



University Of Qom

Laboratory Investigation of the Fracture Toughness of Hot Mix Asphalt at Low Temperatures

Mansour Fakhri¹ , Sayyed Ali Siyadati² , Mohammad Reza Mohammad Aliha³

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: fakhri@kntu.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: sasiyadati@mail.kntu.ac.ir
3. School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, Tehran, Iran. E-mail: mrm_aliha@iust.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 25 May 2025
Revised 12 Dec 2025
Accepted 23 Dec 2025
Published 23 Dec 2025

Keywords:

Hot Mix Asphalt,
Fracture Toughness,
Semi-Circular Bend
Specimen,
Saturated Asphalt
Concrete,
Freeze-Thaw Cycles.

ABSTRACT

Asphalt pavements in cold regions are significantly affected by damage resulting from freeze-thaw cycles, which reduce their resistance to failure. In this study, the effect of freeze-thaw cycles on the fracture toughness of water-saturated asphalt mixtures was investigated. After saturating SCB specimens, the Semi-Circular specimens (SCB) were subjected to (1, 3, 5, 7, and 11) freeze-thaw cycles at various temperatures (-5, -10, -15, -20, and -22°C). The tests were conducted in a combined tensile-shear loading mode with a higher tensile component ($M^e = 0.8$). The results showed that the stress intensity factors Which is determined based on the force applied to the sample at failure, as well as the geometric and dimensional characteristics of the sample, significantly decreased with an increasing number of cycles up to the seventh cycle, after which no substantial reduction was observed. Additionally, the highest fracture strength was recorded at -15°C, while lower temperatures led to decreased strength due to the formation of microcracks caused by bitumen shrinkage. Accordingly, for pavement design in cold climates, the seventh freeze-thaw cycle is recommended as the critical condition for design considerations.

Cite this article: Fakhri M, Siyadati S.A, Mohammad Aliha M.R. Laboratory Investigation of the Fracture Toughness of Hot Mix Asphalt at Low Temperatures. *Civil Infrastructure Researches*. 2026; 12(1): 91-102. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13023.1626>



Introduction

In cold regions, temperature changes and traffic loads can simultaneously generate stresses and lead to crack formation in asphalt pavements. A drop in temperature below zero degrees causes stiffening of the bitumen and brittleness of the pavement, resulting in an increased susceptibility to fracturing. On the other hand, the penetration of water from precipitation into the voids and its expansion during freezing causes the appearance and growth of microcracks, which leads to a reduction in the service life of the pavement. One of the most important factors affecting the durability of the pavement is the number and intensity of freeze-thaw cycles, which cause gradual destruction of the asphalt structure. Therefore, in this study, the effect of freeze-thaw cycles and freezing temperature changes on the fracture resistance of saturated asphalt matures has been investigated.

Materials and Methods

In this study, limestone aggregates and a binder whose penetration grade was 60 –70 (PG 64-16) were used. Grading number 4, according to Standard code number 234 (Iranian Pavement Roads Standard), was employed. The optimum bitumen content, determined by the Marshall method, was 5.5%, with 4% air voids. The specimens were compacted using a gyratory compactor. Finally, the cylindrical samples were cut into Semi-Circular bend (SCB) samples (Fig.1.)

To simulate freeze–thaw cycles, fully saturated specimens were placed for 12 hours in a water bath (25 °C) and then for 12 hours in a freezer (–5 °C). This process was repeated for up to 11 cycles. In addition, tests were performed at temperatures of –10, –15, –20, and –22 °C.

To evaluate fracture resistance under critical conditions, SCB samples were fractured under mixed-mode I/II loading mode with a higher tensile component ($M^e = 0.8$). A SANTAM testing machine (20 kN capacity) was used at a loading rate of 3 mm/min. The stress intensity factors were calculated based on Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM).

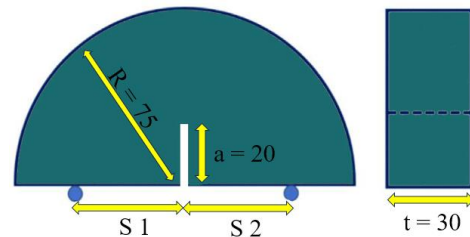


Fig.1. Geometry of the semi-circular bending test specimen

Results and Discussion

Results indicated a consistent reduction in the stress intensity factor with an increasing number of freeze–thaw cycles. This trend is attributed to water penetration and ice expansion into the air voids, leading to the generation of microcracks in the mixture. Also, the penetration of water at the aggregate–bitumen interface results in decreased binder adhesion. The largest reduction occurred during the first seven cycles, after which the decline rate became nearly constant; additional cycles had little influence on fracture resistance. (Fig.2.).

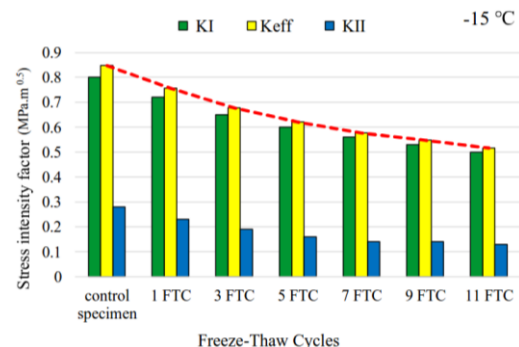


Fig. 2. Fracture toughness of SCB specimens at different FTCs

The stress intensity factors for specimens conditioned at various temperatures decreased by about 32–40% compared to the control specimens. Temperature also played a significant role: the fracture resistance increased as the temperature decreased to –15 °C, but then reduced at lower temperatures. The observed optimum fracture toughness at –15 °C is due to the increasing stiffness of the binder, while at lower temperatures, greater contraction of the binder compared to the aggregates causes the formation of microcracks and a reduction in fracture resistance. Hence, the highest and lowest

fracture resistances were observed at $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively (Fig.3.).

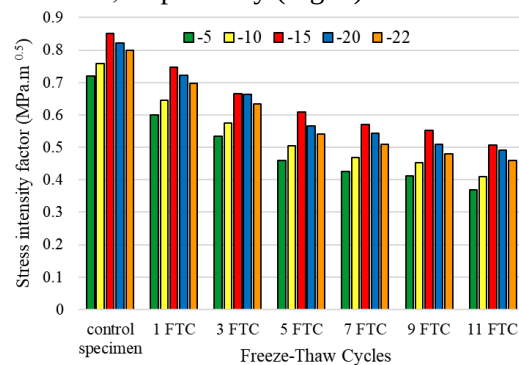


Fig. 3. Effective stress intensity factor at different temperatures and FTCs

Conclusion

Freeze-thaw cycles significantly affect the fracture behavior of saturated asphalt mixtures. Increasing the number of cycles gradually decreases fracture toughness, which stabilizes after approximately seven cycles. Furthermore, the influence of temperature indicates that the maximum fracture resistance occurs around $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, while lower temperatures lead to decreased fracture toughness. Finally, it is recommended that for pavement design in areas with rain and snow in the winter, where freeze-thaw cycles and asphalt saturation occur simultaneously, seven FTCs be considered the critical state in mixed-mode I/II loading mode with a higher tensile component ($M^e = 0.8$).

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization, development, and preparation of this manuscript.

بررسی آزمایشگاهی چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی گرم در دماهای پایین

منصور فخری^۱، سیدعلی سیادت^۲، محمدرضا محمدعلیها^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: fakhri@kntu.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: sasiyadati@mail.kntu.ac.ir

۳. دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران. رایانامه: mrm_aliha@iust.ac.ir

چکیده

روسازی های آسفالتی در مناطق سردسیر به طور قابل توجهی در معرض آسیب های ناشی از چرخه های ذوب و یخ قرار دارند که موجب کاهش مقاومت شکست آن ها می شود. در این پژوهش، تأثیر چرخه های انجماد و ذوب بر مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی اشباع شده با آب بررسی شده است. نمونه های نیم دایره ای (SCB) پس از اشباع شدن، در معرض ۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۱ چرخه متوالی ذوب و انجماد در دماهای مختلف ۵-، ۱۰-، ۱۵-، ۲۰- و ۲۲- درجه سانتیگراد قرار گرفتند. آزمایش ها در مود ترکیبی با سهم کشش بیشتر ($M^e = 0/8$) انجام شد. نتایج نشان داد ضرایب شدت تنش که براساس نیروی اعمال شده به نمونه در زمان شکست و مشخصات هندسی و ابعادی نمونه ها تعیین می گردد، به طور معناداری با افزایش تعداد چرخه ها تا چرخه هفتم کاهش می یابد، ولی پس از آن کاهش قابل توجهی مشاهده نمی شود. همچنین بیشترین مقاومت شکست در دمای ۱۵- درجه سانتیگراد ثبت شده و در دماهای پایین تر به دلیل افزایش ترک های ریز ناشی از انقباض قیر، مقاومت کاهش یافته است. بر این اساس، برای طراحی روسازی در مناطق سردسیر، در نظر گرفتن چرخه هفتم به عنوان حالت بحرانی توصیه می شود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

کلیدواژه ها:

آسفالت گرم،

چقرمگی شکست،

نمونه نیم دایره ای،

نمونه آسفالتی اشباع شده،

چرخه های ذوب و انجماد.

استناد: فخری منصور، سیادت سیدعلی، محمدعلیها محمدرضا. بررسی آزمایشگاهی چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی گرم در دماهای پایین.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.13023.1626>. ۱۰۲-۹۱: (۱)۱۲؛ ۱۴۰۵

۱- مقدمه

تنش های حرارتی و بار ترافیکی، دو عاملی هستند که در ایجاد و گسترش ترک در روسازی ها نقش ایفا می کنند. در مناطق سردسیر به دلیل افزایش سختی روسازی آسفالتی در دمای پایین، روسازی در برابر وزن وسایل نقلیه مستعد ترک بیشتری می باشد. علاوه بر این، در مناطق کوهستانی سیکل های دمایی، سبب تشدید خرابی روسازی می شود. تکرار این سیکل ها در طول زمستان و یخ زدگی روکش آسفالتی در روزهای بارانی و برفی، سبب نفوذ آب به داخل ترک های ایجاد شده در روسازی شده که می تواند موجب گسترش خرابی در هنگام یخ زدگی شوند و آسیب وارد شده به روسازی افزایش می یابد.

به منظور کاهش آسیب های وارده به روسازی می توان از روش های طراحی و ساخت مناسب نظیر استفاده از لایه های ضخیم تر آسفالت یا افزودن مواد افزودنی به مخلوط آسفالتی به منظور افزایش انعطاف پذیری روسازی در دمای سرد استفاده نمود. بازدیدهای دوره ای و تعمیر و نگهداری مناسب می تواند مانع گسترش ترک ها شده که در نهایت عمر خدمت دهی روسازی را افزایش می دهد. با توجه به رفتار متفاوت بتن آسفالتی در دمای بالا و پایین، باید از روش های مختلفی در تحلیل مقاومت های کششی و برشی آسفالت در دمای مورد نظر استفاده نمود.

از آنجا که آسفالت در دمای پایین و زیر صفر رفتاری الاستیک از خود نشان می دهد، در نتیجه می توان از روش مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)^۱ برای پیش بینی رفتار ترک استفاده نمود. ضریب شدت تنش بحرانی (K_{IC}) پارامتر اساسی مورد استفاده در این روش برای بررسی ترک می باشد. این روش برای اولین بار توسط مجیدزاده و همکاران، به منظور بررسی توسعه ترک در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت [۱]. در دمای

بالای صفر که آسفالت، رفتاری ویسکوالاستیک از خود نشان می دهد، سایر روش ها نظیر مدل ناحیه چسبیده می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۲ و ۳]. در سال های اخیر، استفاده از روش LEFM بسیار شایع بوده و کاربرد فراوانی در بررسی مشخصات مکانیکی آسفالت پیدا کرده است. محققین در برخی مطالعات با تغییر مشخصات مخلوط آسفالتی، تغییرات ایجاد شده در مشخصات مکانیکی آسفالت را مورد بررسی قرار داده اند.

به طور مثال در تحقیقی، با اعمال تغییر در قیر، دانه بندی و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی به بررسی چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی پرداخته شد [۴]. در برخی از مطالعات، محققین به بررسی مشخصات مخلوط های آسفالتی در دماهای مختلف پرداخته اند [۵-۷]. پیرمحمد و همکاران، به بررسی تأثیر دمای چرخه ای بر رفتار شکست مخلوط های آسفالتی پرداختند [۸]. مطالعات بسیاری را می توان یافت که با افزودن مواد افزودنی به دنبال بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی می باشند [۹-۱۳]. تغییر در قطر و ابعاد نمونه های آسفالتی و همچنین تغییر در نرخ بارگذاری از دیگر مواردی است که توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷-۱۴]. برخی محققین نیز به بررسی تأثیر بارهای استاتیکی و سیکلی بر نمونه ها پرداخته اند [۱۸]. عبور چرخ وسایل نقیه براساس محل عبور می تواند تنش های متفاوتی را بر روکش آسفالتی تحمیل کند. در نتیجه، بررسی مودهای مختلف بارگذاری به شناخت بهتر خرابی های ایجاد شده در روکش آسفالتی کمک بسزایی می نماید [۱۹]. نهایتاً براساس نیاز محققین در بررسی پارامترهای مورد نظر در مخلوط آسفالتی، نمونه ها را می توان به شکل های متفاوتی ساخت. از جمله این روش های ساخت می توان به SCB^2 و $ENDB^6$ ، IDT^5 ، DCT^4 ، BD^3 ، $SENB^2$

2- Single Edge Notched Bend Beam

3- Brazilian Disc

4- Disc Shape Compact Tension

5- Modified Indirect Tension

6- Edge Notched Disc Bend

7- Semi-Circular Bend

1- Linear Elastic Fracture Mechanics

آسفالتی به علت ریزش برف یا باران اشباع شده و به دلیل افت دما به محدوده زیر صفر دچار یخ زدگی می شود، انبساط کریستال های یخ باعث ایجاد تنش در مخلوط آسفالت شده که نهایتاً منجر به تشکیل ریزترک خواهد شد. چرخه های مکرر ذوب و انجماد، این ترک ها را تشدید می کند و در نهایت، عمر مفید روسازی را کاهش می دهد. در این مقاله به بررسی تأثیر چرخه های ذوب و یخ بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی اشباع شده پرداخته خواهد شد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- قیر و مصالح سنگی

مخلوط آسفالتی از سه جزء سنگدانه، قیر و فضای خالی تشکیل شده است. قیر مورد استفاده در این پژوهش با نفوذپذیری ۶۰/۷۰ و درجه عملکردی PG 64-16 از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

اشاره نمود. هریک از روش های ساخت دارای مزایا و معایبی می باشد. از مهمترین مزایای هر روش می توان به حالت تنش ساده برای بارگذاری تحت مد خالص I در روش DCT، امکان بارگذاری ساده سه نقطه ای خمشی در روش SCB و مناسب بودن روش SENB برای بارگذاری مد I اشاره نمود. از معایب این روش ها نیز می توان به امکان خروج از مرکزیت بار و کنترل سخت بازشدگی ترک در روش DCT، پیچیدگی بیشتر تنش در روش SCB به نسبت سایر روش ها و ساخت مشکل نمونه های SENB به نسبت سایر روش ها اشاره نمود.

هرچند در مطالعات پیشین سعی شده است با تغییر در مشخصات مخلوط آسفالتی و یا تغییر در شرایط محیطی اعمال شده به مخلوط آسفالتی نظیر بارگذاری، دما و غیره، به بررسی مشخصات مکانیکی مخلوط آسفالتی پرداخته شود، اما آنچه به طور خاص مورد بررسی قرار نگرفته است، تأثیر یخ زدگی آب موجود در فضای خالی آسفالت اشباع در فصل زمستان و در دماهای زیر صفر به صورت همزمان می باشد. هنگامی که رویه

جدول ۱- مشخصات قیر

آزمایش	نتایج	واحد	روش آزمایش
وزن مخصوص [۲۰]	۱/۰۳	gr/cm ³	ASTM D70
نقطه اشتعال [۲۱]	۳۰۸	°C	ASTM D92
درجه نفوذ [۲۲]	۶۲	°C	ASTM D5
کشش پذیری [۲۳]	۱۰۰	cm	ASTM D113
نقطه نرمی [۲۴]	۴۹	°C	ASTM D36
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد [۲۵]	۴۲۰	mm ² /s	ASTM D2170
ویسکوزیته دورانی [۲۶]	۰/۳	Pa.sec	ASTM D4402

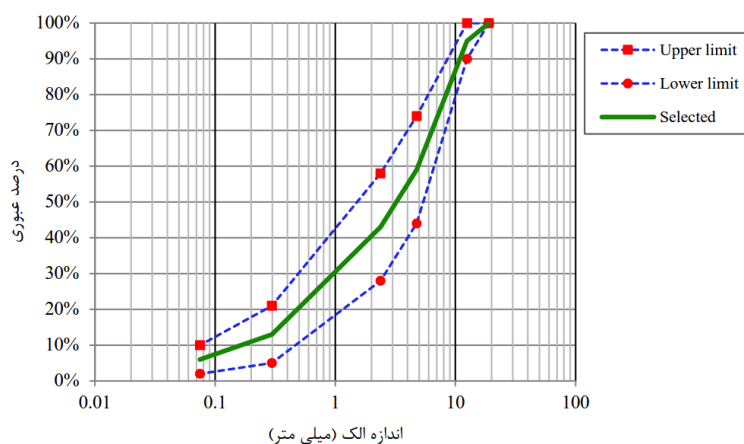
برای ساخت نمونه های آسفالتی روش های مختلفی وجود دارد که در مقدمه به آن اشاره شده است. بر این اساس که نمونه ها تحت چه نوع بارگذاری قرار گیرند و دستگاهی که برای شکست نمونه ها استفاده می شود چه نوع فکی داشته باشد، روش ساخت نمونه ها تعیین

مصالح سنگی نیز آهکی بوده و دانه بندی مخلوط آسفالتی مطابق نشریه ۲۳۴، شماره ۴ بوده که در شکل ۱ نشان داده شده است. درصد قیر بهینه با استفاده از روش مارشال ۵/۵ درصد و درصد فضای خالی ۴ درصد می باشد.

۲-۲- ساخت نمونه ها

می‌گردد. در این پژوهش از نمونه های SCB استفاده شده است. علت این موضوع را می توان در سهولت ساخت نمونه ها به روش ژیراتوری و هزینه کمتر ساخت اشاره نمود. همچنین ساخت نمونه ها به روش ژیراتوری موجب می شود خواص مکانیکی در نمونه استوانه ای تقریباً یکنواخت بوده و قابلیت کنترل مشخصات نمونه از قبیل درصد فضای خالی، دانسیته و ارتفاع فراهم باشد.

مصلح سنگی پس از ۲۴ ساعت باقی ماندن در آون با دمای ۱۷۵ درجه و از بین رفتن کامل رطوبت، با قیر با دمای ۱۳۵ درجه مخلوط شده و پس از پوشش کامل مصلح سنگی توسط قیر، مخلوط آسفالتی را در قالب استوانه ای با قطر ۱۵ سانتی متر ریخته و تراکم توسط دستگاه انجام می شود. پارامترهای ورودی دستگاه ژیراتوری در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱- دانه بندی مصلح آهکی

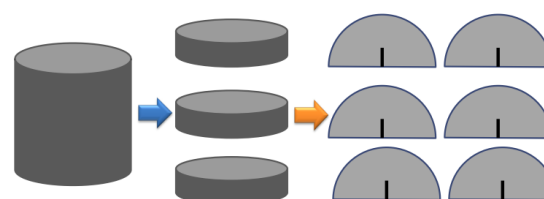
جدول ۲- تنظیمات دستگاه ژیراتوری

مشخصه	مقدار	استاندارد
دمای سنگدانه	۱۷۵ درجه سانتی گراد	AASHTO:R-30
دمای قیر	۱۳۵ درجه سانتی گراد	AASHTO:T-316
زاویه داخلی	۱/۲۵	AASHTO:TP-71
فشار تراکم	۹۰۰ کیلوپاسکال	AASHTO:T-312
تعداد دوران	۳۰ دور در دقیقه	-
قطر نمونه	۱۵۰ میلی متر	-

۲-۳- مشخصات هندسی نمونه ها

برای ایجاد مودهای مختلف بارگذاری می توان از جابه جایی فک دستگاه استفاده نمود. بدین شکل که با ثابت بودن یک فک و جابه جایی فک دیگر، می توان مودهای خالص کششی، ترکیبی کششی- برشی و برشی خالص را ایجاد نمود. روش دیگری که برای ایجاد مودهای مختلف می توان استفاده نمود، تغییر زاویه برش ناچ می باشد. در شکل ۳، مشخصات هندسی نمونه های آسفالتی نشان داده شده است. M^e مقدرای بین صفر تا یک داشته

در نهایت، نمونه های استوانه ای برش داده شده و از هر نمونه استوانه ای، شش نمونه SCB تولید می شود. به منظور ایجاد ناچ در میانه نمونه ها از تیغه ۰/۴ میلی متر استفاده شده است. (شکل ۲)



شکل ۲- برش نمونه های استوانه ای و تبدیل به نمونه های

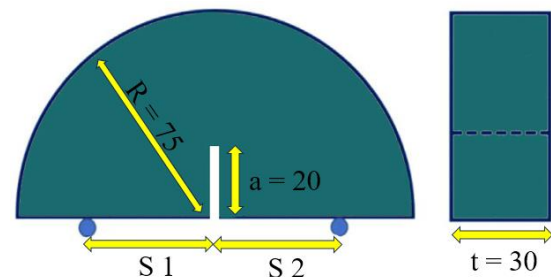
SCB

به مدت ۱۲ ساعت در فریزر با دمای 25°C قرار دادند [۲۹]. در پژوهشی دیگر، فنگ^{۱۰} و همکاران، نمونه های اشباع شده را به مدت ۸ ساعت در محفظه 20°C درجه سانتیگراد قرار داده و سپس نمونه ها را به مدت ۴ ساعت در دمای 60°C درجه سانتیگراد قرار دادند [۳۰]. همانطور که مشاهده می شود در مطالعات قبلی، محدوده های دمایی مختلفی برای اعمال چرخه های انجماد و ذوب مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، به منظور سازگاری و تشابه شرایط محیطی و آزمایشگاهی، محدوده دمایی و شرایط اشباع که اغلب لایه های روسازی راه های ایران تجربه می کنند، انتخاب شدند. بدین شکل که نمونه های آسفالتی به مدت ۱۵ دقیقه با استفاده از پمپ خلاء اشباع شده و سپس به مدت ۱۲ ساعت در حمام آب قرار داده می شوند. در نهایت، به مدت ۱۲ ساعت در فریزر و در دمای 5°C قرار داده می شوند. به این ترتیب یک سیکل ذوب و انجماد به نمونه ها اعمال شده است (شکل ۴). تکرار سیکل ها تا ۱۱ بار تکرار و زمانی که چقرمگی شکست نمونه ها افت معناداری نداشته باشد، ادامه خواهد داشت. اعمال سیکل های ذوب و یخ به همین شکل در دمای 10°C ، 15°C ، 20°C و 22°C انجام خواهد شد تا تأثیر دمای انجماد نیز بر چقرمگی شکست نمونه ها مشخص شود (شکل ۵). نمونه های کنترل نیز بدون آنکه اشباع شوند به مدت ۱۲ ساعت در دمای 5°C قرار گرفته و سپس شکسته خواهند شد.

۲-۵- شکست نمونه ها

برای شکست نمونه ها از دستگاه سننام دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی استفاده شده است. ظرفیت دستگاه ۲۰ کیلو نیوتون بوده و با استفاده از کامپیوتر متصل به دستگاه می توان نمودار بار- جابه جایی و مقدار بار بحرانی نمونه های آسفالتی را در مودهای بارگذاری مختلف ثبت نمود. در شکل ۶، نحوه قرارگیری نمونه های

که در مود خالص کششی برابر یک و در مود برش خالص برابر صفر خواهد بود.



شکل ۳- مشخصات هندسی نمونه های SCB

با استفاده از رابطه (۱) می توان M^e را محاسبه نمود. در این پژوهش برای ایجاد مود ترکیبی کششی- برشی با سهم کشش بیشتر ($M^e = 0.8$) از جابه جایی فک دستگاه استفاده شد. در این مود، مخلوط آسفالتی، بیشترین ضعف را در مقابل شکست از خود نشان داده و به عبارتی بحرانی ترین حالت شکست مخروط می باشد [۲۷]. در نتیجه با شکست مخلوط در این مود، بحرانی ترین شرایط آسفالت شبیه سازی خواهد شد.

$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \right) \quad (1)$$

۲-۴- سیکل های ذوب و یخ

برای اعمال سیکل های ذوب و یخ، روش هایی توسط سایر محققین مورد استفاده قرار گرفته شده است که در ادامه بیان خواهد شد. اما نهایتاً می توان به این نتیجه رسید که براساس نیاز تحقیق و شرایط مورد نظر محقق می توان به ارائه روش پرداخت و نمی توان به روش خاصی تاکید نمود. به طور مثال گو^۸ و همکاران، نمونه ها را به مدت ۱۲ ساعت در حمام آب و در دمای اتاق قرار دادند و سپس نمونه ها را وکیوم نموده و به مدت ۱۲ ساعت در فریزر و در دمای $17/8^{\circ}\text{C}$ قرار دادند [۲۸]. سی^۹ و همکاران، نمونه ها را به مدت ۱۲ ساعت در داخل آب در دمای 25°C درجه سانتیگراد قرار داده و سپس آنها را

^۸- Goh

^۹- Si

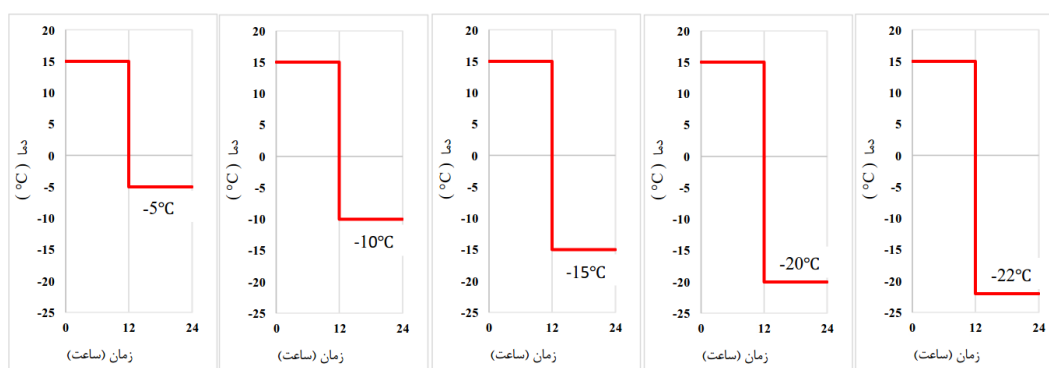
^{۱۰}- Feng

سهم کشش بیشتر ($M^e = 0.8$) استفاده شده است و سرعت بارگذاری به شکل ثابت و نرخ سه میلیمتر در دقیقه لحاظ گردید.

SCB در فیکسچر نمایش داده شده است و با جابه جایی فک ها می توان مودهای خالص و ترکیبی را ایجاد نمود. در این پژوهش، حداقل سه نمونه برای هر حالت اعمال سیکل شکسته شده است. همچنین از مود ترکیبی I/II با



شکل ۴- اشباع کردن نمونه های آسفالتی



شکل ۵- سیکل های اعمالش شده به نمونه ها



شکل ۶- دستگاه سنتام و نحوه قرارگیری نمونه SCB در دستگاه

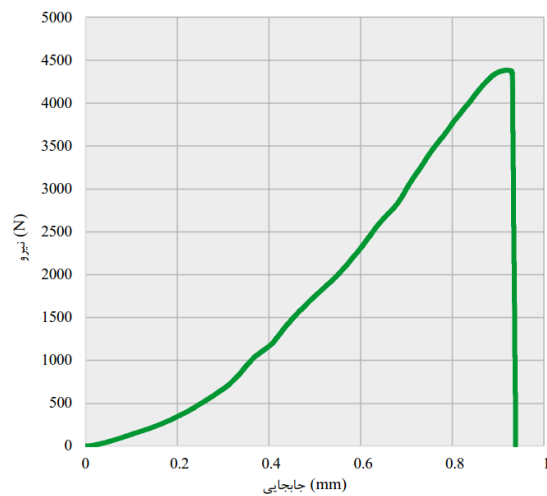
یک ماده را توصیف می کند و به عنوان شاخص مقاومت ذاتی ماده در برابر شروع شکست به کار می رود. این روابط تابع نیرو در زمان شکست و همچنین مشخصات هندسی و ابعادی نمونه می باشد.

$$K_{If} = \frac{P_f}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_I(S1/R, S2/R, a/R) \quad (2)$$

پس از شکست نمونه ها و با استفاده از روابط (۲) تا (۴) می توان ضریب شدت تنش مؤثر در مخلوط آسفالتی را محاسبه نمود. این ضریب که از مکانیک شکست خطی الاستیک ($LEFM^{11}$) بوده، یک پارامتر مکانیک شکست است که شدت میدان تنش در نزدیکی نوک یک ترک در

¹¹- Linear Elastic Fracture Mechanics

با سهم کشش بیشتر ($M^e=0.8$) را باید در کمترین ضریب شدت تنش در این مود دانست.



شکل ۷- منحنی نیرو- جابه‌جایی دستگاه سنّام

براساس مطالعات پیشین، با افزایش M^e ابتدا ضریب شدت تنش کاهش یافته و سپس مجدد افزایش خواهد یافت. به بیان دیگر، در مودهای خالص، ضریب شدت تنش بیشتر از مودهای ترکیبی خواهد بود. این موضوع در مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است و اکثر مطالعات کمترین ضریب شدت تنش را در مود ترکیبی با سهم کشش بیشتر نشان داده‌اند [۶ و ۳۱]. نکته قابل مشاهده در شکل ۸، کاهش ضرایب شدت تنش در تمام دماها با افزایش تعداد چرخه های ذوب و یخ است. علت این مسئله را می‌توان در نفوذ آب به فضای خالی مخلوط آسفالتی دانست. افت دما به زیر صفر، سبب افزایش حجم آب در مخلوط‌های آسفالتی شده که منجر به ایجاد تنش در مخلوط آسفالتی خواهد شد. تکرار چرخه های ذوب و یخ، باعث افزایش تنش و ایجاد میکروترک در مخلوط آسفالتی خواهد شد که نهایتاً منجر به کاهش مقاومت نمونه خواهد شد. همچنین نفوذ آب به مخلوط آسفالتی و سطح مشترک دانه های سنگی و قیر باعث کاهش چسبندگی قیر شده و این موضوع هم باعث کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل شکست خواهد شد. مطالعات گذشته نیز تأییدکننده این کاهش مقاومت می‌باشد [۲۸، ۳۰ و ۳۲].

$$K_{II} = \frac{P_f}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_{II}(S1/R, S2/R, a/R) \quad (3)$$

$$K_{eff} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (4)$$

در این روابط، P_f نیروی اعمال شده به نمونه در لحظه شکست، t ضخامت نمونه، a طول ترک، R شعاع نمونه، $S1$ و $S2$ فاصله مرکز نمونه از تکیه گاه و Y_I و Y_{II} ضرایب هندسی نمونه ها بوده که براساس پارامترهای a ، R ، $S1$ و $S2$ تعیین می شود. در جدول ۳ مقادیر پارامترهای فوق ارائه شده است.

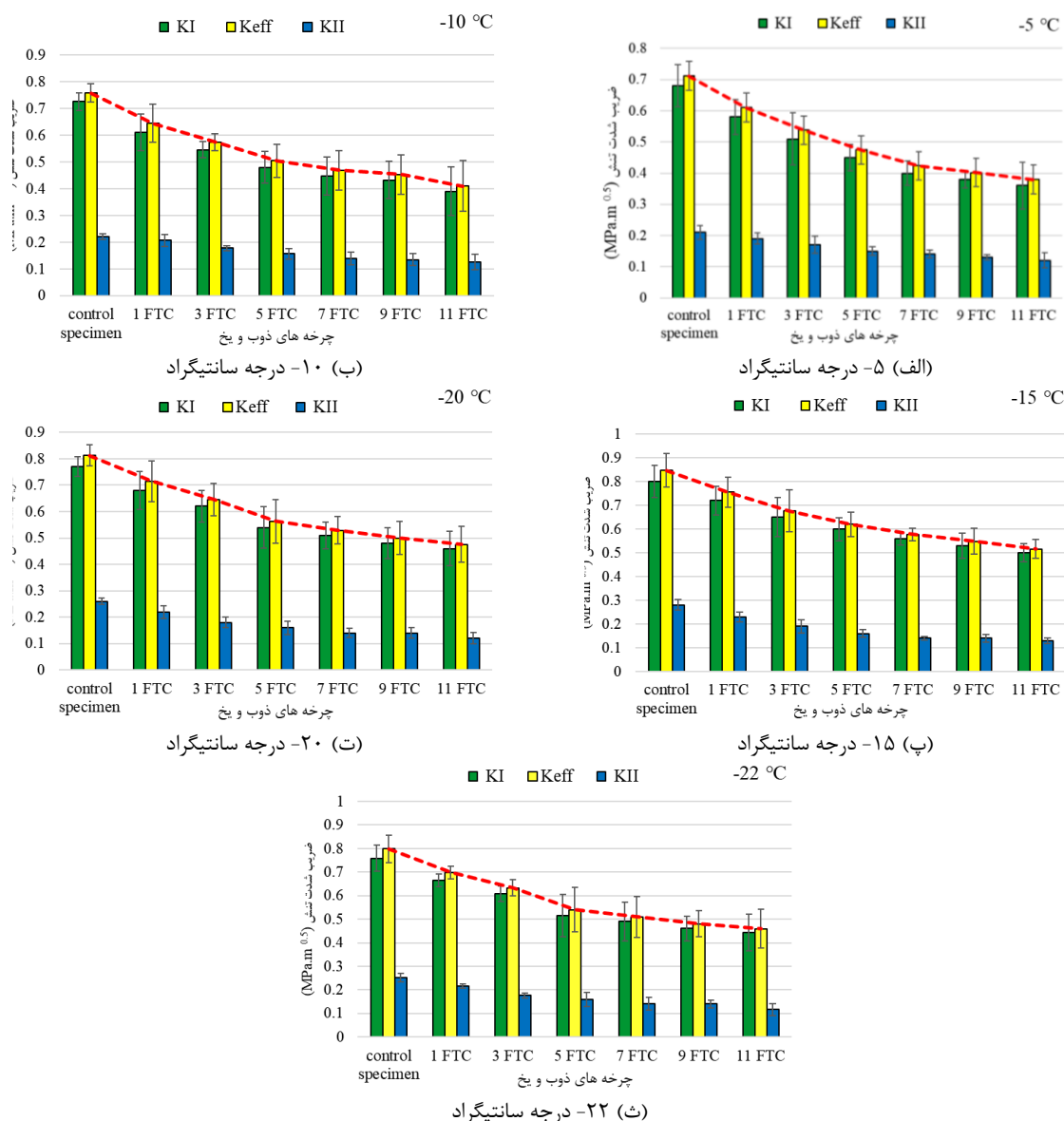
جدول ۳- مشخصات هندسی نمونه‌های SCB در مود ترکیبی

I/II	
(۵۰، ۲۲)	(S1, S2) میلی متر
۰/۸	M^e
۱/۷۶۶	Y_I
۰/۵۷۸	Y_{II}

شکل ۷ بیانگر منحنی نیرو- جابه‌جایی خروجی دستگاه سنّام می باشد. با توجه به این که نمونه‌های آسفالتی در دمای زیر صفر شکسته شده‌اند، در نتیجه، رفتاری الاستیک داشته و منحنی تا زمان رسیدن به نقطه شکست، خطی رشد نموده و نهایتاً پس از شکست نمونه، ظرفیت باربری به کل از بین رفته است.

۳- نتایج و بحث

شکل ۸، تغییر در ضریب شدت تنش در دماهای ۸- تا ۲۲- درجه سانتی‌گراد به عنوان تابعی از تعداد چرخه‌های ذوب و یخ را نشان می دهد. در تمام نمودارها Control Specimen، نشان دهنده نمونه های کنترل و FTC تعداد چرخه های ذوب و یخ را نشان می دهد. علت شکست نمونه‌ها در مود ترکیبی کششی- برشی



شکل ۸- ضریب شدت تنش در دماهای مختلف در مود ترکیبی کششی- برشی با سهم کشش بیشتر ($M^e=0.8$)

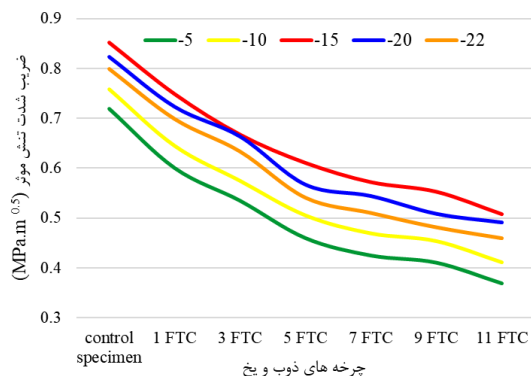
که نمونه‌ها تحت حداکثر ۱۰ سیکل ذوب و یخ قرار داده شد، مشاهده شد با افزایش سیکل‌های ذوب و یخ، IDT^{12} و TSR^{13} کاهش یافت [۳۴]. بنابراین، توصیه می‌شود که از ضرایب شدت تنش در چرخه هفتم به عنوان پارامتر طراحی در بحرانی‌ترین حالت برای ارزیابی مقاومت ترک روسازی در مناطقی که چرخه های ذوب و یخ و اشباع شدگی را به طور همزمان در طول ماه‌های سرد سال تجربه خواهند نمود، استفاده شود.

موضوع قابل توجه دیگر در شکل ۸، کاهش نرخ افت ضرایب شدت تنش پس از هفت چرخه بوده و این نتیجه را خواهد داشت که قرار دادن مخلوط آسفالتی در معرض بیش از هفت چرخه، تأثیر قابل توجهی بر کاهش ضرایب شدت تنش نخواهد داشت. تحقیق انجام شده توسط محققان، نتایج مشابهی را گزارش می‌کند و نشان می‌دهد که نمونه‌هایی که در معرض پنج چرخه قرار گرفتند، کاهش قابل توجهی در چقرمگی شکست خواهند داشت [۳۳]. اعمال چرخه های بیشتر بین پنج تا ۱۰، باعث کاهش جزئی چقرمگی شکست می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، نتایج مشابهی حاصل شد. در این مطالعه

¹²- Indirect Tensile Strength

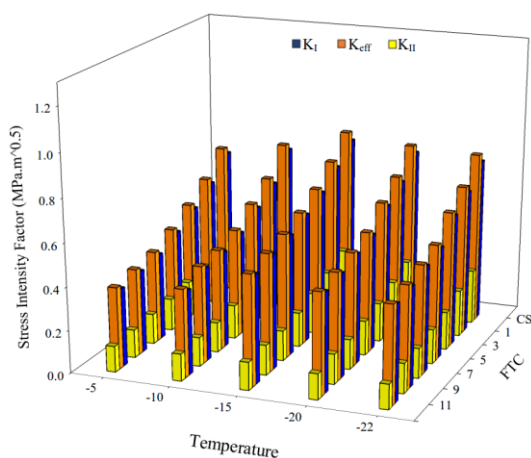
¹³- Tensile Strength Ratio

ذوب و یخ در دماهای مختلف می باشد، نشان می دهد دمای ۱۵- درجه سانتی گراد دارای بیشترین مقاومت در برابر شکست و دمای ۵- درجه سانتی گراد دارای کمترین مقاومت می باشد. کاهش دمای بیشتر از ۲۲- درجه سانتیگراد، می تواند منجر به ضرایب شدت تنش کمتری شود.



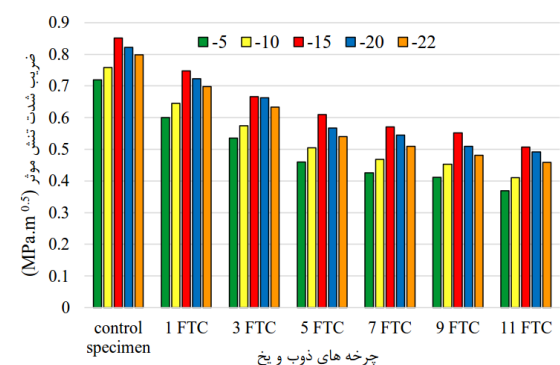
شکل ۱۰- کاهش ضریب شدت تنش مؤثر در دماهای مورد آزمایش

در شکل ۱۱، رشد ضرایب شدت تنش تا دمای ۱۵- درجه سانتی گراد و سپس کاهش آن در دماهای پایین تر و همچنین کاهش نرخ افت ضرایب شدت تنش از سیکل هفتم به بعد، به خوبی نمایش داده شده است. در تحقیقی که توسط سی و همکاران انجام شده است، مشاهده شد که نرخ تغییرات در مشخصات فشاری مخلوط آسفالتی پس از هشت چرخه ذوب و یخ کاهش یافت [۲۹].



شکل ۱۱- تغییرات ضرایب شدت تنش در دما و چرخه های مختلف

دیگر یافته قابل توجه این پژوهش، افزایش ضرایب شدت تنش تا دمای ۱۵- درجه سانتی گراد و سپس افت آن در دماهای پایین تر بوده است. علت این موضوع که در شکل ۹ نمایش داده شده است، می توان در اجزای تشکیل دهنده نمونه های آسفالتی شامل سنگدانه، قیر و چسبندگی بین قیر و سنگدانه ها و ویژگی های ویسکوالاستیک قیر دانست. تغییرات دما می تواند به طور قابل توجهی بر قیر و چسبندگی بین سنگدانه ها و قیر تأثیر داشته باشد. در دمای بالا، قیر رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان خواهد داد، در حالی که در دماهای پایین عمدتاً رفتاری الاستیک و شکننده خواهد داشت. در نتیجه در دماهای زیر صفر، قیر منقبض شده و باعث افزایش سفتی مخلوط آسفالتی خواهد شد که منجر به افزایش مقاومت در برابر شکست خواهد شد. افزایش سفتی مخلوط آسفالت تا ۱۵- درجه سانتیگراد ادامه دارد. با این حال کاهش دما به زیر ۱۵- درجه سانتیگراد سبب انقباض بیشتر قیر نسبت به سنگدانه ها شده که باعث ایجاد ترک های ریز در قیر شده و منجر به کاهش ضرایب شدت تنش در مخلوط خواهد شد. تحقیقات انجام شده در گذشته تأییدکننده این موضوع می باشد [۳۵ و ۳۶].



شکل ۹- ضریب شدت تنش مؤثر در دما و چرخه های مختلف

در نهایت، چرخه های ذوب و یخ سبب بروز ترک های میکروسکوپی متعدد در قیر و در نزدیکی سنگدانه ها خواهد شد که موجب کاهش چسبندگی آن با قیر شده و سبب کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شکست خواهد شد [۳۶-۳۸]. شکل ۱۰ نیز که بیانگر کاهش ضریب شدت تنش در اثر افزایش تعداد سیکل های

در سیکل هفتم، ضرایب شدت تنش در دماهای مختلف از ۳۲ تا ۴۰ درصد کاهش یافت. به طوری که در دماهای ۵-، ۱۰-، ۱۵-، ۲۰- و ۲۲- درجه سانتیگراد به ترتیب شاهد ۴۰، ۳۸، ۳۲، ۳۵ و ۳۶ درصد افت در ضرایب شدت تنش در مقایسه با نمونه کنترل خواهیم بود.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه اخیر به بررسی مشخصه های مکانیکی نمونه های آسفالتی که در معرض چرخه های ذوب و یخ قرار گرفتند، پرداخته شد. مشخصات نمونه ها از جمله سنگدانه، نوع قیر، دانه بندی و درصد فضای خالی هوا ثابت در نظر گرفته شد. نمونه ها با استفاده از پمپ خلاء اشباع شده و سپس به مدت ۱۲ ساعت در حمام آب در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. پس از آن به مدت ۱۲ ساعت در فریزر با دمای ۵- درجه سانتیگراد قرار گرفتند. با تکرار این چرخه های ذوب و یخ نهایتاً ۱۱

چرخه به نمونه ها اعمال شد و پس از چرخه های اول، سوم، پنجم، هفتم، نهم و ۱۱ام شکسته شدند. در دماهای ۱۰-، ۱۵-، ۲۰- و ۲۲- نیز چرخه های ذوب و یخ به نمونه ها اعمال شد. ضرایب شدت تنش با افزایش چرخه های ذوب و یخ کاهش یافته و افت ضرایب تا سیکل هفتم مشهود بوده است. به طوری که مشاهده شد در دماهای مختلف از ۳۲ تا ۴۰ درصد کاهش یافت. اما پس از سیکل هفتم نرخ افت ضرایب شدت تنش به طور مشهودی کاهش یافت. همچنین با افت دما، ضرایب شدت تنش افزایش یافته و به بیشترین مقدار خود در دمای ۱۵- درجه سانتیگراد خواهد رسید و در دماهای پایین تر، کاهش خواهد یافت. در نهایت توصیه می شود برای طراحی روسازی در مناطق با ریزش باران و برف در فصل زمستان که چرخه های ذوب و یخ و اشباع شدن آسفالت به صورت هم زمان رخ خواهد داد، هفت چرخه ذوب و یخ به عنوان حالت بحرانی در مود ترکیبی کششی- برشی با سهم کشش بیشتر ($M^e=0.8$) در نظر گرفته شود.

References

- [1] Majidzadeh K, Buranarom C, Karakouzian M. Application of fracture mechanics for imprved design of bituminous concrete. United States. Department of Transportation. 1976.
- [2] Li X, Marasteanu M. The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature. Engineering Fracture Mechanics. 2010; 77(7): 1175-1190. doi: 10.1016/j.engfractmech.2010.02.018
- [3] Song SH, Paulino GH, Buttlar WG. A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material. Engineering Fracture Mechanics. 2006; 73(18): 2829-2848. doi: 10.1016/j.engfractmech.2006.04.030
- [4] Aliha MM, Behbahani H, Fazaali H, Rezaifar M. Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures. Construction and Building Materials. 2014; 54: 623-635. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.097
- [5] Ayatollahi M-R, Pirmohammad S. Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes. Structural Engineering and Mechanics. 2013; 45(1): 19-32. doi: 10.12989/sem.2013.45.1.019
- [6] Pirmohammad S, Ayatollahi M. Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions. Construction and building materials. 2014; 53: 235-242. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.096
- [7] Fakhri M, Siyadati SA. Effect of temperature on failure resistance of asphalt concrete mixrute. Journal of Transportation Research. 2020; 17(2): 221-232. doi: 20.1001.1.17353459.1399.17.2.16.5 [In Persian]
- [8] Pirmohammad S, Kiani A. Impact of temperature cycling on fracture resistance of asphalt concretes. Computers and Concrete. 2016; 17(4): 541-551. doi: 10.12989/cac.2016.17.4.541
- [9] Karimi F, Mousavi SR, Miri M. Tensile-Tear cracking resistance of RAP incorporated asphalt Mixtures, enhanced by Warm mix asphalt additive and nano calcium carbonate. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2024; 132: 104467. doi: 10.1016/j.tafmec.2024.104467
- [10] Chen Y, Naseri A, Attari A, Zarei M, Khordehbinan MW, Pouri MA. Evaluation of fracture indices of warm mix asphalt (WMA) modified with nano-additive under pure shear and pure tear deformations. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2024; 132: 104471. doi: 10.1016/j.tafmec.2024.104471

- [11] Xiong F, Zarei M, Tabasi E, Naseri A, Khordehbinan MW, Kh TI. Effect of nano-reduced graphene oxide (NRGO) on long-term fracture behavior of Warm Mix Asphalt (WMA). *Construction and Building Materials*. 2023; 392: 131934. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2023.131934**
- [12] Li A, Wang H, Song W. Long-term Freeze–thaw effect on fracture performance of asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement, glass fiber and rejuvenator. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2024; 133: 104560. doi: **10.1016/j.tafmec.2024.104560**
- [13] Shafabakhsh G, Sadeghnejad M, Hejazi SK, Shirazi A. Evaluation the Rheological Behavior of Asphalt Binder, Fracture Resistance and Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: Before and After Adding Nano Fe₂O₃. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2024; 1-13. doi: **10.1007/s42947-024-00437-9**
- [14] Zhang W, Hua W, Zhou M, Wang S, Yang H, Dong S. Influence of specimen configuration on mode I and mode II fracture toughness of sandstone. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2024; 104551. doi: **10.1016/j.tafmec.2024.104551**
- [15] Song W, Yan W, Wu H. Effect of specimen size on mode I fracture performance of hot mix asphalt at the low temperature. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2024; 130: 104309. doi: **10.1016/j.tafmec.2024.104309**
- [16] Song W, Yan W, Wu H. Investigation of fracture performance of asphalt mixtures considering size effect law and equivalent crack propagation law. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2024; 104752. doi: **10.1016/j.tafmec.2024.104752**
- [17] Fattahi Amirdehi H, Ghoreishi S, Aliha M, Hesami S, Jafari Haghighatpour P, Choupani N. On comparison of fracture energy measured for six hot mix asphalt composite mixtures using force–load line displacement and force–crack mouth opening displacement curves at intermediate temperatures and different loading rates. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2024; 47(10): 3858-3873. doi: **10.1111/ffe.14398**
- [18] Erarslan N, Aliha M. Fracture and Damage Analysis of Cement-Stabilized Fine and Coarse Grain Soils Under Static and Cyclic Loading Using Chevron-Notched SCB Specimen. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2025; 48(6): 2708-2724. doi: **10.1111/ffe.14598**
- [19] Fakhri M, Ahmadi T, Shahryari E, Jafari M. Evaluation of fracture behavior of stone mastic asphalt (SMA) containing recycled materials under different loading modes at low temperatures. *Construction and Building Materials*. 2023; 386: 131566. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2023.131566**
- [20] ASTM D70-97. Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method). *Annual Book of ASTM Standards*. 2017.
- [21] International A. Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester: ASTM International. 2012.
- [22] International ASoTM. ASTM D5/D5M-13, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. American Society of Testing Materials (ASTM) International West Conshohocken; 2013.
- [23] ASTM D113. Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials. ASTM: West Conshohocken, PA, USA. 2007.
- [24] International ASoTM. ASTM D36/D36M-14e1, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-ball Apparatus). American Society of Testing Materials (ASTM) International West Conshohocken; 2014.
- [25] ASTM. Standard test method for kinematic viscosity of asphalts (bitumens). 1985.
- [26] ASTM D, editor Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. American Society for Testing and Materials; 2015.
- [27] Fakhri M, Siyadati SA, Aliha M. A prediction model for determining the fracture toughness of saturated asphalt concrete in sub-zero temperatures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2025; 104965. doi: **10.1016/j.tafmec.2025.104965**
- [28] Goh SW, Akin M, You Z, Shi X. Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(1): 195-200. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2010.06.038**
- [29] Si W, Li N, Ma B, Ren J, Wang H, Hu J. Impact of freeze-thaw cycles on compressive characteristics of asphalt mixture in cold regions. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*. 2015; 30(4): 703-709. doi: **10.1007/s11595-015-1215-5**
- [30] Feng D, Yi J, Wang D, Chen L. Impact of salt and freeze–thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China. *Cold Regions Science and Technology*. 2010; 62(1): 34-41. doi: **10.1016/j.coldregions.2010.02.002**
- [31] Fakhri M, Siyadati SA, Aliha M. Impact of freeze–thaw cycles on low temperature mixed mode I/II cracking properties of water saturated hot mix asphalt: An experimental study. *Construction and Building Materials*. 2020; 261: 119939. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2020.119939**

- [32] Merboubh Mh. Effect of thermal cycling on the creep-recovery behaviour of road bitumen. *Energy Procedia*. 2012; 18: 1106-1114. **doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.125**
- [33] Sanfilippo D, Garcia-Hernández A, Alexiadis A, Ghiassi B. Effect of freeze–thaw cycles on the void topologies and mechanical properties of asphalt. *Construction and Building Materials*. 2022; 344: 128085. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.1280**
- [34] Cong L, Ren M, Shi J, Yang F, Guo G. Experimental investigation on performance deterioration of asphalt mixture under freeze–thaw cycles. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2020; 9(3): 218-228. **doi: 10.1016/j.ijtst.2020.04.004**
- [35] Kim KW, El Hussein M. Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures. *Construction and building Materials*. 1997; 11(7-8): 403-411. **doi: 10.1016/S0950-0618(97)00030-5**
- [36] Kim KW, El Hussein H. Effect of differential thermal contraction on fracture toughness of asphalt materials at low temperatures (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 1995; 64: 479-499.
- [37] Kim KW, Kweon SJ, Doh YS, Park T-S. Fracture toughness of polymer-modified asphalt concrete at low temperatures. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2003; 30(2): 406-413. **doi: 10.1139/l02-101**
- [38] Hussein HME, Halim AAE. Differential thermal expansion and contraction: a mechanistic approach to adhesion in asphalt concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1993; 20(3): 366-373. **doi: 10.1139/l93-051**