

بررسی آزمایشگاهی مقاومت شکست مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید سیلیس

تحت شرایط بارگذاری مود ترکیبی I/II

ABSTRACT

افزایش روزافزون عبور و مرور ترافیک، بخصوص در شرایط آب و هوایی سرد، باعث افزایش خرابی ترک‌های برودتی آسفالت می‌شود. در سال‌های اخیر، نانومواد گوناگونی از جمله نانو اکسیدسیلیس با هدف بهبود خواص آسفالت استفاده شده‌است. این تحقیق به بررسی تاثیر نانو اکسیدسیلیس بر وقوع ترک‌های برودتی می‌پردازد. بدین منظور از آزمون خمش نیم‌دایره (SCB) تحت مود بارگذاری ترکیبی I/II استفاده شده و تاثیر افزودن نانو SiO_2 بر آسفالت در برابر ترک خوردگی (ترک خوردگی‌های عمودی و زاویه‌دار) در دماهای مختلف ۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی‌گراد بررسی گردیده است. علاوه بر این تاثیر دو نوع ترک خوردگی بر روی چقرمگی شکست مخلوط‌های اصلاح شده با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده مربوط به نمونه‌های حاوی ترک زاویه‌ای تحت مود خالص کششی می‌باشد، اما حداکثر میزان بهبود چقرمگی شکست بر اثر افزودن نانو اکسید سیلیس مربوط به نمونه‌های حاوی ترک عمودی تحت مود کششی-برشی با $M^e=0/6$ در دمای ۲۵- درجه سانتی‌گراد است. طبق نتایج در هر دو حالت ترک خوردگی و در تمامی دماها، با افزودن ۱/۲٪ نانو اکسیدسیلیس چقرمگی شکست نمونه‌ها بهبود قابل توجهی می‌یابد.

کلمات کلیدی: مخلوط آسفالتی (HMA)، مقاومت شکست، نانو اکسیدسیلیس، آزمون خمش نیم‌دایره.

1. Introduction

در طول سه دهه اخیر، افزایش روزافزون بارهای ترافیکی و همچنین شرایط محیطی، انواع ترک‌ها را در روسازی‌های آسفالتی به وجود آورده است. مهمترین ترک‌های روسازی که بر اثر شرایط آب‌وهوایی سرد پدید می‌آیند، ترک‌های برودتی هستند که بر اثر عبور و مرور وسایل نقلیه روز به روز در حال گسترش‌اند.

ایجاد و گسترش ترک‌های برودتی باعث لزوم انجام تعمیرات زودهنگام و پیش از موعد مقرر می‌گردد. به دلیل هزینه‌های زیاد ساخت یک روسازی و همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری شبکه راه‌ها، محققین جهت بهبود خواص قیرهای مورد استفاده در تهیه آسفالت که به تبع آن بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی را نیز به دنبال دارد، به استفاده از انواع اصلاح کننده‌ها روی آورده‌اند.

تحقیقات بر روی ایجاد و گسترش ترک‌های دمای پایین در اثر شرایط محیطی و همچنین عبور بارهای ترافیکی تحت علم مکانیک شکست ارزیابی می‌شود. Majidzade و همکارانش (۱۹۷۶)، Molenaar و همکارانش (۱۹۸۴) علم مکانیک شکست را جهت بررسی ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی برای اولین بار به کار بردند [1], [2]. به دلیل بروز ترک‌های برودتی در دماهای پایین و همچنین رفتار ترد مخلوط‌های آسفالتی در این دماها، بنابراین میتوان برای مطالعه ترک‌های برودتی از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی که توسط گریفیت ارائه شده‌است استفاده کرد [3]. پارامترهای موثر بر رشد ترک‌های مخلوط‌های آسفالتی شامل نوع ماده افزودنی برای اصلاح قیر، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، تغییرات دما و مود بارگذاری است [4].

برای ایجاد ترک‌ها چهار مود بارگذاری مختلف در نظر گرفته می‌شود. منظور از مود شکست، چگونگی رشد ترک و از هم گسیختگی عضو است. مود I بارگذاری که به آن مود بازشوندگی نیز می‌گویند، به گونه‌ای است که سطوح ترک نسبت به یکدیگر باز می‌شوند و در مود II بارگذاری یا مود برشی لجه‌های ترک در داخل صفحه‌ی جسم نسبت به یکدیگر می‌لغزند و در مود III یا مود پارگی لجه‌های ترک در خارج از صفحه‌ی جسم نسبت به هم می‌لغزند و نهایتاً در مود چهارم ترکیبی از سه مود بالا را داریم. براساس یافته‌های علمی بحرانی‌ترین حالت بارگذاری مربوط به بارگذاری مود ترکیبی کششی-برشی می‌باشد [5].

2. literature review

یکی از انواع اصلاح کننده‌ها که براساس کارهای تحقیقاتی پیشین باعث ایجاد بهبود چشمگیر خواص مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند، نانو مواد هستند. Rouyu Li و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با انجام یک مطالعه مروری به بررسی کاربرد و تاثیر انواع نانوذرات بر روی مواد آسفالتی پرداختند [6]. براساس مطالعات آن‌ها اضافه کردن nano-SiO_2 ، nano-TiO_2 ، nano-ZnO و nano-CaCO_3 به مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش قابل توجه

¹ Fracture Mode

² Opening mode

³ Shear mode

⁴ Tearing mode

مقاومت در برابر ترک خوردگی های دما پایین و همچنین بهبود عملکردهای دما بالای مخلوط های آسفالتی می گردد. براساس بررسی های انجام شده توسط Ashish و همکارانش (۲۰۱۹) مهمترین مواد نانو که باعث بهبود خواص رئولوژیکی و مکانیکی قیرهای مصرفی در مخلوط های آسفالتی شده اند شامل OMNC، CNT، SiO₂، TiO₂ و ZnO می باشند [7].

اصلاح قیر با nano-SiO₂ سبب افزایش کندروانی، افزایش نقطه نرمی، کاهش شکل پذیری و افزایش مدول ارتجاعی می شود [11]–[8]. کاربرد قیرهای اصلاح شده با nano-SiO₂ در مخلوط های آسفالتی سبب بهبود برخی از خصوصیات آن ها از جمله بهبود مدول دینامیکی و روانی [12]، افزایش مقاومت مارشال [13]، افزایش مدول سختی و حساسیت کمتر نسبت به تغییرات دما می شود [14]. براساس کارهای آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین در طول سال ها مشخص شد که مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانو nano-SiO₂ دارای عمر خستگی بیشتر [16]، [15]، [8]، مقاومت بیشتر در برابر شیارشدگی و عمق کمتر شیار [17]، [15]، افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل های دائمی [18]، افزایش خواص ضدپیری از طریق تاخیر در عمل اکسیداسیون [19]، افزایش پایداری در برابر خرابی های رطوبتی [20]، [19]، افزایش خاصیت Anti-stripping [16] و کاهش تنش های خزشی (strain deformation creep) [21]، [16] هستند. علاوه بر این موارد ترکیب همزمان نانو SiO₂ و SBS سبب بهبود خاصیت خود ترمیمی مخلوط های آسفالتی نیز می شود [22].

Aliha و همکاران (۲۰۱۷) چقرمگی شکست مود I مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با SBS، CR، nanosilica و nanoclay را با استفاده از دو نوع نمونه ی آزمایشی دایره ای شکل (ENDB و ENDC) بررسی کردند. نتایج نشان داد که تمامی اصلاح کننده ها باعث افزایش چقرمگی شکست مخلوط های HMA¹ شدند [23]. Fallah Tafti و Hoseini Aqda (۲۰۱۹) چقرمگی شکست مود I مخلوط های آسفالتی اصلاح شده را با پنج نوع اصلاح کننده شامل Polyolefin-Aramid Compound، Sulfur Polymer، Parafiber، Elastoplastomer Polymer Strings (EPS) و Structural Fibers (PACSF) و Sasobit در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد بدست آوردند. نتایج حاکی از آن بود که تمام اصلاح کننده ها به جز EPS باعث افزایش چقرمگی شکست مود I شده و با افزایش میزان ماده اصلاح کننده، میزان چقرمگی شکست نیز افزایش می یابد [24]. Pirmohammad و همکارانش (۲۰۱۹) به بررسی مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانو Fe₂O₃ و CNTs تحت مود ترکیبی I/II با استفاده از آزمون SCB در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد پرداختند و نشان دادند که نمونه های اصلاح شده، مقاومت شکست بهتری از خود نشان می دهند. از طرفی دیگر مقاومت شکست نمونه های مخلوط آسفالتی اصلاح شده با CNTs بیشتر است [25]. Pirmohammad و shabani (۲۰۱۹) به بررسی ضریب شدت تنش بحرانی سه نوع بتن آسفالتی گرم (یعنی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با افزودنی های CR و SBS و یک مخلوط آسفالتی اصلاح نشده) با استفاده از نمونه نیم دیسک خمشی SCB تحت مود بارگذاری ترکیبی I/II پرداختند و مشاهده نمودند که افزودنی های CR و SBS سبب افزایش مقاومت شکست مخلوط آسفالتی گرم شدند، با این حال مخلوط SBS مقاومت شکست بالاتری از خود نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط بحرانی، بتن آسفالتی گرم تحت بارگذاری مود I خالص نبوده و تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II قرار می گیرد [5]. Ziari و همکاران (۲۰۲۰) از افزودنی glass fiber در مخلوط های آسفالتی با درصد های مختلف RAP به منظور بهبود اثرات منفی کاربرد RAP در مخلوط های آسفالتی استفاده کردند و مقاومت شکست آن ها را در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد تحت شرایط بارگذاری کششی بررسی کردند [26]. نتایج نشان داد که کاربرد الیاف شیشه سبب بهبود عملکرد شکست این مخلوط ها می شود. Hong و همکاران (۲۰۲۰) مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی حاوی پودر coal gangue و الیاف polyester را با استفاده از آزمون SCB بررسی کردند [27]. نتایج آزمایشات نشان داد که مقاومت ترک خوردگی با کاهش دما افزایش یافته است. Pirmohammad و همکاران (۲۰۲۰) تاثیر الیاف طبیعی (goat wool و kenaf) را بر روی مقاومت شکست مورد مطالعه قرار دادند [28]. آن ها از آزمون SCB تحت بارگذاری ترکیبی I/II در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد استفاده کردند. نتایج آن ها حاکی از آن بود که الیاف کنف و پشم بز سبب افزایش مقاومت شکست شده و همچنین میزان این افزایش به طول الیاف بستگی دارد.

همانطور که از مطالعات پیشین در مورد چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی اصلاح شده مشخص است، تاکنون هیچگونه بررسی آزمایشگاهی ای به جهت مطالعه تاثیر نانو ذره SiO₂ بر روی مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی انجام نشده است. از آنجایی که در [15]، [29] محققین این تحقیق به بررسی تاثیر افزودنی نانو اکسید سیلیس بر رفتار قیر و مخلوط آسفالتی در برابر خرابی های شیارشدگی و خستگی پرداخته شده است، با این حال لزوم بررسی تاثیر بهینه ترین درصد نانو اکسید سیلیس (۱/۲٪) بر مقاومت شکست مخلوط آسفالتی امری ضروری است که در این مقاله به آن پرداخته می شود. در پژوهش حاضر تاثیر افزودن ۱/۲ درصد نانو اکسید سیلیس به عنوان درصد بهینه، بر روی چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از آزمون خمش نیم دایره (SCB) در سه شرایط دمایی زیر صفر (۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی گراد) و در شرایط مود بارگذاری ترکیبی کششی-برشی (I/II) استفاده شده است. علاوه بر این در این پژوهش اثر شکل هندسی ترک تحت شرایط ذکر شده بررسی گردید، به طوری که نمونه های SCB با دو نوع ترک قائم و زاویه دار تهیه شدند.

¹ Hot mixed asphalt

۳. Experimental

۳.۱. Materials

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق از نوع مصالح آهکی و دانه بندی آن، حد وسط دانه بندی پیشنهادی نشریه ۲۳۴ روسازی آسفالتی راه های ایران با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلیمتر برای لایه توپکا می باشد. سنگدانه های آهکی دارای مقاومت شکست بهتری نسبت به سایر مصالح سنگی هستند [30]. جدول ۱ دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق را نشان می دهد. آزمایش دانه بندی مصالح سنگی براساس استاندارد AASHTO-T27 انجام شده است. جدول ۲ خصوصیات فیزیکی این مصالح سنگی را نشان می دهد. فیلر مورد استفاده در این تحقیق نیز پودر سنگ آهک می باشد.

جدول ۱. دانه بندی مصالح سنگی

Sieve size (mm)	Gradation limits	Value
19	100	100
12.5	90-100	93.3
4.75	44-74	46.8
2.36	28-58	34.5
0.3	5-21	10.5
0.075	2-10	4.3

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق

خصوصیات فیزیکی	استاندارد آزمایش		مقدار مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش
	ASTM	AASHTO	رویه	آستر	
gravity Los Angeles abrasion (%)	C131	T96	30	40	21.6
BS812 حد اکثر ضربه تورق با روش (%)	-	-	25	30	8
Percent fracture (two faces) (%)	D5821	-	90	80	93
Water absorption (Coarse aggregate) (%)	-	T85	2.5	2.5	1.2
Absorption (fine aggregate)	-	T84	2.5	2.8	2.3

قیر مورد استفاده در این تحقیق قیر ۶۰/۷۰ (معادل با قیر PG64-22) است. جدول ۳ مشخصات کامل قیر مورد استفاده را ارائه می دهد.

جدول ۳. مشخصات قیر به کار رفته در این تحقیق

Property	ASTM Standard	Value
Specific gravity at 25 °C (g/cm ³)	D70	1.013
Flash point (°C)	D99	308
Penetration at 25 °C (0.1 mm)	D5	68
Ductility at 25 °C (cm)	D113	102
Softening point (°C)	D36	50
Loss of weight (افت وزنی)	-	0.2
Degree of purity (درجه خلوص)	-	99.6
Performance grade (PG)	-	64-22

نانو ماده افزودنی مورد استفاده در این مقاله سیلیسیوم دی اکسید است که ماده ای بلوری و سفید رنگ با فرمول شیمیایی SiO₂ در ابعاد با اندازه نانومتر است. مهم ترین مزیت نانوسیلیس هزینه تولید کمتر نسبت به سایر مواد نانو و همچنین ویژگی های عملکردی بالاتر است [31]. درصد بهینه نانواکسید سیلیس نیز براساس تحقیقات گذشته و همچنین با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی برابر با ۱/۲ درصد نسبت به وزن قیر استفاده شد [29], [15]. شکل ۱ نانو SiO₂ مصرفی در این تحقیق را نشان می دهد. جدول ۴ مشخصات نانو سیلیس استفاده شده در این تحقیق را ارائه می دهد.



شکل ۱. نانو اکسید سیلیس مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۴. مشخصات پایه ای نانو اکسیدهای مصرفی در این مطالعه

فرمول شیمیایی	وزن مخصوص حجمی g/cc	اندازه ذرات Nm	رنگ	ریخت شناسی Morphology	سطح مخصوص ویژه M2/g	درجه خلوص %	جذب آب %
SiO ₂	2.4	80	سفید	کروی	160	99.9	0.2<

حلال مورد استفاده در این تحقیق به جهت پراکنده کردن ماده نانو، کروزن یا نفت سفید می‌باشد. مشخصات کروزن مصرفی در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۵. مشخصات حلال (کروزن) مصرفی در اختلاط قیر و نانو مواد

حلالیت	چگالی (gr/cm ³)	نقطه تبخیر (°C)	درجه اشتعال (°C)	ساختار
در آب و مشتقات نفتی	0.75	155	85	C ₆

۳.۲. تهیه مخلوط آسفالتی HMA اصلاح شده و پایه

برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانوسیلیس ابتدا باید قیر و ماده نانو با یکدیگر ترکیب شوند. برای این منظور دو شیوه اختلاط رایج، تر و خشک وجود دارد. در این تحقیق، برای اختلاط نانوسیلیس با قیر ابتدا ماده نانو توسط میکسر برش بالا به مدت ۳۰ دقیقه با ۲۵۰۰ دور بر دقیقه در حلال کروزن پراکنده گردید. سپس به منظور اختلاط نهایی قیر را تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم نموده و در طول نیم ساعت، با فواصل زمانی یکسان، ترکیب نانو ذرات - حلال به آرامی در میکسر ریخته شده و با ۴۰۰۰ دور بر دقیقه فرآیند اختلاط ادامه می‌یابد تا جایی که مخلوط همگنی از قیر و نانو ذرات ایجاد گردد. برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی از روش مارشال مطابق استاندارد ASTM D1559 استفاده شده است. جهت تهیه مخلوط آسفالتی با قیر پایه و قیر اصلاح شده حاصله، ابتدا مصالح و قیر در کوره‌ای با دمای ۱۵۲-۱۵۶ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت گرم شدند. سپس قیر به میزان درصد بهینه (۵ درصد برای نمونه پایه و ۶ درصد برای نمونه اصلاح شده با نانو SiO₂) به مصالح سنگی افزوده شده و در داخل قالب استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۱۲۰ میلیمتر ریخته شد و توسط دستگاه تراکم ژیراتوری عمل کوبش در دمای ۱۴۳-۱۴۶ درجه سانتی‌گراد انجام گردید. نمونه‌های استوانه‌ای مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده در این تحقیق

۳.۳. Methodology

۳.۳.۱. Preparation of SCB specimen (تهیه نمونه SCB)

آزمون SCB به دلیل مزایای زیاد از جمله تکرارپذیری، الگوی بارگذاری مناسب و نزدیک به شرایط بارگذاری واقعی و ضریب تغییرات کمتر از ۱۵ درصد نمونه‌ها، از محبوبیت خاصی برخوردار است [32]. برای تهیه نمونه‌های SCB، نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده را ابتدا با استفاده از دستگاه برش با دیسک گردان به دیسک‌های با ضخامت ۳۰ میلیمتر برش داده شده و سپس با تیغه برش با کمترین ضخامت از وسط نصف گردیدند. در مرحله بعد ترک‌ها به صورت عمودی و زاویه‌دار تحت زاویه α ($\alpha=x$)، نسبت به محور مرکزی صفحه، به طول ۲۲/۵ میلیمتر و با استفاده از دستگاه واتر جت ایجاد شدند. بر این اساس نمونه‌های SCB این تحقیق دارای قطر ۱۵۰ میلیمتر و ضخامت ۳۰ میلیمتر هستند. تعداد کل نمونه‌های تهیه شده ۲۱۶ عدد (سه تکرار برای هر آزمایش) می‌باشد. با توجه به طول ترک ایجاد شده (a) و شعاع نمونه‌های SCB (R)، نسبت a/R در نمونه‌ها تقریباً برابر ۰/۳ باشد.

۳.۲. Fracture theory and testing (تئوری شکست و آزمایش)

جهت رسیدن نمونه‌های SCB به شرایط دمایی مورد نظر (دماهای ۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی‌گراد) به مدت حداقل ۴ ساعت در فریزرهایی با همین دماها قرار داده شدند. پس از آنکه نمونه‌های SCB به این دماها رسیدند، برای انجام آزمایش به ترتیب از فریزر خارج شده و در دستگاه آزمایش SCB قرار گرفتند. شکل ۳ دستگاه انجام آزمایش خمش نیم‌دایره را نشان می‌دهد. فاصله زمانی بین خروج نمونه و قرارگیری آن تحت آزمایش به قدری کوتاه است که تغییرات دمایی آن ناچیز به حساب می‌آید. نرخ بارگذاری برابر با ۳ mm/min است. متناسب با هر حالت از مد بارگذاری، فاصله تکیه‌گاه‌های پایینی از قبل تنظیم می‌گردند. کلیه مراحل انجام آزمون خمش نیم‌دایره بر اساس استاندارد AASHTO TP 105-13 انجام گرفته است [33].



شکل ۳. نمونه‌های SCB تحت آزمایش خمش نیم‌دایره

سه روش برای ایجاد مود بارگذاری ترکیبی وجود دارد: (۱) جابه‌جایی فاصله تکیه‌گاه‌ها (S_1, S_2)، (۲) جابه‌جایی موقعیت ایجاد ترک نسبت به محور مرکزی (L) و (۳) ایجاد ترک زاویه‌ای نسبت به محور مرکزی نمونه. در این تحقیق برای نمونه‌های دارای ترک عمودی از روش اول و برای نمونه‌های دارای ترک زاویه‌ای از ترکیب روش اول و سوم استفاده شده است. همچنین برای نشان دادن سهم مودهای بارگذاری کششی و برشی، پارامتر مود ترکیبی (M^e) مطابق رابطه (۱) به کار گرفته شده است:

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

K_I و K_{II} به ترتیب چقرمگی شکست مود I و II بارگذاری هستند. مقدار M^e برای مود خالص کشش برابر با یک، برای مود خالص برش برابر با صفر و برای مودهای ترکیبی کشش-برش بین صفر و یک می‌باشد. در این تحقیق از پنج پارامتر مود ترکیبی استفاده شده است ($M^e=0/4, M^e=0/2, M^e=0, M^e=0/8, M^e=0/6$).

با استفاده از P_{cr} میتوان چقرمگی شکست را برای هر پارامتر مود ترکیبی محاسبه کرد. چقرمگی شکست نشان دهنده میزان انرژی لازم برای انتشار ترک در مخلوط‌های آسفالتی در دماهای پایین است. فرمول‌های (۲)-(۴) به ترتیب چقرمگی شکست را برای مود I بارگذاری، مود II بارگذاری و مود ترکیبی I/II نشان می‌دهد.

$$K_{If} = Y_I \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$K_{IIf} = Y_{II} \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

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

در این روابط K_{If} و K_{IIf} به ترتیب چقرمگی شکست مود I و II بارگذاری، K_{eff} چقرمگی شکست موثر، R شعاع نمونه‌های SCB و برابر ۷۵ میلیمتر، t ضخامت نمونه‌ها و برابر با ۳۰ میلیمتر، a طول ترک و برابر با ۲۲/۵ میلیمتر و P_{cr} بار بحرانی حاصل از آزمایشات است. Y_I و Y_{II} نیز ضرایب شکل مود I و II هستند که مقادیر متناظر این ضرایب برای حالت‌های آزمایش شده در این پژوهش به ازای هر M^e در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. مقادیر Y_I و Y_{II} استفاده شده در این تحقیق

M^e	vertical crack		angular crack	
	Y_I	Y_{II}	Y_I	Y_{II}
0	0	1.42	0	0.82
0.2	0.36	1.06	0.18	0.84
0.4	0.60	0.83	0.55	0.85

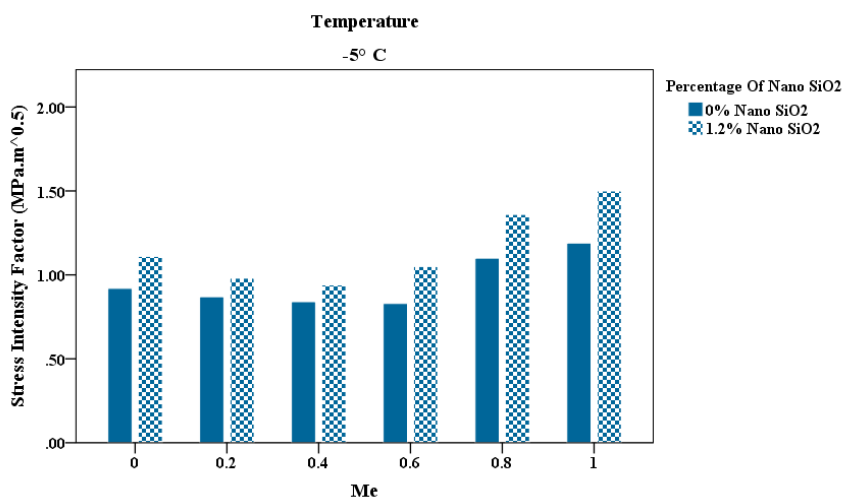
0.6	0.86	0.62	1.00	0.77
0.8	1.19	0.38	1.50	0.49
1	1.71	0	1.71	0

۴. Results and discussions

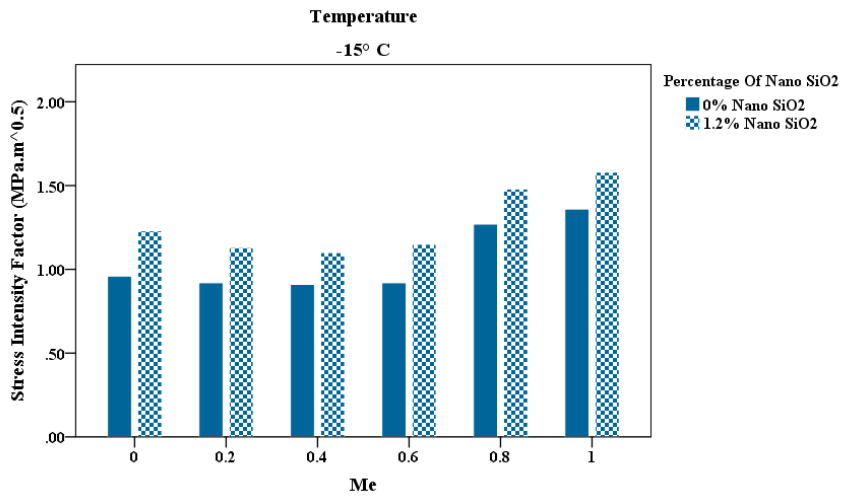
همانطور که در بخش قبل شرح داده شد آزمایش SCB جهت تعیین مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو SiO_2 در سه شرایط دمایی مختلف زیر صفر (-۵، -۱۵ و -۲۵- درجه سانتی‌گراد) و تحت مودهای بارگذاری ترکیبی کششی-برشی مختلف انجام گردید. هدف از انجام این آزمایش به دست آوردن بار بحرانی شکست نمونه‌ها (P_{cr}) است. با توجه به روند افزایشی P_{cr} تا نقطه اوج آن و سپس کاهش ناگهانی آن پس از شکست نمونه، میتوان به این نتیجه رسید که شکستگی نمونه‌های SCB مطابق مفهوم LEFM اتفاق افتاده است. با استفاده از مقادیر P_{cr} میانگین بدست آمده وضرایب شکل مود I و II نشان داده شده در جدول ۶ و جایگذاری آن‌ها در فرمول‌های (۲)-(۴)، میتوان چقرمگی شکست مود I و II بارگذاری و چقرمگی شکست موثر آن‌ها را بدست آورد. در ادامه به بررسی تاثیر افزودن نانو SiO_2 و سایر عوامل متغیر بر روی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی پرداخته می‌شود.

۴.۱. Influence of Nano SiO_2

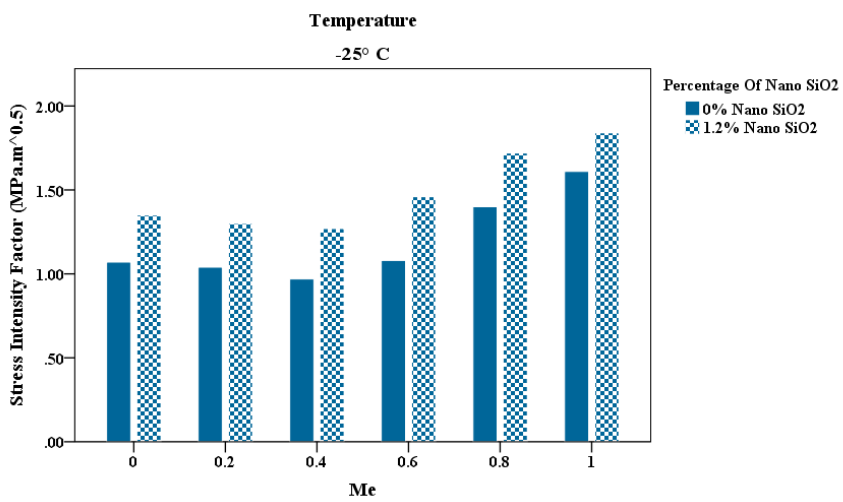
شکل‌های ۴ و ۵ تاثیر افزودن نانو اکسیدسیلیس بر مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با ماده نانو SiO_2 و در سه دما -۵، -۱۵ و -۲۵- درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ترک‌های عمودی و زاویه‌دار نشان می‌دهد. براساس این نمودارها، افزودن ۱/۲ درصد نانو اکسیدسیلیس باعث افزایش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی در دماهای زیر صفر درجه سانتی‌گراد در هر دو حالت ترک عمودی و زاویه‌دار می‌شود. طبق این نمودارها بیشترین میزان افزایش چقرمگی شکست در حالت ترک عمودی و زاویه‌دار به ترتیب برابر با $0.38 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ و $0.28 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ و کمترین میزان آن به ترتیب برابر با $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ و $0.08 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ است. همانطور که مشخص است تاثیر افزودن نانو SiO_2 در حالت ترک عمودی بیشتر است. بنابراین، در حالت کلی استفاده از نانو SiO_2 بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی مناسب به نظر می‌رسد. براساس نتایج به دست آمده و رفتار ترد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای زیر صفر، میتوان به این نتیجه رسید که افزودن نانو SiO_2 باعث افزایش رفتار تردی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و همچنین نسبت به حالت پایه رفتار الاستیک‌تری را از خود نشان می‌دهد که باعث افزایش مقاومت شکست در دماهای زیر صفر می‌گردد.



a)

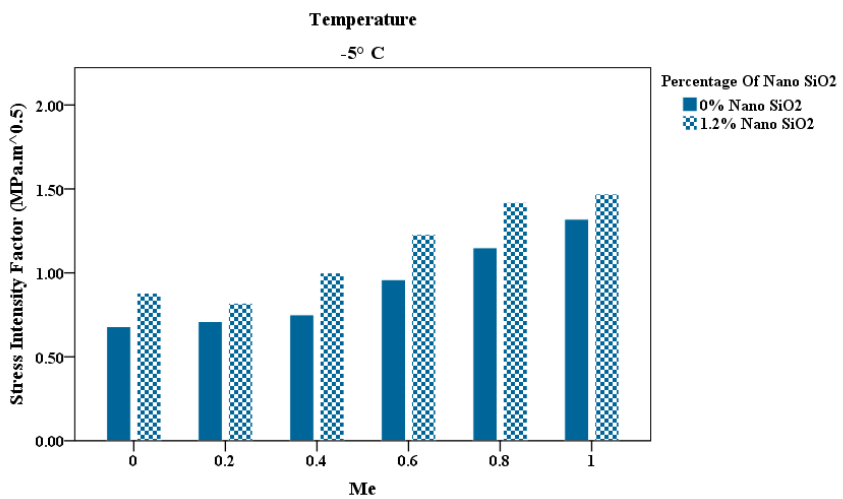


b)

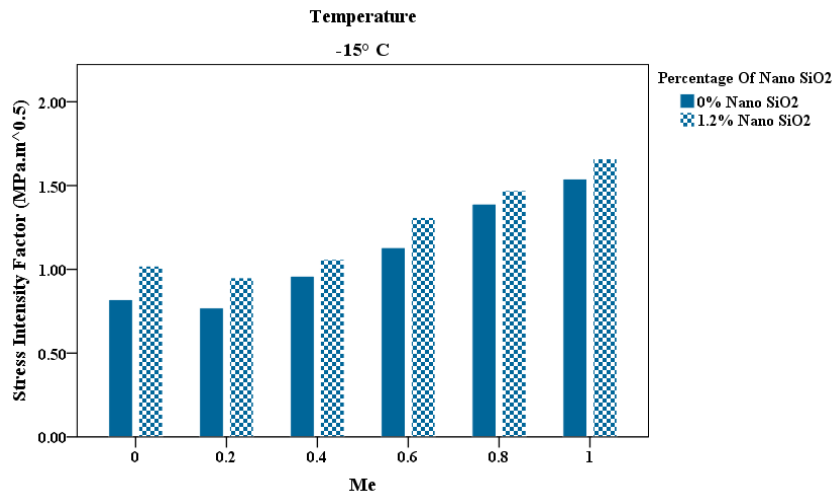


c)

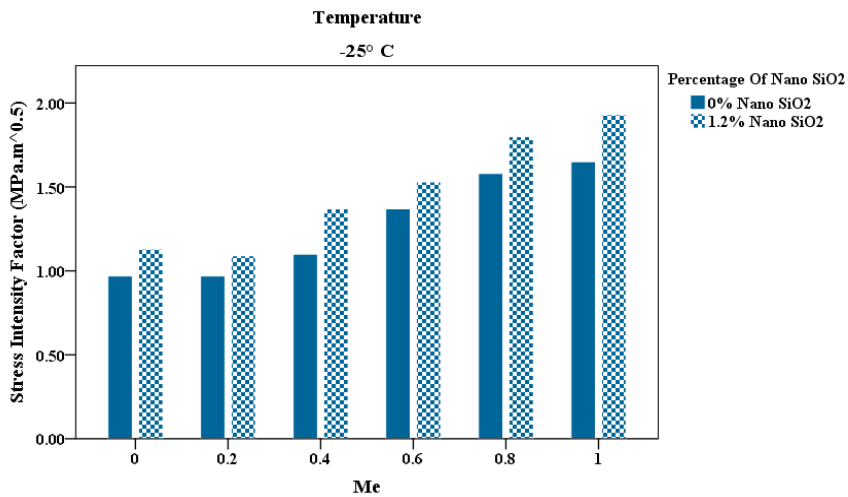
شکل ۴. Critical SIFs measured for the Nano SiO₂-modified HMA mixtures with vertical crack at: a)-5°C ,b)-15°C ,c)-25°C



a)



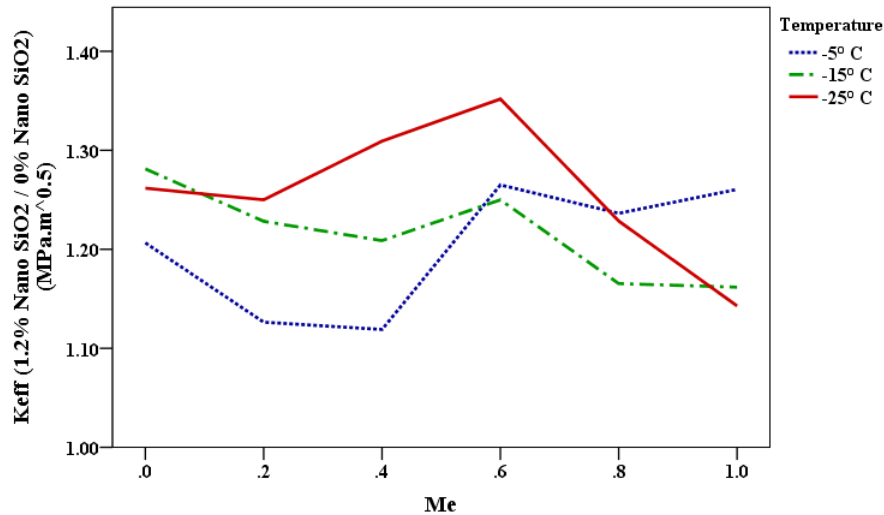
b)



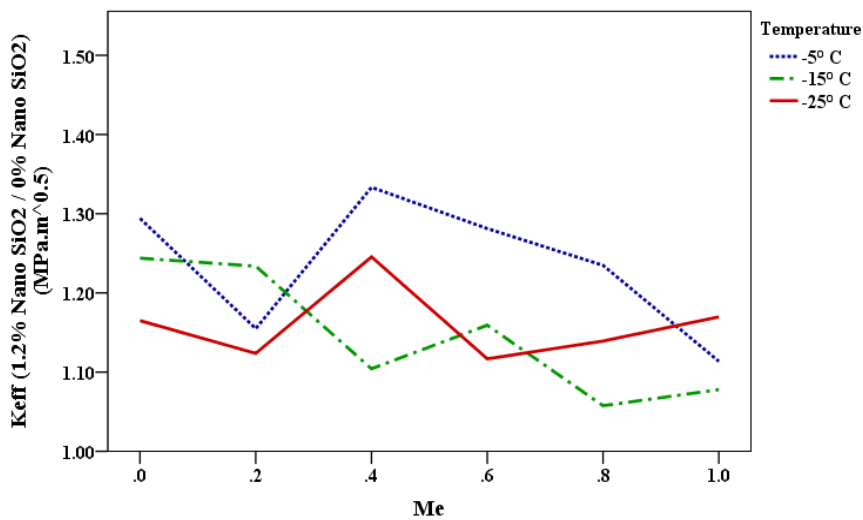
c)

شکل ۵. Critical SIFs measured for the Nano SiO₂-modified HMA mixtures with angular crack crack at: a)-5°C ,b)-15°C ,c)-25°C

میزان افزایش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانواکسیدسیلیس را برای هر دو حالت ترک عمودی و زاویه‌دار به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان مشاهده کرد. براساس این دو نمودار، نسبت چقرمگی شکست در حالت اصلاح شده به حالت پایه بیشتر از یک است که این نشان دهنده تاثیر مثبت کاربرد نانو می‌باشد. حداکثر افزایش چقرمگی شکست در حالت ترک عمودی و زاویه‌دار به ترتیب برابر ۳۵ درصد و ۳۳ درصد و حداقل آن به ترتیب برابر با ۱۱/۹ درصد و ۵/۷ درصد است. میانگین افزایش چقرمگی شکست در اثر افزودن نانواکسیدسیلیس در تمامی نمونه‌های دارای شرایط دمایی و بارگذاری مختلف، در حالت ترک عمودی و زاویه‌دار به ترتیب برابر با ۲۲/۵ درصد و ۱۸ درصد است.



شکل ۶. Ratio of K_{eff} for the Nano SiO₂-modified HMA mixtures to that for the control asphalt mixture (Vertical crack).



شکل ۷. Ratio of K_{eff} for the Nano SiO₂-modified HMA mixtures to that for the control asphalt mixture (Angular crack).

۴.۲. Influence of different temperatures

بر اساس نتایج این آزمایش میتوان روند تغییر چقرمگی شکست را با توجه به تغییرات دما مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. شکل های ۸-a و ۸-b این روند تغییرات را در دماهای زیر صفر درجه سانتی گراد به ترتیب با ترک عمودی و زاویه دار نشان می دهد.

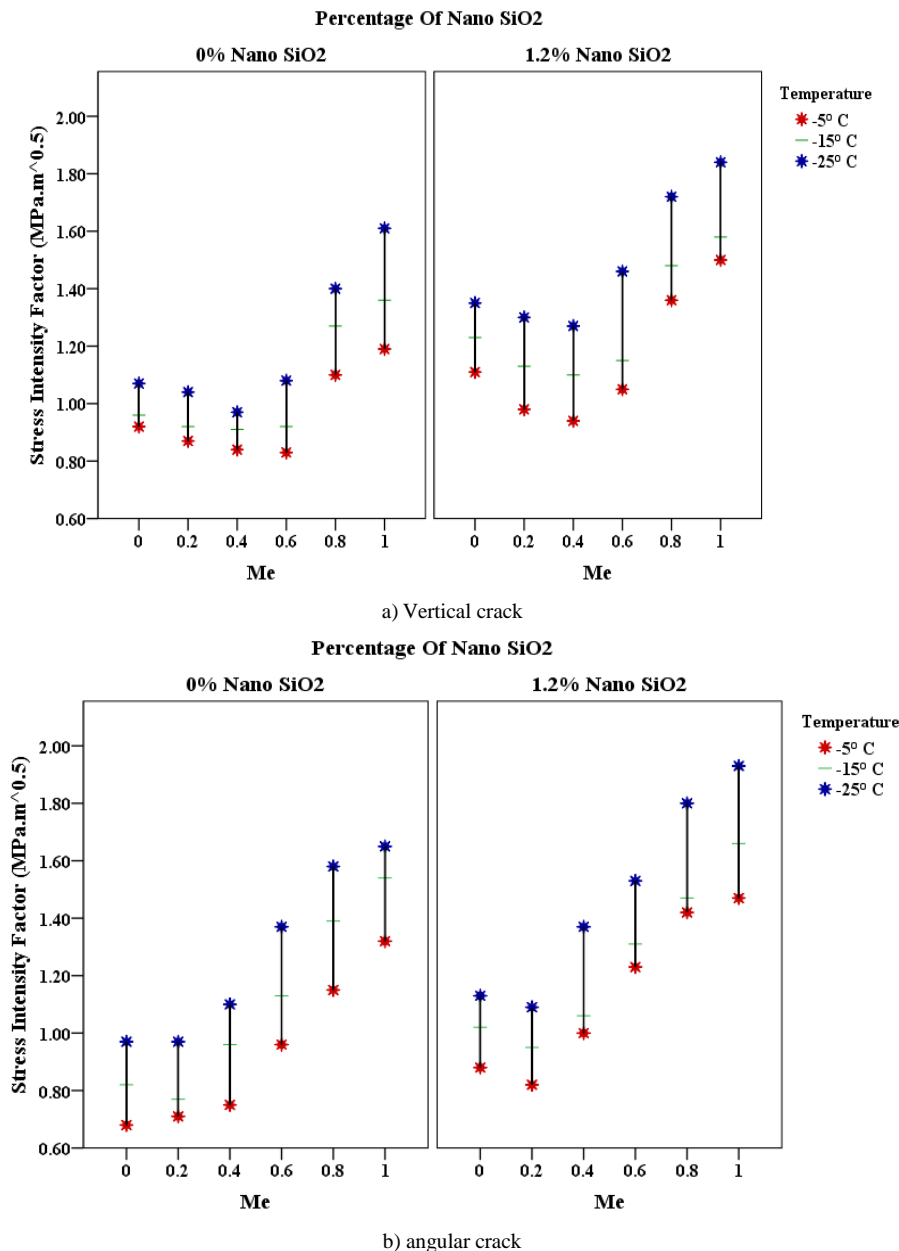
بر اساس نمودار شکل ۸-a در حالت ترک عمودی، برای هر دو حالت پایه و اصلاح شده، با کاهش دما میزان چقرمگی شکست افزایش می یابد و روند تغییر آن در هر سه دما از یک الگوی تقریباً مشابه پیروی می کند. اما در حالت کلی میزان تغییرات چقرمگی شکست با کاهش دما برای حالت اصلاح شده با ۱/۲ درصد نانو اکسیدسیلیس بیشتر از حالت پایه است. همین روند در شکل ۸-b برای حالت ترک زاویه دار نیز مشاهده می شود.

میانگین افزایش چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی تحت مود ترکیبی I/II با افزودن ۱/۲ درصد نانو اکسیدسیلیس در حالت ترک عمودی در دماهای -۵، -۱۵ و -۲۵ درجه سانتی گراد به ترتیب برابر با ۱۸/۶۷ درصد، ۲۱/۳۱ درصد و ۲۸/۴۹ درصد است. به همین ترتیب برای حالت با ترک زاویه دار برابر با ۲۵/۱۰ درصد، ۱۳/۸۶ درصد و ۱۵/۶۲ درصد است. همانطور که مشاهده می شود با افزودن ۱/۲ درصد نانو اکسیدسیلیس بیشترین چقرمگی شکست در حالت ترک عمودی و زاویه دار به ترتیب مربوط به دمای -۲۵ درجه سانتی گراد و -۵ درجه سانتی گراد می باشد.

از طرفی دیگر شکل های ۸-a و ۸-b میزان تغییر چقرمگی شکست را از دمای -۵ به -۱۵ و -۲۵ درجه سانتی گراد نمایش می دهد. طبق این دو شکل، کاهش دما در حالت تغییر دما از -۱۵ درجه سانتی گراد به -۲۵ درجه سانتی گراد در مقایسه با تغییر دما از -۵ درجه سانتی گراد به -۱۵ درجه سانتی گراد

بیشتر است. در حالت مود ترکیبی این امر مشهودتر است. میزان افزایش چقرمگی شکست با کاهش دما از ۱۵- درجه سانتی گراد به ۲۵- درجه سانتی گراد برای حالت اصلاح شده با ترک زاویه دار بیشتر از ترک عمودی می باشد.

بر اساس شکل های ۶ و ۷، در بخش قبل، میزان بهبود چقرمگی شکست مود ترکیبی I/II بر اثر افزودن نانواکسیدسیلیس با کاهش دما در حالت دارای ترک عمودی افزایش و در حالت ترک زاویه دار کاهش می یابد.

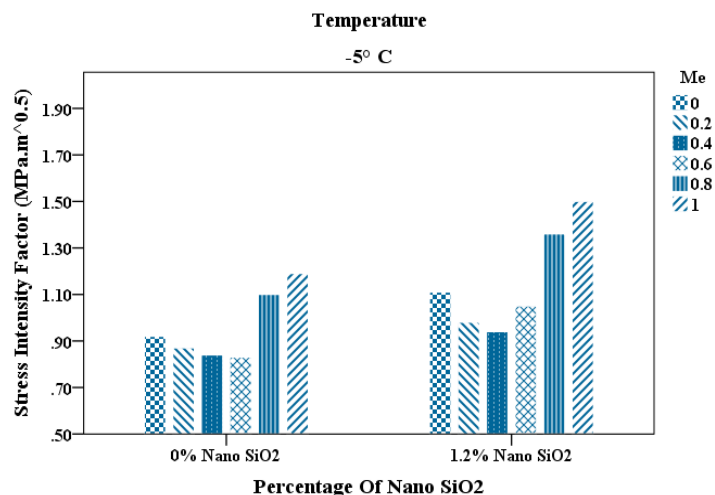


Effect of low temperatures on critical SIFs for: a) vertical crack b) Angular crack شکل ۸

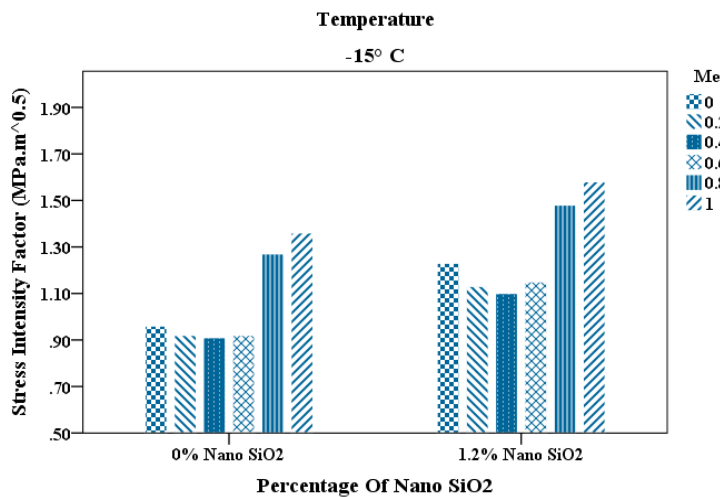
۳.۴. Influence of loading mode

با میل کردن M^e به سمت ۱، مود بارگذاری نیز به سمت مود بارگذاری کششی میل میکند و $M^e=1$ نماینده مود I خالص می باشد. با میل کردن M^e به سمت صفر مود بارگذاری نیز به سمت مود بارگذاری برشی میل میکند و $M^e=0$ نماینده مود II خالص می باشد. شکل های ۹ و ۱۰ مربوط به چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی اصلاح شده در دماهای ۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی گراد به ترتیب برای نمونه های با ترک عمودی و زاویه دار هستند که

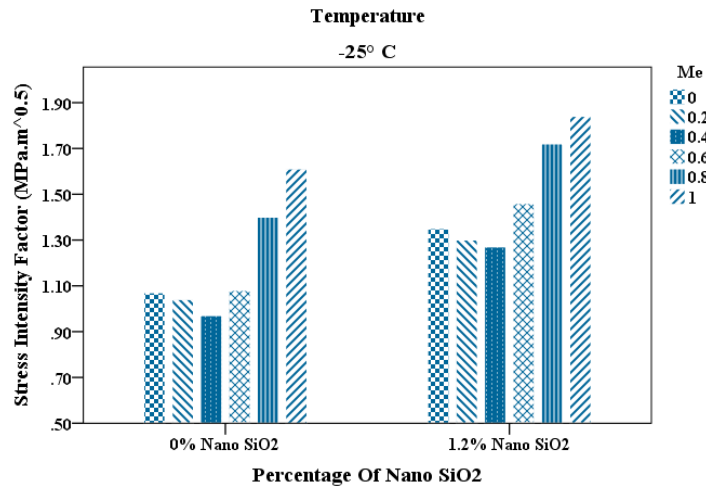
نسبت به شرایط بارگذاری مختلف نشان داده شده اند. بر اساس این نمودارها، در هر دو شکل هندسی ترک و هر سه دما در حالت پایه و اصلاح شده، حداکثر چقرمگی شکست مربوط به مود خالص کششی است که در حالت اصلاح شده این چقرمگی شکست تا حد بسیار زیادی افزایش می‌یابد. طبق شکل ۹، در نمونه‌های دارای ترک عمودی، در هر سه دمای زیر صفر، در هر دو حالت پایه و اصلاح شده با اینکه مود برشی غالب ($M^e=0$) است، ابتدا چقرمگی شکست مناسب است اما با میل کردن پارامتر مود ترکیبی به سمت $0/4$ از میزان چقرمگی شکست کاسته می‌شود. این بدان معنی است که حالت بحرانی بارگذاری مربوط به مود ترکیبی است. در ادامه مجدداً در حالتی که بارگذاری به سمت مود کششی غالب میل می‌کند افزایش چشمگیری در چقرمگی شکست مشاهده می‌شود به گونه‌ای که برای رسیدن به $M^e=0/8$ یک جهش در چقرمگی شکست مشاهده می‌گردد. به طور کلی میتوان گفت که میانگین بیشترین و کمترین میزان افزایش چقرمگی شکست به واسطه استفاده از نانواکسیدسیلیس در دماهای زیر صفر به ترتیب مربوط به مود $M^e=0/6$ (۲۸٪ افزایش) و $M^e=1$ (۱۸٪ افزایش) است. همچنین، بیشترین تاثیر افزودن ماده نانو بر روی مقاومت شکست مربوط به مود ترکیبی بارگذاری ($M^e=0/6$) و برابر با ۳۵ درصد است.



a)



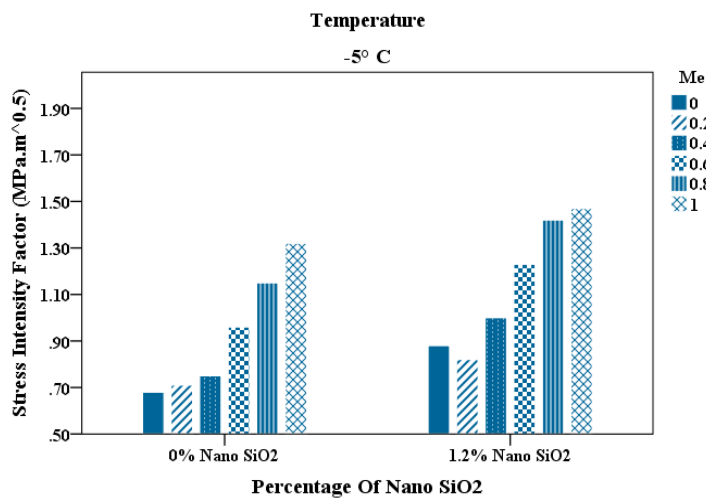
b)



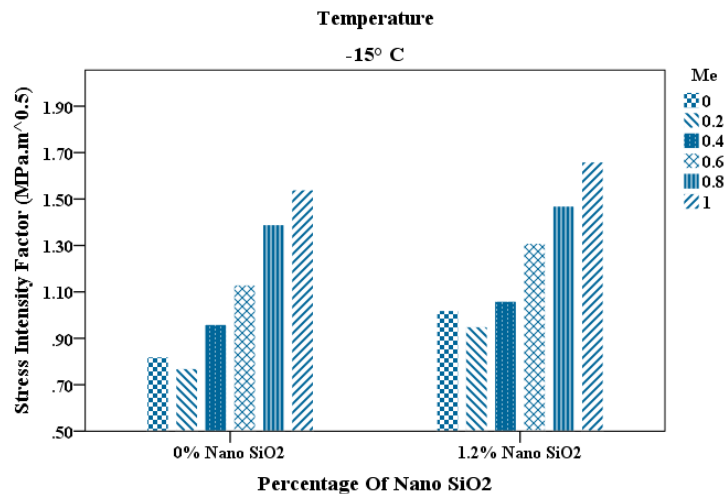
c)

Fracture strength of nanomaterials under different loading modes: a)-5°C ,b)-15°C ,c)-25°C (Vertical crack) . شکل ۹

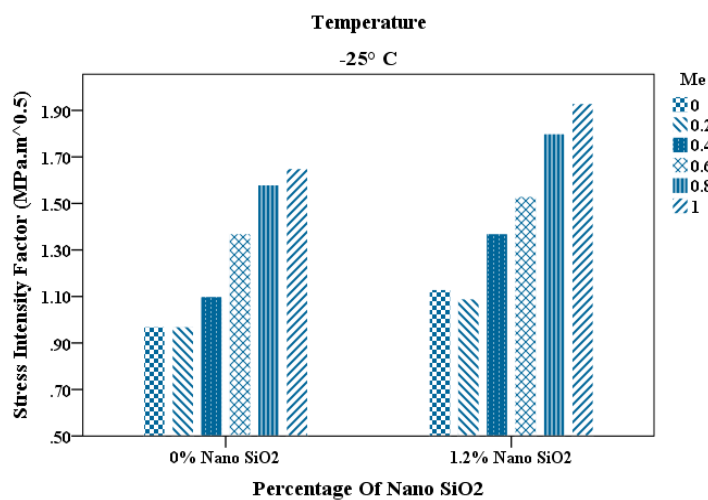
طبق شکل ۱۰ در نمونه‌های دارای ترک زاویه‌دار، در هر سه دمای زیر صفر و در هر دو حالت پایه و اصلاح شده، با افزایش پارامتر مود ترکیبی ($M^e > 0$) ابتدا چقرمگی شکست تا $M^e = 0.2$ کاهش می‌یابد سپس در حالتی که همچنان M^e رو به افزایش است (افزایش مود کششی)، افزایش چشمگیری در چقرمگی شکست مشاهده می‌شود. بر این اساس، حالت بحرانی بارگذاری مربوط به حالت مود برشی قالب ($M^e = 0.2$) است. به طور کلی می‌توان گفت میانگین بیشترین و کمترین میزان افزایش چقرمگی شکست، بر اثر استفاده از نانو اکسید سیلیس، در این دماها به ترتیب مربوط به پارامتر مود ترکیبی $M^e = 0$ (۲۳/۴٪ افزایش) و $M^e = 1$ (۱۲٪ افزایش) است که این امر نشان دهنده تاثیر مثبت کاربرد این ماده نانو در حالت بارگذاری بحرانی است. بیشترین افزایش چقرمگی شکست نیز بر اثر افزودن نانو SiO_2 در این نمونه‌ها مربوط به $M^e = 0.4$ می‌باشد که برابر با ۳۳ درصد است. همچنین می‌توان تاثیر قابل ملاحظه افزودن این ماده نانو را در بهبود چقرمگی شکست در حالت بارگذاری ترکیبی مشاهده کرد.



a)



b)

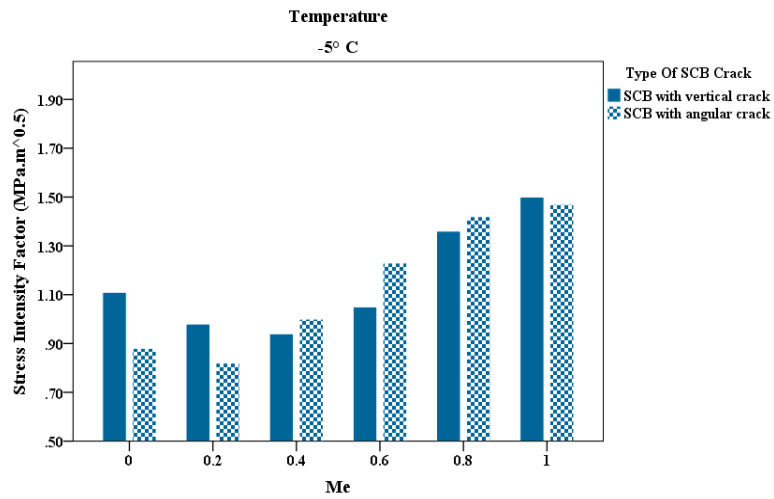


c)

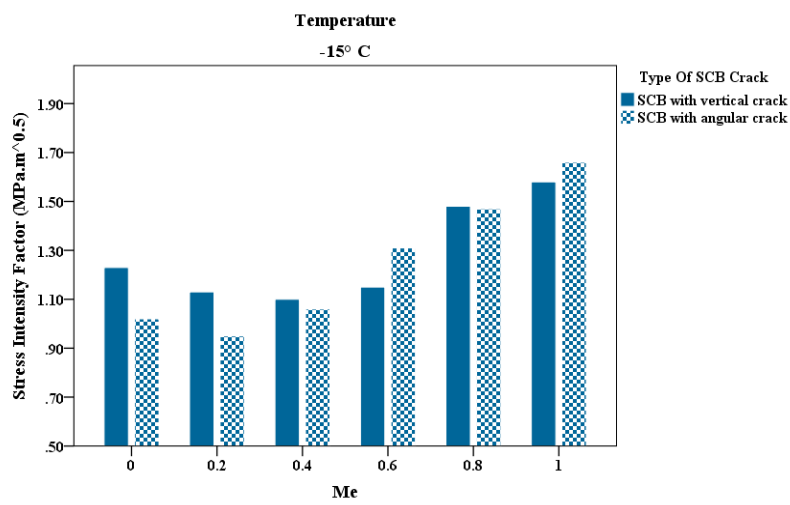
شکل ۱۰. Fracture strength of nanomaterials under different loading modes: a)-5°C, b)-15°C, c)-25°C (Angular crack).

۴. ۴. Influence of geometric shape of cracks

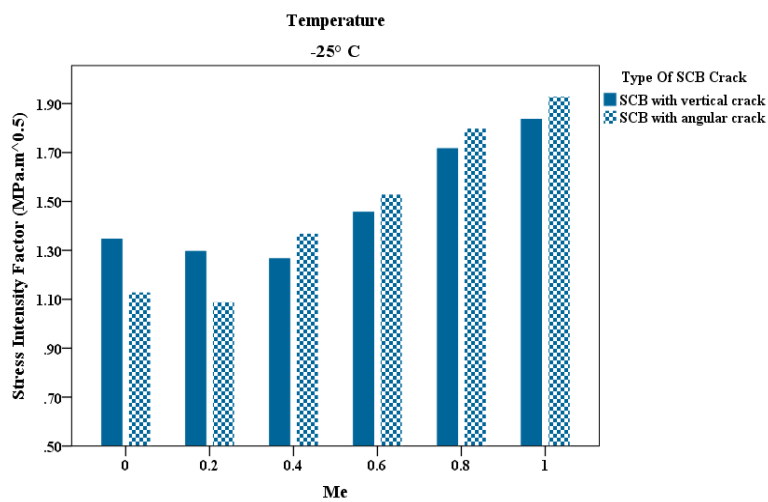
شکل ۱۱، چقرمگی شکست نمونه‌های SCB اصلاح شده با ۱/۲ درصد نانواکسیدسیلیس حاوی ترک عمودی را با نمونه‌های SCB اصلاح شده با ۱/۲ درصد نانواکسیدسیلیس حاوی ترک زاویه‌دار مقایسه می‌کند. طبق این نمودارها چقرمگی شکست در مود برشی خالص و همچنین مود برشی غالب در حالت ترک عمودی بیشتر است. با افزایش مقدار M^c (گرایش بیشتر به سمت مود کششی) میزان چقرمگی شکست در نمونه‌های دارای ترک زاویه‌دار بیشتر شده که این امر با کاهش دما افزایش می‌یابد. بیشترین اختلاف چقرمگی شکست در این دو شکل ترک برابر $0.23 \text{ MPa.m}^{0.5}$ است که مربوط به $M^c=0$ می‌باشد.



a)



b)



c)

شکل ۱۱. مقایسه چقرمگی شکست نمونه‌های اصلاح شده حاوی ترک عمودی و نمونه‌های اصلاح شده حاوی ترک زاویه‌دار

۵. نتایج

ترک‌های برودتی از مهمترین ترک‌ها به شمار می‌روند. شرایط آب‌وهوایی سرد و عبور و مرور روزافزون وسایل نقلیه باعث گسترش این ترک‌ها میگردد. در این پژوهش، مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانواکسیدسیلیس با استفاده از آزمایش SCB تحت شرایط مود بارگذاری ترکیبی I/II در دماهای زیر صفر ۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه‌سنتی گراد برای دو حالت ترک عمودی و زاویه‌دار مورد بررسی قرار گرفت. عمده نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

- (۱) نتایج حاصل از انجام آزمایشات گواه بر این موضوع است که افزودن ۱/۲ درصد نانواکسیدسیلیس باعث می‌شود تا چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت مود ترکیبی I/II، حداکثر ۳۵ درصد و حداقل ۱۱ درصد در حالت ترک عمودی و حداکثر ۳۳ درصد و حداقل ۵ درصد در حالت ترک زاویه‌دار افزایش یابد.
- (۲) بر اساس نتایج، با کاهش دما میزان چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانواکسیدسیلیس و همچنین مخلوط‌های آسفالتی پایه افزایش می‌یابد و این افزایش در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده چشمگیرتر است. میانگین افزایش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت مود ترکیبی I/II با افزودن ۱/۲ درصد نانواکسیدسیلیس در حالت ترک عمودی، در دماهای ۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه‌سنتی گراد به ترتیب برابر با ۱۸/۴۲ درصد، ۲۱/۶۸ درصد و ۲۸/۶ درصد و در حالت ترک زاویه‌دار برای این دماها به ترتیب برابر با ۲۵/۱۰ درصد، ۱۳/۸۶ درصد و ۱۵/۶۲ درصد است.
- (۳) با افزودن ۱/۲ درصد نانواکسیدسیلیس بیشترین چقرمگی شکست در حالت ترک عمودی و زاویه‌دار به ترتیب مربوط به دمای ۲۵- درجه‌سنتی گراد ($M^e=0/6$) و ۵- درجه‌سنتی گراد ($M^e=0/4$) می‌باشد.
- (۴) حداکثر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده و پایه مربوط به مود خالص کششی ($M^e=1$) می‌باشد که در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ترک زاویه‌دار برابر با $1/93 \text{ MPa.m}^{0.5}$ و در مخلوط‌های پایه با ترک عمودی برابر با $1/61 \text{ MPa.m}^{0.5}$ است.
- (۵) حداکثر افزایش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی با افزودن ۱/۲ درصد نانو SiO_2 مربوط به حالت ترک عمودی، مود بارگذاری ترکیبی I/II ($M^e=0/6$) و دمای ۲۵- درجه‌سنتی گراد است که برابر با $0/38 \text{ MPa.m}^{0.5}$ (۳۵ درصد افزایش) می‌باشد.

۵. مراجع

- [1] Majidzadeh.K&etal., "Application of fracture mechanics for improved design of bituminous concrete," *Rep, FHWA-RD-76-91, Vols, 1 2, Fed. Highw. Adm. Washington, D.C.*, 1976.
- [2] A. A. Molenaar, "Fatigue and Reflection Cracking due to Traffic Loads," *Proc. Assoc. Asph. Paving Technol. Tech. Sess.*, 1984.
- [3] A. A. Griffith; and M. Eng, "VI. The phenomena of rupture and flow in solids," *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. or Phys. Character*, 1920.
- [4] M. R. M. Aliha, H. Fazaeli, S. Aghajani, and F. Moghadas Nejad, "Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures," *Constr. Build. Mater.*, 2015.
- [5] S. Pirmohammad and H. Shabani, "Mixed Mode I/II Fracture Strength of Modified HMA Concretes Subjected to Different Temperature Conditions," *J. Test. Eval.*, vol. 47, no. 5, pp. 3355–3371, 2019.
- [6] R. Li, F. Xiao, S. Amirhanian, Z. You, and J. Huang, "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials – A review," *Construction and Building Materials*, vol. 143, pp. 633–648, 2017.
- [7] P. K. Ashish and D. Singh, "Use of nanomaterial for asphalt binder and mixtures: a comprehensive review on development, prospect, and challenges," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–47, 2019.
- [8] G. H. Shafabakhsh, O. J. Ani, and S. M. Mirabdolazimi, "Rehabilitation of Asphalt Pavement to Improvement the Mechanical and Environmental Properties of Asphalt Concrete by Using of Nano Particles," *J. Rehabil. Civ. Eng.*, vol. 4, pp. 1–22, 2020.
- [9] A. E. A. Mostafa, "Examining the Performance of Hot Mix Asphalt Using Nano- Materials," vol. 06, no. 02, pp. 25–34, 2016.
- [10] H. Zhang, C. Zhu, J. Yu, C. Shi, and D. Zhang, "Influence of surface modification on physical and ultraviolet aging resistance of bitumen containing inorganic nanoparticles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 735–740, 2015.
- [11] A. K. Arshad, E. Shaffie, W. Hashim, F. Ismail, and K. A. Masri, "Evaluation of nanosilica modified stone mastic asphalt," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 1508–1516, 2019.
- [12] A. K. Arshad, K. A. Masri, J. Ahmad, and M. S. Samsudin, "Investigation on Moisture Susceptibility and Rutting Resistance of Asphalt Mixtures incorporating Nanosilica Modified Binder," *Pertanika J. Sci. Technol.*, vol. 25, pp. 19–30, 2017.
- [13] G. H. Shafabakhsh and O. J. Ani, "Experimental investigation of effect of Nano $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 692–702, 2015.
- [14] G. Shafabakhsh, M. Motamedi, M. Firouznia, and M. Isazadeh, "Experimental investigation of the effect of asphalt binder modified with nanosilica on the rutting, fatigue and performance grade," *Pet. Sci. Technol.*, vol.

- 37, no. 13, pp. 1495–1500, 2019.
- [15] G. A. Shafabakhsh, M. Sadeghnejad, B. Ahoor, and E. Taheri, “Laboratory experiment on the effect of nano SiO₂ and TiO₂ on short and long-term aging behavior of bitumen,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 237, p. 117640, 2020.
- [16] F. Leiva-Villacorta and A. Vargas-Nordbeck, “Optimum content of nano-silica to ensure proper performance of an asphalt binder,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 20, no. 2, pp. 414–425, 2019.
- [17] M. Saltan, S. Terzi, and S. Karahancer, “Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 976–984, 2017.
- [18] H. Ezzat, S. El-Badawy, A. Gabr, E. S. I. Zaki, and T. Breakah, “Evaluation of Asphalt Binders Modified with Nanoclay and Nanosilica,” in *Procedia Engineering*, 2016.
- [19] H. Zhang, H. Xu, X. Wang, and J. Yu, “Microstructures and thermal aging mechanism of expanded vermiculite modified bitumen,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 919–926, 2013.
- [20] H. Yao *et al.*, “Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 327–337, 2013.
- [21] S. A. Ghanoon and J. Tanzadeh, “Laboratory evaluation of nano-silica modification on rutting resistance of asphalt Binder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 223, pp. 1074–1082, 2019.
- [22] M. A. Ganjei and E. Aflaki, “Application of nano-silica and styrene-butadiene-styrene to improve asphalt mixture self healing,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 89–99, 2019.
- [23] M. R. M. Aliha, M. J. Sarbijan, and A. Bahmani, “Fracture toughness determination of modified HMA mixtures with two novel disc shape configurations,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 155, pp. 789–799, 2017.
- [24] M. F. Tafti, S. Abuzar, and H. Aqda, “The impacts of type and proportion of five different asphalt modifiers on the low-temperature fracture toughness and fracture energy of modified HMA,” *Des. Civ. Environ. Eng.*, vol. 47, pp. 169–185, 2019.
- [25] S. Pirmohammad, Y. Majd-Shokorlou, and B. Amani, “Experimental investigation of fracture properties of asphalt mixtures modified with Nano Fe₂O₃ and carbon nanotubes,” *Road Materials and Pavement Design*, 2019.
- [26] H. Ziari, M. R. M. Aliha, A. Moniri, and Y. Saghaf, “Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fibre,” *Constr. Build. Mater. J.*, 2019.
- [27] R. Hong, J. Wu, and H. Cai, “Low-temperature crack resistance of coal gangue powder and polyester fibre asphalt mixture,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 238, p. 117678, 2020.
- [28] S. Pirmohammad, Y. M. Shokorlou, and B. Amani, “Influence of natural fibers (kenaf and goat wool) on mixed mode I / II fracture strength of asphalt mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 239, p. 117850, 2020.
- [29] M. Sadeghnejad and G. Shafabakhsh, “Use of Nano SiO₂ and Nano TiO₂ to improve the mechanical behaviour of stone mastic asphalt mixtures,” *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 965–974, 2017.
- [30] M. Fakhri, E. Haghghat Kharrazi, M. R. M. Aliha, and F. Berto, “The effect of loading rate on fracture energy of asphalt mixture at intermediate temperatures and under different loading modes,” *Frat. ed Integrita Strutt.*, 2018.
- [31] G. Lazzara and S. Milioto, “Dispersions of nanosilica in biocompatible copolymers,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 95, no. 4, pp. 610–617, 2010.
- [32] Y. Zhu, E. V. Dave, R. Rahbar-Rastegar, J. S. Daniel, and A. Zofka, “Comprehensive evaluation of low-temperature fracture indices for asphalt mixtures,” *Road Mater. Pavement Des.*, 2017.
- [33] *AASHTO TP 105-13. Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtu[1]*
AASHTO TP 105-13. Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB), American Associ.