$

در این معادله،  $W_{s,v}^a$  کار چسبندگی بین سطح سنگدانه (S) و بخار (V)،  $\Gamma_v^{total}$  انرژی آزاد سطحی کل بخار ماده تحقیق و  $\pi_e$  فشار توزیعی تعادلی مربوط به بخار ماده تحقیق بر روی سطح سنگدانه می‌باشد.

فشار توزیعی تعادلی بخار ماده تحقیق بر روی سطح سنگدانه از طریق جذب سطحی همدمایی با استفاده از معادله (۱۲) بدست می‌آید:

$$\pi_e = \frac{RT}{MA} \int_0^{p_n} \frac{n}{p} dp \quad (12)$$

در این معادله R ثابت جهانی گاز، T دمای آزمایش، M وزن مولکولی بخار ماده تحقیق، n جرم بخار جذب شده در واحد جرم سنگدانه در فشار بخار p، و A مساحت سطح ویژه سنگدانه می‌باشد. مساحت سطح ویژه سنگدانه از طریق رابطه کلاسیک BET با استفاده

$$\Delta G_{ij}^{aLW} = -2\sqrt{\Gamma_i^{LW} \Gamma_j^{LW}} \quad (6)$$

$$\Delta G_{ij}^{aAB} = -2 \left( \sqrt{\Gamma_i^+ \Gamma_j^-} + \sqrt{\Gamma_i^- \Gamma_j^+} \right) \quad (7)$$

بر اساس روابط (۸) و (۹)، انرژی آزاد چسبندگی دو ماده دلخواه را میتوان با استفاده از رابطه زیر و با قرار دادن مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی دو ماده محاسبه نمود.

$$\Delta G_{ij}^a = \Gamma_{ij} - \Gamma_i - \Gamma_j = \Delta G_{ij}^{aLW} + \Delta G_{ij}^{aAB} = -2 \left[ \sqrt{\Gamma_i^{LW} \Gamma_j^{LW}} + \sqrt{\Gamma_i^+ \Gamma_j^-} + \sqrt{\Gamma_i^- \Gamma_j^+} \right] \quad (8)$$

در ادامه در مورد روند اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه توضیح داده می‌شود.

براساس معادله یانگ-دوپره، ون اوس و همکاران [۳۲] در سال ۱۹۸۸ رابطه زیر را بین انرژی آزاد چسبندگی گیس ( $\Delta G_{l,s}$ )، کار چسبندگی ( $W_{l,s}$ )، زاویه تماس ( $\theta$ ) یک ماده مایع تحقیق (l) در تماس با یک جسم جامد (S) و با داشتن اجزای انرژی آزاد سطحی هر دو ماده مایع و جامد ارائه کردند.

$$-\Delta G_{l,s}^a = W_{l,s}^a = \Delta G_{l,s}^{Total} (1 + \cos \theta) = 2 \left[ (\Gamma_s^{LW} \Gamma_l^{LW})^{0.5} + (\Gamma_s^+ \Gamma_l^-)^{0.5} + (\Gamma_s^- \Gamma_l^+)^{0.5} \right] \quad (9)$$

معادله (۹) اساس معادله‌ای است که برای محاسبه اجزای انرژی آزاد سطحی قیر با استفاده از زاویه تماس به کار می‌رود. در این معادله، جسم جامد (S) با قیر جابه‌جا می‌شود و مایع تحقیق (l) مایع آزمایش است که اجزای انرژی آزاد سطحی آن معلوم می‌باشد. اگر جذر اجزای انرژی آزاد سطحی قیر را مجهول فرض کرده و آن را با  $x_1$ ،  $x_2$  و  $x_3$  نمایش دهند، معادله (۹) به شکل معادله زیر بیان می‌شود:

$$\Gamma_l^{Total} (1 + \cos \theta) = 2 \left[ (\Gamma_s^{LW})^{0.5} * x_1 + (\Gamma_s^+)^{0.5} * x_2 + (\Gamma_s^-)^{0.5} * x_3 \right] \quad (10)$$



جدول ۶. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده در دو حالت پیر نشده و پیر شده

Table 6. Components of surface free energy of base and modified bitumens in both unprocessed and aged states

| مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm <sup>2</sup> ) |         |      |       |      | نوع قیر                | شرایط قیر |
|---|---------|------|-------|------|------------------------|-----------|
| کل  | غیرقطبی | قطبی | اسیدی | بازی |                        |           |
| ۱۳/۶۹   | ۱۲/۱۲   | ۱/۵۶ | ۱/۲۱  | ۰/۵۰ | PG 64-16               | پیر نشده  |
| ۱۹/۴۰   | ۱۷/۲۴   | ۲/۱۶ | ۱/۱۳  | ۰/۹۶ | PG 64-16 + 1.5% UHMWPE |           |
| ۲۰/۱۲   | ۱۷/۹۰   | ۲/۲۳ | ۱/۱۰  | ۱/۰۵ | PG 64-16 + 3% UHMWPE   |           |
| ۱۳/۲۴   | ۱۱/۳۷   | ۱/۸۷ | ۱/۳۲  | ۰/۶۶ | PG 58-22               |           |
| ۱۹/۵۷   | ۱۷/۲۱   | ۲/۳۶ | ۱/۲۳  | ۱/۰۴ | PG 58-22 + 1.5% UHMWPE |           |
| ۲۰/۱۴   | ۱۷/۶۷   | ۲/۴۷ | ۱/۱۸  | ۱/۱۹ | PG 58-22 + 3% UHMWPE   |           |
| ۱۴/۲۹   | ۱۱/۶۴   | ۲/۶۵ | ۰/۷۰  | ۲/۵۰ | PG 64-16               | پیر شده   |
| ۱۹/۷۲   | ۱۶/۵۵   | ۳/۱۶ | ۰/۶۶  | ۳/۸۱ | PG 64-16 + 1.5% UHMWPE |           |
| ۲۰/۴۴   | ۱۷/۱۸   | ۳/۲۶ | ۰/۶۴  | ۴/۱۷ | PG 64-16 + 3% UHMWPE   |           |
| ۱۳/۷۵   | ۱۰/۹۱   | ۲/۸۴ | ۰/۷۷  | ۲/۶۴ | PG 58-22               |           |
| ۱۹/۹۵   | ۱۶/۵۲   | ۳/۴۳ | ۰/۷۱  | ۴/۱۲ | PG 58-22 + 1.5% UHMWPE |           |
| ۲۰/۵۶   | ۱۶/۹۶   | ۳/۶۰ | ۰/۶۸  | ۴/۷۲ | PG 58-22 + 3% UHMWPE   |           |

از رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- انرژی آزاد سطحی

۴-۱-۱- انرژی آزاد سطحی قیر

$$A = \left( \frac{n_m \times N_0}{M} \right) \times \alpha \quad (13)$$

نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده به صورت پیر نشده و پیر شده در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج مربوط به مؤلفه‌های اسیدی و بازی انرژی آزاد سطحی در جدول ۶ نشان می‌دهد قیرها در حالت پایه خصوصیات اسیدی بیشتری در مقایسه با خصوصیات بازی از خود نشان می‌دهند. استفاده از UHMWPE باعث شده است تا مؤلفه بازی انرژی آزاد سطحی افزایش و مؤلفه اسیدی آن کاهش یابد. این موضوع سبب می‌شود تا از خصوصیات اسیدی قیر کاسته شود و چسبندگی آن با سنگدانه‌های اسیدی مانند گرانیت افزایش یابد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد قیر PG ۵۸-۲۲ دارای مؤلفه‌های بازی و اسیدی به ترتیب بزرگتر و کوچکتر در مقایسه با قیر PG ۶۴-۱۶ است که این موضوع نشان‌دهنده خصوصیات بازی قوی‌تر قیر PG ۵۸-۲۲ است. فرآیند پیرشدگی سبب شده است تا مؤلفه اسیدی انرژی آزاد سطحی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد و مؤلفه بازی آن به میزان کمی کاهش یابد. این موضوع می‌تواند تأثیر منفی بر روی چسبندگی ناشی از پیوندهای قطبی شکل‌گرفته بین قیرهای

در این معادله  $N_0$  عدد آووگادرو،  $\alpha$  سطح تصویر شده یک مولکول،  $n_m$  ظرفیت تک‌لایه‌ای قابل جذب بر روی سطح سنگدانه می‌باشد. تعداد مولکول‌های مورد نیاز برای پوشاندن سطح سنگدانه در یک لایه را ظرفیت تک‌لایه‌ای قابل جذب بر روی سطح سنگدانه می‌گویند. این فاکتور را می‌توان از طریق معادله (۱۴) بدست آورد. در این معادله  $S$  و  $I$  به ترتیب شیب و طول از مبدأ نموداری است که  $p/n$  ( $p_0 - p$ ) را در برابر  $p/p_0$  نشان می‌دهد که در آن  $p_0$ ،  $p$  و  $n$  به ترتیب فشار بخار جزئی، حداکثر فشار بخار اشباع و جرم بخار جذب شده بر روی جرم واحد سنگدانه می‌باشند.

$$n_m = \frac{1}{S + I} \quad (14)$$

پیرشده و سنگدانه های بازی مانند سنگ آهک شود.

موضوع باعث می شود تا خاصیت روغن دوستی سنگدانه سنگ آهک نسبت به سنگدانه گرانیت بیشتر باشد. از طرفی، سنگدانه های گرانیتی وجود مقدار زیاد درصد سیلیکا دارند که این موضوع باعث ضعف چسبندگی آنها با قیر می شود. مؤلفه های قطبی و غیرقطبی انرژی آزاد سطحی نیز نشان می دهد سنگدانه گرانیت خصوصیات قطبی بیشتری در مقایسه با سنگدانه سنگ آهک دارد که عمده ی این پیوندها با روغن های قطبی موجود در قیر است. دلیل این موضوع به درصد سیلیکا در ساختار یک سنگدانه بر می گردد که هر چقدر درصد دی اکسید سیلیکون ( $\text{SiO}_2$ ) یا همان سیلیکا در ساختار یک سنگدانه بیشتر باشد، آن سنگدانه دارای قطبیت بیشتری است. این موضوع هم راستا با نتایج به دست آمده در مطالعات پلتونن است [۳۳]. بر این اساس می توان گفت که تنها مؤلفه های بازی و اسیدی انرژی آزاد سطحی سنگدانه ها روی بازی یا اسیدی بودن سنگدانه نقش ایفا نمی کنند؛ بلکه مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی هم روی این موضوع تأثیرگذار است.

#### ۴-۱-۳- انرژی آزاد سطحی مخلوط آسفالتی

نتایج مربوط به انرژی آزاد پیوستگی قیرهای پایه و اصلاح شده در حالت های پیر نشده و پیر شده در شکل ۳ ارائه شده است. همان طور که از داده های ارائه شده روی این شکل مشخص است، قیر ۱۶-۶۴ PG دارای انرژی آزاد پیوستگی بیشتری در مقایسه با قیر ۲۲-۵۸ PG است. این مطلب نشان می دهد برای گسیختگی در قیر ۱۶-۶۴ PG به انرژی بیشتری نیاز است. البته از سویی دیگر، افزایش در انرژی آزاد پیوستگی سبب می شود تا پوشش پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه به شکل مؤثری انجام نشود. این موضوع می تواند باعث کاهش قدرت چسبندگی بین قیر و سنگدانه شود. استفاده از UHMWPE باعث شده است تا مقدار انرژی آزاد پیوستگی به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یابد. این موضوع در هر دو نوع قیر عملکردی مورد استفاده در این پژوهش مشاهده شده است. پیرشدگی سبب شده است تا مقدار انرژی آزاد پیوستگی هر دو نوع قیر پایه افزایش یابد. این افزایش از سویی می تواند باعث افزایش مقاومت ماستیک شود؛ اما از سویی دیگر باعث ضعف پوشش پذیری و چسبندگی قیر-سنگدانه می شود. افزایش در مقدار انرژی آزاد پیوستگی در نتیجه پیرشدگی در قیرهای اصلاح شده از قیرهای اصلاح نشده بیشتر است. این مطلب نشان می دهد استفاده از UHMWPE باعث شده است تا فرآیند پیرشدگی در قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای پایه با شدت کمتری اتفاق افتد.

نتایج مربوط به انرژی آزاد چسبندگی قیرهای پایه و اصلاح شده در

نتایج مربوط به مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی قیرهای پیر نشده و پیر شده در جدول ۶ نشان می دهد قیر ۲۲-۵۸ PG دارای مؤلفه قطبی بیشتری در مقایسه با قیر ۱۶-۶۴ PG است. پیوندهای قطبی معمولاً دارای استحکام مناسبی در برابر رطوبت نیستند، اما در برابر شرایط محیطی مقاومت مناسبی دارند. اکسیده شدن به همراه دمای بالا باعث افزایش قطبیت مولکول ها و در نتیجه افزایش تجمع و پیوستگی این مولکول ها می گردند. استفاده از افزودنی UHMWPE نیز باعث افزایش مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح شده می شود. روند افزایش مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی به علت پیرشدگی در قیرهای اصلاح شده نیز مشاهده می شود.

نتایج ارائه شده در جدول ۶ نشان می دهد پیوندهای قطبی قیر نقش بسیار مهمی در عملکرد قیر در برابر گسیختگی پیوستگی آن را دارا هستند. پیوندهای غیرقطبی معمولاً ناشی از پیوند بین روغن های آروماتیک و اشباع قیر است. در نتیجه پیرشدگی مشاهده می شود که درصد این روغن ها در قیر کم می شود. این موضوع سبب می شود تا مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیرهای پیرشده کاهش یابد. کاهش در مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیر علاوه بر افزایش ویسکوزیته و افزایش سختی، باعث می شود تا پیوندهای غیرقطبی شکل گرفته بین قیر و سنگدانه ها کاهش یابد. این پیوندها در مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان شدگی بسیار مؤثر هستند. نتایج مربوط به انرژی آزاد سطحی کل نشان می دهد استفاده از افزودنی UHMWPE باعث افزایش در انرژی آزاد سطحی کل می شود. استفاده از ۱/۵ درصد از UHMWPE باعث افزایش قابل توجه در انرژی آزاد سطحی کل می شود، اما استفاده از ۳ درصد از این افزودنی تأثیر زیادی در افزایش این پارامتر ندارد. پیرشدگی باعث شده است تا درصد جرمی آسفالتن در قیر افزایش یابد. با توجه به ویسکوزیته ی بالای این ماده این انتظار وجود داشت که پیرشدگی باعث شود تا انرژی آزاد سطحی کل در قیرهای پیر شده نسبت به قیرهای پیر نشده افزایش قابل توجهی داشته باشد.

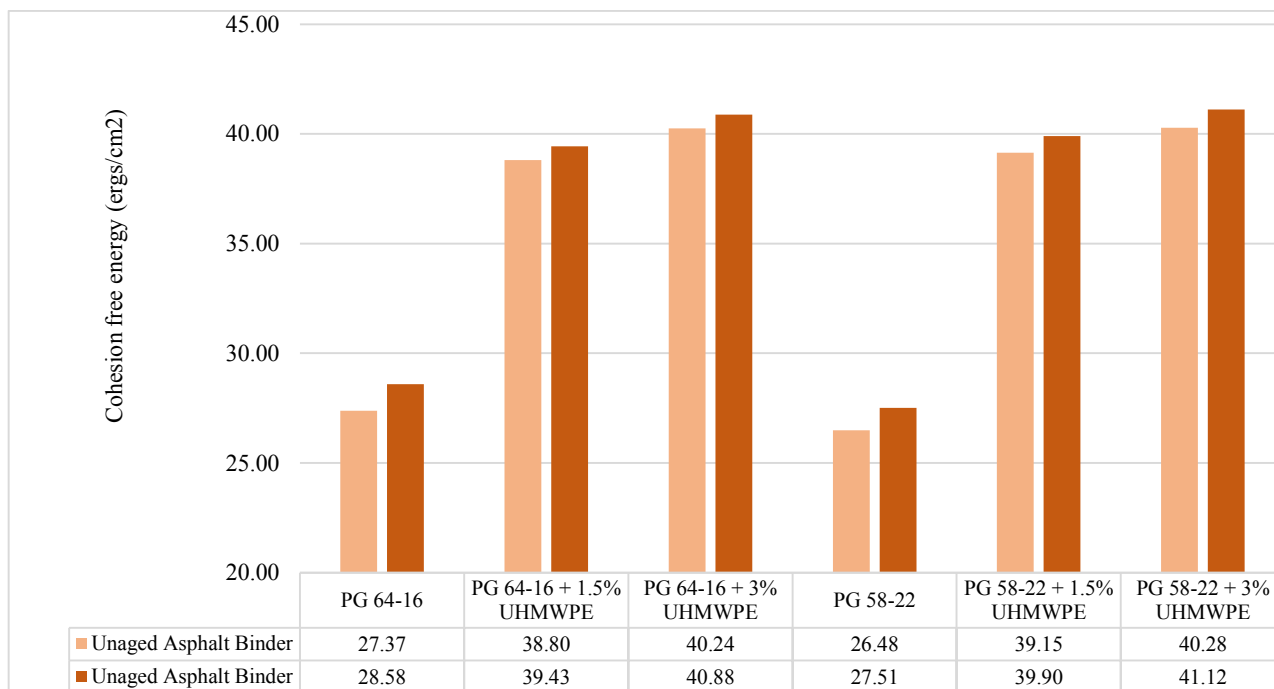
#### ۴-۱-۲- انرژی آزاد سطحی سنگدانه

نتایج بدست آمده از روش دستگاه جذب همگانی برای تعیین مؤلفه های انرژی آزاد سطحی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۷ ارائه شده است. همان طور که از داده های ارائه شده در این جدول مشاهده می شود مؤلفه بازی سنگدانه آهکی از سنگدانه گرانیتی بیشتر است که میتوان دلیل آن را در کمتر بودن درصد سیلیکا در ترکیب سنگ آهک دانست. این

جدول ۷. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

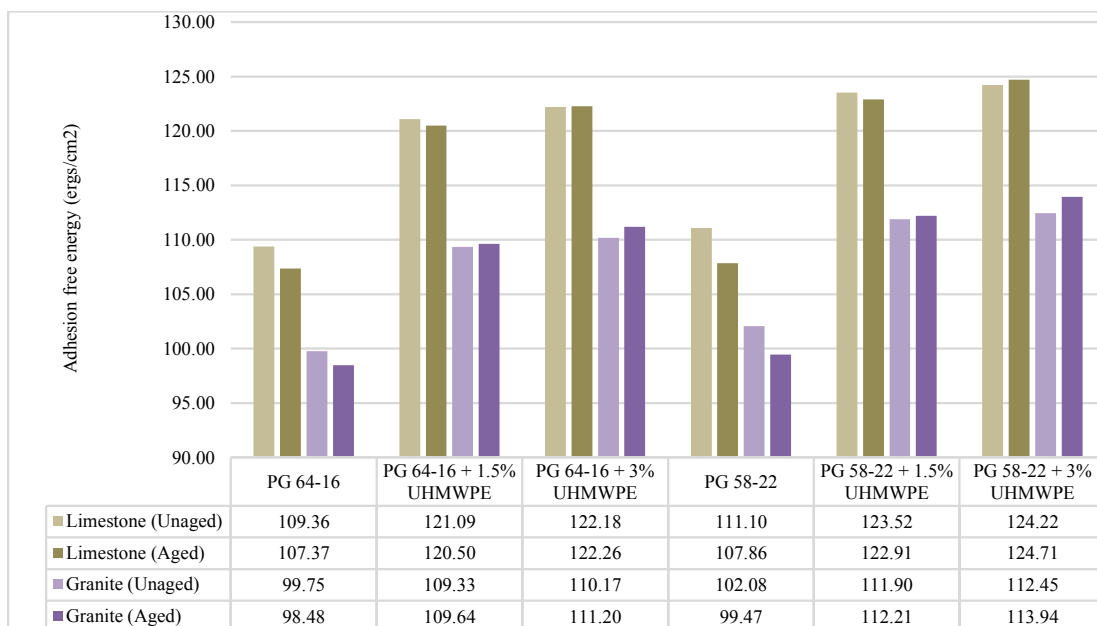
Table 7. Components of surface free energy of aggregates used in this research

| مساحت سطح ویژه سنگدانه<br>(m <sup>2</sup> /gr) | مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm <sup>2</sup> ) |       |       |         |       | نوع سنگدانه |
|--|---|-------|-------|---------|-------|-------------|
|  | بازی  | اسیدی | قطبی  | غیرقطبی | کل    |             |
| ۲/۱۳   | ۴۸۱/۸   | ۳۶/۸  | ۲۶۶/۳ | ۵۶/۷    | ۳۲۳/۰ | سنگ آهک     |
| ۱/۸۴   | ۵۲۱/۳   | ۴۳/۶  | ۳۰۱/۵ | ۳۳/۲    | ۳۳۴/۷ | گرانیت      |



شکل ۳. انرژی آزاد پیوستگی در قیرهای مختلف در شرایط پیر نشده و پیر شده

Fig. 3. Free energy of cohesion in different bituminous compounds in both immature and aged states



شکل ۴. انرژی آزاد چسبندگی بین ترکیب‌های مختلف قیر-سنگدانه در دو حالت پیر نشده و پیر شده

Fig. 4. Free energy of adhesion between different bitumen-aggregate compounds in both immature and aged states

استفاده از ۳ درصد از این افزودنی از نظر چسبندگی مؤثر نیست. یکی از مهم‌ترین خصوصیات سنگدانه‌ها مساحت سطح ویژه سنگدانه است که باعث ایجاد مقاومت بهتر در برابر ترک خوردگی دماپایین می‌شود؛ البته به شرطی که باعث کاهش درصد قیر مفید نشود. نتایج این پژوهش در شکل ۷ نشان می‌دهد که سنگدانه‌های سنگ‌آهک دارای مساحت سطح ویژه سنگدانه بزرگ‌تری هستند. با توجه به اینکه انرژی آزاد سطحی در واحد سطح بیان می‌شود، هر چقدر مقدار مساحت سطح ویژه بزرگ‌تر باشد باعث می‌شود تا نیروی بیشتری برای جدایی قیر از روی سطح سنگدانه نیاز باشد.

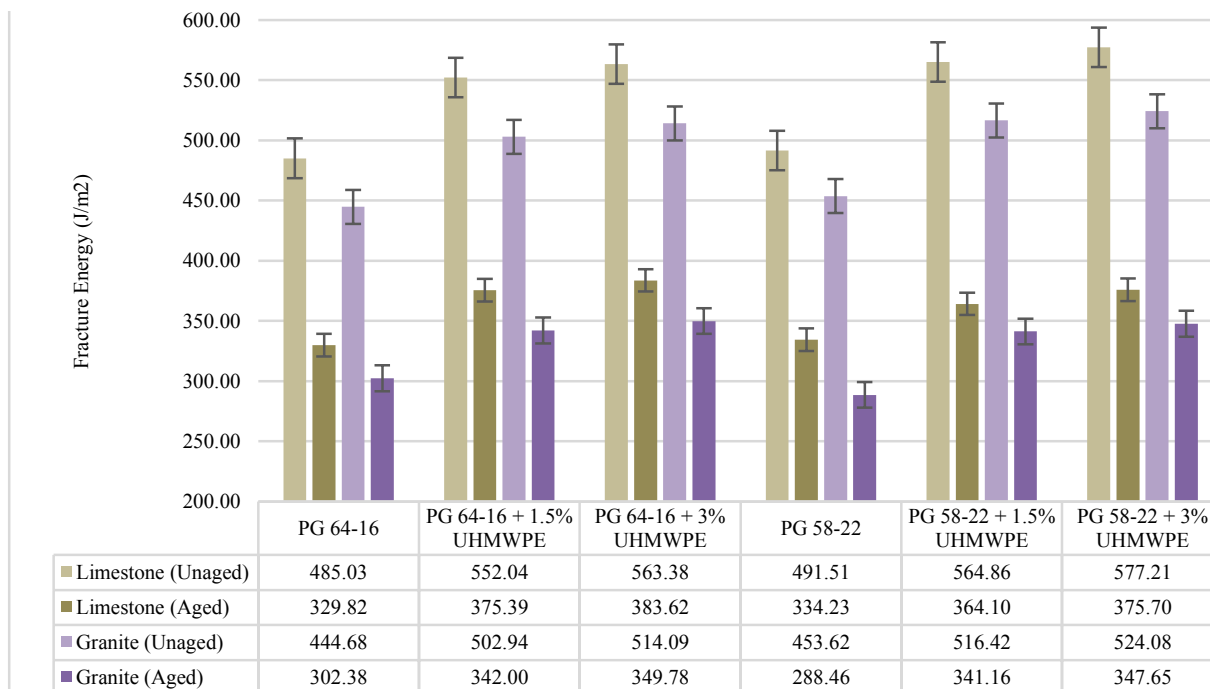
#### ۴-۲- آزمایش خمش نیم‌دایره

نتایج مربوط به پارامترهای آزمایش خمش نیم‌دایره شامل انرژی شکست و چقرمگی شکست است که در ادامه نتایج مربوط به این دو پارامتر ارائه شده است.

#### ۴-۲-۱- انرژی شکست

نتایج مربوط به پارامتر شکست در مخلوط‌های آسفالتی مختلف در

دو حالت پیر شده و پیر نشده در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چسبندگی قیر-سنگدانه در ترکیب‌های قیر-سنگدانه‌های سنگ‌آهک از ترکیب‌های قیر-سنگدانه گرانیتی به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. این موضوع را می‌توان در نتیجه خصوصیات اسیدی قیر دانست که چسبندگی بهتری با سنگدانه‌های بازی ایجاد می‌کند. نتایج این شکل نشان می‌دهد چسبندگی سنگدانه‌ها با قیر PG ۵۸-۲۲ از قیر PG ۶۴-۱۶ بهتر است. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان بالاتر بودن خصوصیات اسیدی و بازی قیر PG ۵۸-۲۲ در مقایسه با قیر PG ۶۴-۱۶ دانست. این موضوع سبب می‌شود تا پیوندهای قطبی بهتری بین قیر-سنگدانه شکل گیرد. از سویی دیگر، پیرشدگی باعث شده است تا مقدار چسبندگی قیر-سنگدانه، برخلاف پیوستگی آن، کاهش یابد. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان کاهش خصوصیات قطبی قیرهای پیر شده در مقایسه با قیرهای پیر نشده دانست. در واقع، پیرشدگی سبب می‌شود تا مقدار قطبیت قیر کاهش یابد که این موضوع سبب می‌شود چسبندگی بین قیر-سنگدانه کاهش یابد. مقدار انرژی آزاد چسبندگی قیرهای اصلاح شده با ۱/۵ و ۳ درصد از افزودنی UHMWPE تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد و لذا به نظر می‌رسد



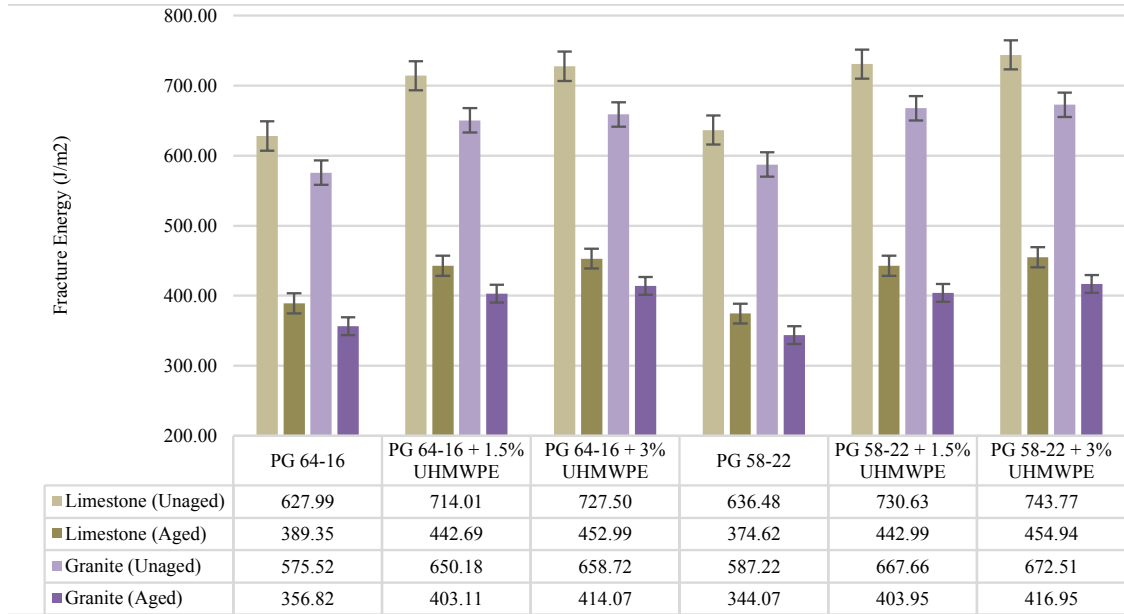
شکل ۵. انرژی شکست در نمونه‌های کنترل و پیر شده (دمای ۲۰- درجه سلسیوس)

Fig. 5. Fracture energy in controlled and aged samples (temperature -20 °C)

نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ‌آهک دارای مقدار انرژی شکست بیشتری در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی هستند. دلیل اصلی این امر را می‌توان به چسبندگی بهتر سنگدانه های سنگ‌آهک و قیر که خصوصیات اسیدی دارد، نسبت داد. در واقع، سنگدانه های سنگ‌آهک دارای مقادیر قابل توجهی کانی  $CaO$  هستند که این موضوع سبب ایجاد پیوندهای کووالانسی قطبی بسیار قوی بین این سنگدانه ها و قیر می‌شود. استفاده از UHMWPE باعث شده است تا مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی دمایی افزایش یابد. UHMWPE یک زیرشاخه از پلی‌اتیلن‌های ترموپلاستیک است. این ماده دارای زنجیره‌های بسیار طولانی است که جرم مولکولی آنها بین ۲ تا ۶ امو (amu) می باشد. زنجیره طولانی باعث انتقال بار به نحو مؤثری بر روی ستون فقرات پلیمری با کشش بین مولکولی می‌شود. این موضوع باعث شکل‌گیری ماده‌ای سخت و با قابلیت تحمل تغییر شکل بالا می‌شود. استفاده از UHMWPE در قیر باعث شبکه قوی از زنجیره‌های کربن در داخل این ماده می‌شود. در واقع، دلیل اصلی مقاومت قیر در برابر ترک خوردگی دماپایین را می‌توان شبکه‌های بلند UHMWPE دانست که مانند الیاف باعث تسلیح قیر می‌شود. این موضوع

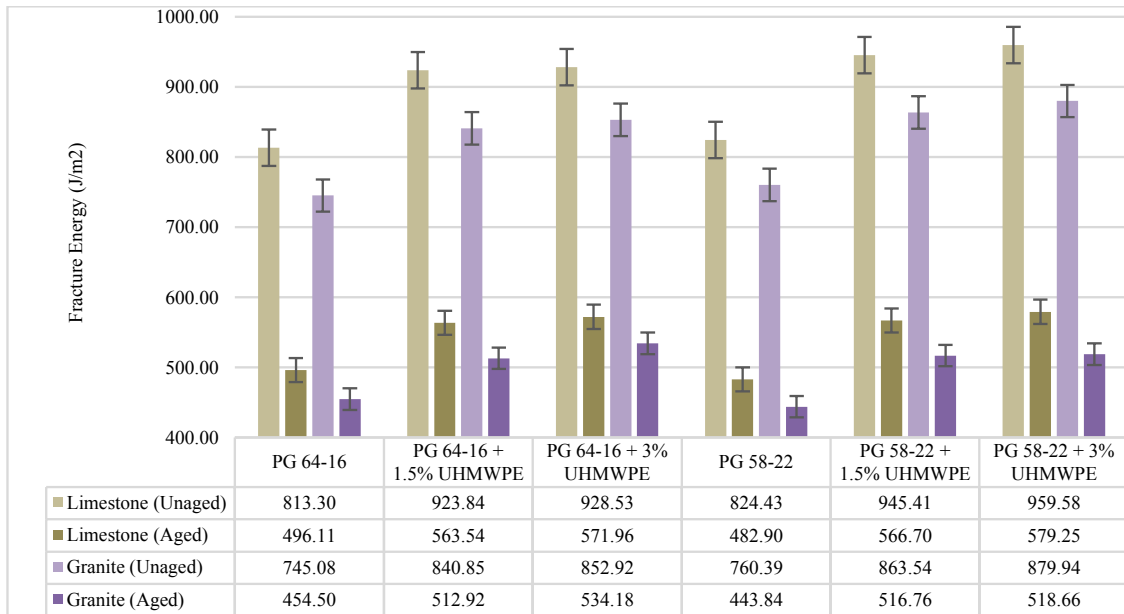
دماهای پایین، میانی و بالا به ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه شده است. داده‌های ارائه شده در این شکل‌ها نشان می‌دهد پیرشدگی باعث شده است تا انرژی شکست در نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. در واقع، پیرشدگی قیر سبب می‌شود تا مقدار انرژی پیوستگی قیر افزایش یابد، اما انرژی چسبندگی قیر-سنگدانه کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه انرژی شکست مجموع انرژی جذب شده از لحظه بارگذاری تا لحظه شکست است، می‌توان گفت پیرشدگی سبب شده است تا قابلیت جذب تنش توسط مخلوط آسفالتی کاهش یابد. این موضوع در همه نمونه‌های مخلوط آسفالتی وجود دارد که پیرشدگی سبب کاهش در مقدار انرژی شکست می‌شود؛ اما در نمونه‌های ساخته شده با قیر PG ۵۸-۲۲ بیشتر است. در واقع این قیرها دارای عملکرد بهتری در شرایط آب و هوایی سرد نسبت به قیر PG ۶۴-۱۶ هستند. از سویی دیگر، مقدار روغن موجود در این قیرها نسبت به قیر PG ۶۴-۱۶ بیشتر است. این موضوع باعث می‌شود پیرشدگی باعث شود تا تفاوت عملکرد بین قیرهای کنترل و پیر شده در نمونه‌های حاوی قیر PG ۵۸-۲۲ از قیر PG ۶۴-۱۶ بیشتر باشد. همان‌طور که از داده‌های ارائه شده در این شکل مشخص است





شکل ۶. انرژی شکست در نمونه‌های کنترل و پیرشده (دمای +۱- درجه سلسیوس)

Fig. 6. Fracture energy in controlled and aged samples (temperature -10 °C)



شکل ۷. انرژی شکست در نمونه‌های کنترل و پیر شده (دمای + درجه سلسیوس)

Fig. 7. Fracture energy in control and aged samples (temperature 0 °C)

با سنگ‌آهک به واسطه درصد قیر بهینه بیشتر دارای قیر مفید بیشتری در خلل و فرج بین سنگدانه‌ها هست. از این رو، این انتظار وجود دارد که نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک مقاومت بیشتری در برابر ترک‌خوردگی دمایی داشته باشد.

#### ۴-۲-۲- چقرمگی شکست

نتایج مربوط به پارامتر چقرمگی شکست در نمونه‌های مخلوط آسفالتی کنترل و پیرشده در دماهای پایین، میانی و بالا به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۰ ارائه شده است. با مقایسه نتایج مقدار چقرمگی شکست در نمونه‌های پیر شده و پیر نشده می‌توان متوجه شد که پیرشدگی باعث شده است تا مقدار پارامتر چقرمگی شکست به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. در واقع، پیرشدگی سبب می‌شود تا درصد آسفالت موجود در ساختار قیر افزایش یابد و قسمت‌های سبک‌وزن قیر تبخیر شوند یا به مولکول‌های درشت‌تر تبدیل شوند. این تغییرات سبب می‌شود تا قیرهای پیر شده انعطاف‌پذیری کمتری داشته باشند. هوای سرد نیز باعث تشدید خصوصیات شکنندگی قیر می‌شود. برآیند این اتفاق‌ها سبب می‌شود تا در روسازی‌هایی که چندین سال از عمر آنها گذشته و در معرض سیکل‌های حرارتی یا یک دوره بسیار سرد کوتاه‌مدت قرار می‌گیرند، ترک‌خوردگی دمایی ایجاد شود. همچنین، مقایسه نتایج بین قیرهای PG ۵۸-۲۲ و PG ۶۴-۱۶ نشان می‌دهد استفاده از قیر PG ۵۸-۲۲ باعث شده است تا مخلوط‌های آسفالتی عملکرد بهتری در برابر ترک‌خوردگی دمایی داشته باشند. این موضوع را می‌توان به درصد بیشتر روغن‌های موجود در ساختار قیر PG ۵۸-۲۲ نسبت داد.

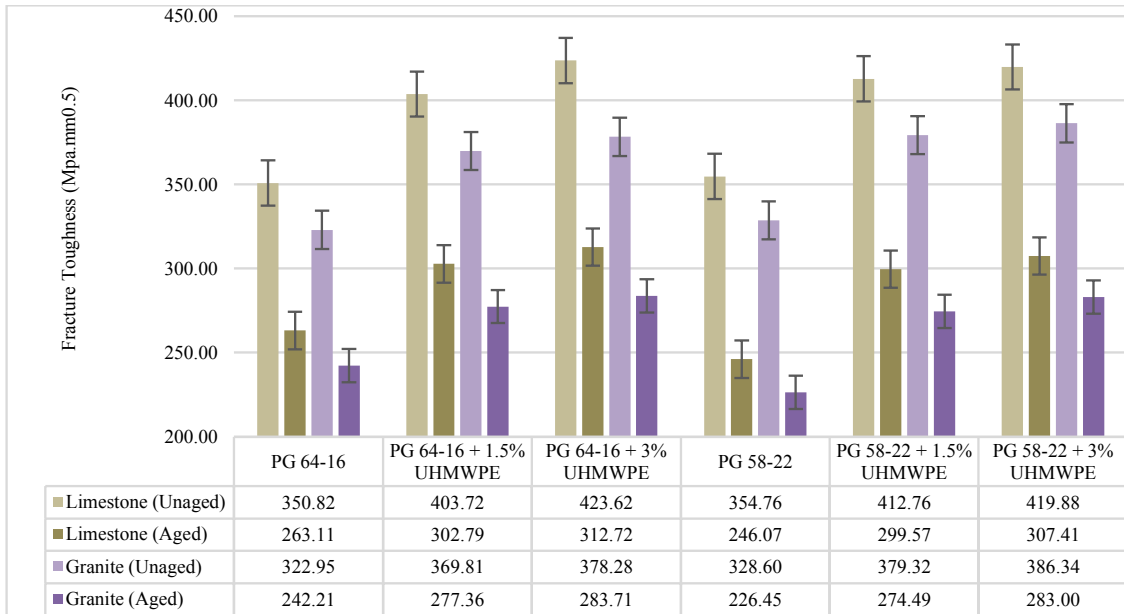
نتایج ارائه شده در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان می‌دهد استفاده از افزودنی UHMWPE باعث شده است تا مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی دمایی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. در واقع، استفاده از UHMWPE با ایجاد شبکه پیوسته‌ای از زنجیره‌های کربنی سبب می‌شود تا برای گسیختگی در قیر نیاز به انرژی بیشتری باشد. همچنین، استفاده از این افزودنی سبب بهبود هم در پیوندهای قطبی و هم پیوندهای غیرقطبی بین قیر و سنگدانه می‌شود که باعث بهبود چسبندگی قیر-سنگدانه و کاهش احتمال گسیختگی چسبندگی می‌شود.

مشابه با نتایج ارائه شده در مورد پارامتر انرژی شکست، در مورد پارامتر چقرمگی شکست نیز می‌توان گفت سنگدانه‌های سنگ‌آهک به واسطه خلل و فرج سطحی بیشتر دارای جذب قیر بیشتر و چسبندگی مکانیکی بهتر با قیر هستند. از طرفی، چسبندگی بین قیر-سنگدانه، با توجه به خصوصیات

باعث می‌شود تا برای گسیختگی در مخلوط‌های آسفالتی انرژی بیشتری از لحظه اول بارگذاری تا شکست نهایی نیاز باشد. نکته مهم در استفاده از UHMWPE این است که تفاوت آشکاری بین عملکرد نمونه‌های ساخته شده با ۱/۵ و ۳ درصد از UHMWPE مشاهده نمی‌شود. در واقع، استفاده از ۱/۵ درصد UHMWPE باعث شکل‌گیری شبکه پیوسته‌ای از پلیمر در فضای قیر می‌شود. استفاده بیشتر از این ماده ممکن است باعث شکل‌گیری پیوندهای بیشتری در داخل قیر شود، اما از سویی دیگر باعث افزایش سختی قیر و کاهش قابلیت آرام‌سازی تنش در دمای پایین می‌شود. برآیند این دو تأثیر باعث شده است تا عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با ۱/۵ و ۳ درصد از UHMWPE در دمای پایین تفاوت چندانی نداشته باشند.

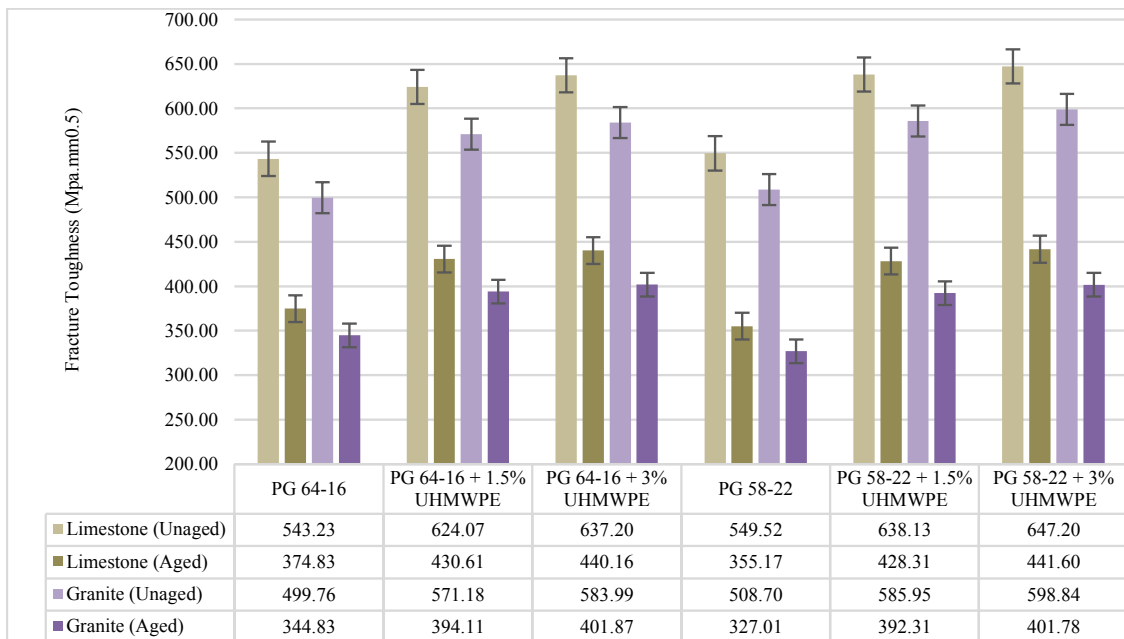
مقایسه نتایج بین قیرهای PG ۶۴-۱۶ و PG ۵۸-۲۲ نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته شده با قیرهای PG ۶۴-۱۶ دارای مقادیر انرژی شکست بیشتری در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با قیرهای PG ۵۸-۲۲ می‌باشند. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان قابلیت آرام کردن تنش بیشتر قیر PG ۵۸-۲۲ و سختی کمتر آن دانست. در واقع، این قیر دارای ساختار نرم‌تر است که تحت تنش‌های ایجاد شده ناشی از دمای پایین به نحو بهتری می‌تواند ساختار مولکولی خود را دوباره‌سازی کند و تنش را از خود مضمحل کند. همچنین، با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های ۵ تا ۷ مشاهده می‌شود افزایش دما باعث شده است تا انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی افزایش یابد. این موضوع باعث می‌شود تا از ابتدای بارگذاری تا لحظه شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی قابلیت ذخیره‌سازی بیشتری از انرژی را داشته باشند و مقاومت آنها در برابر ترک‌خوردگی حرارتی بیشتر باشد.

نقش خصوصیات سنگدانه مانند شکل، شکستگی و بافت سطحی نقش چندانی در رخداد ترک‌خوردگی دمایی ندارد؛ اما مطابق مطالعات پیشین می‌توان گفت بیشترین میزان مقاومت در برابر ترک‌های عرضی ناشی از دمای پایین، در سنگدانه‌هایی با خصوصیات مقاومت سایشی بالا، مقاوم در برابر انجماد یا خصوصیات تورمی پایین و جذب کم رخ می‌دهد. مصالح سنگی با قدرت جذب بیشتر، منجر به کاهش مقاومت آسفالت در دمای پایین می‌شود. زیرا جذب قیر بیشتر باعث می‌شود قیر موجود برای پیوستگی مصالح سنگی از حالت عادی (مصالح سنگی که تمایل به جذب قیر ندارند) کمتر شود. با فرض اینکه مخلوط به گونه‌ای طراحی شده باشد که در برابر شیارشدگی مقاومت خوبی نشان دهد، دانه‌بندی سنگدانه‌ها اثر کمی بر میزان مقاومت در دمای پایین مخلوط دارد [۲]. مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده



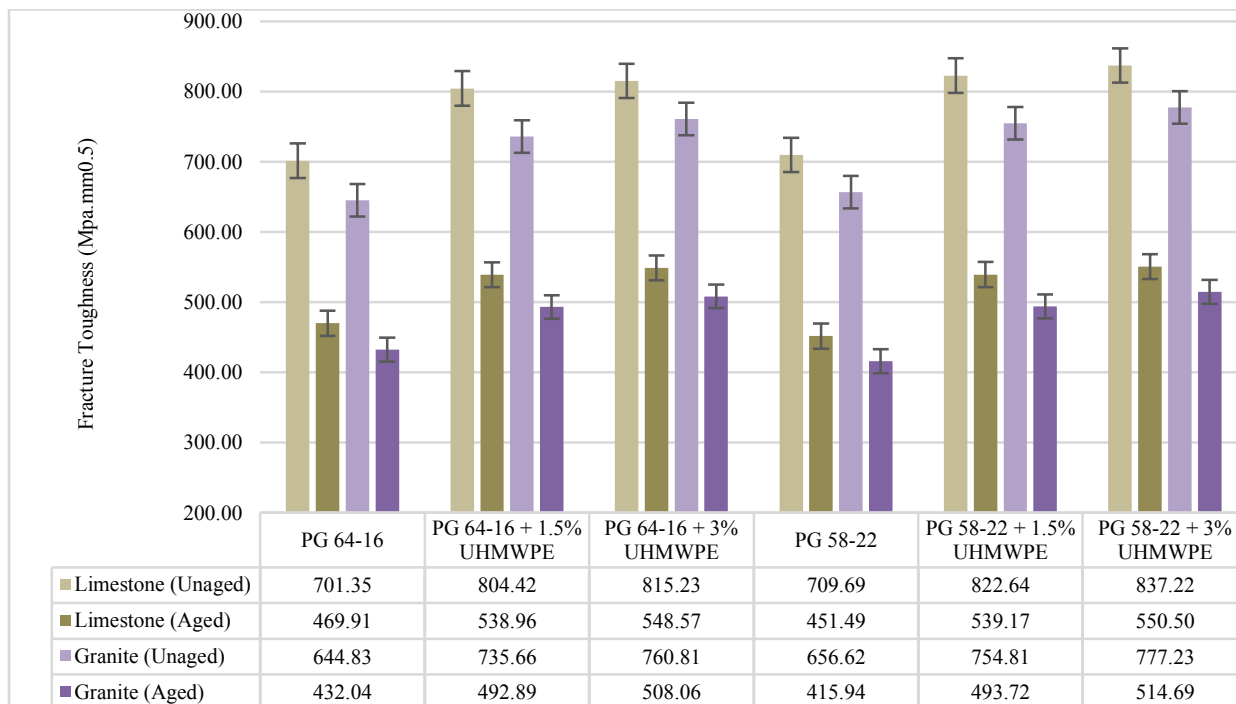
شکل ۸. چقرمگی شکست در نمونه‌های کنترل و پیر شده (دمای +۲۰- درجه سلسیوس)

Fig. 8. Fracture toughness in controlled and aged specimens (temperature -20 °C)



شکل ۹. چقرمگی شکست در نمونه‌های کنترل و پیر شده (دمای +۱۰- درجه سلسیوس)

Fig. 9. Fracture toughness in control and aged specimens (temperature -10 °C)



شکل ۱۰. چقرمگی شکست در نمونه‌های کنترل و پیر شده (دمای + درجه سلسیوس)

Fig. 10. Fracture toughness in control and aged specimens (temperature 0 °C)

#### ۵- نتیجه‌گیری

فرآیند پیرشدگی و تأثیر آن بر خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی در پژوهش‌های متعددی بررسی شده است. با این وجود، بررسی تأثیر پیرشدگی بر خصوصیات پایه‌ای مواد بر اساس مفاهیم روش انرژی آزاد سطحی می‌تواند به ارائه نتایجی منجر شود که دید بهتری در مورد روند خرابی‌های مختلف در مخلوط‌های آسفالتی و ارائه روش‌های جلوگیری از این خرابی‌ها را برای پژوهشگران و مهندسان طراح فراهم کند. بر این اساس، در این پژوهش به بررسی نقش پیرشدگی بلندمدت بر روی پارامترهای انرژی آزاد سطحی قیر و تأثیر آن بر گسیختگی پیوستگی در قیر و گسیختگی چسبندگی در سطح تماس قیر-سنگدانه پرداخته شده است. همچنین، سعی شده است تا پتانسیل ترک‌خوردگی دمایی در سه دمای مختلف با استفاده از روش خمش نیم‌دایره انجام شود و نتایج این آزمایش با نتایج روش انرژی آزاد سطحی مقایسه شود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

- پیرشدگی باعث شده است تا روغن‌های فرار قیر تبخیر شده و

اسیدی قیر، در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ‌آهک به نحو بهتری شکل می‌گیرد. این موضوع باعث می‌شود تا مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر گسیختگی در سطح تماس قیر-سنگدانه کاهش یابد.

با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود افزایش دما باعث شده است تا انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی افزایش یابد. این موضوع باعث می‌شود تا از ابتدای بارگذاری تا لحظه شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی قابلیت ذخیره‌سازی بیشتری از انرژی را داشته باشند و مقاومت آنها در برابر ترک‌خوردگی حرارتی بیشتر باشد.

#### ۴-۳- مقایسه با مطالعات پیشین

در جدول ۸ نتایج استفاده از سایر مواد پلیمری در پتانسیل ترک‌خوردگی دمایی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از UHMWPE تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. نکته قابل ذکر دیگر این است که در این پژوهش‌ها عمدتاً از روش‌های مکانیکی برای بررسی ترک‌خوردگی دمایی استفاده می‌شود و استفاده از روش انرژی آزاد سطحی مورد استفاده قرار نگرفته است.

جدول ۸. نتایج مطالعات پیشین در زمینه‌ی کاربرد مواد پلیمری در کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی دمایی

Table 8. Results of previous studies on the use of polymeric materials in reducing the potential for low temperature cracking

| نویسندگان                                | ماده (مواد) مورد استفاده                                  | نوع آزمایش   | نتیجه   |
|--|---|--|---|
| لو <sup>۳</sup> و همکاران [۳۴]           | EVA, SEBS, SBS یا EBA                                     | رئومتر برش دینامیکی و رئومتر تیرچه خمشی، تنش کششی نمونه محدود شده                                    | استفاده از افزودنی‌های پلیمری باعث بهبود خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی دمایی شده‌اند  |
| ژانگ <sup>۴</sup> و همکاران [۳۵]         | پلیمر SBS و دو نوع ترکیب SBS و خرده لاستیک                | لایه نازک متحرک قیر و پیرشدگی محفظه تحت فشار، جاروب فرکانس رئومتر تیرچه خمشی و آزمایش سنتی نقطه شکست | استفاده از ۲ درصد SBS بهترین عملکرد را در کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی دمایی قیر داشته است   |
| تلتایو <sup>۵</sup> و همکاران [۳۶]       | پلیمرهای الاستومر   | رئومتر تیرچه خمشی، تنش کششی نمونه محدود شده  | نمونه‌های قیرهای اصلاح شده عملکرد به مراتب بهتری در برابر ترک‌خوردگی دمایی را هم در آزمایش‌های قیر و هم در آزمایش‌های مخلوط آسفالتی از خود نشان دادند.  |
| لیو <sup>۶</sup> و همکاران [۳۷]          | پلی فسفریک اسید   | رئومتر تیرچه خمشی، تنش کششی نمونه محدود شده  | افزودن پلی فسفریک اسید باعث تأثیر ناخوشایند در مقاومت شکست و انتقال تسریع‌شده الاستیک-ویسکوالاستیک شده است.   |
| ژانگ و همکاران [۳۸]                      | نانومواد و مواد پلیمری                                    | آزمایش‌های سنتی و رئومتر تیرچه خمشی  | استفاده از نانومواد باعث پخش بهتر پلیمر در قیر و سازگاری بهتر بین این دو ماده شده است که در نتیجه آن عملکرد قیرهای اصلاح شده در برابر آزمایش‌های سنتی و آزمایش‌های قیر در دمای پایین از قیرهای کنترل بهتر بوده است. |
| ایساکسون <sup>۷</sup> و زنگ <sup>۸</sup> | تأثیر مواد مختلف پلیمری بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی مختلف | تنش کششی نمونه محدود شده   | نوع پلیمر، نوع مخلوط و درجه پیرشدگی بر عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای پایین مؤثر است.   |
| عبدالعزیز <sup>۹</sup> و همکاران [۳۹]    | استایرن بوتادین استایرن                                   | خمش نیم‌دایره و تنش کششی نمونه محدود شده   | ۳ درصد از افزودنی پلیمری می‌تواند گزینه خوبی برای کاهش ترک‌خوردگی دمایی در مناطق بسیار سرد باشد.  |

<sup>۳</sup> Lu

<sup>۴</sup> Zhang

<sup>۵</sup> Teltayev

<sup>۶</sup> Liu

<sup>۷</sup> Isacson

<sup>۸</sup> Zeng

<sup>۹</sup> Abdelaziz



• بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان پیشنهاد داد که استفاده از ماده افزودنی UHMWPE در مناطق با شرایط آب و هوایی سرد، می‌تواند در کاهش پتانسیل ایجاد ترک‌خوردگی دماپایین در روسازی‌های آسفالتی مؤثر باشد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود ابتدا خصوصیات شیارشدگی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با UHMWPE مورد بررسی قرار گیرد و در صورتی که در این خصوصیات نیز بهبود ایجاد شد، استفاده از این نوع مخلوط آسفالتی در پروژه‌های کوچک به صورت نمونه اجرا شود تا عملکرد میدانی آن برای استفاده در پروژه‌های میدانی بزرگ نیز بررسی شود.

### منابع

- [1] S. Liu, C. Ma, W. Cao, J. Fang, Influence of aluminate coupling agent on low-temperature rheological performance of asphalt mastic, *Construction and Building Materials*, 24(5) (2010) 650-659.
- [2] D. Jung, T.S. Vinson, *Low-temperature cracking: test selection*, 1994.
- [3] N. Li, T. Li, H. Chen, Z. Zhang, Evaluation of Low-Temperature Properties of Long-Term-Aged Asphalt Mixtures, in: *GeoHunan International Conference: Challenges and Recent Advances in Pavement Technologies and Transportation Geotechnics*, 2009.
- [4] Y. Wang, L. Sun, Y. Qin, Aging mechanism of SBS modified asphalt based on chemical reaction kinetics, *Construction and Building Materials*, 91 (2015) 47-56.
- [5] E. Brown, P.S. Kandhal, F.L. Roberts, Y.R. Kim, D.-Y. Lee, T.W. Kennedy, *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*, NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD, (2009).
- [6] C.J. Glover, A.E. Martin, A. Chowdhury, R. Han, N. Prapaitrakul, X. Jin, J. Lawrence, Evaluation of binder aging and its influence in aging of hot mix asphalt concrete: literature review and experimental design, *Texas Transportation Institute*, 2009.
- [7] D.K. Paul, O. Sirin, E. Kassem, Laboratory investigation of asphalt mixture aging, in: *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 2016.

غلظت قسمت‌های سنگین‌وزن و قطبی مانند آسفالتن افزایش یابد. این موضوع باعث شده است تا مؤلفه قطبی و غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیرهای پیر شده در مقایسه با قیرهای پیر نشده افزایش یابد. همچنین، پیرشدگی سبب افزایش در مؤلفه اسیدی و کاهش در مؤلفه بازی انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش شده است.

• پیرشدگی قیر باعث شده است تا مقدار انرژی آزاد پیوستگی این ماده به میزان قابل توجهی افزایش یابد. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان کاهش در درصد‌های روغن قیرهای پیر شده و افزایش در غلظت آسفالتن آن دانست.

• انرژی آزاد چسبندگی قیر، که یک ماده اسیدی است، با سنگدانه های گرانیتی که خصوصیات بازی دارند، از سنگدانه های گرانیتی بیشتر است. پیرشدگی سبب شده است تا مقدار انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد.

• استفاده از افزودنی UHMWPE باعث افزایش در مؤلفه بازی و کاهش در مؤلفه اسیدی انرژی آزاد سطحی قیر شده است. همچنین، این ماده باعث افزایش در هر دو نوع پیوندهای قطبی و غیرقطبی قیرهای پایه شده است که منجر به افزایش در انرژی آزاد پیوستگی و انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه شده است که به ترتیب باعث کاهش احتمال گسیختگی در قیر و سطح تماس قیر-سنگدانه می‌شود.

• استفاده از UHMWPE باعث شده است تا پیرشدگی تأثیر کمتری بر روی مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه داشته باشد. این موضوع سبب می‌شود تا پارامترهای انرژی آزاد پیوستگی و چسبندگی در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده در دو حالت پیر شده و پیر نشده مقادیر نزدیک به یکدیگر داشته باشند.

• پیرشدگی سبب شده است تا پتانسیل ترک‌خوردگی دماپایین در دماهای مختلف مورد بررسی در این پژوهش در نمونه‌های پایه و اصلاح شده کاهش یابد.

• نتایج پارامترهای انرژی آزاد سطحی نشان می‌دهد پیرشدگی باعث افزایش در انرژی آزاد پیوستگی قیر و کاهش در انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه می‌شود. برآیند دو اثر ذکر شده به نحوی بوده است که پتانسیل ترک‌خوردگی دماپایین در مخلوط‌های آسفالتی پایه و اصلاح شده افزایش یابد. این موضوع اهمیت چسبندگی قیر-سنگدانه در خصوصیات ترک‌خوردگی در دمای پایین را نشان می‌دهد که در اکثر مطالعات پیشین به آن کم توجهی می‌شود و تمرکزشان بر روی خصوصیات قیر است.

- [18] N. Esmaeili, G.H. Hamed, M. Khodadadi, Determination of the stripping process of asphalt mixtures and the effective mix design and SFE parameters on its different phases, *Construction and Building Materials*, 213 (2019) 167-181.
- [19] N. Esmaeili, G.H. Hamed, M. Khodadadi, Determination of the stripping process of asphalt mixtures and the effective mix design and SFE parameters on its different phases, *Construction and Building Materials*, 213 (2019) 167-181.
- [20] ASTM, D 3515: Standard specification hot-mixed, hot laid bituminous paving mixtures, *Annual book of standards*, 4 (2004).
- [21] L.A. ERSHAD, A.A. YOUSEFI, Study of viscoelastic behavior of bitumen-polyethylene blends, (2003).
- [22] G.H. Hamed, K.G. Shamami, M.M. Pakenari, Effect of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the performance characteristics of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 258 (2020) 119729.
- [23] G.H. Hamed, M.H. Pirbasti, Z.R. Pirbasti, Investigating the Effect of Using Waste Ultra-high-molecular-weight Polyethylene on the Fatigue Life of Asphalt Mixture, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, (2020).
- [24] S. Sreedhar, E. Coleri, Effects of binder content, density, gradation, and polymer modification on cracking and rutting resistance of asphalt mixtures used in Oregon, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11) (2018) 04018298.
- [25] J. Du, C. Ai, S. An, Y. Qiu, Rheological Properties at Low Temperatures and Chemical Analysis of a Composite Asphalt Modified with Polyphosphoric Acid, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5) (2020) 04020075.
- [26] MS-2 Asphalt Mix Design Methods, Asphalt Institute, 2014.
- [27] M.K. Idham, H. Mohd Rosli, H. Yaacob, M.N.M. Warid, M.E. Abdullah, Effect of aging on resilient modulus of hot mix asphalt mixtures, in: *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 2013, pp. 291-297.
- [28] G. Nsengiyumva, Y.-R. Kim, T. You, Development of a Semicircular Bend (SCB) Test Method for Performance
- [8] D. Cheng, Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete based on surface free energy, (2003).
- [9] R. Schapery, Nonlinear fracture analysis of viscoelastic composite materials based on a generalized J integral theory, *Composite materials: Mechanics, mechanical properties and fabrication*, (1982) 171-180.
- [10] E.K. Ofori-Abebrese, Fatigue resistance of hot-mix asphalt concrete (HMAC) mixtures using the calibrated mechanistic with surface energy (CMSE) measurements approach, Texas A&M University, 2006.
- [11] N.L. Li, X.P. Zhao, C.L. Zhang, Q.Y. Xiao, H.H. Li, Effect of Aging on the Low-Temperature Properties of Asphalt Mixture, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Pub., 2013, pp. 383-386.
- [12] R. Zhang, J.E. Sias, E.V. Dave, R. Rahbar-Rastegar, Impact of Aging on the Viscoelastic Properties and Cracking Behavior of Asphalt Mixtures, *Transportation Research Record*, 2673(6) (2019) 406-415.
- [13] A. Azarhoosh, F. Moghadas Nejad, A. Khodaii, The influence of cohesion and adhesion parameters on the fatigue life of hot mix asphalt, *The Journal of Adhesion*, 93(13) (2017) 1048-1067.
- [14] L. Cong, J. Peng, Z. Guo, Q. Wang, Evaluation of fatigue cracking in asphalt mixtures based on surface energy, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3) (2017) D4015003.
- [15] A.R. Azarhoosh, Evaluating fatigue of asphalt mixtures using surface free energy method, Amirkabir University of Technology, 2018.
- [16] A. Azarhoosh, F. Moghadas Nejad, A. Khodaii, Using the surface free energy method to evaluate the effects of nanomaterial on the fatigue life of hot mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(10) (2016) 04016098.
- [17] Azarhoosh, H.F. Abandansari, G.H. Hamed, Surface-Free Energy and Fatigue Performance of Hot-Mix Asphalt Modified with Nano Lime, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9) (2019) 04019192.

- [35] H. Zhang, G. Xu, X. Chen, R. Wang, K. Shen, Effect of long-term laboratory aging on rheological properties and cracking resistance of polymer-modified asphalt binders at intermediate and low temperature range, *Construction and Building Materials*, 226 (2019) 767-777.
- [36] Teltayev, C. Rossi, G. Izmailova, E. Amirbayev, A. Elshibayev, Evaluating the effect of asphalt binder modification on the low-temperature cracking resistance of hot mix asphalt, *Case Studies in Construction Materials*, 11 (2019) e00238.
- [37] L. Sun, X. Xin, J. Ren, Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance, *Construction and Building Materials*, 133 (2017) 358-366.
- [38] H.-l. Zhang, M.-m. Su, S.-f. Zhao, Y.-p. Zhang, Z.-p. Zhang, High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 323-332.
- [39] Abdelaziz, C.-H. Ho, M. Snyder, Evaluating the Influence of Polymer Modified Asphalt Binders on Low Temperature Properties, in: *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, pp. 05012.
- Testing of Nebraska Asphalt Mixtures, (2015).
- [29] M. Marasteanu, W. Buttlar, H. Bahia, C. Williams, K.H. Moon, E.Z. Teshale, A.C. Falchetto, M. Turos, E. Dave, G. Paulino, Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements national pooled fund study–phase II, (2012).
- [30] ASTM D6521, Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV), in: *USA: Annual Book of ASTM Standards*, 2019.
- [31] ASTM D2867, 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).
- [32] C.J. Van Oss, M.K. Chaudhury, R.J. Good, Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems, *Chemical Reviews*, 88(6) (1988) 927-941.
- [33] P.V. Peltonen, Road aggregate choice based on silicate quality and bitumen adhesion, *Journal of transportation engineering*, 118(1) (1992) 50-61.
- [34] X. Lu, U. Isacson, J. Ekblad, Influence of polymer modification on low temperature behavior of bituminous binders and mixtures, *Materials and Structures*, 36(10) (2003) 652-656.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*P. Moradi*<sup>1</sup>, *H. Shirmohammadi*, *Gh. H. Hamedi*, *Effect of Long-Term Aging on Low-Temperature Cracking of Asphalt Mixtures using Mechanical and Thermodynamic Methods*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 4787-4808.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18548.6897](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18548.6897)

