



## ارزیابی مشخصه‌های مخلوط‌های آسفالتی گرم اصلاح شده با نانوگرافن

کیومرث قلندری شمایی، میثم عفتی\*، سید محمد میرعبدالعظیمی

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰  
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

### کلمات کلیدی:

مخلوط آسفالتی گرم  
شیار شدگی  
خستگی  
حساسیت رطوبتی  
نانوگرافن

**خلاصه:** یکی از روش‌های مورد استفاده در زمینه بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از مواد افزودنی به مخلوط‌های آسفالتی است. از افزودنی‌های مورد استفاده که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند می‌توان به مواد نانو اشاره کرد که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند بسیار مورد استقبال قرار گرفته‌اند. در این پژوهش به بررسی اثر نانوگرافن بر مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی گرم پرداخته شده است. به این منظور قیر در درصد‌های ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی قیر، اصلاح و با انجام آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و رئومتر برش دینامیکی، مقدار نانوگرافن ۰/۵ درصد انتخاب شد. سپس به منظور بررسی مشخصات عملکردی مخلوط‌ها آزمایش‌های بار محوری مکرر، مدول برجهنگی، خستگی به روش کشش غیرمستقیم انجام گرفت. همچنین به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها آزمایش‌های کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌ها در دو حالت خشک و مرطوب صورت گرفت. نتایج نشان از کاهش تغییر شکل نهایی، افزایش مدول برجهنگی در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ به ترتیب به مقدار ۱۵، ۳۶ و ۵۴ درصد بود. همچنین در برخی از نمونه‌ها عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در برابر مخلوط‌های متداول تا ۵۵ درصد بهبود یافت. افزایش شاخص TSR در آزمایش کشش غیرمستقیم نشان از بهبود عملکرد نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های متداول و کاهش حساسیت آن‌ها در برابر رطوبت بود تا جایی که مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اصلاح شده در حالت خشک و مرطوب نسبت به نمونه‌های متداول به ترتیب حدود ۲۳ درصد و ۳۸ درصد افزایش داشته است.

### ۱- مقدمه

توجه به خواص ویژه‌ای از جمله سطح ویژه بالا، ویژگی‌های ساختاری که دارند بتوانند عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدگی، خستگی و ترک‌های حرارتی را بهبود ببخشند. از افزودنی‌ها عموماً جهت افزایش دوام و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدگی، خستگی و ترک خوردگی حرارتی استفاده می‌شود. شیار شدگی در اثر تغییر شکل مخلوط‌های آسفالتی یکی از مکانیزم‌های اصلی خرابی در روسازی‌های آسفالتی است که در هر شرایط آب و هوایی به خصوص در دماهای بالا می‌تواند ایجاد شود که در نهایت منجر به کاهش عمر روسازی می‌شود [۵]. در دهه‌های اخیر کاربرد تکنولوژی نانو در صنعت روسازی جهت افزایش کیفیت و دوام مخلوط‌های آسفالتی به سرعت رشد کرده است. از مواد نانو می‌توان در تهیه مخلوط‌های مقاوم در برابر شرایط ترافیکی و محیطی استفاده کرد چرا که دامنه اندازه ذرات در علم نانو به ایجاد خواص جدید و منحصر به فرد این مواد کمک می‌کند [۶]. نانو مواد دارای ویژگی‌های مورفولوژیکی هستند که باعث می‌شود دارای ویژگی‌های خاصی نسبت به مواد با اندازه‌های معمولی

بتن آسفالتی یکی از مواد پرکاربرد در ساخت روسازی‌ها راه و فرودگاه است. محققان همواره سعی داشته‌اند تا با بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی مقاومت این مخلوط‌ها را در برابر خرابی‌ها افزایش داده تا هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی‌ها را کاهش دهند [۱]. آسیب‌هایی که قبل از پایان عمر مفید روسازی نمایان می‌شوند شامل خرابی‌های شیار شدگی، تغییر شکل دائمی و خستگی و ترک‌های حرارتی می‌باشند. با توجه به اینکه بازسازی و تعمیر این خرابی‌ها ممکن است هزینه‌بر باشد از این رو به منظور جلوگیری یا به تأخیر انداختن زمان ظهور این خرابی‌ها محققان از روش‌های مختلفی استفاده می‌کنند [۲ و ۳]. با توجه به اینکه قیر حدود ۵ تا ۷ درصد وزنی و ۱۳ تا ۱۵ درصد حجم مخلوط‌های آسفالتی را تشکیل می‌دهد نقش بسیار مهمی در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند [۴]. یکی از این روش‌ها اصلاح قیر توسط مواد مختلف است. به نظر می‌رسد مواد نانو با

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Meysameffati@Guilan.ac.ir



باشند. این ویژگی‌ها به دلیل اندازه‌های بسیار کوچک و سطح ویژه بسیار بالا و نیز نسبت طول بسیار زیاد ذرات به ضخامتشان است. افزودن نانو مواد به مواد دیگر ممکن است به برخی از محدودیت‌های ساختاری مواد غلبه کرده و مخلوط‌های آسفالتی هم از این شرایط مستثنی نیستند [۷]. از سال ۲۰۰۴ که گرافن کشف شد به دلیل خواص ویژه‌ای که داراست توجه بسیاری از پژوهشگران را در صنعت مهندسی به خود معطوف کرده است. از کامپوزیت‌های گرافنی به جای فولاد در بدنه فضاپیماها و همچنین ساخت ایستگاه‌های فضایی استفاده شود. جهت کاربردهای الکترونیکی از جمله کاربرد در ترانزیستورها استفاده می‌شود. در صفحات لمسی، نمایشگرهای کریستال مایع (LCD) و دیودهای نوری آلی (OLED) نیز کاربرد دارد. گرافن در بسیاری از زمینه‌های دیگر از جمله مهندسی پزشکی، فیلتراسیون، و دارویی کاربرد دارد. لذا کاربرد این ماده در علوم مختلف باعث شد تا در این پژوهش به بررسی تاثیر این ماده بر روی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شود [۸].

#### ۱-۱- پیشینه تحقیق

در ده‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از مواد نانو انجام شده است. در سال ۲۰۱۶ مبارکی و همکاران با استفاده از نانو اکسید آلومینیم و پلیمر ASA به اصلاح قیر در درصد‌های ۳، ۵ و ۷ پرداختند و خواص قیر را در دماهای بالا بررسی کردند. اصلاح قیر در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. جهت تعیین ویسکوزیته قیر اصلاح شده از آزمایش ویسکوزیته دورانی استفاده شد و همچنین پارامتر شیار شدگی نیز برای مقادیر مختلف با استفاده از آزمایش رئومتر برش دینامیکی بررسی شد. نتایج نشان از بهبود خواص قیر اصلاح شده تا میزان ۰/۵٪ از هر افزودنی و سپس کاهش این خواص می‌باشد که نشان از این است که این درصد به عنوان درصد بهینه هر دو نوع افزودنی است [۹]. در سال ۲۰۱۶ هانگژیان و همکاران [۱۰] به بررسی اثر نانوگرافن بر بتن پرداختند. آن‌ها به اصلاح نمونه‌ها با ۱/۵ درصد نانوگرافن پرداختند و در مقایسه با نانو اکسید تیتانیوم و نانوسیلیس، نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد نانوگرافن عملکرد بسیار بهتری در برابر نفوذ و انتشار کلرید، و عمق نفوذ آب داشتند تا جایی که ضریب انتقال نمونه‌های حاوی گرافن تا ۸۰ درصد کاهش یافت. سالتان و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر نانو سیلیکا بر روی خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی مطابق طرح اختلاط سوپرپیو پرداختند. در این پژوهش نانوسیلیکا در درصد‌های ۰/۱،

۰/۳ و ۰/۵ درصد به قیر افزوده شد که مطابق با نتایج بهترین عملکرد در ۰/۳ درصد از نانوسیلیکا بوده است. در این پژوهش قیر تا دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد و با مخلوط‌کن دور بالا با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲ ساعت انجام شد. در دمای همچنین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مطابق آزمایش لاتمن اصلاح شده و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش حاکی از بهبود مقاومت در برابر شیار شدگی و افزایش عمر خستگی بود و نیز حساسیت کمتری نسبت به رطوبت از خود نشان دادند [۴]. مقدس‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی اثر نانو مواد بر روی پتانسیل شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم پرداختند. در این پژوهش از دی اکسید تیتانیوم، آلومینیم اکسید، اکسید آهن و اکسید روی در مقیاس نانو به عنوان افزودنی استفاده شد و سپس آزمایش‌های متداول قیر مثل درجه نفوذ، شکل‌پذیری، نقطه نرمی و ویسکوزیته دورانی به منظور تعیین مشخصات قیر بر روی آن انجام شد. به منظور ایجاد یک مخلوط همگن و پخش مناسب ذرات نانو در قیر عمل اختلاط در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۰ الی ۳۰ دقیقه با سرعت ۲۸۰۰۰ دور در دقیقه انجام شد. پس از اصلاح قیر آزمایش خزش استاتیکی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج این پژوهش نشان از کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه اشتعال و شکل‌پذیری و کاهش پتانسیل شیار شدگی مخلوط‌ها و افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی بود [۱۱]. در سال ۲۰۱۸ ناوارو و همکاران به بررسی اثر گرافن بر روی مشخصات مکانیکی و حرارتی قیر پرداختند. در این پژوهش گرافن در درصد‌های ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد و به مدت حداقل ۱۰ دقیقه در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با قیر مخلوط شد. در این پژوهش مقدار گرافن بهینه چیزی در حدود ۰/۵ تا ۱ درصد انتخاب شد. نتایج نشان از افزایش مدول پیچیدگی و کاهش حساسیت قیر در برابر دما و بهبود شاخص شیار شدگی قیر بود هر چند برای درصد‌های بالاتر ممکن است کاهش حدود ۱۰ درصدی برای زاویه فاز مشاهده شود [۸]. طاهرخانی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر نانوسیلیکا و نانوزایکوسل بر روی مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. قیر در درصد‌های ۱، ۳ و ۵ درصد نانوسیلیکا و ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد نانوزایکوسل با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد اصلاح شد. آزمایش کشش غیرمستقیم و خزش دینامیکی بر روی نمونه‌ها نشان می‌دهد بهترین عملکرد در برابر شیار شدگی و رطوبت را به ترتیب نمونه‌های اصلاح شده با ۵ درصد نانوسیلیکا و ۰/۱ درصد نانوزایکوسل دارند [۱۲]. چلوئیان و شفاخش در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر نانو اکسید آلومینیم بر روی خواص

برجهندگی انجام شد. نتایج نشان از افزایش ۱۰ درصدی TSR نمونه‌ها و افزایش ۱۲ درصدی مدول برجهندگی در نمونه‌ها بود. همچنین کاهش افت شاخص TSR در سیکل‌های مختلف ذوب- یخ در نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های کنترل بود [۱۵].

علیرغم اینکه در پژوهش‌های متعدد [۱۶-۱۸] به بررسی تاثیر مواد و افزودنی‌های مختلفی از جمله نانولوله‌های کربنی، گرافیت، اکسید گرافن و بسیاری از مشتقات دیگر کربن بر روی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است، نانوگرافن به عنوان یکی از مشتقات کربن و با توجه به ویژگی‌هایی که از این ماده بیان شد کمتر مورد توجه قرار گرفته و استفاده از این ماده محدود به قیر بوده و انتظار می‌رود استفاده از این ماده به عنوان افزودنی در بهبود خصوصیات دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم نتایج جدیدی را حاصل کند. لذا در این پژوهش سعی بر آن شده است تا علاوه بر بررسی تاثیر خصوصیات این ماده بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی به بررسی پتانسیل شیار شدگی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانوگرافن پرداخته شود.

## ۲- اهداف پژوهش

یکی از نانومواد که تاکنون در تولید و بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی کمتر مورد توجه قرار گرفته نانوگرافن است. در این پژوهش هدف، بررسی تاثیر نانوگرافن بر روی مشخصه‌های دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی است. مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از:

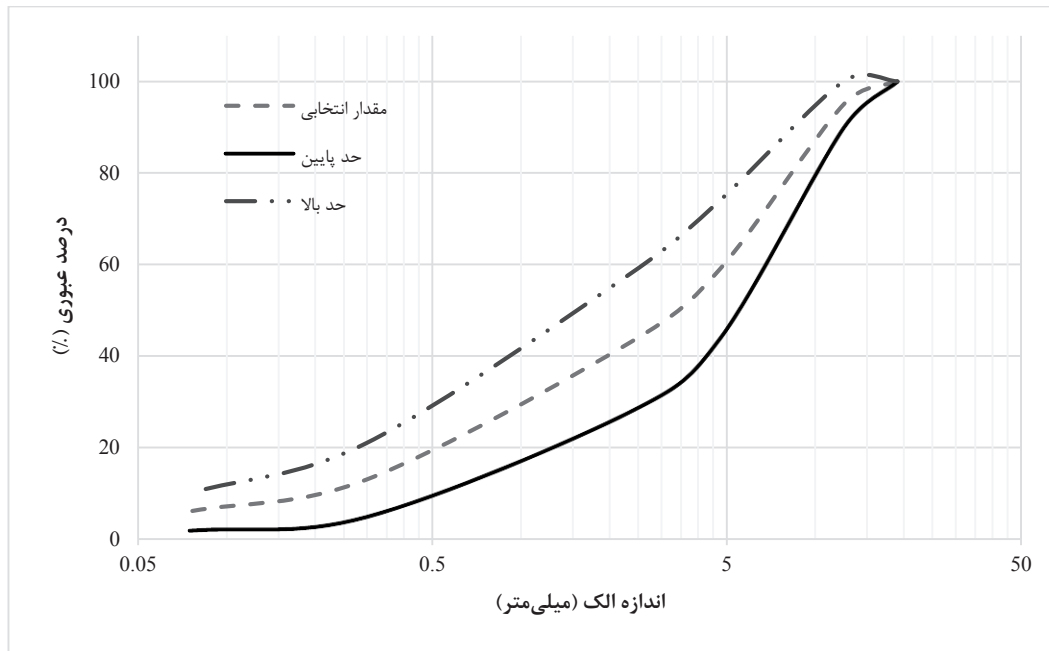
- بررسی تاثیر نانوگرافن بر روی خواص قیرهای اصلاح شده
- بررسی تاثیر نانوگرافن بر پتانسیل شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی
- بررسی تاثیر استفاده از قیر اصلاح شده با نانوگرافن بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی
- سنجش تاثیر استفاده از نانوگرافن بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی
- ارزیابی میزان حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانوگرافن

## ۳- مصالح و آماده‌سازی نمونه‌ها

### ۳-۱- مصالح

قیر مورد استفاده در این پژوهش از نوع قیر ۷۰-۶۰ از شرکت نفت جی اصفهان بوده و مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است. مصالح

مخلوط‌های آسفالتی سنگدانه‌ای پرداختند. آن‌ها قیر را در درصدهای ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ اصلاح کردند. جهت بررسی خصوصیات این مخلوط‌ها آزمایش‌های خزش دینامیکی در سطوح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه و سطوح تنش ۳۵۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. نتایج نشان داد در تمامی سطوح دمایی در تنش ۳۵۰ نمونه‌های اصلاح شده با ۰/۶ و در سطح تنش ۵۰۰ نمونه‌های اصلاح شده با ۰/۹ درصد کمترین میزان خزش را دارا بودند. همچنین با انجام آزمایش اثر چرخ به این نتیجه رسیدند که کمترین عمق شیار مربوط به نمونه‌های اصلاح شده با ۰/۶ درصد نانواکسید آلومینیم است. همچنین نتایج آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم مشخص کرد نمونه‌های اصلاح شده با ۰/۶ درصد نانو بهترین مقاومت در برابر خستگی را دارند [۱۳]. در سال ۲۰۲۰ عابد و همکاران به بررسی تاثیر پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا در مقیاس نانو و استایرن-بوتادین-استایرن بر روی عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. در این پژوهش قیر در درصدهای وزنی ۳ و ۵ درصد اصلاح گردید و با انجام آزمایش‌های سوپریو مانند DSR، RTFO، RV، PAV به بررسی عملکرد قیر اصلاح شده پرداخته شد. جهت بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی آزمایش‌های wheel Track و IDT انجام شد. نتایج نشان داد نمونه‌های اصلاح شده با پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا در مقیاس نانو نسبت به نمونه‌های اصلاح شده با استایرن-بوتادین-استایرن و نمونه‌های متداول دارای عمق شیار کمتری بوده و در مقابل شیار شدگی عملکرد بهتری داشته و همچنین با توجه به نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم در شرایط برابر، نمونه‌های اصلاح شده با پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا در مقیاس نانو نسبت به نمونه‌های اصلاح شده با استایرن-بوتادین-استایرن و نمونه‌های متداول عملکرد بهتری دارند [۱۴]. حامدی در سال ۲۰۲۰ به بررسی اثر نانواکسید مس بر روی خصوصیات رئولوژیکی قیر و مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. در این پژوهش نمونه‌ها با ۱ و ۲ درصد نانواکسید مس اصلاح شدند و تحت آزمایش‌های بار محوری مکرر و خستگی به روش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. نتایج نشان از این بود که تغییر شکل ماندگار نمونه‌های حاوی این افزودنی به ترتیب ۳۵/۱۳ و ۳۷/۱۸ درصد کاهش یافته‌اند. همچنین عمر خستگی نمونه‌های اصلاح شده در دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۶/۹ و ۳۱/۶ درصد بوده است [۶]. ماهپور و همکاران در سال ۲۰۲۱ از نانواکسید تیتانیوم جهت بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند. جهت انجام این امر آن‌ها قیر را در درصدهای ۳ و ۶ درصد نانواکسید تیتانیوم اصلاح کرد و به منظور بررسی تاثیر این ماده، آزمایش‌های کشش غیرمستقیم و مدول



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی

Fig. 1. Grading chart of aggregates

جدول ۱. خصوصیات قیر پایه مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Characteristics of base bitumen used in this research

ویژگی	وزن مخصوص در دمای ۲۵	درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)	نقطه نرمی (سانتی‌گراد)	نقطه اشتعال (سانتی‌گراد)	شکل پذیری (سانتی‌متر)	درجه خلوص (درصد)
مقدار	۱/۰۴	۶۴	۵۰	۲۵۳	۱۰۰	۹۹
استاندارد مربوطه	ASTM D70-76	ASTM D5-73	ASTM D36-76	ASTM D92-78	ASTM D113-79	ASTM D2042-76

برای یک فیلم نازک فرضی از فولاد با ضخامت مشابه گرافن، (ضخامت لایه‌ای ۳۵/۳ آنگستروم از گرافیت) مقاومت شکست در حدود ۰/۴۲ - ۰/۰۸۴ نیوتن بر متر مربع خواهد بود و نشانگر آن است که استحکام گرافن ۱۰۰ برابر فولاد است. ویژگی‌های برجسته گرافن که تاکنون گزارش شده‌اند در جدول ۲ آمده است. شکل ۲ پودر نانوغرافن مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد [۲۰]:

سنگی مورد استفاده نیز از نوع مصالح سیلیسی بوده و دانه‌بندی همه نمونه‌ها بر اساس دانه‌بندی شماره آیین‌نامه ۴ آشتو است نمودار دانه‌بندی مصالح سنگ در شکل ۱ مشخص است [۱۹]. نانوغرافن به دلیل داشتن ویژگی‌های غیرمعمولی و مکانیکی، دمایی، اپتیکی، مساحت سطحی بسیار بالا، و امکان کنترل تمام این ویژگی‌ها از طریق عامل‌دار کردن شیمیایی، مورد توجه دانشمندان قرار دارد. مقاومت شکست گرافن ۴۲ نیوتن بر متر مربع است.

جدول ۲. مشخصات گرافن

Table 2. Nano-Graphene characteristics

ویژگی	گرافن	واحد
رسانایی دمایی	$5/3 \times 10^3$	(Wm-1K-1)
مدول الاستیسیته	۱ تا ۰/۵	(Tpa)
ضریب انبساط دمایی	$-6 \times 10^{-4}$	(K-1)
سطح ویژه	۲۶۳۰	(m <sup>2</sup> g-1)
مقاومت کششی	۱۳۰	(Gpa)



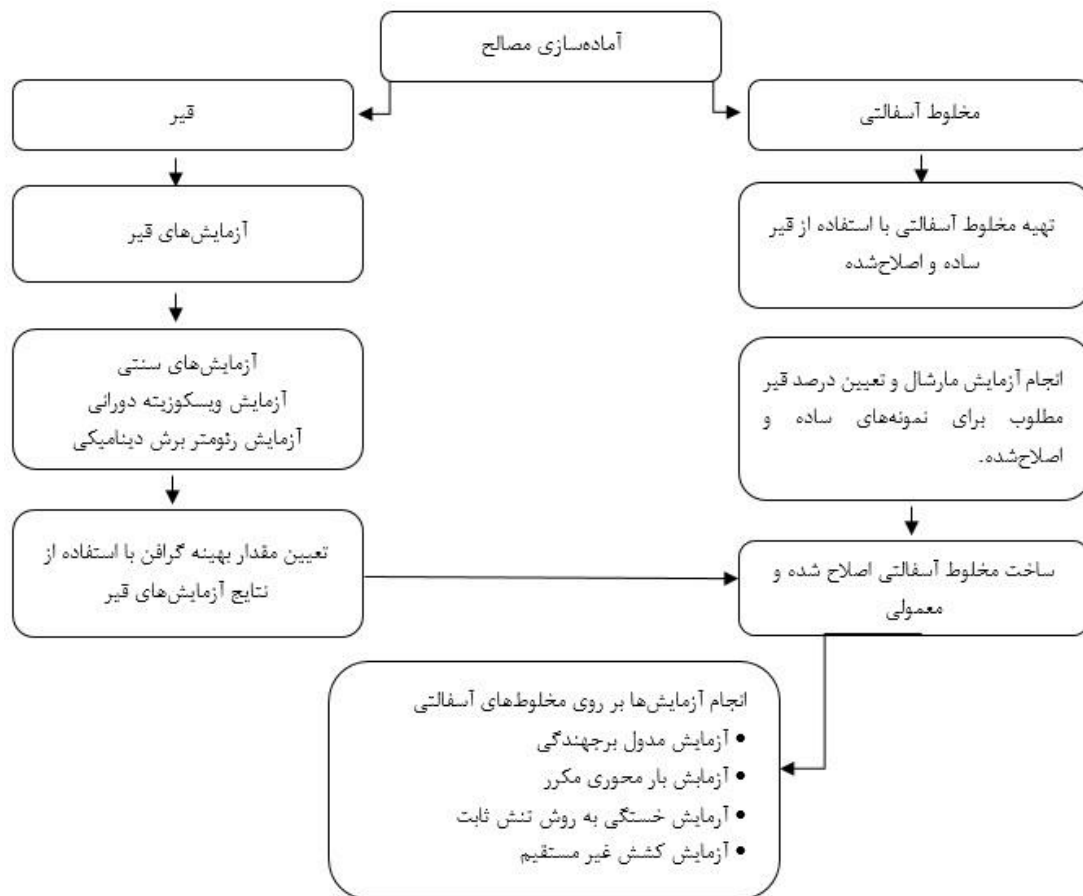
شکل ۲. پودر نانوغرافن مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 2. Nanographene powder used in this study

### ۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها نانوغرافن در درصدهای ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ (درصد وزنی قیر) به قیر اضافه شد. جهت دستیابی به مخلوط همگن و یکنواخت قیر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد و عمل اختلاط توسط یک مخلوط‌کن دور بالا با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۴۵ دقیقه انجام شد. انتخاب زمان و سرعت اختلاط به منظور ایجاد یک مخلوط همگن با توجه به تحقیقات پیشین و خواص مواد نانو صورت گرفت [۲۱].

جهت در نظر گرفتن تاثیر پیر شدگی کوتاه مدت قیر در اثر اصلاح بر روی نتایج حاصله، قیر ساده نیز در شرایط مشابه در همزن قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمایشات درجه نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری، ویسکوزیته دورانی و رئومتر برش دینامیکی مقدار نانوغرافن بهینه ۰/۵ درصد انتخاب شد. آزمایش مارشال بر اساس استاندارد ASTM D1559 جهت تعیین قیر بهینه در حالت متداول و اصلاح شده انجام شد و مقادیر قیر بهینه برای نمونه‌های متداول و اصلاح شده به ترتیب ۵/۴ و ۵/۶ درصد به دست آمد. شکل ۳ روند



شکل ۳. روند انجام فعالیت‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر

Fig. 3. The process of performing laboratory activities of the present study

۴-۱-۲- آزمایش ویسکوزیته دورانی  
 آزمایش ویسکوزیته دورانی طبق استاندارد ASTM D4402 و یا AASHTO TP48 جهت اندازه‌گیری کندروانی قیرها در دماهای بالا انجام می‌شود. این آزمایش جهت اختلاط مناسب، پمپاژ و جابجایی قیرهای ساده و اصلاح شده انجام می‌شود و کندروانی پیر نشده قیرها طبق مشخصاتشان در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس باید حداکثر ۳ پواز باشد. این آزمایش می‌توان برای بررسی تاثیر افزودنی‌های مختلف بر روی ویسکوزیته و روانی قیرها استفاده کرد [۲].

۴-۱-۳- آزمایش رئومتر برش دینامیکی  
 آزمون رئومتر برشی دینامیکی به منظور سنجش رفتار الاستیک و کندروان قیر و بررسی مقاومت در برابر شیار شدگی در دماهای بالا (مدول

آزمایشگاهی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

#### ۴- روش‌های آزمایشگاهی

۴-۱- آزمایش‌های قیر

۴-۱-۱- آزمایش‌های سنتی قیر

درجه نفوذ یک قیر، مقدار طولی (برحسب دهم میلی‌متر) است که در مدت ۵ ثانیه تحت اثر یک وزن ۱۰۰ گرمی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس فرو می‌رود. آزمایش نقطه نرمی که طبق تعریف درجه نرمی درجه حرارتی است که که یک قیر از حالت جامد به حالت روان در می‌آید. درجه یا نقطه نرمی درجه حرارتی است که در آن گلوله با وزن و قطر معین از داخل یک لایه قیر به قطر و ضخامت مشخص عبور کرده و به صفحه‌ای که در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از آن قرار دارد می‌رسد [۲۲].



و در سه سطح تنش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شد.

#### ۴-۴- آزمایش بار محوری مکرر (RLA)

در این پژوهش جهت بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدگی از آزمایش بار محوری مکرر استفاده شد. شکل ۴ مراحل ایجاد کرنش در یک نمونه‌ی آسفالتی در آزمایش بار محوری مکرر نشان می‌دهد. این نمودار نشان دهنده تغییر شکل دائمی ایجاد شده در نمونه در برابر تعداد سیکل‌های متناظر است [۲۷]. در مرحله اول علی‌رغم تعداد سیکل‌های کم تغییر شکل‌ها بزرگ خواهند بود. در ناحیه دوم نرخ افزایش مقدار کرنش تقریباً ثابت است و در ناحیه سوم که معمولاً با پیدایش ترک‌ها همراه است نرخ افزایش کرنش شدید بوده و تا گسیختگی نمونه ادامه خواهد داشت [۲]. در این پژوهش نمونه‌های متداول و اصلاح شده در سطوح تنش ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال و در دو دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد تحت آزمایش بار محوری مکرر قرار گرفتند.

#### ۴-۵- آزمایش کشش غیرمستقیم (ITST)

آزمایش مقاومت کششی به روش غیرمستقیم یک آزمایش مخرب است که در راستای قطر عمودی نمونه برای بررسی مقاومت ترک خوردگی مخلوط انجام می‌شود. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D6931 انجام می‌شود [۲۸ و ۲۹]. در این پژوهش جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانوگرافن از این آزمایش استفاده شد. مطابق با استاندارد AASHTO T 283 برای هر طرح ۳ نمونه عادی و ۳ نمونه تحت شرایط ساخته می‌شوند. نمونه‌ها باید دارای فضای خالی  $0.5 \pm 0.7$  درصد باشند. نمونه‌های تحت شرایط باید ابتدا بین ۷۰ تا ۸۰ درصد اشباع شوند و سپس به مدت حداقل ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد نگهداری شوند. سپس نمونه‌ها از فریزر خارج و باید به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شوند. نمونه‌های عادی نیز باید به مدت ۲ ساعت در حمام ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس مورد آزمایش قرار گیرند. در مقاومت کششی بیشینه نمونه‌ها توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۲۹]. همچنین نسبت مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط قرار گرفته به نمونه‌های خشک از رابطه ۴ تعیین می‌شود که این نسبت طبق استاندارد باید حداقل ۷۵ درصد باشد [۳۰]. در این رابطه D: قطر نمونه‌ها و t: ضخامت نمونه‌ها هستند. همچنین شکل ۵ نمودار تیپ مقاومت کششی برحسب زمان را در آزمایش کشش غیرمستقیم نشان می‌دهد.

مرکب  $G^*$  و زاویه فاز  $\delta$  که نشان دهنده رفتار الاستیک و کندروان قیر هستند) انجام می‌شود. این آزمون به منظور ارزیابی پارامتر مقاومت شیار شدگی در دماهای بالا به وسیله هندسه صفحات موازی در فرکانس بارگذاری ۱۰ رادیان بر ثانیه بر اساس استاندارد ASTM D7175 انجام می‌شود [۳]. جهت بررسی رفتار قیر در دماهای بالا از شاخص شیار شدگی  $G^*/\text{Sin}\delta$  استفاده می‌شود. رابطه ۱ مقدار کار تلف شده در هر چرخه در تنش ثابت در این آزمایش را نشان می‌دهد. بنابراین هر چه مقدار مدول مرکب  $G^*$  بیشتر و مقدار زاویه فاز  $\delta$  کمتر باشد رفتار قیر سخت‌تر و الاستیک‌تر بوده و با افزایش شاخص  $G^*/\text{Sin}\delta$  مقاومت در برابر شیار شدگی با کاهش میزان کار تلف شده، افزایش می‌یابد [۲۳].

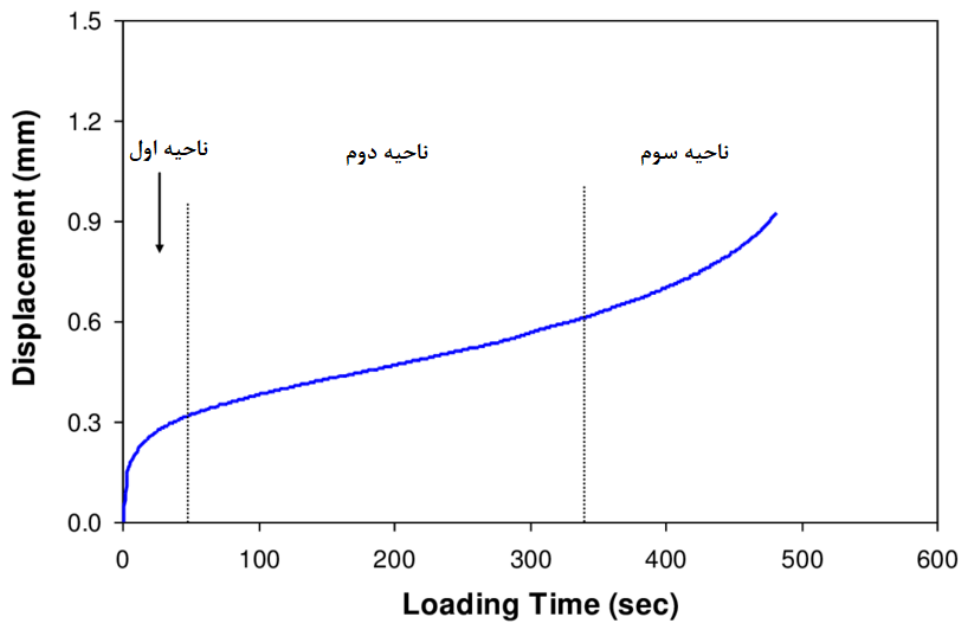
$$W_c = \pi \sigma_0^2 \left[ \frac{1}{G^* / \text{Sin}\delta} \right] \quad (1)$$

#### ۴-۲- آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم (ITSM)

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D 4123 جهت تعیین مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی استفاده می‌شود. در این پژوهش از دستگاه نائینگهام استفاده شد. این آزمایش در راستای قطر نمونه و با اعمال نیروی خطی با سیکل ۱/۰ ثانیه برای اعمال بار و سیکل ۹/۰ ثانیه استراحت برای نمونه‌ها انجام می‌شود. تغییر شکل افقی نمونه‌ها با توجه به ضریب پواسون ورودی توسط حسگرها اندازه‌گیری می‌شود و باید در محدوده الاستیک باشد [۲۴]. در این پژوهش جهت تعیین مدول برجهندگی دینامیکی نمونه‌های آسفالتی این آزمایش در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

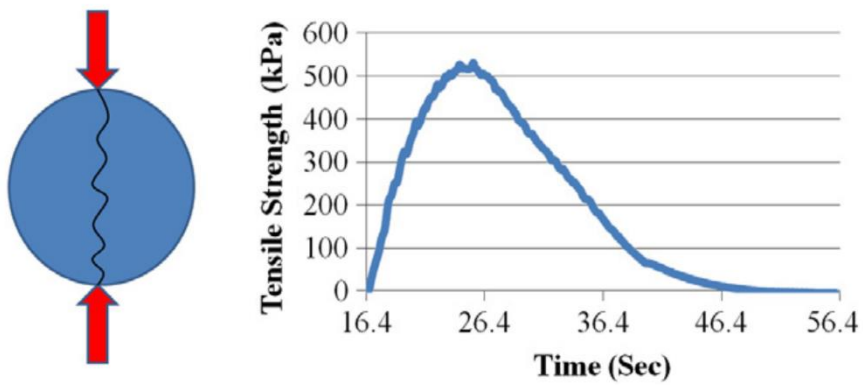
#### ۴-۳- آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم (ITFT)

آزمایش مقاومت در برابر خستگی مطابق با استاندارد BS EN12697-24 بر روی نمونه‌های دارای قطر ۱۰/۱۶ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد [۲۵]. آزمایش خستگی عموماً در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت انجام می‌شود. در حالت تنش ثابت، مقدار تنش ثابت نگه داشته می‌شود و با گذر زمان و افزایش تعداد سیکل‌ها، کرنش تا لحظه گسیختگی افزایش می‌یابد و تعداد سیکل‌های متناظر با کرنش گسیختگی ثبت می‌شود. نحوه بارگذاری در این آزمایش به صورت خطی و در امتداد محور قطرهای نمونه صورت می‌گیرد [۲۶]. در این پژوهش آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۴. منحنی تیپ خزش در آزمایش بار محوری مکرر [۲۲]

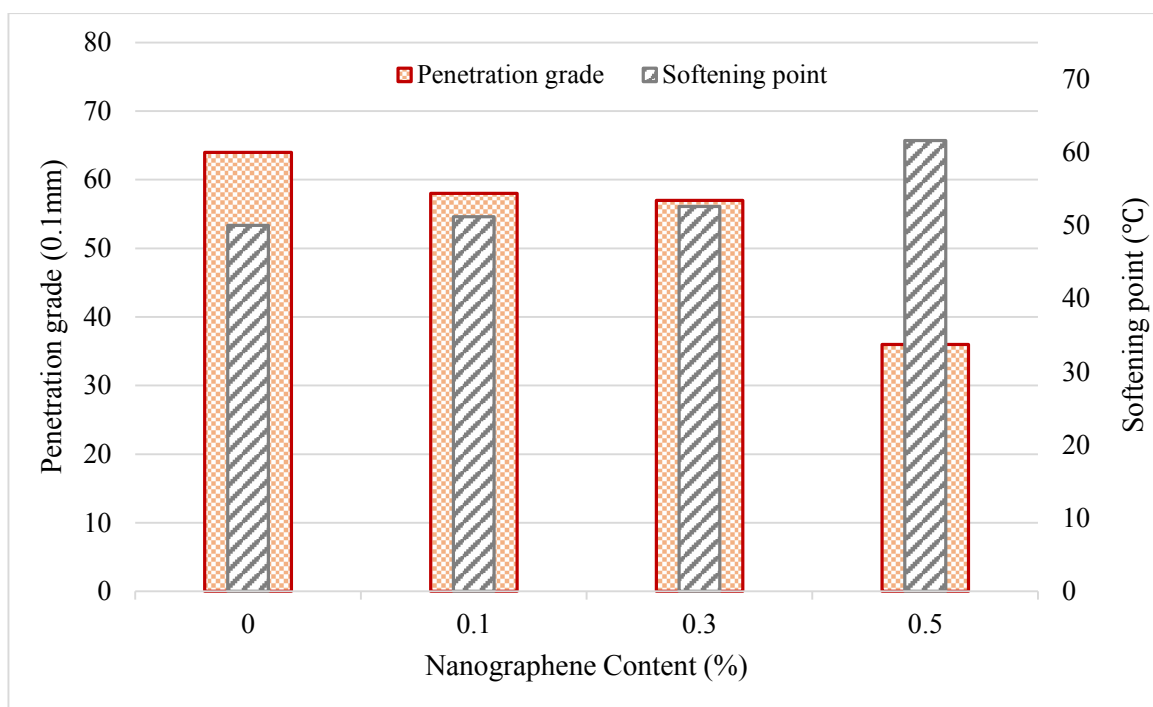
Fig. 4. Typical creep curves in repeated axial load tests



شکل ۵. نمودار مقاومت کششی برحسب زمان [۳۱]

Fig. 5. Tensile strength diagram in time





شکل ۶. نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی

Fig. 6. Test results of degree of penetration and softening point

ذرات نانوگرافن و زنجیره‌های هیدروکربنی قیر و در نتیجه افزایش سختی قیر اصلاح شده نسبت به قیر اولیه باشد. در نتیجه قیر اصلاح شده نسبت به قیر پایه تحت نیروهای برابر مقدار تغییر شکل کمتری را تجربه خواهد کرد. ضمن اینکه آسفالتین‌ها با ایجاد پیوندهایی با ذرات نانو، علاوه بر ایجاد پیوندی مستحکم‌تر، مانع جدا شدگی ذرات قیر شده که در نتیجه قیری با خواص بهتر تشکیل می‌شود. نقطه نرمی قیر مستقیماً با ویسکوزیته آن در ارتباط بوده و هر مقدار که نقطه نرمی بیشتر باشد به این معنی است که قیر دارای ویسکوزیته بیشتر و حساسیت کمتری نسبت به دما است. این موضوع به معنی افزایش ویسکوزیته و کاهش حساسیت قیر نسبت به حرارت است. افزایش نقطه نرمی در قیرهای اصلاح شده می‌تواند در اثر افزایش انرژی لازم برای شکستن پیوندهای بین ذرات نانو و زنجیره‌های هیدروکربنی قیر و یا در اثر پیر شدگی کوتاه مدت قیر در اثر فرایند اصلاح باشد.

#### ۵-۲- آزمایش ویسکوزیته دورانی

شکل ۷ نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی برای نمونه‌های کنترل و اصلاح شده را در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. بر اساس این

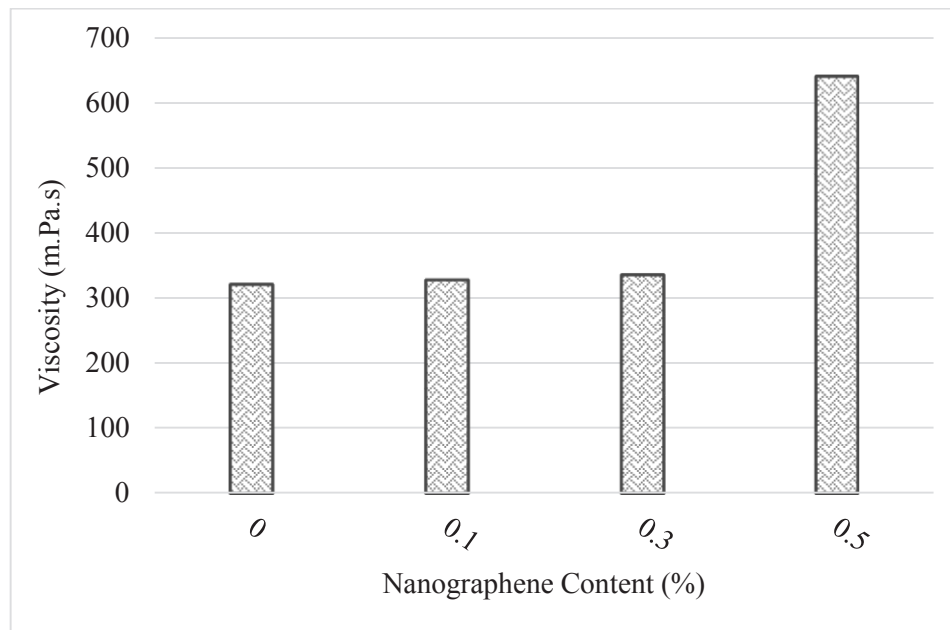
$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (2)$$

$$TSR = \left( \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \right) \times 100 \quad (3)$$

#### ۵- نتایج و بحث‌ها

##### ۵-۱- آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی

همانطور که در شکل ۶ مشخص است افزایش درصد نانوگرافن منجر به کاهش درجه نفوذ قیرهای اصلاح شده نسبت به نمونه اولیه آن شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است با افزایش مقدار نانوگرافن به ۰/۵ درصد بیشترین کاهش درجه نفوذ مشاهده شده است و سختی نسبی قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر اولیه افزایش یافته است. با توجه به ساختار کربنی نانوگرافن این امر می‌تواند به دلیل افزایش قدرت پیوند بین



شکل ۷. نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی

Fig. 7. Results of rotational viscosity test

ضوابط روسازی ممتاز است، برای قیرهای پیر نشده کمینه مقدار پارامتر  $G^*/\text{Sin}\delta$  جهت مقاومت در برابر شیار شدگی ۱ کیلوپاسکال تعیین کرده است لذا نمونه‌های کنترل و نمونه‌های حاوی ۰/۱ و ۰/۳ درصد نانوگرافن در دماهای بالا این معیار را برآورده نکرده‌اند اما نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد نانوگرافن در دماهای بالاتر عملکرد قابل قبولی خواهند داشت.

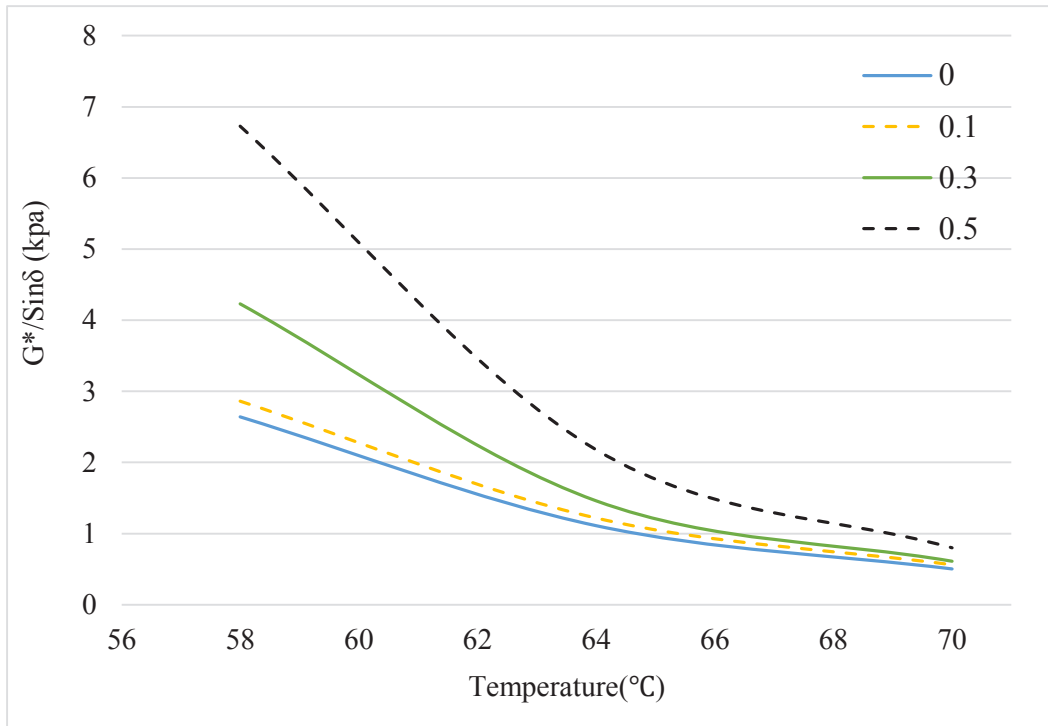
#### ۴-۵- آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM)

از این روش عموماً برای تحلیل و بررسی نحوه اختلاط قیر و مواد در مقیاس نانو استفاده می‌شود. شکل ۹ نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی برای قیرهای حاوی ۰/۵ درصد نانوگرافن را نشان می‌دهد. این تصویر پراکنندگی ذرات نانوگرافن در قیر در بزرگنمایی‌های مختلف از ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ برابر را نشان می‌دهد. همانطور که از این تصویر پیداست در برخی از نقاط ذرات نانوگرافن در محیط قیر به حالت لختگی مانده‌اند اما عموماً در جهات مختلف و تمام قسمت‌های نمونه کاملاً پراکنده شده‌اند. این تفاوت در شکل ظاهری نمونه‌ها به دلیل تفاوت در سطح مقطع آن‌ها است که به طور تصادفی از نقاط مختلف قیر نمونه‌گیری و عکس برداری شده‌اند. با قرارگیری صفحات نانوگرافن در جهات مختلف در نقاط مختلف قیر و سختی

نمودار افزودن نانوگرافن به قیر موجب افزایش ویسکوزیته نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های کنترل شده است. این افزایش ویسکوزیته می‌تواند در اثر تمایل جذب قیر و ذرات نانوگرافن باشد. وجود ذرات نانوگرافن در قیر می‌تواند موجب افزایش سختی و کاهش تغییر شکل‌های قیر در دمای ثابت شود. اگر چه این موضوع باعث افزایش دمای اختلاط و کاهش کارایی و افزایش هزینه‌ها می‌شود اما در طولانی مدت افزایش ویسکوزیته منجر به افزایش استحکام قیر و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر گرما و کاهش آسیب‌های ناشی از آن می‌شود [۳۲].

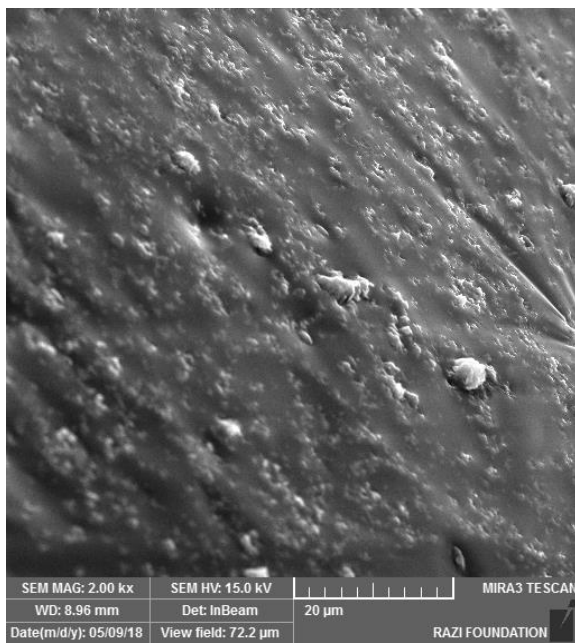
#### ۵-۳- آزمایش رئومتر برش دینامیکی

نتایج پارامتر شیار شدگی  $G^*/\text{Sin}\delta$  در حالت پیر نشده برای آزمایش رئومتر برش دینامیکی در شکل ۸ ارائه شده است. همانطور که از داده‌های ارائه شده در شکل ۸ مشخص است، استفاده از نانوگرافن در قیرهای اصلاح شده با کاهش همزمان زاویه فاز  $(\delta)$  و افزایش  $G^*$  همراه بوده است. این امر موجب افزایش  $G^*/\text{Sin}\delta$  شده که مطابق شکل در نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد نانوگرافن نسبت به نمونه‌های حاوی ۰/۳ و ۰/۱ درصد و نمونه‌های کنترل افزایش چشمگیری مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه

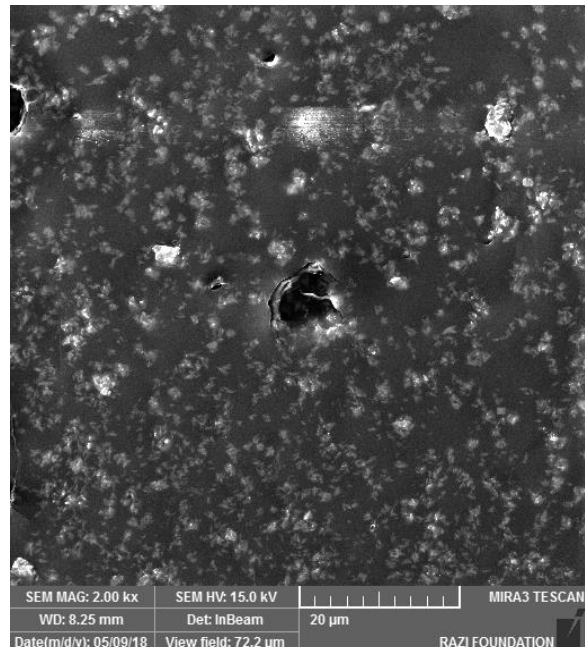


شکل ۸. تایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی و شاخص شیار شدگی  $G^*/\text{Sin}\delta$

Fig. 8. Dynamic shear rheometer test results and  $G^*/\text{Sin}\delta$  rutting index



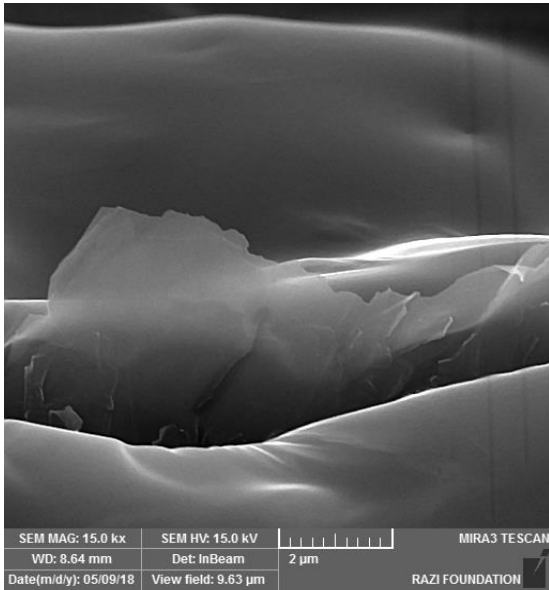
(ب)



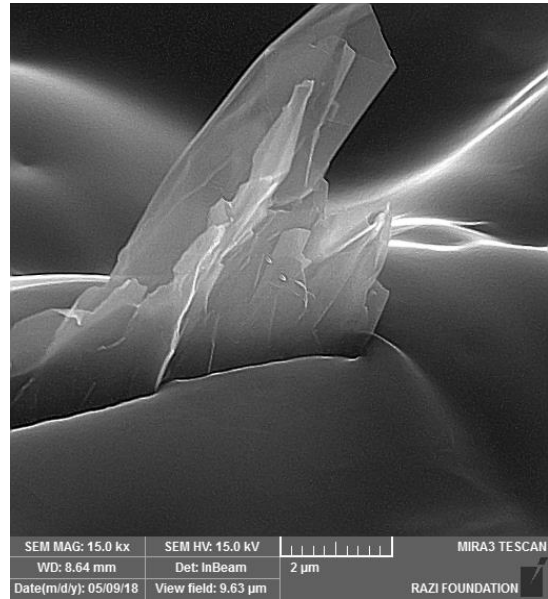
(الف)

شکل ۹. نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی بر روی قیر اصلاح شده با ۰/۵ درصد نانوگرافن (ادامه دارد)

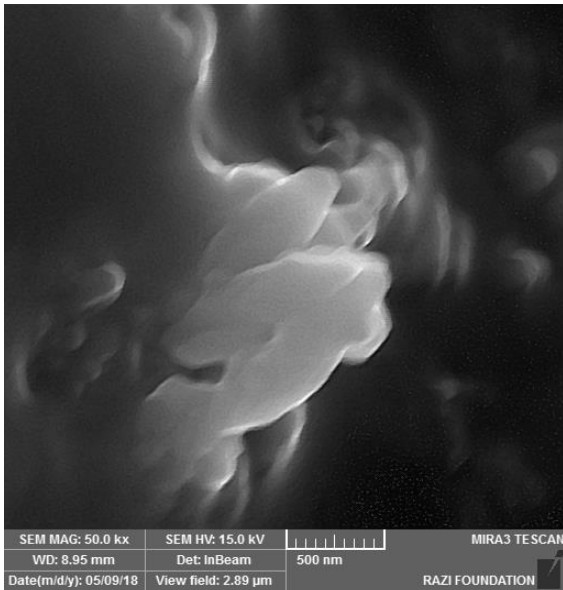
Fig. 9. Electron microscope test results on modified bitumen with 0.5% nano-graphene (Continude)



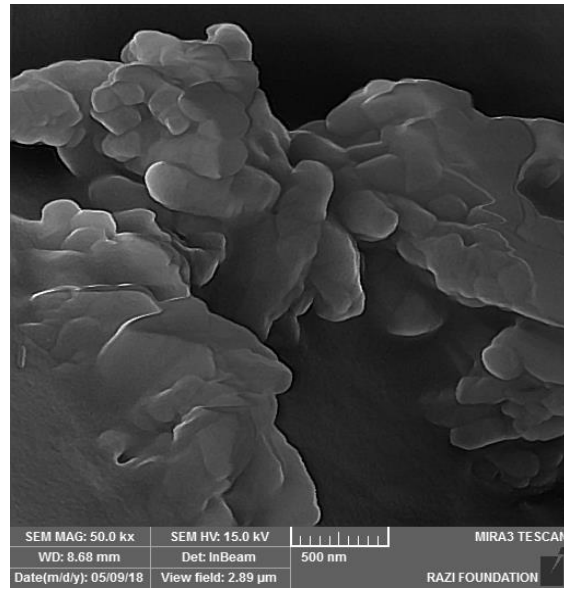
(د)



(ج)



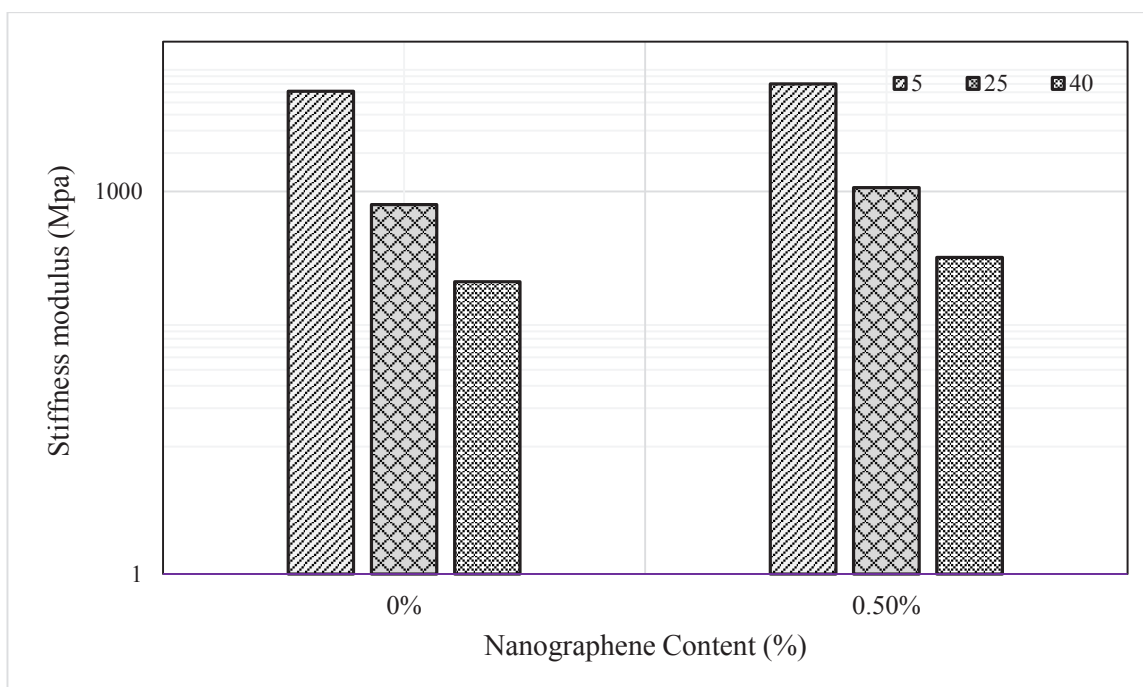
(ی)



(و)

شکل ۹. نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی بر روی قیر اصلاح شده با ۰/۵ درصد نانوگرافن

Fig. 9. Electron microscope test results on modified bitumen with 0.5% nano-graphene



شکل ۱۰. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

Fig. 10. Stiffness module test results

سنگدانه‌ها در حضور ذرات نانو می‌شود نیز می‌تواند عامل دیگری در جهت افزایش مدول برجهندگی نمونه‌ها باشد.

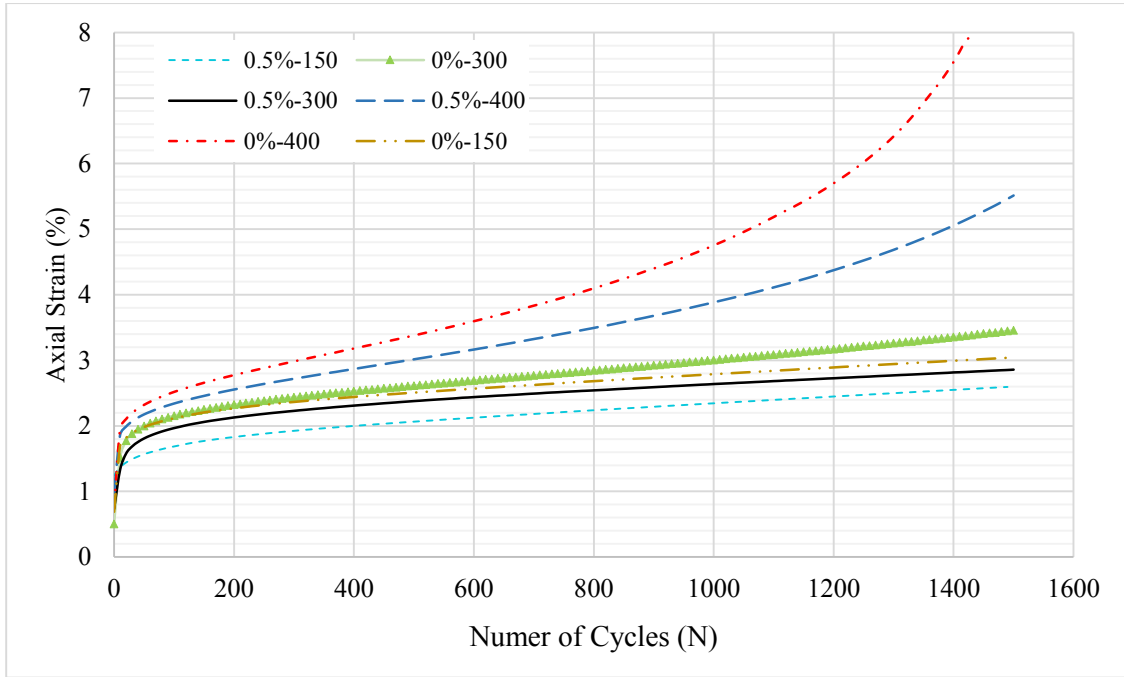
#### ۵-۶- آزمایش بار محوری مکرر

نتایج این آزمایش در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ در دو دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی ذرات نانوگرافن تغییر شکل نهایی کمتری نسبت به نمونه‌های متداول هستند. در واقع استفاده از نانوگرافن مقاومت مخلوط‌ها را در برابر تغییر شکل دائمی افزایش داده است. با افزایش سطح دما و تنش نیز مقادیر تغییر شکل‌های هر نمونه نسبت به نمونه‌های مشابه افزایش یافته است. مقدار کرنش نهایی نمونه‌های مورد آزمایش در دو حالت متداول و اصلاح شده در دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و تنش‌های مختلف به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آمده است. همانطور که از نمودار ۱۱ مشخص است با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ میزان تغییر شکل‌های نهایی افزایش یافته است. با توجه به اینکه عموماً پتانسیل شیار شدگی در اثر کاهش ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد افزایش ویسکوزیته قیر در اثر استفاده از نانوگرافن مطابق نتایج آزمایشات قیر می‌تواند باعث

بالای نانوگرافن، این مواد می‌توانند با افزایش محتوای آسفالتین (که گرافن به عنوان آسفالتین عمل می‌کند)، عملکرد نمونه‌ها را بهبود بخشد.

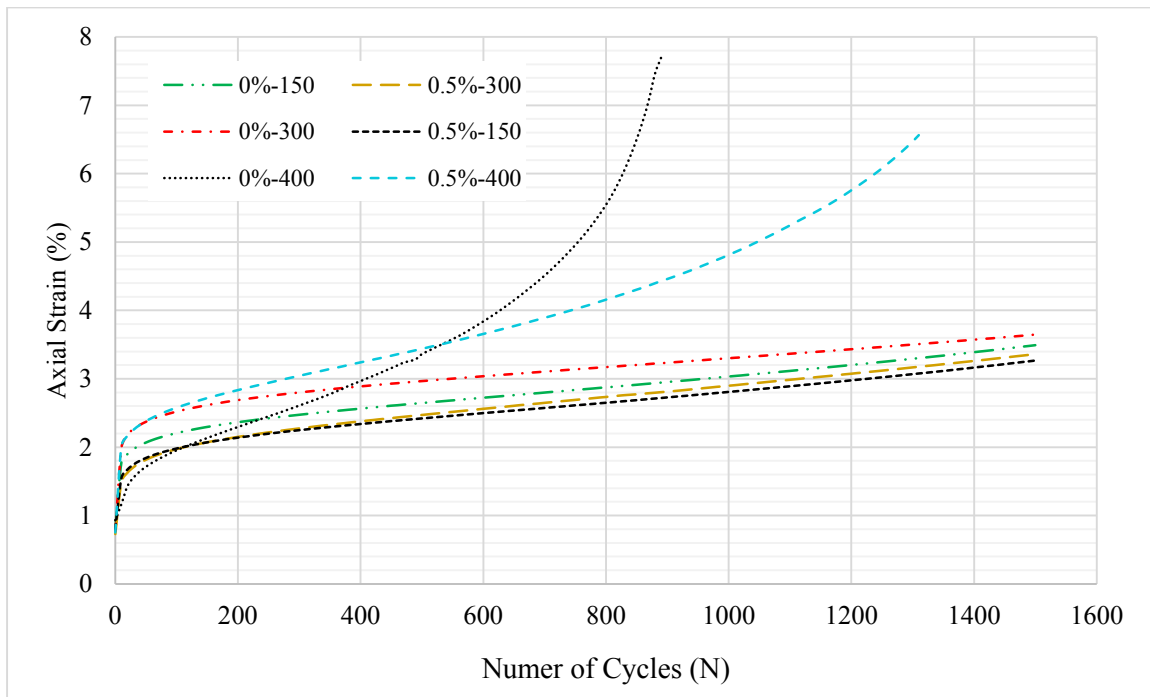
#### ۵-۵- آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم

نتایج آزمایش مدول برجهندگی مطابق شکل ۱۰ است. به طور کلی مدول برجهندگی قیر با افزایش حساسیت قیر نسبت به دما کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش مدول برجهندگی در اثر افزایش دما می‌تواند در اثر تضعیف ارتباط و چسبندگی بین چسباننده قیری و مصالح سنگی باشد. همانطور که از شکل ۱۰ برمی‌آید در اثر افزایش دما از ۵ به ۲۵ و ۴۰ مدول برجهندگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. مقدار مدول برجهندگی در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ برای نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های متداول به ترتیب ۱۵، ۳۶ و ۵۴ درصد افزایش یافته است. افزایش ویسکوزیته قیر در حضور نانوگرافن منجر به افزایش میزان برجهندگی نمونه‌ها می‌شود که این امر با توجه به بهبود خاصیت الاستیک آن منجر به افزایش توانایی تحمل تنش توسط مخلوط آسفالتی می‌شود. علاوه بر افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح شده، اندرکنش ذرات نانو- قیر با سطح سنگدانه که سبب افزایش جذب سطحی در قیر و



شکل ۱۱. نتایج آزمایش شیار شدگی در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد

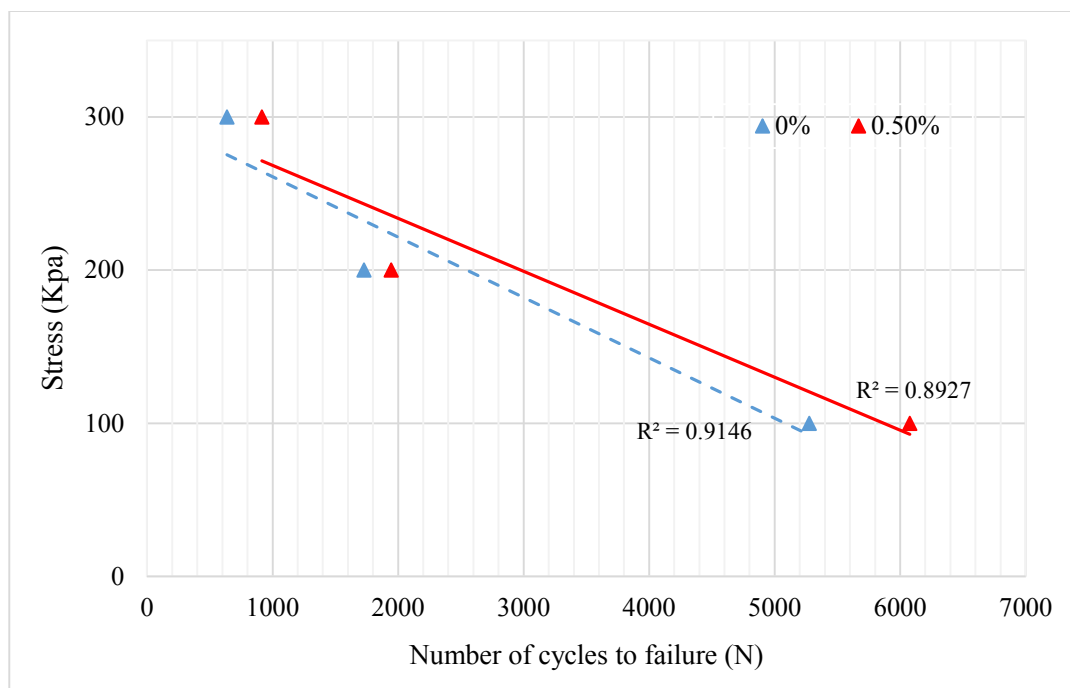
Fig. 11. Results of rutting test at 50 ° C



شکل ۱۲. نتایج آزمایش شیار شدگی در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد

Fig. 12. Results of rutting test at 60 ° C





شکل ۱۳. نتایج آزمایش خستگی در سطح ترافیک متوسط

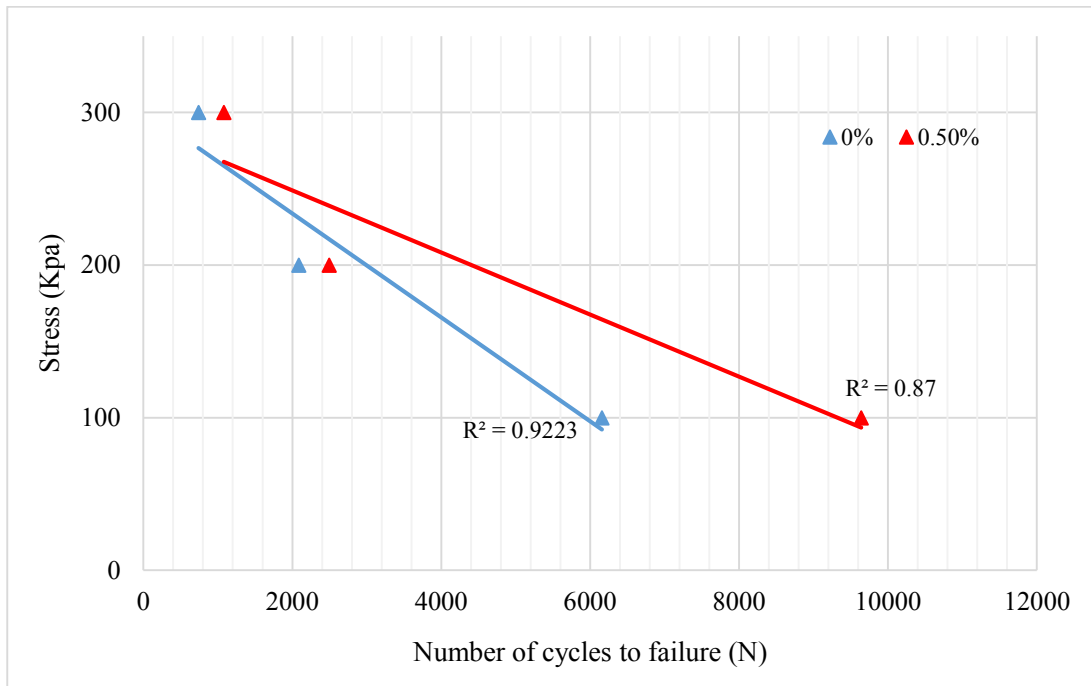
Fig. 13. Fatigue test results at moderate traffic levels

که ناشی از سطح ویژه بالای آن است و ایجاد چسبندگی زیاد بین قیر و مصالح سنگی رخ دهد. همچنین قابلیت کششی بالا در نانوگرافن نیز به این موضوع کمک کرده و بخشی از تنش‌ها را جذب می‌کند. این عوامل در کنار افزایش خاصیت الاستیک مخلوط آسفالتی که ناشی از وجود نانوگرافن در آن است سبب به تأخیر افتادن روند ایجاد و گسترش ترک‌ها می‌شود و در نتیجه عمر خستگی نمونه بهبود می‌یابد. ایجاد شبکه‌های دو بعدی نیز می‌تواند عامل دیگر این رویداد باشد. این شبکه‌های دو بعدی از صفحات نانوگرافن با ضخامت نانومتری و مولکول‌های قیر تشکیل می‌شود. صفحات نانوگرافن با قرار گرفتن میان مولکول‌های پلیمری قیر، باعث تقویت شبکه‌ی قیر شده و تا اندازه‌ای مقاومت مخلوط‌ها در برابر گسترش ترک‌های خستگی را افزایش می‌دهد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴،  $R^2$  به عنوان ضریب همبستگی چندگانه یا ضریب تعیین کننده شناخته می‌شود، که نشان دهنده سطح توضیح واریانس و تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل است. به طور کلی، این ضریب بین ۰ و ۱ محدود است، با مقادیر بالاتر نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل تا حد زیادی می‌توانند متغیرهای وابسته را توضیح دهند.

کاهش این تغییر شکل‌ها و در نهایت افزایش مقاومت مخلوط‌ها در برابر شیار شدگی شود. همچنین این امر می‌تواند در اثر عواملی چون چسبندگی بیشتر قیر و سنگدانه، افزایش مدول برجهندگی نمونه‌ها باشد. با توجه به کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی قیر در اثر اصلاح، در شرایط مشابه انتظار می‌رود نمونه‌های اصلاح شده دارای تغییر شکل کمتری نسبت به نمونه‌های متداول باشند.

#### ۵-۷- آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

همانطور که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص است نمونه‌های حاوی نانوگرافن در برابر نمونه‌های متداول از عملکرد خستگی بهتری برخوردارند. این امر می‌تواند به دلیل مقاومت کششی بسیار بالای نانوگرافن باشد که رشد و گسترش ترک‌ها را به تأخیر بیندازد. این افزایش در عمر خستگی در سطوح تنش مختلف متفاوت است. در برخی از نمونه‌ها عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در برابر مخلوط‌های متداول تا ۵۵ درصد بهبود یافته است. دلیل این اتفاق می‌تواند در اثر خاصیت جذب بالای قیر در نانوگرافن



شکل ۱۴. نتایج آزمایش خستگی در سطح ترافیک سنگین

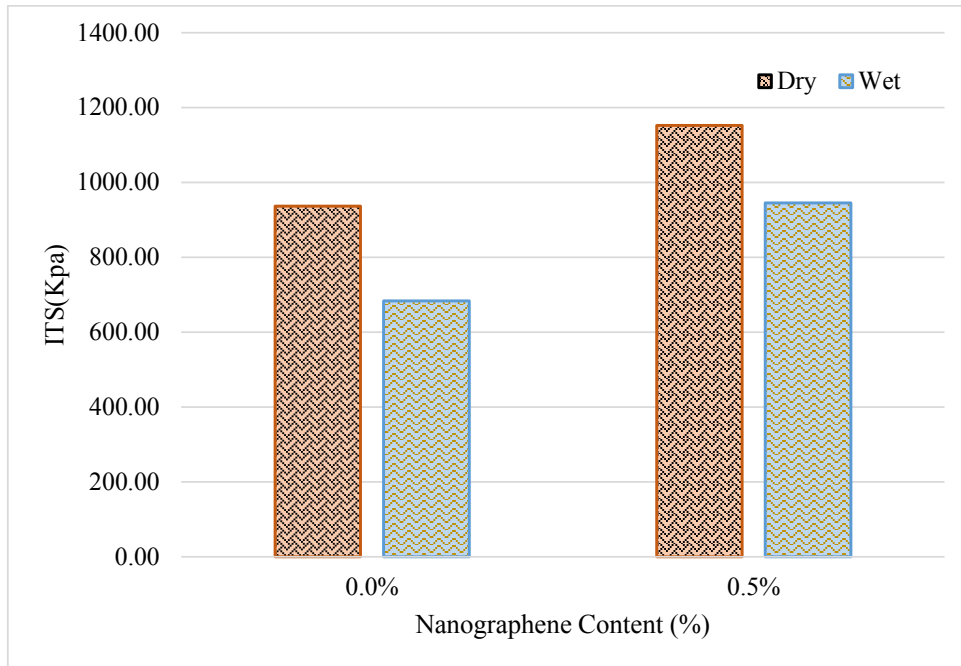
Fig. 14. Fatigue test results at heavy traffic levels

#### ۵-۸- آزمایش مقاومت به روش کشش غیرمستقیم

نسبت مقاومت کششی از آزمایش لاتمن اصلاح شده مطابق استاندارد AASHTO T283 محاسبه شده است. متوسط مقادیر مقاومت کششی مربوط به تمامی نمونه‌های عمل‌آوری شده و نمونه‌های خشک نمونه‌های متداول و اصلاح شده، در شکل ۱۵ آورده شده است. در این نمودار مقدار درصد کاهش مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده نسبت به نمونه‌های خشک، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که، مقدار ITS مخلوط‌های عمل‌آوری شده نسبت به مخلوط‌های خشک، کمتر است، و این، به دلیل حضور آب در مخلوط و در نتیجه کاهش چسبندگی قیر و همچنین چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها است، و در نتیجه، مقاومت نمونه‌های مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری، کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۵ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اصلاح شده در حالت خشک و مرطوب نسبت به نمونه‌های متداول به ترتیب حدود ۲۳ درصد و ۲۷ درصد افزایش داشته است. مخلوط‌های اصلاح شده با ۰/۵ درصد نانوغرافن افزایش چشم‌گیری در مقاومت کششی نسبت به نمونه پایه، در هر دو حالت خشک

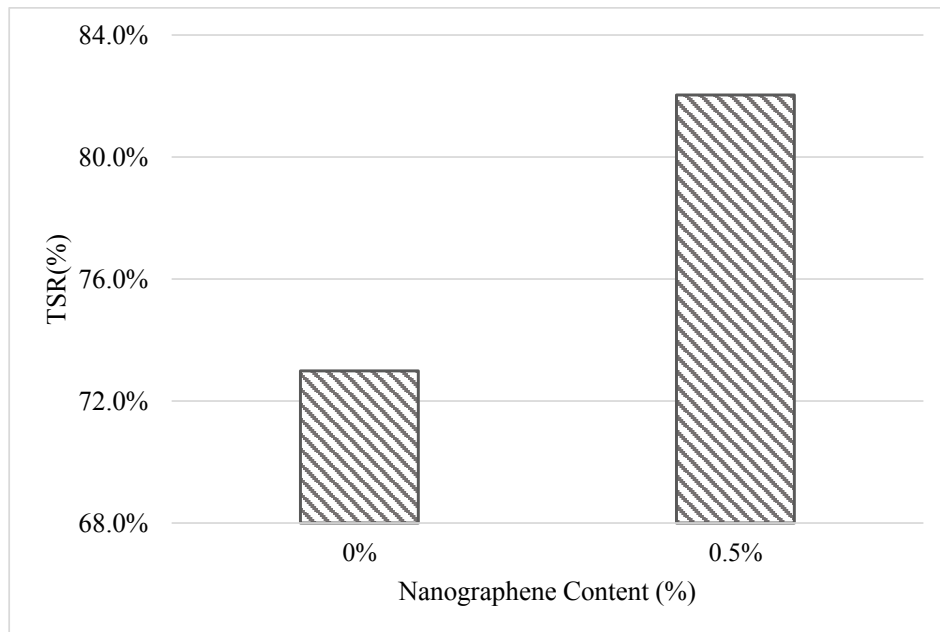
و عمل‌آوری شده داشتند. درصد کاهش مقاومت کششی نمونه‌های مرطوب تحت شرایط قرار گرفته نسبت به نمونه‌های خشک، با افزودن نانوغرافن، کاهش می‌یابد. در نمونه‌های متداول و اصلاح شده مقدار کاهش مقاومت کشش غیرمستقیم به ترتیب ۲۶ و ۲۸ درصد است. در نتیجه می‌توان گفت، افزودن نانوغرافن باعث کاهش حساسیت مخلوط در برابر رطوبت می‌شود. این افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل سطح ویژه بسیار بالای نانوغرافن باشد که با قرار گرفتن در شبکه قیر باعث مسلح شدن شبکه قیر شده و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارگذاری و جدا شدگی باشد. این افزایش در مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم را می‌توان به بهبود در میزان چسبندگی نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده نسبت به نمونه‌های ساخته شده با قیر متداول ارتباط داد.

شاخص TSR که نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های تحت شرایط قرار گرفته را نسبت به نمونه‌های تحت شرایط قرار نگرفته نشان می‌دهد مطابق استاندارد AASHTO T 283 باید حداقل ۷۵ درصد باشد. مطابق شکل ۱۶ این شاخص در نمونه‌های متداول و اصلاح شده به



شکل ۱۵. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

Fig. 15. Indirect tensile test results



شکل ۱۶. نتایج نسبت مقاومت کششی نمونه‌های مرطوب و خشک

Fig. 16. Results of tensile strength ratio of wet and dry samples

ترتیب ۷۳ و ۸۲ درصد به دست آمده است. بنابراین در نمونه‌های اصلاح شده افزایش TSR نسبت به نمونه‌های خشک نیز گواه بهبود عملکرد نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های متداول در حضور رطوبت است.

## ۶- نتیجه‌گیری

همانطور که در گفته شد هدف از انجام این پژوهش اصلاح خواص قیر و در نتیجه آن بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی گرم است. برای این منظور قیر با مقادیر ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی نانوگرافن اصلاح شد و در ساخت نمونه‌های آسفالتی پس از انجام آزمایش‌های قیر از درصد وزنی ۰/۵ استفاده شد. نتایج آزمایشات انجام شده بر روی قیر و مخلوط‌های آسفالتی در حالت متداول و اصلاح شده ارائه شد و مورد بحث و ارزیابی قرار گرفت. به طور کلی، نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- نمونه‌های قیری اصلاح شده نسبت به نمونه‌های قیری پایه دارای درجه نفوذ کمتر، نقطه نرمی بیشتر و شکل‌پذیری بیشتر هستند و این مطلب به معنی بهبود خصوصیات قیر در اثر اصلاح با نانوگرافن است.
- ویسکوزیته دورانی قیر اصلاح شده نسبت به قیر پایه نیز افزایش داشته است و مقدار پارامتر شیار شدگی در قیر اصلاح شده نسبت به قیر پایه نیز بهبود پیدا کرده است. در واقع وجود نانوگرافن در قیر همزمان با افزایش سختی قیر خاصیت الاستیک آن را بهبود بخشیده و منجر به افزایش مقاومت قیر اصلاح شده در برابر شیار شدگی می‌گردد.

- در نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های متداول مقدار مدول برجهنگی افزایش داشته است. این امر موجب کاهش ضخامت مورد نیاز روسازی و در نتیجه صرفه‌جویی در هزینه‌های احداث روسازی می‌شود.
- مطابق با نتایج آزمایش بار محوری مکرر تغییر شکل نهایی نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های متداول در تمامی سطوح تنش و دمایی مختلف کاهش یافته است. این کاهش با توجه به افزایش میزان سختی نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های متداول قابل پیش‌بینی است.

- عملکرد خستگی نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های متداول نیز به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است. این افزایش در هر دو فضای خالی اتفاق افتاده است. افزایش در مقدار تنش تاثیر قابل توجهی در کاهش تعداد سیکل‌های منجر به گسیختگی دارد به طوری با افزایش تنش از مقدار ۱۰۰ کیلوپاسکال به ۳۰۰ کیلوپاسکال تعداد سیکل منجر به

گسیختگی چیزی در حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد کاهش داشت.

- در هر دو حالت خشک و تر در آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های اصلاح شده در مقایسه با نمونه‌های متداول مقاومت بیشتری از خود نشان دادند و این نشان از کاهش میزان حساسیت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت است.

- در آزمایش فشاری نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های متداول مقاومت بهتری از خود نشان داده و این امر در هر دو حالت خشک و مرطوب مشهود است.

## منابع

- [1] S. Mirabdolazimi, G. Shafabakhsh, Rutting depth prediction of hot mix asphalts modified with forta fiber using artificial neural networks and genetic programming technique, *Construction and Building Materials*, 148 (2017) 666-674.
- [2] G. Shafabakhsh, S. Mirabdolazimi, M. Sadeghnejad, Evaluation the effect of nano-TiO<sub>2</sub> on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 54 (2014) 566-571.
- [3] G.H. Hamed, K.G. Shamami, M.M. Pakenari, Effect of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the performance characteristics of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 258 (2020) 119729.
- [4] M. Saltan, S. Terzi, S. Karahancer, Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica, *Construction and Building Materials*, 156 (2017) 976-984.
- [5] G. Shafabakhsh, O.J. Ani, M. Talebsafa, Artificial neural network modeling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates, *Construction and Building Materials*, 85 (2015) 136-143.
- [6] G.H. Hamed, Evaluating the Rheological and Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Modified with Nano Copper Oxide, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(10) (2021) 4-4.
- [7] G.H. Hamed, A. Ali Pour, Evaluation of moisture sensitivity of asphalt mixtures modified with nanoparticle (zinc and silicon oxides), *Amirkabir Journal of Civil*

- (2020) 2321-2343.
- [17] J.-L. Le, M.O. Marasteanu, M. Turos, Mechanical and compaction properties of graphite nanoplatelet-modified asphalt binders and mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 21(7) (2020) 1799-1814.
- [18] A.M. Adnan, X. Luo, C. Lü, J. Wang, Z. Huang, Improving mechanics behavior of hot mix asphalt using graphene-oxide, *Construction and Building Materials*, 254 (2020) 119261.
- [19] T. Officials, AASHTO guide for design of pavement structures, Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, (1993).
- [20] P.K. HG, M.A. Xavior, Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review, (2014).
- [21] S. Mirabdolazimi, A. Kargari, M.M. Pakenari, New achievement in moisture sensitivity of nano-silica modified asphalt mixture with a combined effect of bitumen type and traffic condition, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(1) (2021) 105-115.
- [22] G. Shafabakhsh, O.J. Ani, Experimental investigation of effect of Nano TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates, *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 692-702.
- [23] H. Yaacob, M.A. Mughal, R.P. Jaya, M.R. Hainin, D.S. Jayanti, C.N.C. Wan, Rheological properties of styrene butadiene rubber modified bitumen binder, *Jurnal Teknologi*, 78(7-2) (2016).
- [24] D. ASTM, 4123. Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, Reapproved. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, (1995) 2-5.
- [25] CEN, Test methods for hot mix asphalt—Part 24: Resistance to fatigue, in, EN12697-24. British Standards Institution London, 2012.
- [26] A. Amini, H. Ziari, S.A. Saadatjoo, N.S. Hashemifar, A. Goli, Rutting resistance, fatigue properties and temperature susceptibility of nano clay modified asphalt Engineering, 52(5) (2020) 1243-1264.
- [8] F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, F. Gámiz, M. Rubio-Gámez, Mechanical and thermal properties of graphene modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 180 (2018) 265-274.
- [9] M. Mubarak, S.I.A. Ali, A. Ismail, N.I.M. Yusoff, Rheological Evaluation of Asphalt Cements Modified with ASA Polymer and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles, *Procedia engineering*, 143 (2016) 1276-1284.
- [10] H. Du, H.J. Gao, S. Dai Pang, Improvement in concrete resistance against water and chloride ingress by adding graphene nanoplatelet, *Cement and Concrete Research*, 83 (2016) 114-123.
- [11] F. Moghadas Nejad, R. Tanzadeh, J. Tanzadeh, G.H. Hamedi, Investigating the effect of nanoparticles on the rutting behaviour of hot-mix asphalt, *International Journal of Pavement Engineering*, 17(4) (2016) 353-362.
- [12] H. Taherkhani, S. Afroozi, S. Javanmard, Comparative Study of the Effects of Nanosilica and Zyco-Soil Nanomaterials on the Properties of Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8) (2017) 04017054.
- [13] A. Chelovian, G. Shafabakhsh, Laboratory evaluation of Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> effect on dynamic performance of stone mastic asphalt, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2) (2017) 131-138.
- [14] A.H. Abed, H.U. Bahia, Enhancement of permanent deformation resistance of modified asphalt concrete mixtures with nano-high density polyethylene, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117604.
- [15] A. Mahpour, M. Khodadadi, M. Shahraki, F. Moghadas Nejad, Evaluation of Moisture Durability of Modified Asphalt Mixture with Nano-Titanium Dioxide Using Surface Free Energy Method, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2021) -.
- [16] S. Pirmohammad, Y. Majd-Shokorlou, B. Amani, 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)

- [30] G.H. Hamed, F.M. Nejad, K. Oveisi, Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide, *Materials and Structures*, 49(4) (2016) 1165-1174.
- [31] S.W. Goh, M. Akin, Z. You, X. Shi, Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 25(1) (2011) 195-200.
- [32] X. Cao, H. Wang, X. Cao, W. Sun, H. Zhu, B. Tang, Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil, *Construction and building materials*, 180 (2018) 455-463.
- rubber binder, *Construction and Building Materials*, 267 (2021) 120946.
- [27] M. Ameri, R. Mohammadi, M. Vamegh, M.J.C. Molayem, Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 156 (2017) 107-113.
- [28] D. ASTM, 6931-17, Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA,, (2017).
- [29] G.H. Hamed, F. Moghadas Nejad, K. Oveisi, Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA, *Road Materials and Pavement Design*, 16(3) (2015) 536-552.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*K. Ghalandari shamami, M. Effati, S. M. Mirabdolazimi, Evaluation of properties of hot mix asphalt modified with nano-graphene, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3391-3410.*

DOI: 10.22060/ceej.2022.20719.7514

