

**E. Shahryari**

Department of Civil  
Engineering, K. N. Toosi  
University of Technology,  
Tehran, Iran.

**e-mail:**

shahryari.ehsan@gmail.com

**M. Akbari\***

Assistant Professor, Department  
of Civil Engineering, Semnan  
University, Semnan, Iran.

**e-mail:** akbari@semnan.ac.ir

**A. M. Hamedipour**

Department of Civil  
Engineering, Semnan  
University, Semnan, Iran.

**e-mail:**

amirhamedi1373@yahoo.com

## **Investigation of the Effect of Nano Graphene Oxide on Fracture Resistance of Asphalt Mixtures with a Fracture Energy Approach**

*In recent years, extensive studies have been conducted on the effect of different nanomaterials on the performance of asphalt mixtures. Also, in the present study, Nano graphene oxide (GO) in the amounts of 0.2, 0.5, and 0.8% by weight of bitumen was used to improve the fracture resistance of HMA asphalt mixture against cracking at negative temperatures. Nano graphene oxide (GO) has been introduced as the material of the century due to its very unique and excellent properties. For this purpose, to investigate the effect of this nanomaterial on the fracture resistance of the asphalt mixtures, the semi-circular bending (SCB) fracture test at temperatures of  $-5$  and  $-15^{\circ}\text{C}$  and four different loading modes have been used. In addition, conventional bitumen tests were performed to investigate the effect of Nano GO on pure bitumen in this study. The conventional bitumen tests showed that the addition of Nano GO to pure bitumen increased the softening point, viscosity, and specific gravity and reduced the penetration and ductility in pure bitumen. Also, the semi-circular bending (SCB) fracture test results indicate that using Nano graphene oxide increases the fracture energy of asphalt mixtures and improves the resistance of asphalt specimens to cracking. So that mixtures containing 0.5% of this additive have the best performance. The results show that the use of this amount of additive in the asphalt mixture at  $-5^{\circ}\text{C}$  and pure loading mode I increases by 105% and at  $-15^{\circ}\text{C}$  and pure loading mode II increases by 60% in the fracture energy.*

**Keywords:** Nano graphene oxide, fracture energy, low temperature cracking, SCB fracture test, asphalt mixture.

---

\* Corresponding author

Received 28 March 2022, Revised 04 May 2022, Accepted 09 May 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.8028.1377

## بررسی اثر نانو اکسید گرافن بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم با رویکرد انرژی شکست

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر تاثیر نانو مواد مختلف بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. در مطالعه حاضر از نانو اکسید گرافن در مقادیر ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ درصد وزنی قیر مصرفی، به منظور بهبود مقاومت شکست مخلوط آسفالتی گرم در برابر ترک خوردگی در دماهای منفی استفاده شده است. نانو اکسید گرافن به دلیل داشتن خصوصیات بسیار منحصر به فرد و شگفت‌انگیز در برخی صنایع، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به همین منظور برای بررسی اثر این ماده بر مقاومت شکست مخلوط آسفالتی از آزمایش مکانیک شکست روی نمونه‌های نیم‌دایره‌ای خمشی در دماهای ۵- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد و چهار حالت بارگذاری مختلف استفاده شده است. به علاوه، آزمایش‌های رایج قیر برای بررسی اثر نانو اکسید گرافن بر قیر خالص در این مطالعه انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های رایج قیر نشان داد که افزودن نانو اکسید گرافن به قیر خالص باعث افزایش نقطه نرمی، ویسکوزیته، وزن مخصوص و همچنین کاهش درجه نفوذ و شکل‌پذیری در قیر خالص شده است. همچنین نتایج آزمایش مکانیک شکست حاکی از آن است که استفاده از نانو اکسید گرافن منجر به افزایش انرژی شکست مخلوط آسفالتی و بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی می‌شود به طوری که مخلوط‌های حاوی ۰/۵ درصد از این افزودنی دارای بهترین عملکرد هستند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این مقدار افزودنی در مخلوط آسفالتی در دمای ۵- و حالت بارگذاری خالص I باعث افزایش به مقدار ۱۰۵ درصد و در دمای ۱۵- و حالت بارگذاری خالص II باعث افزایش به مقدار ۶۰ درصد در انرژی شکست می‌شود.

**واژگان کلیدی:** آزمایش خمشی نمونه نیم‌دایره‌ای خمشی، نانو اکسید گرافن، انرژی شکست، ترک خوردگی در دمای پایین، مخلوط آسفالتی گرم.

### احسان شهریاری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

پست الکترونیک:

shahryari.ehsan@gmail.com

### مهدی اکبری\*

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

پست الکترونیک:

akbari@semnan.ac.ir

### امیرمحمد حامدی پور

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

پست الکترونیک:

amirhamedi1373@yahoo.com

### ۱- مقدمه

پلاستیک را از خود نشان می‌دهد که منجر به خرابی‌هایی مانند تغییر شکل دائمی در مسیر چرخ در مخلوط آسفالتی می‌شود که یکی از شایع‌ترین خرابی‌ها در روسازی آسفالتی است.

در مقابل، مخلوط آسفالتی در دماهای پایین به دلیل رفتار الاستیک قیر مصرفی، شکننده است. به همین دلیل، می‌تواند منجر به ایجاد ترک در مخلوط آسفالتی شود [۴،۳]. ترک خوردگی یکی از خرابی‌های رایج روسازی آسفالتی می‌باشد. ایجاد و گسترش ترک در روسازی‌ها همیشه تحت تأثیر دو عامل تنش‌های حرارتی و بارگذاری

رفتار مخلوط آسفالتی به طور عمده بستگی به رفتار قیر آن دارد [۱،۲]. قیر موجود در مخلوط آسفالتی باعث ایجاد رفتارهای مختلف مخلوط در دماهای مختلف می‌شود. در دمای بالا، آسفالت رفتار ویسکو الاستو

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹.  
DOI: 10.22091/cer.2022.8028.1377 شناسه دیجیتال

می‌باشد. هندسه‌های مختلفی که از جمله رایج‌ترین آن‌ها نمونه‌های نیم‌دایره‌ای خمشی می‌باشد، در سال‌های اخیر توسط محققان برای بررسی عملکرد شکست انواع مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است.

تحقیقات گسترده‌ای به منظور بررسی رفتار شکست مخلوط آسفالتی انجام شده است. برخی از محققان از اصول مکانیک شکست برای ارزیابی مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در دمای پایین استفاده کرده‌اند. شکست مخلوط آسفالتی ممکن است در حالت I (حالت ترک کششی)، حالت II (حالت ترک برشی به صورت لغزش)، حالت III (حالت ترک برشی به صورت پیچش) یا ترکیبی از آنها رخ دهد [۱۲ و ۱۳].

در پژوهشی توسط فخری و همکاران به منظور بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA)<sup>۴</sup> دارای درصد‌های مختلف مواد بازیافتی پلی‌وینیل‌کلراید (PVC)<sup>۵</sup>، از آزمون شکست بر نمونه‌های خمشی نیمه دایره‌ای تحت بارگذاری‌های حالت خالص I، II و یک حالت ترکیبی (I/II) در دماهای بالای صفر و زیر صفر درجه سانتی‌گراد به منظور بررسی مقاومت در برابر شکست استفاده شد [۱۴].

شفابخش و همکاران، در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر نانو اکسید سیلیس بر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. به این منظور آزمون خمشی نیم‌دایره‌ای تحت بارگذاری حالت ترکیبی I/II در دماهای مختلف ۵-، ۱۵- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد و تحت دو نوع ترک عمودی و زاویه‌دار انجام شد [۷].

پیرمحمد و همکاران در مطالعه‌ای به ارزیابی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی تقویت‌شده با الیاف کربن و کناف پرداختند. در این مطالعه از آزمون خمشی نیم‌دایره‌ای (SCB)<sup>۶</sup> تحت بارگذاری حالت خالص I، حالت خالص II و حالت ترکیبی I/II در دمای ۱۵- درجه

ترافیکی بوده است. بر این اساس، ترک‌خوردگی به سه نوع اصلی ترک‌های حرارتی، ترک‌های خستگی و ترک‌های انعکاسی تقسیم می‌شود [۵، ۶].

ترک‌خوردگی در دمای پایین یا ترک‌خوردگی حرارتی یکی از خرابی‌های اصلی روسازی‌های آسفالتی است که می‌تواند در آب و هوای بسیار سرد یا زمانی که چرخه‌های دمایی گسترده‌ای در طول روز وجود دارد و منجر به انبساط و انقباض آسفالت می‌شود، رخ دهد. در این صورت تنش کششی حرارتی مخلوط آسفالتی بیش از مقاومت کششی آن می‌شود [۷، ۸، ۹]. ترک‌خوردگی حرارتی منجر به کاهش عملکرد روسازی و نفوذ آب به لایه‌های زیرین روسازی می‌شود. اصلاح قیر مصرفی در آسفالت می‌تواند به کاهش شکنندگی مخلوط آسفالتی در دمای پایین، افزایش مقاومت شیارشدگی در درجه حرارت بالا تحت رفتار ویسکو الاستو پلاستیک و همچنین مقابله با آسیب‌دیدگی رطوبتی به دلیل افزایش در بارگذاری ترافیکی و شرایط محیطی کمک کند [۱۰].

از آنجا که مخلوط آسفالتی در دماهای پایین، رفتاری الاستیک و در نهایت شکننده دارد، بنابراین، بسیاری از محققان از مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)<sup>۲</sup> به منظور بررسی خواص شکست مخلوط آسفالتی گرم (HMA)<sup>۳</sup> در شرایط دمای پایین استفاده کرده‌اند. تحلیل ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی با توجه به مکانیک شکست الاستیک خطی عمدتاً شامل شاخص‌های ارزیابی ضریب شدت تنش، چقرمگی شکست و انرژی شکست می‌باشد [۱۱]. ضریب شدت تنش بحرانی و انرژی شکست به عنوان پارامترهای اساسی به منظور مطالعه میدان تنش نوک ترک در نظر گرفته می‌شود [۸].

برای تعیین این دو پارامتر اساسی، انتخاب هندسه مناسب برای نمونه آسفالتی بسیار مهم است زیرا تنها راه تعیین این دو پارامتر از طریق روش‌های آزمایشی مناسب

<sup>4</sup> Stone Mastic Asphalt (SMA)

<sup>5</sup> Polyvinyl Chloride (PVC)

<sup>6</sup> Semi-Circle Bending (SCB)

<sup>2</sup> Linear Elastic Fracture Mechanic (LEFM)

<sup>3</sup> Hot Mix Asphalt

مشتقات آن می‌باشد. نانو اکسید گرافن (GO)<sup>۷</sup> یک ورقه تک‌لایه دویعدی از گرافیت است که در آن اتم‌های کربن در ساختارهای شش‌ضلعی در کنار هم قرار گرفته‌اند. این ساختار منحصربه‌فرد گرافن باعث به‌وجود آمدن خصوصیات مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و نوری فوق‌العاده‌ای در این ماده شده است [۱۷ و ۱۸].

نانو اکسید گرافن شکل اکسید شده گرافن می‌باشد که دارای گروه‌های عملکردی سطحی حاوی عامل‌های اکسیژن قطبی از جمله اپوکسی، کربوکسیل و هیدروکسیل می‌باشد که باعث می‌شود این ماده به راحتی در حلال‌های ارگانیک از جمله آب پخش شود. این ویژگی نانو اکسید گرافن باعث افزایش کاربرد این ماده نسبت به گرافن شده است [۱۹]. همچنین از اکسید گرافن برای اصلاح خواص پلیمرهای مختلف برای تهیه کامپوزیت‌هایی با عملکرد بهتر نیز استفاده می‌شود و طی تحقیقاتی که در سال‌های اخیر در این زمینه صورت گرفته، روشن شده است که اکسید گرافن می‌تواند خواص مکانیکی، حرارتی، رسانایی، فیزیکی و رئولوژیکی این کامپوزیت‌های پلیمری را به شکل قابل توجهی بهبود بخشد [۲۰].

از آنجایی که قیر مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی، یک ماده ویسکو الاستیک با خواص مشابه این دسته از پلیمرها است می‌تواند سازگاری خوبی با ماده نانو اکسید گرافن داشته باشد [۲۱]. با توجه به این موضوع در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه استفاده از گرافن و مشتقات آن در جهت بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی شده است.

ژو<sup>۸</sup> و همکاران در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی اثر نانو گرافن در مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن نانو گرافن با مقدار ۰/۵ درصد وزنی قیر باعث افزایش قابل توجهی در دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالت پایه می‌شود. مخلوط بتن آسفالتی

سانتیگراد استفاده شد. یافته‌ها نشان داد که هر دو الیاف کربن و کناف به بهبود مقاومت در برابر شکست کمک می‌کنند که الیاف کربن عملکرد بهتری دارد [۱۵].

فخری و همکاران به بررسی تأثیر چرخه ذوب-یخ بر خصوصیات ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. در این پژوهش از آزمون خمش نیم‌دایره‌ای تحت چهار حالت بارگذاری، حالت خالص I، حالت خالص II و دو حالت متفاوت ترکیبی I/II استفاده شد. یافته‌های پژوهش نشان داد که مقاومت در برابر شکست با افزایش تعداد چرخه ذوب-یخ به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۸].

امروزه، استفاده از نانو مواد به طور گسترده‌ای در زمینه روسازی‌های آسفالتی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها شامل سطح ویژه بالا و اندازه کوچک بین ۱ و ۱۰۰ نانومتر و قابلیت تولید مصالح جدید، رواج پیدا کرده است که قادر به افزایش دوام و عمر مفید روسازی‌های انعطاف پذیر است [۱۰]. انواع مختلفی از نانو ذرات از جمله نانو سیلیس، نانو لوله‌های کربنی، نانو رس و نانو خاکستر ذغال سنگ، در میان بسیاری دیگر، برای اصلاح قیر و آسفالت استفاده شده است. افزایش عملکرد این مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو مواد ثابت شده است [۱۶]. اگرچه استفاده از نانو مواد در روسازی‌های آسفالتی در مرحله تولید می‌تواند موجب افزایش هزینه‌ها شود، اما با توجه به این که استفاده از این مواد می‌تواند باعث بهبود قابل توجه خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی شود، از اینرو در بلند مدت موجب افزایش عمر بهره برداری روسازی و کاهش هزینه‌های نگهداری و مرمت روسازی می‌شود. این عامل می‌تواند در بلند مدت هزینه‌های اضافی در مرحله ساخت روسازی را جبران کند و موجب صرفه اقتصادی شود.

یکی از گروه‌های نانو موادی که در سال‌های اخیر با توجه به خصوصیات منحصربه‌فرد خود بسیار مورد توجه محققان در زمینه‌های مختلف قرار گرفته است گرافن و

<sup>7</sup> Nano-Graphene Oxide

<sup>8</sup> Zhu

ژو و همکاران مطالعه‌ای به منظور بررسی ویژگی‌های قیرهای اصلاح‌شده با اکسید گرافن انجام دادند که نتایج نشان دادند افزودن اکسید گرافن باعث بهبود قابل‌توجه چسبندگی قیر و در نتیجه بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌گردد [۱۷]. ونگ<sup>۱۳</sup> و همکاران گزارش کردند که آنالیز FTIR نشان داد که اکسید گرافن و نانو لوله‌های کربنی باعث بهبود مقاومت قیر در برابر پیرشدگی و بهبود عملکرد رئولوژیکی قیر در دمای پایین می‌شود [۲۵].

یودیما<sup>۱۴</sup> و همکاران نشان دادند که پایداری مارشال مخلوط آسفالتی را می‌توان با افزودن حداقل مقدار گرافن و اکسید گرافن افزایش داد. همچنین افزودن اکسید گرافن به قیر منجر به کاهش نفوذپذیری و شکل‌پذیری قیر می‌شود [۲۶].

مطالعه‌ای توسط عباس مختار عدنان<sup>۱۵</sup> و همکاران با هدف بهبود رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی گرم با استفاده از اکسید گرافن انجام شد. بدین منظور برخی از آزمایش‌های عملکردی، به عنوان مثال آزمون مدول ارتجاعی، خزش دینامیکی، غوطه‌وری مارشال و خمش نیم‌دایره‌ای برای بررسی عملکرد خستگی، مقاومت در برابر تغییرشکل، حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر شکست در دمای مثبت مخلوط آسفالتی گرم اصلاح‌شده با اکسید گرافن انجام شد. نتایج نشان داد رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی گرم اصلاح‌شده با اکسید گرافن، بهبود چشمگیری نسبت به مخلوط آسفالتی معمولی دارد [۱۰].

ونگ<sup>۱۶</sup> و همکاران، اثر پیری بر پارامترهای ترمودینامیک و قابلیت خودترمیمی قیر اصلاح‌شده با اکسید گرافن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقدار انرژی آزاد سطحی قیر با افزودن اکسید گرافن افزایش یافته است. هرچه میزان درصد اکسید گرافن

دارای نانوغرافن می‌تواند مقاومت در برابر رطوبت، مقاومت در برابر عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی را به میزان قابل‌توجهی بهبود بخشد [۲۲].

سینگ<sup>۹</sup> و همکاران در پژوهشی به تأثیر اکسید گرافن و خرده لاستیک در مخلوط آسفالتی گرم پرداختند. از آزمون مارشال به همراه آزمون کشش غیرمستقیم برای بررسی مقاومت مخلوط آسفالتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد، خرده لاستیک و اکسید گرافن کاملاً با قیر سازگار هستند. عملکرد مخلوط بتن آسفالتی گرم اصلاح‌شده با اکسید گرافن در مقایسه با مخلوط کنترلی و مخلوط بتن آسفالتی گرم با خرده لاستیک اصلاح‌شده دارای عملکرد بهتری است [۱۹].

لیو<sup>۱۰</sup> و همکاران در پژوهشی به ارزیابی عملکرد و تحلیل مکانیزم اصلاح پیوندهای آسفالت اصلاح‌شده با اکسید گرافن پرداختند. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی ارزیابی اثرات درصدهای مختلف اکسید گرافن روی خواص قیر اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS)<sup>۱۱</sup> پرداخته شد. نتایج نشان داد که افزودن مقادیر کمی از اکسید گرافن (کمتر از ۰/۲ درصد وزنی) باعث افزایش ویسکوزیته قیر، بهبود قابلیت ارتجاعی در درجه حرارت بالا و مقاومت در برابر تغییرشکل در قیرهای اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با SBS می‌شود [۲۳].

ناوارو<sup>۱۲</sup> و همکاران به پژوهشی در زمینه ارزیابی خصوصیات مکانیکی و حرارتی قیرهای اصلاح‌شده با گرافن پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که وجود گرافن پاسخ الاستیک‌تری در قیر ایجاد می‌کند. علاوه بر این، نشان داده شده است که گرافن می‌تواند حساسیت حرارتی مخلوط آسفالتی را کاهش و ظرفیت گرم‌شدن آن‌ها و انتقال حرارت را افزایش دهد [۲۴].

<sup>13</sup> Wang

<sup>14</sup> Jyothirmai

<sup>15</sup> Adnan

<sup>16</sup> Wang

<sup>9</sup> Singh

<sup>10</sup> Liu

<sup>11</sup> Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Polymer

<sup>12</sup> Navarro

بیشتر باشد، عملکرد ترمودینامیکی و خودترمیمی مخلوط آسفالتی بهتر می‌شود [۲۷].

ژو و همکاران بیان کردند که افزودن اکسید گرافن می‌تواند ویسکوزیته قیر را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و در نتیجه، موجب افزایش دمای اختلاط و تراکم شود. همچنین منجر به کاهش نفوذپذیری و شکل‌پذیری قیر پایه و افزایش نقطه نرمی و دوام قیر می‌شود. افزودن اکسید گرافن به میزان ۰/۰۵ درصد وزنی قیر باعث افزایش مقاومت در برابر پیرشدگی مخلوط آسفالتی و تاثیر آن بر عملکرد دمای پایین آن می‌شود [۲۲]. افزودن اکسید گرافن می‌تواند به طور قابل توجهی رفتار خزش و مقاومت در برابر خرابی‌های دمایی را در قیر بهبود ببخشد [۲۳].

## ۲- مواد و مصالح مصرفی

### ۲-۱- قیر و مصالح سنگی

مصالح سنگی مصرفی در این تحقیق، برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از نوع سنگدانه‌های شکسته آهکی می‌باشند. دانه‌بندی مصالح سنگی مصرفی در این پژوهش، حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ پیشنهادی نشریه ۲۳۴ با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلی‌متر می‌باشد که منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ ارائه شده است. در این مطالعه از پودر سنگ آهک بعنوان فیلر استفاده شده است. همچنین قیر مصرفی در این پژوهش، قیر ۶۰-۷۰ است که مشخصات آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

### ۲-۲- مواد افزودنی

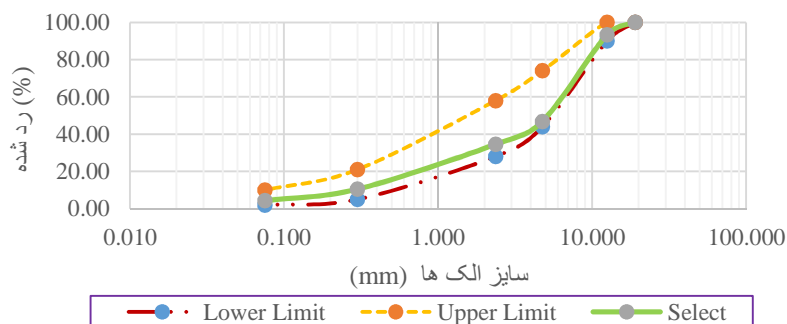
در این مطالعه از نانو اکسید گرافن به عنوان افزودنی در مقادیر ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ درصد وزنی قیر مصرفی برای بهبود خصوصیات شکست مخلوط آسفالتی استفاده شده است. درصد های انتخابی بر اساس مقادیر بهینه مطالعات پیشین انتخاب شده است. همچنین با توجه به این که استفاده از نانو اکسید گرافن حتی در مقادیر کمتر از ۱ درصد وزنی قیر مصرفی دارای تاثیرات قابل توجهی در بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی است.

شهریاری و همکاران نشان دادند که افزودن نانو گرافن کاهش‌یافته (RGO)<sup>۱۷</sup> در قیر خالص باعث افزایش نقطه نرمی و ویسکوزیته و همچنین منجر به کاهش خاصیت نفوذپذیری و شکل‌پذیری قیر خالص می‌شود. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که افزایش درصد نانو گرافن کاهش‌یافته، منجر به افزایش پایداری مارشال، استحکام کششی غیرمستقیم، کرنش جمعی، استحکام چسبندگی کششی و انرژی شکست می‌شود و همچنین منجر به بهبود پوشش قیر روی سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالت ماستیک سنگ‌دانه‌ای می‌شود. علاوه بر این، نانو گرافن کاهش‌یافته، مقاومت مخلوط‌های آسفالت ماستیک سنگ‌دانه‌ای را در برابر حساسیت به رطوبت به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [۲۸].

با توجه به اطلاعات بدست‌آمده و با بررسی مطالعاتی که در زمینه استفاده از اکسید گرافن در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است، می‌توان دریافت که تا کنون مطالعه‌ای در مورد بررسی تاثیر این ماده بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی در

با توجه به اطلاعات بدست‌آمده و با بررسی مطالعاتی که در زمینه استفاده از اکسید گرافن در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است، می‌توان دریافت که تا کنون مطالعه‌ای در مورد بررسی تاثیر این ماده بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی در

<sup>17</sup> Reduced Graphene Oxide (RGO)



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگ‌دانه‌ای مصرفی در این مطالعه

### ۳-۱- آماده سازی قیرهای اصلاح شده

در مطالعه حاضر برای آماده‌سازی نمونه‌های قیری اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن، مراحل زیر انجام شد. ابتدا قیر خالص برای رسیدن به دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، در گرمخانه قرار داده شد. سپس نانو اکسید گرافن با مقادیر ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ درصد وزنی قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی به تدریج به قیر خالص که به دمای ۱۶۰ درجه رسیده است اضافه شد. در ادامه بر اساس مطالعات پیشین [۱۰، ۱۷ و ۲۲]، ماده نانو اضافه شده به قیر خالص با استفاده از همزن برشی با سرعت بالا و با سرعت چرخش ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۴۵ دقیقه و در دمای  $160 \pm 5$ ، با قیر خالص برای رسیدن به یک مخلوط همگن به خوبی مخلوط شد. در نهایت، قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن با درصدهای مختلف آماده شدند. همچنین برای کسب اطمینان از این که ماده نانو به طور همگن در قیر پراکنده شده است و در برابر اثرات ناشی از انبار کردن در امان است، از آزمایش پایداری نگهداری<sup>۱۹</sup> و آزمایش‌های رایج قیر استفاده شد. همچنین ذکر این نکته نیز اهمیت دارد که برای جلوگیری از اثرات احتمالی انبار کردن بر قیرهای اصلاح‌شده، در این مطالعه قیرهای اصلاح‌شده بلافاصله بعد از فرایند اختلاط با ماده نانو، مورد استفاده قرار گرفتند.

لذا به نظر می‌رسد مقادیر انتخابی هم از نظر اقتصادی و هم از نظر فنی توجیه پذیر باشند [۳۴ و ۱۹، ۲۴]. در این مطالعه که به روش هامرز<sup>۱۸</sup> از ذرات گرافیت در آزمایشگاه تولید شده است [۲۲]، دارای شکل فیزیکی پودری و رنگ مشکی است که در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین سایر مشخصات مکانیکی و فیزیکی این ماده نانو در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲- تصویر نانو اکسید گرافن مصرفی

جدول ۱- مشخصات نانو اکسید گرافن مصرفی

مقادیر	مشخصات
۳-۶	ضخامت (نانومتر)
~۰.۹۹	خلوص (درصد)
۸-۱۰	تعداد لایه ها
$120 <$	مساحت سطح ( $m^2/g$ )
۰/۴۲	چگالی حجمی ( $g/cc$ )
۵-۱۰	ابعاد جانبی (میکرومتر)

### ۳- شرح روش آزمایش

<sup>19</sup> Storage Stability

<sup>18</sup> Hummers

## ۳-۲- محاسبه درصد قیر بهینه

در این مطالعه برای محاسبه مقدار قیر بهینه، نمونه‌های آسفالتی با توجه به پیشنهاد آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، از روش مارشال (ASTM D1559) استفاده شد. برای این منظور، با توجه به آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران، مقدار فضای خالی مخلوط آسفالتی برابر با ۴ درصد و حداقل مقدار فضای خالی مصالح سنگی (VMA) برابر با ۱۴ درصد در نظر گرفته شد. در ادامه، برای محاسبه قیر بهینه، ۱۸ نمونه آسفالتی مارشال با مقادیر قیر ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد وزنی مخلوط آسفالتی ساخته شد. برای کاهش میزان خطا در محاسبه قیر بهینه، از هر مخلوط آسفالتی ۳ نمونه مارشال ساخته شد. در نهایت با توجه به شرایط ذکر شده، درصد قیر بهینه برای نمونه کنترل برابر با ۵/۵ درصد بدست آمد.

بیان این نکته بسیار مهم است که در این مطالعه برای آن که تاثیر نانو اکسید گرافن با دقت بیشتری روی رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی بدست آید، دانه‌بندی مصالح سنگ‌دانه‌ای و مقدار قیر بهینه برای همه نمونه‌های کنترل و اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن که در آزمایش مکانیک شکست استفاده شد، ثابت لحاظ شده‌اند.

## ۳-۳- آزمایش‌های متداول قیر

آزمایش‌های متداول قیر خالص، مانند آزمایش شکل‌پذیری (ASTM D113)، آزمایش ویسکوزیته سی‌بولت (ASTM D88)، آزمایش نقطه نرمی (ASTM D36)، تست نفوذپذیری (ASTM D5) و آزمایش وزن مخصوص (ASTM D70) برای بررسی قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با نانو مواد استفاده شد. نتایج این آزمایشها در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، استفاده از نانو اکسید گرافن در قیر خالص منجر به افزایش نقطه نرمی، ویسکوزیته و وزن مخصوص و همچنین کاهش نفوذپذیری و شکل‌پذیری می‌شود که نتایج به دست‌آمده در این مطالعه با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین مطابقت دارد [۱۰ و ۲۲]. در واقع ذرات نانو اکسید گرافن با توجه به ساختار شبکه‌ای خاص خود و سطح بالای انرژی و سطح ویژه بالا باعث افزایش چسبندگی بین ذرات قیر می‌شوند و در نتیجه افزایش سختی قیر را بدنبال دارد که افزایش ویسکوزیته و کاهش شکل‌پذیری و درجه نفوذ در آزمایشات رایج قیر این گفته را ثابت می‌کند.

جدول ۲- خصوصیات قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن

خصوصیات	استاندارد	واحد	بازه استاندارد برای قیر خالص	قیر خالص	۰/۲ درصد نانو اکسید گرافن	۰/۵ درصد نانو اکسید گرافن	۰/۸ درصد نانو اکسید گرافن
نقطه نرمی	ASTM-D36	°C	۴۹-۵۶	۴۹	۵۰	۵۴	۵۵
شکل پذیری (°C) (۲۵)	ASTM-D113	Cm	≥۱۰۰	۱۰۴	۷۶	۶۹	۶۳
وزن مخصوص	ASTM-D70	g/cm <sup>3</sup>	-	۱/۰۳۲	۱/۰۳۶	۱/۰۴	۱/۰۴۶
درجه نفوذ (°C) (۲۵)	ASTM-D5	0.1mm	۶۰-۷۰	۶۴	۵۵	۵۳	۵۰
ویسکوزیته (°C) (۱۳۵)	ASTM-D88	S	-	۱۳۴	۱۴۵	۱۵۱	۱۵۸



## ۳-۴- آزمایش مکانیک شکست روی نمونه‌های خمشی

## نیم‌دایره‌ای

یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی خرابی‌های ناشی از ترک‌خوردگی در دمای پایین می‌باشد. روش‌های مختلفی برای بررسی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر این خرابی وجود دارد. در این مطالعه برای بررسی اثر نانو اکسید گرافن روی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی گرم در برابر ترک‌خوردگی در دمای منفی از آزمایش مکانیک شکست با نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای استفاده شده است. در این آزمایش تاثیر درصد‌های مختلف این ماده نانو بر مقاومت نمونه‌های آسفالتی در حالت‌های بارگذاری مختلف و دماهای منفی مختلف بررسی شده است.

## ۳-۴-۱- آماده‌سازی نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای

در تحقیق حاضر از نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای برای بررسی پارامترهای شکست مخلوط آسفالتی به دلایلی از جمله سهولت در بارگذاری (با ابزارهای رایج خمش سه‌نقطه‌ای) و سهولت در ساخت (توسط متراکم‌کننده‌های ژیراتوری یا مارشال) استفاده شد [۲۹]. شکل ۳، نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این هندسه قادر است همه حالت‌های بارگذاری یعنی حالت خالص I، حالت خالص II و حالت ترکیبی I/II را با تغییر موقعیت ترک و تکیه‌گاه‌ها شبیه‌سازی کند [۲۹].



شکل ۳- هندسه نمونه خمشی دایره‌ای مصرفی در این مطالعه

در این مطالعه چهار نوع مخلوط آسفالتی مختلف بر اساس معیارهای طراحی روسازی ممتاز به منظور ارزیابی مقاومت آن‌ها در برابر شکست تهیه شد. در ابتدا، پیش از

فرآیند اختلاط برای حذف رطوبت موجود در آن‌ها، سنگدانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و قیر به مدت ۲ ساعت با دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد در گرمخانه قرار داده شدند. پس از آن، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر توسط متراکم‌کننده ژیراتوری با فشار  $60.0 \pm 18$  کیلوپاسکال (AASHTO T-312) و با زاویه ۱/۲۵ درجه (AASHTO T-71) در دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد، براساس استاندارد AASTO T312 متراکم شدند تا میزان فضای خالی نمونه‌ها به ۴ درصد برسد.

در نهایت، قسمت‌های پایین و بالای نمونه‌های استوانه‌ای به ضخامت ۱ سانتی‌متر برش داده شد و هر نمونه استوانه‌ای به چهار صفحه دایره‌ای با ضخامت ۲۵ میلی‌متر تقسیم شدند. سپس، هر صفحه به دو آزمون برای آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (SCB) تقسیم شد. سرانجام به وسیله یک تیغ اره با الماس دوار به ضخامت ۱ میلی‌متر، شکافی به طول ۲۵ میلی‌متر در لبه وسط هر نمونه ایجاد شد. در این تحقیق نسبت طول ترک بر شعاع دیسک ( $a/r$ ) در نمونه‌ها برابر  $0.33$  می‌باشد.

## ۳-۴-۲- فرآیند انجام آزمایش

آزمون خمش نیم‌دایره‌ای (SCB) به طور گسترده‌ای برای بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت حالت‌های بارگذاری مختلف استفاده می‌شود. زیرا نمونه‌های SCB را می‌توان به راحتی با دستگاه تراکم مارشال و ژیراتور تهیه کرد. در این آزمون تمامی حالت‌های بارگذاری از جمله حالت خالص I، حالت خالص II و حالت ترکیبی I/II را می‌توان در نمونه SCB ایجاد کرد. به منظور ایجاد حالت ترکیبی I/II می‌توان از سه روش متمایز مطابق شکل ۴ استفاده کرد [۷ و ۱۲]:

(الف) تغییر موقعیت تکیه‌گاه‌های پایین نسبت به شکاف عمودی در وسط نمونه.

(ب) تغییر موقعیت شکاف عمودی از وسط نمونه.

(ج) تنظیم زاویه ترک در مقایسه با حالت عمودی.

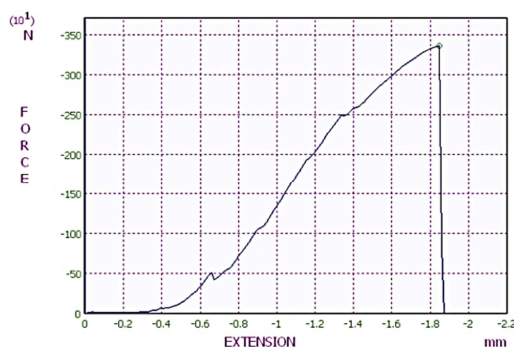
I (حالت کششی)، حالت خالص بارگذاری II (حالت برشی) و دو حالت بارگذاری ترکیبی I/II استفاده شد. همچنین با توجه به این که حداقل دمای سطح روسازی های آسفالتی در اغلب مناطق کشور در زمستان به طور میانگین در بازه بین صفر تا ۲۰- درجه سانتیگراد قرار دارد [۱۴ و ۱۲]، لذا برای شبیه سازی بهتر و تخمین حالت های بحرانی، آزمایش مکانیک شکست در این مطالعه در دماهای ۵- و ۱۵- درجه سانتیگراد انجام شد.

جدول ۳- پارامترهای حالت های مختلف بارگذاری

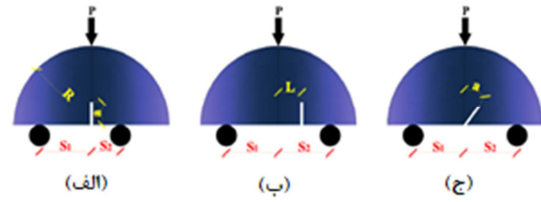
$M^e$	(S1, S2) mm	حالت بارگذاری
صفر	(۹,۵۰)	حالت خالص II
۰/۳۸	(۱۵,۵۰)	حالت ترکیبی I/II
۰/۸	(۲۲,۵۰)	حالت ترکیبی I/II
۱	(۵۰,۵۰)	حالت خالص I

رفتار ترک خوردگی بر روی مواد شکننده به کمک مکانیزم شکست الاستیک خطی (LEFM) قابل پیش بینی است. به طور کلی، روش LEFM زمانی می تواند مورد استفاده قرار گیرد که ناحیه پلاستیک در اطراف نوک ترک در مقایسه با اندازه ترک کوچک باشد [۱۲].

شکل ۵ منحنی بار-جابجایی نمونه های SCB مطالعه حاضر را نشان می دهد. در ابتدا، بار به صورت خطی افزایش می یابد تا به نقطه اوج خود برسد که در آن شکستگی ترد آغاز می شود، پس از آن، بار به طور قابل توجهی کاهش می یابد تا به صفر می رسد.



شکل ۵- نمودار تغییرات نیرو نسبت به جابجایی برای نمونه های SCB در دمای منفی



شکل ۴- روش های ایجاد حالت های بارگذاری ترکیبی

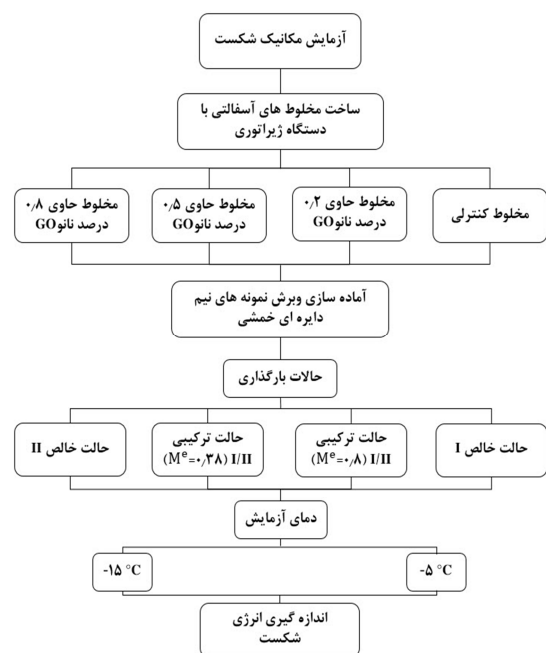
در مطالعه حاضر از روش اول به منظور بررسی ترک های عمودی ایجاد شده در نمونه های SCB استفاده شده است. تکیه گاه سمت چپ همیشه ثابت بوده و با تغییر موقعیت تکیه گاه سمت راست، حالت های بارگذاری مختلف بین حالت خالص I و حالت خالص II روی نمونه ها اعمال شد. همچنین، پارامتر اختلاط ( $M^e$ )، به عنوان نسبت شکستگی حالت های نوک ترک تعریف می شود [۲۹] که برای محاسبه آن می توان از معادله ۱ محاسبه کرد:

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

که مقدار آن برای حالت خالص I،  $M^e$  برابر یک، برای حالت خالص II،  $M^e$  برابر صفر و برای سایر شرایط بارگذاری ها، شرط پارامتر اختلاط به صورت  $M^e$  بین صفر و یک می باشد [۱۳].

در این مطالعه از چهار  $M^e$  یا چهار حالت بارگذاری مختلف برای شبیه سازی ترک خوردگی در دمای پایین استفاده شد که مقادیر  $M^e$  و فواصل تکیه گاه ها برای حالت های بارگذاری مختلف در نظر گرفته شده در این تحقیق در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به اینکه گسترش ترک و ایجاد مکانیسم شکست در روسازی انعطاف پذیر عمدتاً تحت تاثیر تنش های کششی، برشی و یا ترکیبی از این دو حالت اتفاق می افتد، به همین علت در این پژوهش با توجه به محدودیت های آزمایش مکانیک شکست بر نمونه های نیم دایره ای خمشی (SCB) برای شبیه سازی بهتر حالات بارگذاری و بررسی سهم مقاومت برشی و کششی مخلوط های آسفالتی در مقاومت در برابر ترک خوردگی، از حالت خالص بارگذاری

در نهایت فلوجارت روند انجام آزمایش شکست در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- فلوجارت روند انجام آزمایش مکانیک شکست

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- آزمایش مکانیک شکست روی نمونه‌های خمشی

##### نیم‌دایره‌ای (SCB)

آزمایش SCB روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن تحت چهار حالت بارگذاری مختلف در دماهای ۵- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد برای مقایسه خواص شکست آن‌ها انجام شد. تاثیرات هر متغیر در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

##### ۴-۱-۱- تاثیر افزودنی

شکل ۷ مقاومت نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن (GO) در برابر ترک خوردگی در دماهای منفی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد نانو اکسید گرافن (GO) در مخلوط آسفالتی گرم، پارامتر انرژی شکست در ابتدا افزایش می‌یابد تا به حداکثر میزان خود در مقدار ۰/۵ درصد وزنی قیر می‌رسد و سپس برای حالت‌های بارگذاری  $M^e$  معادل

همچنین رفتار شکننده در حین آزمایش شکست مشاهده می‌شود، زیرا ترک در اطراف سنگدانه‌ها (با شکستن آن‌ها) منتشر می‌شود. علاوه بر این، بر اساس مطالعات پیشین شکستن سنگدانه‌ها می‌تواند شاهد دیگری از شکست ترد باشد [۲۹].

بنابراین در دمای منفی، آسفالت مانند یک ماده شکننده یا شبه‌شکننده عمل می‌کند، در نتیجه مکانیزم شکست الاستیک خطی (LEFM) می‌تواند به عنوان یک ابزار عملی برای ارزیابی پدیده ترک خوردگی در دمای پایین در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد [۱۲].

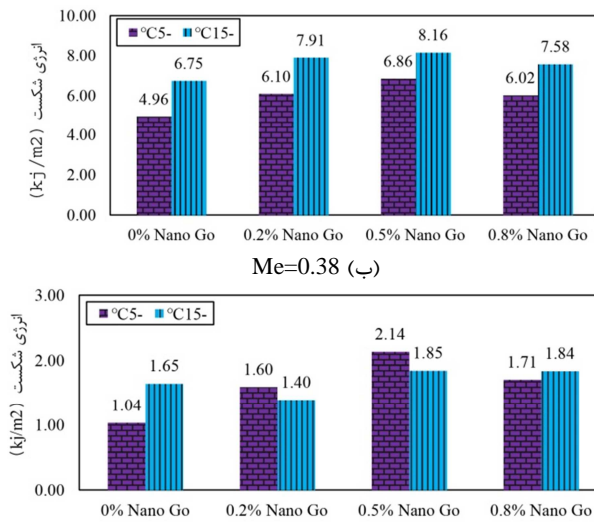
در این مطالعه از پارامتر انرژی شکست ( $G_f$ ) برای بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است [۳۰ و ۳۱]. پارامتر انرژی شکست ( $G_f$ ) مقدار انرژی مورد نیاز برای گسترش ترک در مخلوط آسفالتی را اندازه‌گیری می‌کند و می‌تواند تأثیر افزودنی‌های اصلاح‌کننده بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر شکست را به دقت تشخیص دهد. این پارامتر یکی از پارامترهای اساسی برای تخمین رفتار شکست مخلوط آسفالتی در برابر گسترش ترک است، زیرا وابستگی کمتری به مکانیزم شکست الاستیک خطی (LEFM) نسبت به پارامتر چقرمگی شکست دارد و نتایج حاصل از آن همبستگی منطقی و مناسبی با شرایط واقعی دارد [۱۴، ۲۸ و ۳۱]. برای محاسبه انرژی شکست از منحنی بار-جابجایی طبق استاندارد RILEM TC50-FMC از فرمول رایج زیر استفاده می‌شود:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (2)$$

$$A_{lig} = \left(\frac{D}{2} - a\right) \times t \quad (3)$$

که در آن،  $G_f$  معادل انرژی شکست ( $J/m^2$ )،  $W_f$  معادل کار شکست ( $J$ )،  $A_{lig}$  معادل سطح شکست ( $m^2$ )،  $D$  معادل قطر نمونه ( $m$ )،  $a$  معادل طول ترک اولیه ( $m$ ) و  $t$  معادل ضخامت نمونه ( $m$ ) است.

مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند.



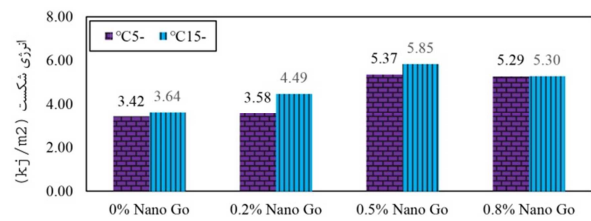
Me=1 (ت)

افزایش انرژی شکست در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد به ترتیب حدود ۵۷، ۳۸، ۲۴ و ۱۰۵ درصد برای تمام مقادیر  $M^e$  (به ترتیب برای  $M^e$  معادل صفر، ۰/۳۸، ۰/۸ و یک) می‌شود در حالی که افزودن ۰/۵ درصد نانو اکسید گرافن به عنوان درصد بهینه افزودنی، باعث افزایش انرژی شکست در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد به ترتیب حدود ۶۰، ۲۱، ۱۰ و ۱۲ درصد در حالت‌های  $M^e$  به ترتیب معادل صفر، ۰/۳۸، ۰/۸ و یک می‌شود.

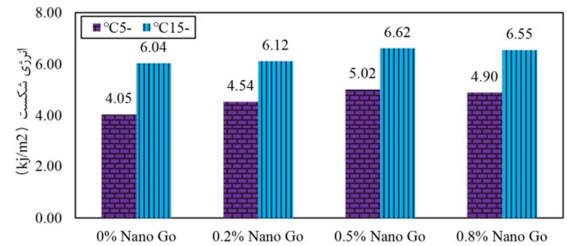
حداکثر افزایش انرژی شکست در مورد نمونه‌های حاوی ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ درصد افزودنی در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۵۳، ۱۰۵ و ۶۴ درصد می‌باشد که تمامی این افزایش‌ها در حالت بارگذاری حالت I اتفاق افتاده است. در حالی که حداکثر افزایش انرژی شکست در مورد نمونه‌های حاوی ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ درصد افزودنی در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۲۳، ۶۱ و ۴۶ درصد می‌باشد که تمامی این افزایش‌ها در حالت بارگذاری II اتفاق افتاده است.

علاوه بر این، افزودن نانو اکسید گرافن باعث بهبود بیشتر انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم در حالت II نسبت به حالت I در دمای ۱۵- شد. این نشان

صفر، ۰/۳۸ و یک کاهش می‌یابد ولی در  $M^e$  معادل ۰/۸،



Me=0 (الف)



Me=0.8 (پ)

شکل ۷- نتایج آزمایش مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی مختلف در دماها و حالت‌های بارگذاری مختلف

این نشان می‌دهد که مقدار بهینه‌ای برای استفاده از نانو اکسید گرافن به عنوان اصلاح‌کننده در مخلوط آسفالتی وجود دارد. بنابراین، طبق نتایج می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ۰/۵ درصد می‌تواند مقدار مناسبی برای افزودن نانو اکسید گرافن به مخلوط آسفالتی گرم باشد. از آنجایی که نانو اکسید گرافن دارای گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن فراوانی در ساختار خود است، بنابراین ذاتاً با قیر سازگاری خوبی دارد. در واقع نانو اکسید گرافن، به ذرات قیر کمک می‌کند تا ویژگی چسبندگی بالاتری را ایجاد کند و در نتیجه سنگدانه‌ها به شدت به هم پیوند می‌خورند و باعث افزایش مقاومت کششی و برشی مخلوط آسفالتی در دماهای پایین می‌شود. علاوه بر این، نانو اکسید گرافن می‌تواند نیروی چسبندگی مخلوط را با ایجاد یک اثر اتصالی بین قیر و ذرات نانو اکسید گرافن افزایش دهد و با جلوگیری از تشکیل میکروتکرک‌ها در دماهای پایین‌تر بهتر در برابر رشد ترک مقاومت کند [۵] و [۳۲].

پس از محاسبه تغییر در مقادیر انرژی شکست در مقادیر مختلف نانو اکسید گرافن، مشخص شد افزودن ۰/۵ درصد نانو اکسید گرافن به عنوان درصد بهینه، باعث

شکل ۸، روند تغییرات انرژی شکست در مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی نانو اکسید گرافن (GO) را نشان می‌دهد. به غیر از حالت بارگذاری I برای نمونه‌های حاوی ۰/۲ و ۰/۵ درصد افزودنی، در تمامی حالت‌های بارگذاری، مقدار انرژی شکست در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای ۵- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که مقدار انرژی شکست با کاهش دما نیز افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که سفتی مخلوط‌های آسفالتی گرم با کاهش دما افزایش می‌یابد.

همچنین قیر در مقایسه با سنگدانه‌ها نسبت به دما حساس تر است. با کاهش دما، چسباننده مخلوط آسفالتی منقبض می‌شود و ویسکوزیته آن افزایش می‌یابد. یکی از دلایل این افزایش ویسکوزیته می‌تواند سخت تر شدن پیوند بین ذرات قیر باشد، که این سخت شدن پیوند ذرات قیر به طبع می‌تواند باعث بهبود اتصالات در مخلوط آسفالتی شود [۳۲]. بنابراین، نیرو و انرژی بیشتری برای شکستن اتصال‌دهنده نیاز است و در نتیجه، مقدار انرژی شکست مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، کاهش بیش از حد دما، یعنی زمانی که کاهش درجه حرارت از حد پایین درجه عملکردی (PG)<sup>۱</sup> قیر نیز فراتر می‌رود، باعث می‌شود اتصال‌دهنده شکننده تر شود و احتمالاً مکانیسم شکست اتصال‌دهنده از ویسکوالاستیک به شکننده تغییر می‌کند و در نتیجه، هسته‌ای از ریزترک‌ها در اتصال‌دهنده شکننده ایجاد می‌شود که منجر به کاهش قدرت اتصال‌دهنده و در نتیجه کاهش مقاومت شکست می‌شود [۱۲].

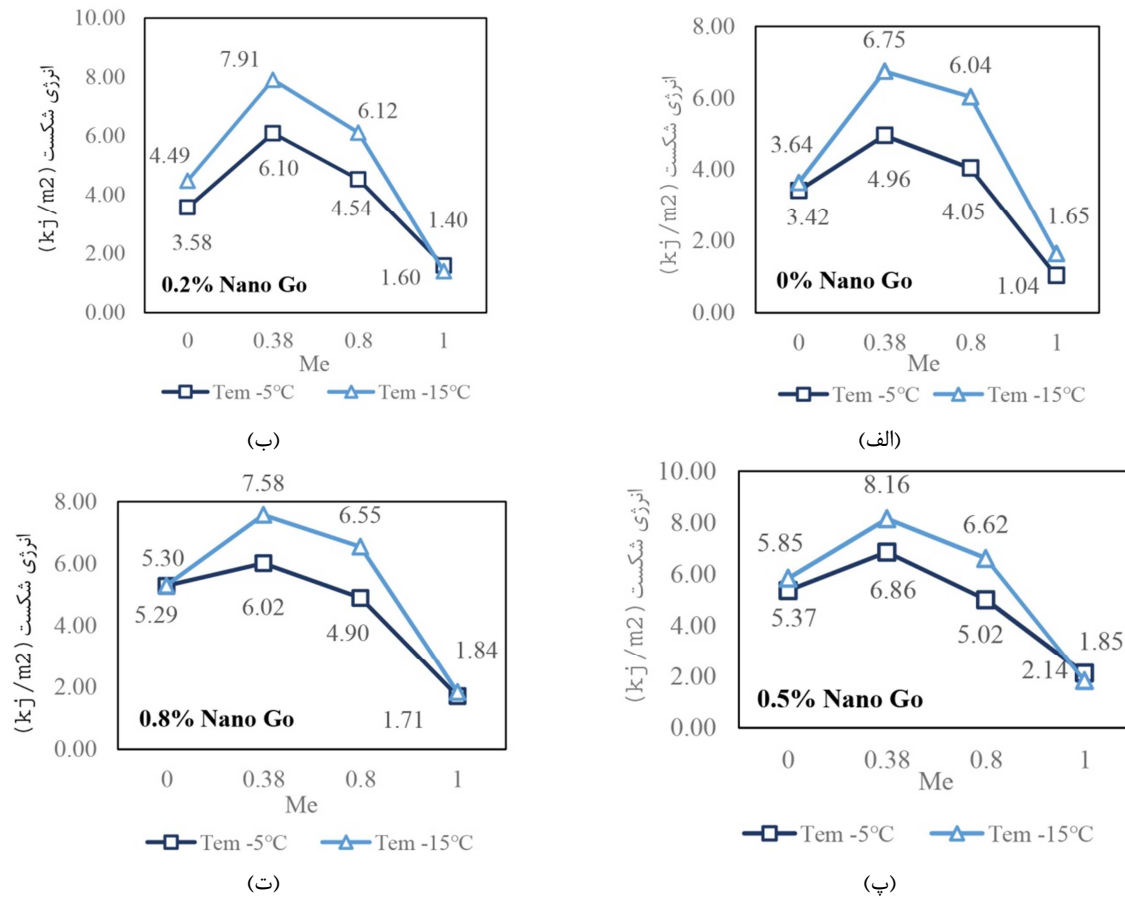
براساس شکل ۸، مشاهده می‌شود نمونه‌های با ۰/۵ درصد نانو اکسید گرافن (GO) در هر دو دما بیشترین مقاومت در برابر شکست را دارند.

می‌دهد که افزودن نانو اکسید گرافن به مخلوط آسفالتی گرم تاثیر بیشتری روی بهبودی پیوند بین اجزای مخلوط آسفالتی گرم در صفحات برشی در این دما دارد، که منجر به تأثیر بر مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در این حالت بارگذاری می‌گردد. در حالی که با افزایش دما این موضوع برعکس می‌شود، به طوری که در دمای ۵-، پیوند بین اجزای مخلوط‌های آسفالتی گرم اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن در صفحات کششی بهتر عمل می‌کنند. همچنین با بررسی پژوهش‌های پیشین می‌توان به تاثیر برخی از افزودنی‌های دیگر بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی اشاره کرد. به طور مثال گلچین و همکاران گزارش کردند که افزودن الیاف کربن به مخلوط آسفالتی باعث افزایش مقاومت شکست در دمای منفی در حالت‌های بارگذاری II و I به ترتیب به مقدار ۵ و ۴۳ درصد می‌شود [۳۳]. منصوریان و همکاران اعلام کردند که استفاده از الیاف طبیعی (جوت) و الیاف مصنوعی (با پایه ی پلی اولفین و آرامید) در مخلوط آسفالتی نیمه گرم موجب بهبود مقاومت شکست در حالت‌های بارگذاری خالص کششی و ترکیبی در دمای منفی می‌شود [۳۴]. کاووسی و همکاران نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم حاوی افزودنی شیمیایی آسفالت نیم گرم عملکرد بهتری در برابر شکست در دمای پایین نسبت به مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم حاوی افزودنی ساسوبیت (افزودنی آلی) دارد [۳۵]. همچنین فخری و همکاران در پژوهشی گزارش کردند که افزودن نانو رس به مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی خرده آسفالت بازیافتی باعث افزایش مقاومت شکست مخلوط در دمای منفی می‌شود [۱۲].

#### ۴-۱-۲- تاثیر دماهای مختلف

از آنجا که روسازی‌های آسفالتی در شرایط اقلیمی بسیار سرد ممکن است دچار ترک‌خوردگی‌های حرارتی شوند [۳۶]، در این پژوهش نمونه‌ها در دماهای ۵- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد برای ارزیابی شرایط بحرانی مورد آزمایش شکست قرار گرفتند.

<sup>1</sup> Performance Grade (PG)



شکل ۸- تاثیر دما روی انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی برای درصد افزودنی‌های مختلف

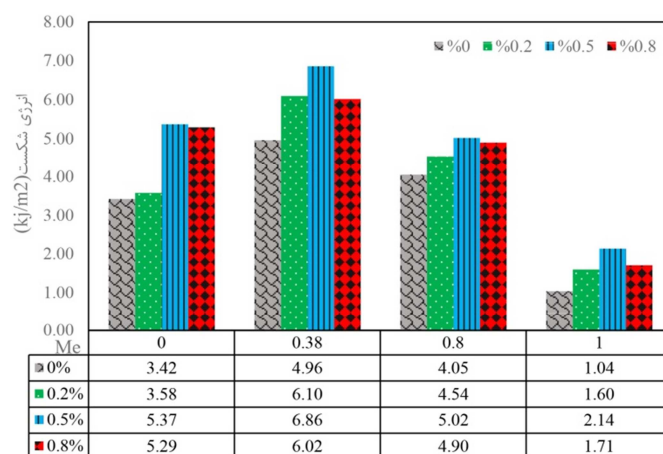
همچنین براساس نمودار (ب) شکل ۹، در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد، بیشترین انرژی شکست تحت حالت بارگذاری ترکیب با  $M^e$  برابر با ۰/۳۸، برای همه مخلوط‌های آسفالتی گرم مورد بررسی در این تحقیق مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، انرژی شکست ابتدا افزایش می‌یابد و سپس با افزایش نسبت حالت کششی (حالت I) در جلوی ترک نمونه SCB کاهش می‌یابد.

#### ۲-۴- آنالیز آماری

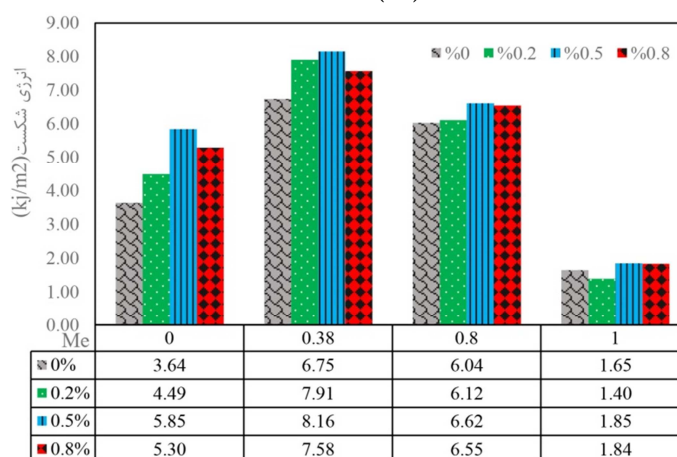
پس از بررسی تاثیر نانو اکسید گرافن بر مقاومت در برابر ترک خوردگی در دماهای پایین مخلوط آسفالتی گرم، با آزمایش مکانیک شکست با نمونه های خمشی نیم‌دایره‌ای (SCB)، در این قسمت به بررسی اهمیت تاثیر نانو اکسید گرافن، حالت‌های مختلف بارگذاری و دماهای مختلف آزمایش بر انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی به وسیله تحلیل آماری پرداخته شده است.

#### ۳-۱-۴- اثر حالت‌های بارگذاری مختلف

اثرات حالت‌های بارگذاری چهارگانه روی مقاومت شکست مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن (GO) برای دماهای ۵- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد، در شکل ۹ نشان داده شده است. بر اساس نمودار (الف) شکل ۹، در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد، حالت بحرانی در تمامی نمونه‌های اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن (GO) زمانی اتفاق می‌افتد که در حالت  $M^e$  برابر با یک است. با توجه به این شکل، انرژی شکست با افزایش نسبت برشی (حالت II) در نوک ترک نمونه SCB افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که بارگذاری حالت بحرانی مربوط به بارگذاری حالت خالص I است و بدان معنی است که مخلوط آسفالت اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد تحت حالت خالص I در برابر شکستگی آسیب‌پذیرتر است.



T = -5°C (الف)



T = -15°C (ب)

شکل ۹- تاثیر حالت‌های بارگذاری مختلف بر انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی

پایین نمونه‌های آسفالتی نیم‌دایره‌ای، میزان تاثیر حالت‌های مختلف بارگذاری، تاثیر دماهای متفاوت آزمایش و تاثیر درصدهای مختلف نانو اکسید گرافن معنی‌دار و قابل توجه می‌باشد زیرا برای هر سه عامل مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد. با توجه به نتایج، مقادیر P-value برای حالت‌های مختلف بارگذاری برابر با صفر، برای دماهای مختلف آزمایش برابر ۰/۰۰۱ و برای مقادیر مختلف نانو اکسید گرافن معادل ۰/۰۰۶ بوده است که به مراتب کمتر از ۰/۰۵ بودند.

به همین منظور، در این مطالعه از آزمون تحلیل کوواریانس (ANCOVA) در نرم‌افزار SPSS استفاده شد که بر اساس آن، معناداری بر مبنای مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ (سطح اطمینان ۹۵ درصد) تعریف شد [۳۷].

جدول ۴ خروجی نتایج حاصل از آزمون ANCOVA برای مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین برای مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن را نشان می‌دهد. طبق یافته‌های به‌دست‌آمده برای مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای

جدول ۴- نتایج تحلیل آماری ANCOVA روی متغیرهای مورد مطالعه

مقدار P-value	متغیرهای مستقل	متغیر وابسته
صفر	حالت بارگذاری	مقاومت ترک‌خوردگی در دمای پایین مخلوط آسفالتی گرم
۰/۰۰۶	مقدار درصد افزودنی نانو اکسید گرافن	
۰/۰۰۱	دمای آزمایش	

## ۵- نتیجه گیری

- با کاهش دمای آزمایش، ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد و در واقع قیر رفتار سخت تری از خود نشان می‌دهد و در نتیجه، منجر به افزایش انرژی شکست می‌گردد که این افزایش در نمونه‌های اصلاح‌شده با نانو اکسید گرافن مشهودتر می‌باشد.

- افزودن نانو اکسید گرافن منجر به افزایش انرژی شکست مخلوط آسفالتی در همه حالت‌های بارگذاری می‌گردد. بالاترین بهبود در انرژی شکست مخلوط آسفالتی در دماهای ۵- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد تحت حالت بارگذاری  $M^e$  برابر با ۰/۳۸ مشاهده شد.

- نتایج حاصل از آزمون آماری ANCOVA نشان داد که حالت‌های مختلف بارگذاری، دماهای مختلف آزمایش و مقادیر مختلف نانو اکسید گرافن بر مقدار انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در دمای منفی تاثیرگذاری معنی‌داری دارند.

- در نهایت با توجه به این که مخلوط‌های دارای ۰/۵ درصد نانو اکسید گرافن (GO) دارای بیشترین مقاومت در برابر ترک خوردگی در دماهای منفی هستند، می‌توان مقدار ۰/۵ درصد نانو اکسید گرافن را به عنوان مقدار بهینه استفاده از آن در مخلوط آسفالتی گرم برای شرایط محیطی مشابه مطالعه حاضر پیشنهاد داد.

هدف از این مطالعه بررسی اثر نانو اکسید گرافن (GO) بر مقاومت شکست مخلوط آسفالتی داغ (HMA) در برابر ترک خوردگی در دمای پایین می‌باشد. به همین منظور در این مطالعه از آزمایش مکانیک شکست بر روی نمونه‌های نیم دایره ای خمشی (SCB) استفاده شده است. همچنین برای بررسی اثر این افزودنی بر خصوصیات قیر خالص از آزمایش‌های رایج قیر استفاده شده است. در نهایت با توجه به آزمایشات انجام شده نتایج زیر را می‌توان بیان کرد:

- با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های رایج قیر خالص، مشاهده می‌شود افزودن نانو اکسید گرافن (GO) به قیر خالص باعث افزایش وزن مخصوص، نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر خالص می‌شود. همچنین افزودن این ماده به قیر خالص منجر به کاهش خاصیت شکل‌پذیری و درجه نفوذ قیر خالص می‌شود.

- افزودن نانو اکسید گرافن منجر به افزایش قابل توجه چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی می‌گردد که این موضوع باعث افزایش مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در دماهای پایین می‌شود.

## مراجع

- [1] Guo, Q., Wang, H., Gao, Y., Jiao, Y., Liu, F., & Dong, Z. (2020). Investigation of the low-temperature properties and cracking resistance of fiber-reinforced asphalt concrete using the DIC technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 229, 106951.
- [2] Zhao, W., Xie, X., Li, G., Geng, J., Bao, M., & Wang, M. (2020). Research on the Influence of Nanocarbon/Copolymer SBS/Rubber Powder Composite Modification on the Properties of Asphalt and Mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.
- [3] Yalghouzaghaj, M. N., Sarkar, A., Hamed, G. H., & Hayati, P. (2021). Application of the surface free energy method on the mechanism of low-temperature cracking of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 268, 121194.
- [4] Mamun, A. A., & Arifuzzaman, M. (2018). Nano-scale moisture damage evaluation of carbon nanotube-modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 193, 268–275.
- [5] Pirmohammad, S., Majd-Shokorlou, Y., & Amani, B. (2020). Experimental investigation of fracture properties of asphalt mixtures modified with Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and carbon nanotubes. *Road Materials and Pavement Design*, 21(8), 2321–2343.
- [6] Wang, T., Xiao, F., Amirhanian, S., Huang, W., & Zheng, M. (2017). A review on low temperature performances of rubberized asphalt materials. *Construction and Building Materials*, 145, 483–505.
- [7] Shafabakhsh, G., Sadeghnejad, M., & Ebrahimnia, R. (2021). Fracture resistance of asphalt mixtures under mixed-mode I/II loading at low-temperature: Without and with nano SiO<sub>2</sub>. *Construction and Building Materials*, 266, 120954.



- [8] Fakhri, M., Siyadati, S. A., & Aliha, M. R. M. (2020). 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*, 261, 119939.
- [9] Zhou, F., Im, S., Hu, S., Newcomb, D., & Scullion, T. (2017). Selection and preliminary evaluation of laboratory cracking tests for routine asphalt mix designs. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup1), 62–86.
- [10] Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J., & Huang, Z. (2020a). Improving mechanics behavior of hot mix asphalt using graphene-oxide. *Construction and Building Materials*, 254, 119261.
- [11] Zhou, B., Pei, J., Zhang, J., Guo, F., Wen, Y., & Luo, P. (2020). Comparison of Fracture Test Methods for Evaluating the Crack Resistance of Asphalt Mixture. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), 8745–8758.
- [12] Fakhri, M., & Mottahed, A. R. (2021). Improving moisture and fracture resistance of warm mix asphalt containing RAP and nanoclay additive. *Construction and Building Materials*, 272, 121900.
- [13] Mansourian, A., Razmi, A., & Razavi, M. (2016). Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers. *Construction and Building Materials*, 117, 37–46.
- [14] Fakhri, M., Shahryari, E., & Ahmadi, T. (2022). Investigate the use of recycled polyvinyl chloride (PVC) particles in improving the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Construction and Building Materials*, 326, 126780.
- [15] Pirmohammad, S., Shokorlou, Y. M., & Amani, B. (2020). Laboratory investigations on fracture toughness of asphalt concretes reinforced with carbon and kenaf fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, 226, 106875.
- [16] Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J., & Huang, Z. (2020b). Physical properties of graphene-oxide modified asphalt and performance analysis of its mixtures using response surface methodology. *International Journal of Pavement Engineering*, 1–15.
- [17] Zhu, J., Zhang, K., Liu, K., & Shi, X. (2020). Adhesion characteristics of graphene oxide modified asphalt unveiled by surface free energy and AFM-scanned micro-morphology. *Construction and Building Materials*, 244, 118404.
- [18] Tarcan, R., Todor-Boer, O., Petrovai, I., Leordean, C., Astilean, S., & Botiz, I. (2020). Reduced graphene oxide today. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(4), 1198–1224.
- [19] Singh, B. B., Mohanty, F., Das, S. S., & Swain, S. K. (2020). Graphene sandwiched crumb rubber dispersed hot mix asphalt. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 652–667.
- [20] Xu, G., & Wang, H. (2017). Molecular dynamics study of oxidative aging effect on asphalt binder properties. *Fuel*, 188, 1–10.
- [21] Wang, J., Jia, H., Tang, Y., Ji, D., Sun, Y., Gong, X., & Ding, L. (2013). Enhancements of the mechanical properties and thermal conductivity of carboxylated acrylonitrile butadiene rubber with the addition of graphene oxide.
- [22] Zhu, J., Zhang, K., Liu, K., & Shi, X. (2019). Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 217, 273–282.
- [23] Liu, K., Zhang, K., & Shi, X. (2018). Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 163, 880–889.
- [24] Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Gámiz, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Mechanical and thermal properties of graphene modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 180, 265–274.
- [25] Wang, R., Yue, M., Xiong, Y., & Yue, J. (2021). Experimental study on mechanism, aging, rheology and fatigue performance of carbon nanomaterial/SBS-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 268(xxxx), 121189.
- [26] Jyothirmmai, B., Kiranmai, M. H., & Vagdevi, K. (2020). Graphene reinforces asphalt–Doubles durability of road. *AIP Conference Proceedings*, 2269(1), 30085. AIP Publishing LLC.
- [27] Wang, R., Qi, Z., Li, R., & Yue, J. (2020). Investigation of the effect of aging on the thermodynamic parameters and the intrinsic healing capability of graphene oxide modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 230, 116984.
- [28] Fakhri, M., & Shahryari, E. (2021). The effects of Nano Zinc Oxide (ZnO) and Nano Reduced Graphene Oxide (RGO) on moisture susceptibility property of Stone Mastic Asphalt (SMA). *Case Studies in Construction Materials*, 15(June), e00655.
- [29] Pirmohammad, S., Shokorlou, Y. M., & Amani, B. (2020). Corrigendum to “Laboratory investigations on fracture resistance of asphalt concretes reinforced with carbon and kenaf fibers at– 15° C” [Eng. Fract. Mech. 226 (2020) 106875]. *Engineering Fracture Mechanics*, 230, 106977.
- [30] Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Martin, A. E., Daniel, J. S., & Salari, S. (2018). Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 167, 286–298.
- [31] Kavussi, A., & Motevalizadeh, S. M. (2021). Fracture and mechanical properties of water-based foam warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 269(xxxx), 121332.

- [32] Razmi, A., & Mirsayar, M. M. (2018). Fracture resistance of asphalt concrete modified with crumb rubber at low temperatures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(3), 265–273.
- [33] Golchin, B., Safayi, R. (2018). Effect of Carbon Fibers on Fracture Toughness of Asphalt Mixtures Using Linear Elastic Fracture Mechanics. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 4(2), 77-92. doi: 10.22075/jtie.2018.13530.1269.
- [34] Mansourian, A., Razmi, A., Razavi, M. Mohammad Aliha, M. R. (2019). Evaluation of fracture toughness of warm-mix asphalt containing natural and synthesis fibers at Low temperatures, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 35.2(2.2), 29-38.
- [35] Kavussi, A., Motevalizadeh, S. (2019). Determination of Fracture Properties of Warm Mix Asphalt at Low Temperatures Based on SCB Results. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 5(2), 1-16. doi: 10.22075/jtie.2019.17747.1387.
- [36] Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C., & Wistuba, M. P. (2018). Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations. *Road Materials and Pavement Design*, 19(3), 591–604.
- [37] shahryari, E., Fakhri, M. (2022). Investigation of mechanical properties of stone mastic asphalt mix (SMA) modified with Nano Reduced Graphene Oxide. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, (), -. doi: 10.22075/jtie.2022.26070.1586.