

بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA) اصلاح‌شده با نانواکسید گرافن کاهش یافته

احسان شهریاری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی، تهران

منصور فخری*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

Email: Fakhri@kntu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۳

چکیده

با افزایش روزافزون استفاده از راه‌های آسفالتی، طراحی و ساخت روسازی آسفالتی که بتواند در برابر خرابی‌های مختلف مقاومت کند، ضروری است. استفاده از نانومواد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و برجسته آنها در صنعت روسازی آسفالتی، برای اصلاح خواص مکانیکی آسفالت، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش، اثرات نانواکسید گرافن کاهش یافته (RGO) را بر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA) بررسی کرده است. در این مطالعه، از آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم، آزمایش خزش استاتیک و آزمون بیرون‌کشیدگی برای بررسی اثر نانواکسید گرافن کاهش یافته بر خصوصیات مکانیکی این آسفالت استفاده شده است. قیر خالص با سه درصد متفاوت از نانواکسید گرافن کاهش یافته (۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزن قیر مصرفی) اصلاح شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که افزودن نانواکسید گرافن کاهش یافته در قیر خالص باعث افزایش نقطه نرمی، ویسکوزیته و وزن مخصوص و کاهش نفوذپذیری و شکل‌پذیری قیر خالص می‌شود. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که افزایش نانواکسید گرافن کاهش یافته منجر به افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت چسبندگی، کرنش جمعی، کاهش سختی خزشی و بهبود حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های SMA می‌شود. به طور کلی، ۰/۶ درصد از این ماده نانو باعث ایجاد تغییرات قابل توجه‌تری در خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های SMA نسبت به سایر مقادیر شد. به طوری که افزودن ۰/۶ درصد از این افزودنی در SMA باعث ۲۳٪ افزایش در شاخص TSR، ۴۸٪ افزایش در مقاومت چسبندگی در حالت مرطوب و ۴۳٪ کاهش در سختی خزشی نسبت به مخلوط کنترل شد.

واژه‌های کلیدی: نانواکسید گرافن کاهش یافته، مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA)، خزش استاتیک، حساسیت رطوبتی، مقاومت چسبندگی، تست بیرون‌کشیدگی.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از نانومواد در صنایع مختلف، به‌ویژه در صنعت روسازی جاده‌ها، افزایش چشمگیری داشته است. همچنین، بررسی اثرات این نانومواد به دلیل ویژگی‌های خاص آنها (مانند انرژی سطحی و مساحت ویژه زیاد و قابلیت بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد مختلف) در زمینه مخلوط‌های آسفالتی توسط محققان در سال‌های اخیر رواج زیادی پیدا کرده است (یانگ و تیگ، ۲۰۱۳؛ سو و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعات اخیر در این زمینه نشان داده است که استفاده از نانومواد در قیر و مخلوط‌های آسفالتی باعث ایجاد اثرات مثبتی در ساختار فیزیکی و شیمیایی آنها می‌شود.

یکی از نانومواد که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است، مشتقات ماده گرافن می‌باشد. گرافن یک صفحه دوبعدی از اتم‌های کربن است که در الگویی شش‌ضلعی چیده شده‌اند و دارای خواص شیمیایی و فیزیکی منحصر به فردی مانند استحکام مکانیکی، خواص نوری، هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی شگفت‌انگیزی است. اکسید گرافن (GO) شکلی از گرافن است که حاوی گروه‌های عاملی اکسیژن-دار می‌باشد. به دلیل وجود گروه‌های عاملی کربوکسیل، اپوکسی و هیدروکسیل، GO می‌تواند در آب و سایر حلال‌های طبیعی پراکنده شود. همچنین، می‌توان از آن برای ساخت گرافن استفاده کرد. اکسید گرافن کاهش‌یافته^۳ (RGO) را می‌توان با استفاده از فرایند احیا یا کاهش از GO به‌دست آورد. این فرآیند را می‌توان از طریق کاهش شیمیایی، حرارتی و یا الکتروشیمیایی انجام داد. در طی فرآیند احیا، گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن، مانند گروه‌های کربوکسیل، هیدروکسیل و اپوکسی، به طور جزئی یا کامل از GO حذف می‌شوند که منجر به کاهش خاصیت آب‌دوستی و افزایش خاصیت آب‌گریزی

با پیشرفت روزافزون تکنولوژی و افزایش استفاده از راه‌های ارتباطی، به‌خصوص راه‌های آسفالتی، طراحی و ساخت روسازی آسفالتی که بتواند در برابر خرابی‌های مختلف مانند خرابی شیارشدگی، ترک‌خوردگی‌های خستگی و خرابی‌های رطوبتی عملکرد قابل قبولی داشته باشد حیاتی می‌باشد. مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای^۱ (SMA) نوعی مخلوط آسفالتی گرم است که شامل دو قسمت اصلی مصالح درشت‌دانه و ملات ماستیک (قیر، افزودنی‌های تثبیت‌کننده و مصالح فیلر) می‌باشد. ایده اصلی تولید این مخلوط آسفالت بر اساس ساختار سنگ روی سنگ^۲ است. در این نوع روسازی آسفالتی، با تغییر در دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها، درصد سنگ‌دانه درشت افزایش می‌یابد. در نتیجه، توانایی روسازی آسفالتی در تحمل بار چرخ افزایش می‌یابد. برخی از ویژگی‌های مخلوط آسفالتی SMA مقاومت قابل توجه آن در برابر خرابی شیارشدگی، مقاومت بالای آن در برابر لغزش، کاهش و جذب آلودگی‌های صوتی ناشی از حرکت وسایل نقلیه و بهبود مقاومت در برابر ترک‌های انعکاسی است. اما وجود درصد زیادی از مصالح فیلر در این نوع مخلوط آسفالتی باعث می‌شود که پارامتر چسبندگی در این مخلوط آسفالتی در حضور رطوبت به یک پارامتر بحرانی تبدیل شود. قیر مورد استفاده در آسفالت SMA می‌تواند همان قیر معمولی باشد که در مخلوط‌های آسفالتی رایج استفاده می‌شود. میزان قیر بهینه در این نوع آسفالت حداقل ۶ درصد و معمولاً بیشتر از مقدار قیر مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته می‌باشد. به دلیل درصد بالای قیر مصرفی و نسبت زیاد سنگ‌دانه‌های درشت در این مخلوط آسفالتی، نیاز به افزودنی‌های تثبیت‌کننده برای جلوگیری از ریزش قیر می‌باشد.

³- Reduced graphene oxide

¹- Stone mastic asphalt

²- Stone on stone

بررسی اثر نانوگرافن و نانو اکسید گرافن بر خصوصیات مخلوط آسفالتی HMA اعلام کردند که این مواد حتی در مقادیر بسیار کم باعث افزایش قابل توجه مقاومت مارشال و باربری مخلوط آسفالتی می‌شوند. هان و همکاران (۲۰۱۸) دریافتند که استفاده از نانوپلاکت‌های گرافن پیوندی با پلی‌استایرن می‌تواند باعث بهبود رفتار ویسکوالاستیک، عملکرد در دمای زیاد، عملکرد دمای کم و عملکرد ضد خستگی در قیر شود. مورنو ناوارو و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که استفاده از گرافن در قیر می‌تواند باعث کاهش حساسیت دمایی قیر شود. به این صورت که در این مطالعه، طی انجام آزمایش‌های رئولوژیک و دمایی، نمونه‌های قیری اصلاح‌شده با ذرات گرافن ظرفیت بیشتری برای جذب و انتقال گرما از خود نشان دادند. یانگ و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که افزودن دو ماده گرافن و نانوکربن‌های لوله‌ای به صورت کامپوزیت به قیر باعث بهبود قابل توجه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای کم و تغییر شکل-های ماندگار می‌شود. سو و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که نمونه‌های قیری اصلاح‌شده با الیاف گرافن آمینه شده دارای کار چسبندگی بیشتر و به دنبال آن دارای خصوصیت آب‌گریزی بیشتری نسبت به نمونه‌های کنترلی هستند که با توجه به این موضوع مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با این قیرهای اصلاح‌شده دارای عملکرد بهتری در برابر خرابی‌های رطوبتی و ترک‌خوردگی‌های دمای کم هستند. عدنان و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که افزودن نانو GO به مخلوط HAM باعث افزایش انرژی شکست و بهبود مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در دمای میانه می‌شود و این بهبود با افزایش درصد نانو GO در مخلوط آسفالتی ارتباط مستقیم دارد. حفیظ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای دریافتند که افزودن نانوپلاکت‌های گرافن باعث افزایش چسبندگی داخلی ذرات مخلوط آسفالتی می‌شود.

RGO می‌شود. RGO دارای خواص مکانیکی، نوری و الکترونیکی یا رسانایی مشابه گرافن می‌باشد (سیواشانکاری و پرابهاران، ۲۰۱۷؛ تارکان و همکاران، ۲۰۲۰). در سال‌های اخیر، تحقیقاتی در زمینه استفاده از نانوگرافن و مشتقات آن در زمینه روسازی‌های آسفالتی صورت گرفته است. ژو و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که نانو GO می‌تواند باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه شود که افزایش مقاومت آسفالت در برابر خرابی‌های مختلف را در پی دارد. استفاده از نانوکربن‌ها و نانوگرافن باعث افزایش ویسکوزیته و کاهش درجه نفوذ قیر و بهبود رفتار قیر در دمای زیاد می‌شود (وو و تهری، ۲۰۲۱). ژو و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که استفاده از نانو GO باعث بهبود حساسیت رطوبتی، عملکرد در دمای زیاد و مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی گرم و داغ می‌شود. همچنین، در این مطالعه، محققان به این نتیجه رسیدند که نانو GO می‌تواند باعث افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر پیرشدگی شود و تأثیر پیرشدگی بر عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای کم را کاهش دهد. ترکیب نانو GO و ساسوبیت می‌تواند باعث بهبود عملکرد خستگی، مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی و عملکرد در دمای زیاد در مخلوط آسفالتی شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۹). ونگ و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی اعلام کردند که افزودن اکسید گرافن به قیر باعث افزایش انرژی آزاد سطحی قیر شده و موجب بهبود رفتار خودترمیمی و عملکرد ترمودینامیک آن می‌شود. اضافه شدن گرافن به مخلوط آسفالتی متخلخل باعث افزایش مقاومت مارشال و بهبود عملکرد آن می‌شود (آراویند و همکاران، ۲۰۱۸). ونگ و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که نانو GO و نانولوله‌های کربنی باعث افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی می‌شوند. همچنین، استفاده از نانو GO باعث افزایش مقاومت قیر در برابر پیرشدگی می‌شود (زنگ و همکاران، ۲۰۲۰). جودیرمای و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی در زمینه

عملکرد بهینه‌ای از این دو ماده باشد. به همین منظور، پژوهش حاضر به بررسی اثر نانو RGO بر برخی خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی SMA می‌پردازد. برای دستیابی به این هدف در این مطالعه، از آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، آزمون خزش استاتیک و آزمایش بیرون‌کشیدگی^۱ استفاده شده است. همچنین، از آزمایش‌های رایج قیر برای بررسی اثر این نانوماده بر خواص قیر مصرفی استفاده شده است. در نهایت، قابل توجه بودن تأثیر نانو RGO بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی به وسیله آنالیز آماری ANOVA مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. مواد و مصالح مصرفی

۱-۲. قیر

قیر پایه مورد استفاده در این مطالعه، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شده است.

۲-۲. مصالح سنگی

در این تحقیق، دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها با حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر بر اساس میانگین دانه‌بندی پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه ۲۳۴ روسازی راه‌های ایران برای مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای انتخاب شده است. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها در شکل ۱ ارائه شده است و حدود این دانه‌بندی در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، خواص فیزیکی سنگ‌دانه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مصالح سنگی استفاده شده در این مطالعه از نوع مصالح شکسته آهکی می‌باشد و از معدن شن و ماسه اسب چران واقع در حومه شهر تهران تهیه شده است.

همچنین، استفاده از این نوع افزودنی بهبود مقاومت در برابر لغزش را در مخلوط آسفالتی به دنبال دارد. با توجه به مطالعات گذشته می‌توان دریافت که بیشتر تمرکز محققان در بررسی تأثیر نانو GO و نانوگرافن بر خواص مخلوط‌های آسفالتی بوده است و در این بین خلأ بررسی تأثیر نانو اکسید گرافن کاهش یافته (RGO) بر خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی، به خصوص در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA)، دیده می‌شود. از آنجایی که پارامتر چسبندگی در مخلوط SMA، به دلیل وجود درصد بالایی از مصالح فیلر، در حضور رطوبت می‌تواند به یک پارامتر بحرانی تبدیل شود (مونیاندی و ابورکابا، ۲۰۱۰؛ حبیب نژاد و همکاران، ۲۰۲۰). لذا، استفاده از یک افزودنی مناسب که باعث بهبود مقاومت چسبندگی و مقاومت کششی مخلوط SMA، به خصوص در حضور رطوبت شود، احساس می‌شود. با توجه به اینکه نانو اکسید گرافن کاهش یافته دارای مقاومت کششی قابل ملاحظه، خواص آب‌گریزی بسیار بهینه و خاصیت حل‌شوندگی مناسب در قیر است (تارکان و همکاران، ۲۰۲۰)، استفاده از این ماده در مخلوط SMA می‌تواند قابل بررسی باشد. علاوه بر آن، با توجه به این که هزینه تولید و اجرای مخلوط SMA به دلیل درصد زیاد قیر مصرفی و ملاحظات اجرایی نسبت به روسازی‌های رایج می‌تواند بسیار بیشتر باشد، استفاده از گرافن و مشتقات آن که حتی در درصدهای بسیار کم تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی دارند (سینگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ مورنو ناوارو و همکاران، ۲۰۱۸؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۹)، می‌تواند باعث افزایش عمر بهره‌برداری و کاهش هزینه‌های نگهداری روسازی شود. همچنین، از آنجایی که نانو اکسید گرافن کاهش یافته ماده‌ای است که هم برخی از خواص مثبت نانو GO و هم برخی از خواص مثبت نانوگرافن را دارا می‌باشد، انتظار می‌رود که دارای

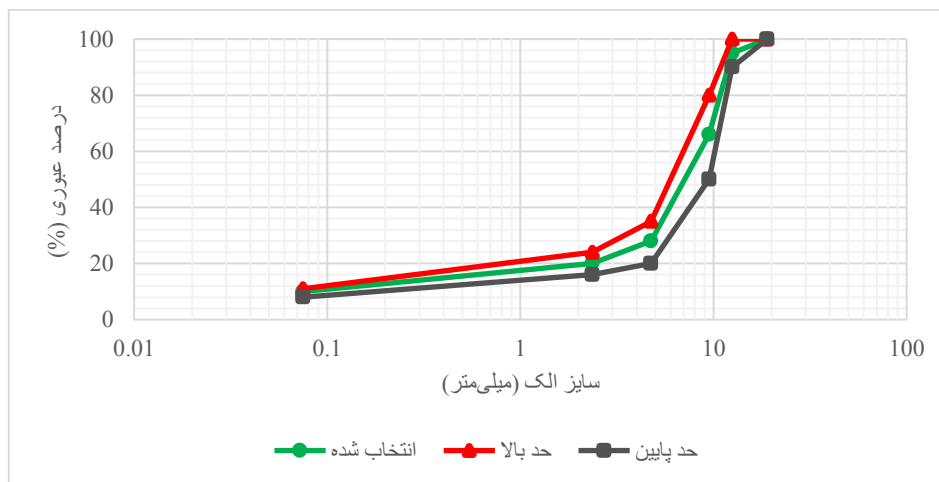
¹- Pull-off adhesion test

جدول ۱. حدود دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده در این مطالعه

شماره الک (mm)	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۰۷۵
حدود بالا و پایین	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۵۰-۸۰	۲۰-۳۵	۱۶-۲۴	۸-۱۱
رد شده (%)	۱۰۰	۹۵	۶۶	۲۸	۲۰	۱۰

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

آزمایش های سنگ دانه	نتایج	استاندارد
درصد جذب مصالح درشت دانه (%)	۲/۱	ASTM C-127
درصد جذب مصالح ریزدانه (%)	۲/۴	ASTM C-128
تست سایش لس آنجلس (%)	۲۰/۱	ASTM C-131
ارزش ماسه ای مصالح ریزدانه (%)	۷۱	ASTM D-2419
درصد شکستگی در دو وجه (%)	۹۳	ASTM D-5821
وزن مخصوص مصالح درشت دانه (>2.36 mm, gr/cm ³)	۲/۵۸	ASTM C-127
وزن مخصوص مصالح ریزدانه (0.075-2.36 mm, gr/cm ³)	۲/۵	ASTM C-128
وزن مخصوص مصالح فیلر (<0.075 mm, gr/cm ³)	۲/۵۵	ASTM D-854



شکل ۱. نمودار دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این مطالعه

۳-۲. افزودنی ها

بیش از ۹۵ درصد، ۱-۵ لایه، ضخامت ذرات ۲-۰/۳ نانومتر و قطر ذرات ۳-۱۰ میکرومتر) می باشد. تصویر ظاهری و تصویر TEM^۱ (میکروسکوپ الکترونی عبوری) به ترتیب در شکل های ۲-الف و ۲-ب نشان

افزودنی مورد استفاده در این مطالعه، نانواکسید گرافن کاهش یافته (RGO) (با ظاهر پودری، سیاه رنگ، خلوص

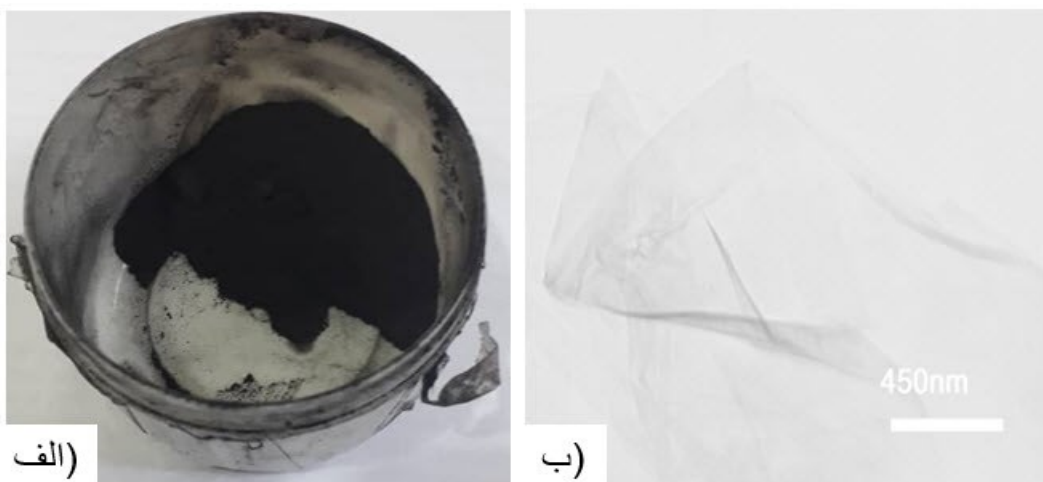
^۱- Transmission electron microscopy

نشان می‌دهد که ساختار کریستالی گرافیت تخریب شده و RGO تولید شده است.

۲-۴. افزودنی تثبیت‌کننده

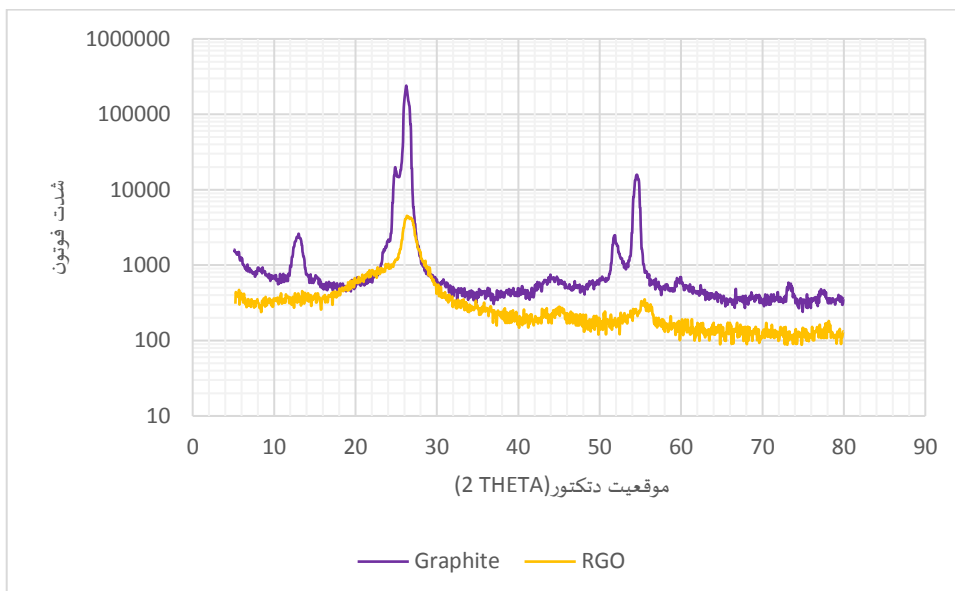
بر اساس پیشنهاد آیین‌نامه ۲۳۴ و AASHTO در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای، به دلیل داشتن مقادیر زیاد قیر و ساختار دانه‌ای درشت، باید از یک افزودنی تثبیت‌کننده برای جلوگیری از ریزش قیر از مخلوط آسفالتی استفاده شود. آیین‌نامه ۲۳۴ استفاده از الیاف سلولزی (شکل ۴) به میزان ۰/۳ درصد وزنی مخلوط آسفالتی را به عنوان تثبیت‌کننده در آسفالت SMA پیشنهاد می‌دهد. مشخصات مهندسی الیاف سلولزی استفاده شده در این مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

داده شده است. یکی از کاربردهای تصاویر TEM ارائه تصاویر با مقیاس نانو با وضوح زیاد برای مطالعه خواص ساختاری نانومواد (مانند اندازه ذرات، نوع شبکه‌بندی، اطلاعات ریخت‌شناسی) می‌باشد. در این مطالعه، از تصاویر TEM برای نشان دادن تعداد لایه‌های ذرات نانو RGO استفاده شده است که در مورد نانو RGO، تعداد کم لایه بودن ذرات این ماده را تأیید می‌کند. همچنین، نتایج پراش اشعه ایکس (XRD)^۱ در شکل ۳ ارائه شده است. از تکنیک XRD برای بررسی ساختار بلوری ذرات و کنترل خلوص مواد استفاده شده است. شکل ۳، تغییرات در ساختار کریستال گرافیت را در فرآیند اکسیداسیون و تولید GO و در نهایت فرایند کاهش و تولید RGO نشان می‌دهد. الگوی XRD گرافیت قله‌های پراش تیز و بلند را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده ساختار بلوری شدید در این ماده است. الگوی XRD ماده RGO نشان‌دهنده قله‌های پراش کوتاه‌تر و پهن‌تری است و



شکل ۲. الف) تصویر شکل ظاهری و ب) تصویر TEM نانو اکسید گرافن کاهش یافته مورد استفاده در این مطالعه

^۱- X-ray diffraction



شکل ۳. نتایج تست پراش اشعه ایکس نانو اکسید گرافن کاهش یافته

جدول ۳. خصوصیات مهندسی الیاف سلولز

ویژگی	مقدار
میانگین ضخامت الیاف (mm)	۳-۱
pH	۸/۵ - ۶/۵
چگالی حجمی (gr/cm ³)	۰/۴۸ - ۰/۴۲
خلوص الیاف (%)	۹۸-۹۵
میانگین طول الیاف (mm)	۸-۴



شکل ۴. الیاف سلولزی استفاده شده در این مطالعه

۳. شرح روش آزمایش

۳-۱. آماده سازی قیرهای اصلاح شده

برای تهیه قیرهای اصلاح شده، ابتدا قیر پایه و خالص تا ۱۶۰ درجه سلسیوس گرم می شود و سپس با ماده نانو RGO (با مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد از وزن قیر در مخلوط آسفالتی) به وسیله میکسر برشی با سرعت زیاد^۱ با سرعت چرخش ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵۰ دقیقه در دمای 160 ± 5 درجه سلسیوس مخلوط می شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ عدنان و همکاران، ۲۰۲۰؛ سالطان و همکاران، ۲۰۱۹). در نهایت، نمونه های قیر اصلاح شده با نانوگرافن کاهش یافته به دست آمد.

۳-۲. آماده سازی نمونه های مخلوط آسفالتی

در این مطالعه، بر اساس آیین نامه ۲۳۴ روسازی راه های ایران، از دستور کار نشریه MS-2 انستیتو آسفالت برای تعیین مقدار قیر بهینه نمونه های آسفالتی استفاده شد. به این منظور، آیین نامه ۲۳۴، درصد فضای خالی (V_a) مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای را ۱/۴٪ و حداقل درصد فضای خالی مصالح سنگدانه ای را ۱۷٪ (VMA) پیشنهاد می کند. آیین نامه ۲۳۴ این دو مقدار را به عنوان معیار مهمی برای تعیین مقدار قیر بهینه برای

مخلوط های SMA پیشنهاد می کند. در نهایت، بر اساس شرایط فوق، مقدار قیر بهینه برای مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای ۶/۴۵ درصد به دست آمد. تمامی پارامترهای محاسبه شده برای تعیین قیر بهینه در جدول ۴ به طور خلاصه ارائه شده است. به منظور بررسی دقیق تأثیر درصد های مختلف ماده نانو مصرفی در نمونه های آسفالتی، همه مخلوط های آسفالتی تولید شده در این تحقیق دارای دانه بندی سنگدانه ای و درصد قیر بهینه یکسان می باشند. به منظور جلوگیری از پدیده ریزش قیر در مخلوط های آسفالتی، در این مطالعه، با توجه به پیشنهاد آیین نامه ۲۳۴ الیاف سلولز با مقدار ۰/۳ درصد وزن مخلوط آسفالتی به عنوان تثبیت کننده در مخلوط SMA استفاده شد. در این مطالعه، برای تهیه نمونه ها به منظور انجام آزمایش های مکانیکی، از نمونه های مارشال استفاده شد (ASTM D1559). همچنین، نمونه های آسفالتی توسط چکش مارشال با ۵۰ ضربه در هر وجه نمونه فشرده شدند. برای ساده سازی توضیحات در این مطالعه، در جداول و شکل ها، مخلوط شاهد با حرف C و مخلوط های اصلاح شده با مقدار درصد مواد افزودنی نشان داده شده اند.

جدول ۴. پارامترهای محاسبه شده برای تعیین قیر بهینه

عدد روانی (0.25mm)	استحکام مارشال (KgF)	G_{se} (g/cm ³)	G_{sb} (g/cm ³)	G_{mm} (g/cm ³)	G_{mb} (g/cm ³)	V_a (%)	VMA (%)	VFA (%)	مقدار قیر (%)
۱۵	۵۴۰	۲/۶۳	۲/۵۶	۲/۴۸	۲/۳۲	۶/۱۹	۱۵/۸۴	۵۷/۵۳	۵/۵
۱۵/۳۳	۶۲۸	۲/۶۰	۲/۵۶	۲/۴۳	۲/۳۰	۵/۱۳	۱۶/۱۵	۶۷/۴۸	۶
۱۶	۶۶۵	۲/۵۸	۲/۵۶	۲/۴۰	۲/۳۰	۴/۱۰	۱۷/۱۲	۷۴/۸۵	۶/۵
۱۶/۳۳	۶۳۵	۲/۶۱	۲/۵۶	۲/۴۰	۲/۳۲	۳/۳۴	۱۸/۴۹	۷۹/۲۵	۷
۱۶/۷۷	۵۸۴	۲/۵۸	۲/۵۶	۲/۳۶	۲/۳۱	۲/۴۴	۱۹/۰۲	۸۵/۶۹	۷/۵

^۱- High shear mixer

۳-۳. آزمایش‌های متداول قیر

در این مطالعه، آزمایش‌های متداول قیر، مانند آزمایش شکل‌پذیری (ASTM-D113)، آزمایش ویسکوزیته سی بولت^۱ (ASTM-D88)، تست نقطه نرمی (ASTM-D36)، تست نفوذپذیری (ASTM-D5) و آزمایش وزن مخصوص (ASTM-D70) برای بررسی قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با نانومواد استفاده شد.

۳-۴. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در این مطالعه، از آزمایش کششی غیرمستقیم^۲ (ITS) برای ارزیابی مقاومت نمونه‌های متراکم آسفالتی در برابر آسیب‌های رطوبتی استفاده شد. این روش یکی از رایج‌ترین روش‌های به‌دست آوردن حساسیت به رطوبت مخلوط‌های آسفالتی است که مطابق استاندارد AASHTO T283 انجام می‌شود.

برای دستیابی به این هدف، نمونه‌ها به دو دسته نمونه‌های خشک و نمونه‌های مرطوب تقسیم می‌شوند. حداقل شش نمونه از هر مخلوط باید به عنوان نمونه خشک و مرطوب (سه نمونه برای شرایط مرطوب و سه نمونه برای شرایط خشک) به طور مساوی ساخته شود. در مرحله اول، برای تهیه نمونه‌های عمل‌آوری شده (مرطوب)، نمونه‌ها باید بین ۵۵ تا ۸۰ درصد اشباع شوند. سپس، نمونه‌های اشباع شده به مدت ۱۶ ساعت در دستگاه فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس قرار داده

شدند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب در دمای ۵ ±۶۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند (شکل ۵-الف). سرانجام، نمونه‌های عمل‌آوری شده (مرطوب) و نمونه‌های عمل‌آوری نشده (خشک) به مدت ۲ ساعت در حمام آب قرار داده شدند تا به دمای ۲۵ درجه سلسیوس برسند. همه نمونه‌ها تحت آزمون ITS با سرعت بارگذاری ۵۰ میلی‌متر در دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۵-ب) و حداکثر نیرویی که نمونه‌های آسفالتی تحت آن شکسته شدند به دست آمد. در نهایت، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) از معادله زیر محاسبه شد:

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

که P حداکثر نیرو (کیلونیوتون)، D قطر نمونه (متر)، t ضخامت نمونه (متر) و ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلوپاسکال) است.

مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی نمونه‌ها با شاخص

TSR^۳ و با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$TSR = \frac{ITS_{\text{مرطوب}}}{ITS_{\text{خشک}}} \quad (2)$$

مقدار ITS مورد استفاده برای این معادله مقدار متوسط برای نمونه‌ها در شرایط مرطوب یا خشک است. طبق استاندارد AASHTO T283، مخلوطی در برابر آسیب رطوبتی مقاوم است که شاخص TSR آن برابر یا بیشتر از ۸۰ درصد باشد.

³- Tensile strength ratio

¹- Saybolt viscosity test

²- Indirect tensile strength



(الف)



(ب)

شکل ۵. الف) روند عمل آوری نمونه‌های مرطوب و ب) دستگاه تست کشش غیرمستقیم

که ϵ کرنش محوری تجمعی، Δh تغییر شکل محوری نمونه آسفالتی استوانه‌ای و h_0 ارتفاع اولیه نمونه آسفالتی قبل از انجام آزمایش است.

همچنین، پارامتر سختی خزشی (یا مدول سختی استاتیک) به عنوان توانایی مواد برای مقاومت در برابر تغییر شکل بر اثر بارگذاری تعریف می‌شود. از نظر عددی، سختی خزشی عبارت است از نسبت تنش ثابت اعمال شده بر نمونه آسفالتی به کرنش محوری تجمعی ایجاد شده در نمونه آسفالتی بر اثر بار استاتیک اعمال شده در یک بازه زمانی مشخص، که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Creep Stiffness} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4)$$

که ϵ کرنش محوری تجمعی (بعد از ۶۰ دقیقه بارگذاری) و σ تنش اعمالی بر نمونه‌های آسفالتی بر حسب کیلو پاسکال است (در این مطالعه، ۱۵۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است).

پارامتر سختی خزشی یکی از خصوصیات مکانیکی مهم مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد که توانایی روسازی در انتقال تنش‌های ناشی از بارگذاری به لایه‌های زیرین را نشان می‌دهد. هرچه مقدار عددی این پارامتر بیشتر باشد مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار بیشتر است.

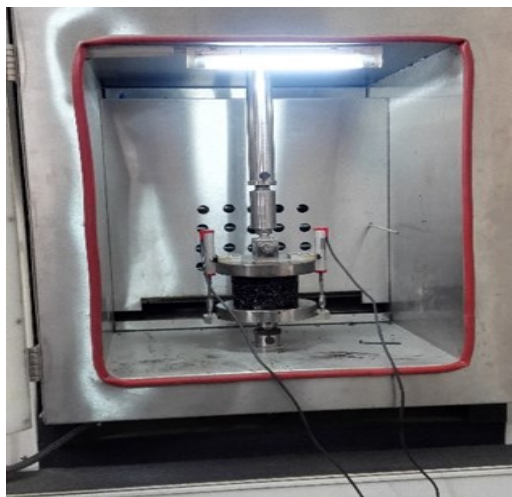
۳-۵. آزمایش خزش استاتیک

در این پژوهش، از آزمایش خزش استاتیک^۱ بر اساس استاندارد BS-598 Part 111 به منظور ارزیابی میزان تأثیر نانو اکسید گرافن کاهش یافته بر مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالتی SMA استفاده شد (شکل ۶). همچنین، از روش مارشال برای ساخت نمونه‌های آسفالتی به قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶/۵ میلی‌متر (خیابوی و منصور، ۲۰۱۷؛ ابو قودیس، ۲۰۰۷) استفاده شد. برای انجام این آزمایش، بار ثابت تک محوری ۱۵۰ کیلو پاسکال به مدت ۶۰ دقیقه روی نمونه‌ها اعمال شد و در پایان فرایند آزمایش میزان تغییر شکل عمودی نمونه‌های آسفالتی (Δh) ثبت شد. در این پژوهش، برای بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار، دو پارامتر کرنش محوری تجمعی و سختی خزشی^۲ نمونه‌های آسفالتی محاسبه شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. کرنش محوری تجمعی (ϵ) به عنوان نسبت بین تغییر شکل محوری نمونه‌های آسفالتی بعد از پایان فرایند تست به ارتفاع اولیه نمونه‌ها تعریف می‌شود که با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3)$$

²- Creep stiffness

¹- Static creep test



شکل ۶. دستگاه تست خزش استاتیک

۳-۶. آزمایش بیرون کشیدگی (مقاومت چسبندگی پول آف)

چسبندگی و استحکام پیوند بین قیر و سنگ‌دانه‌ها یک پارامتر مهم در ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی‌های مختلف است. در این تحقیق، آزمون بیرون کشیدگی^۱، مطابق استاندارد ASTM-D4541، برای ارزیابی مقاومت کششی و قدرت چسبندگی اجزای داخلی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، برای ارزیابی اثر رطوبت بر قدرت چسبندگی اجزای داخلی مخلوط آسفالتی نیز نمونه‌ها در حالت‌های عمل‌آوری شده (مرطوب) و عمل‌آوری نشده (خشک) آزمایش شدند. برای تهیه نمونه‌های عمل‌آوری شده، از روشی مشابه آزمایش ITS استفاده شد. تجهیزات مورد نیاز برای انجام این آزمایش شامل قطعات استاب^۲ فلزی (شکل ۷-ب)، چسب مخصوص برای اتصال استاب‌های فلزی به نمونه‌ها و دستگاه تست بیرون کشیدگی برای محاسبه مقاومت کششی مستقیم نمونه‌ها است. برای انجام این آزمایش، مراحل زیر در نظر گرفته شد:

۱. در ابتدا، نمونه‌های آسفالتی بر اساس روش مارشال ساخته شدند.

۲. سپس، برای رسیدن به سطح صاف و تمیز روی نمونه‌ها برای اتصال بهتر بین استاب‌های فلزی و نقاط مورد نظر روی نمونه‌ها، سطح بالای نمونه‌ها با دستگاه برش تراشیده شد.

۳. برای ارزیابی بهتر نقاط بحرانی، هسته‌هایی با قطر ۲۰ میلی‌متر و عمق ۱۰ میلی‌متر عمود بر سطح نمونه‌ها با دستگاه کرگر ایجاد شدند. با توجه به شکل ۷-الف، بدون ایجاد هسته‌ها، نتایج آزمایش‌ها ممکن است تحت تأثیر جداشدگی چسب از سطح استاب‌های فلزی باشد. همچنین، برای هسته‌های عمیق‌تر نیاز به نیروی کششی بیشتری برای جدا کردن آنها از نمونه است، که با توجه به مطالعات قبلی دارای انحراف استاندارد بیشتری هستند. به این معنی که داده‌های به دست آمده قابلیت اطمینان کمتری دارند (لوری و همکاران، ۲۰۱۹؛ فخری و روح-الامینی، ۲۰۱۹).

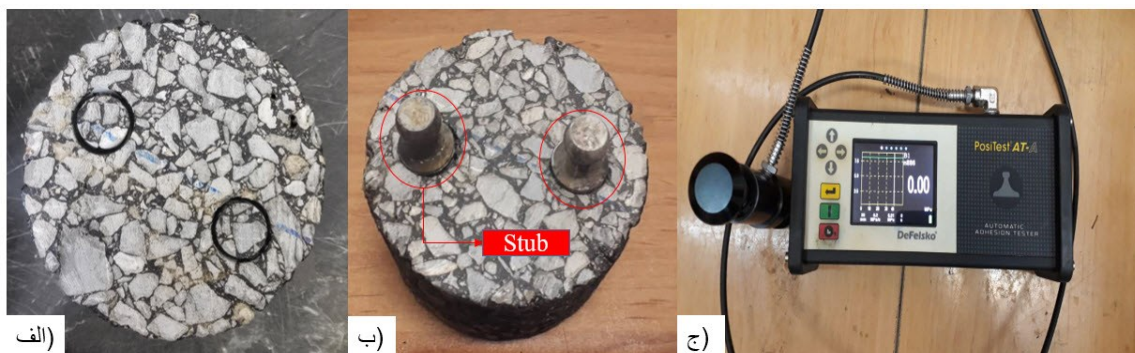
۴. سپس، سطح نمونه‌ها و استاب‌های فلزی پاک شده و با چسب مخصوص به هم متصل می‌شوند (شکل ۷-ب).

¹- Pull-off adhesion test

²- Stub

بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA) اصلاح‌شده با نانواکسید گرافن کاهش یافته

۵. در نهایت، مقاومت چسبندگی^۱ (مقاومت کششی مستقیم) نمونه‌های آسفالتی توسط دستگاه کشش (شکل ۷-ج) با سرعت بارگذاری کششی ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه اندازه‌گیری شد.



شکل ۷. مراحل آماده‌سازی آزمایش بیرون‌کشیدگی

۴. نتایج و بحث
۴-۱. آزمایش‌های متداول قیر
به منظور بررسی قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با نانواکسید گرافن کاهش یافته از آزمایش‌های متداول قیر، مانند آزمایش شکل‌پذیری (ASTM-D113)، آزمایش ویسکوزیته سی‌بولت^۱ (ASTM-D88)، تست نقطه نرمی (ASTM-D36)، تست نفوذپذیری (ASTM-D5) و آزمایش وزن مخصوص (ASTM-D70) استفاده شد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، استفاده از نانواکسید گرافن کاهش یافته در قیر خالص منجر به افزایش نقطه نرمی، ویسکوزیته و وزن مخصوص و کاهش نفوذپذیری و شکل‌پذیری می‌شود.

جدول ۵. خصوصیات قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده

RG0 0.6%	RG0 0.4%	RG0 0.2%	قیر خالص	واحد	استاندارد	خصوصیات
۵۴	۵۲	۵۴	۵۰	°C	ASTM-D36	نقطه نرمی
۶۲	۶۸	۷۹	۹۹	cm	ASTM-D113	شکل‌پذیری (۱۵ °C)
۱/۰۴۶	۱/۰۴	۱/۰۳۶	۱/۰۳۲	g/cm ³	ASTM-D70	وزن مخصوص
۵۴	۵۶	۵۵	۶۴	0.1mm	ASTM-D5	درجه نفوذ (۲۵ °C)
۱۵۹	۱۵۰	۱۴۳	۱۳۴	S	ASTM-D88	ویسکوزیته (۱۳۵ °C)

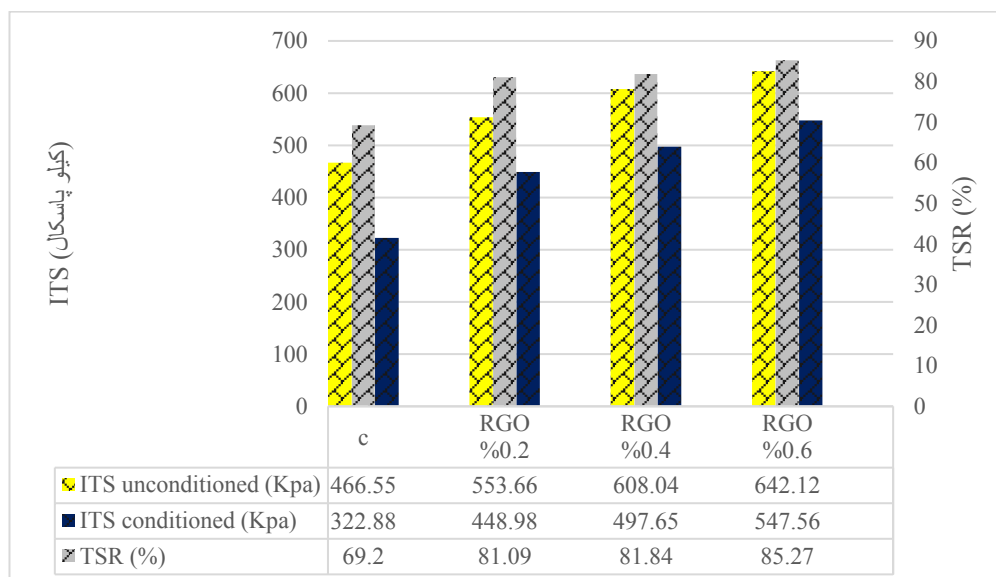
^۱ - Saybolt viscosity test

^۱ - Pull-off adhesion strength

۴-۲. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۸، افزایش درصد ماده افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی منجر به افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود که با یافته‌های ژانگ و لو (۲۰۱۹) همسو است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، از آنجا که افزایش درصد آب در مخلوط‌های آسفالتی منجر به کاهش چسبندگی قیر و سنگدانه می‌شود، مقادیر ITS نمونه‌های آسفالتی مرطوب در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی خشک کمتر است. همچنین، تبدیل آب موجود در حفره‌های مخلوط آسفالتی به یخ در نمونه‌های عمل‌آوری شده باعث ضعیف شدن و شکست پیوند بین قیر و سنگدانه می‌شود. با این حال، افزایش مقدار نانواکسید گرافن کاهش یافته در مخلوط آسفالتی باعث بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده می‌شود. به طوری که افزودن ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد از این ماده نانو در مخلوط آسفالتی باعث بهبود به ترتیب ۳۹٪، ۵۴٪ و ۶۶٪ در مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده در مقایسه با نمونه کنترلی شد که این مقادیر قابل توجه است. از آنجا که از بین رفتن پیوند بین قیر و سنگدانه‌ها در مقیاس نانو رخ می‌دهد، نانو مواد می‌توانند از این مشکل جلوگیری کنند (فخری و متحد، ۲۰۲۱). به علاوه، از آنجا که کشش سطحی یکی از مهمترین عواملی است که بر کیفیت پوشش سنگدانه توسط قیر تأثیر می‌گذارد، نانو RGO با بهبود این عامل موجب افزایش کیفیت تماس قیر و سنگدانه می‌شود. در نتیجه‌ی این

عمل، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت افزایش می‌یابد (رضوی و کاوسی، ۲۰۲۰). همانطور که از نتایج در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش درصد ماده افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش شاخص TSR در مقایسه با نمونه‌های شاهد شد که با یافته‌های مطالعات قبلی در مورد مصرف مشتقات گرافن بر مخلوط‌های آسفالتی رایج مطابقت دارد. به طور مثال، لیو و همکاران (۲۰۱۹) اظهار داشتند که نانواکسید گرافن پیوند بین سنگدانه و قیر را به دلیل انرژی سطحی زیاد بهبود می‌بخشد. به همین دلیل، شاخص TSR را در مخلوط‌های آسفالتی افزایش می‌دهد، که از این نظر مشابه نانواکسید گرافن کاهش یافته عمل می‌کند (زو و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، نتایج به دست آمده نشان داد که از لحاظ کمی، استفاده از ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد نانواکسید گرافن کاهش یافته در نمونه‌های آسفالتی موجب افزایش شاخص TSR به ترتیب به مقادیر ۱۷٪، ۱۸٪ و ۲۳٪ نسبت به نمونه کنترلی شد. مقادیر حداقل مقدار توصیه شده توسط استاندارد ASTM برای شاخص TSR مقدار ۸۰ درصد می‌باشد. همه مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو RGO در این مطالعه این حداقل نیاز را برآورده کردند. در نهایت، می‌توان گفت که افزودن نانو RGO باعث افزایش قابل توجه مقادیر ITS در حالت خشک و مرطوب و در نتیجه بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی SMA شد. به طوری که مخلوط‌های حاوی ۰/۶ درصد نانو RGO دارای بیشترین مقادیر شاخص TSR و ITS (در هر دو گروه نمونه‌های خشک و مرطوب) در بین همه مخلوط‌های آسفالتی در این مطالعه است.



شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی

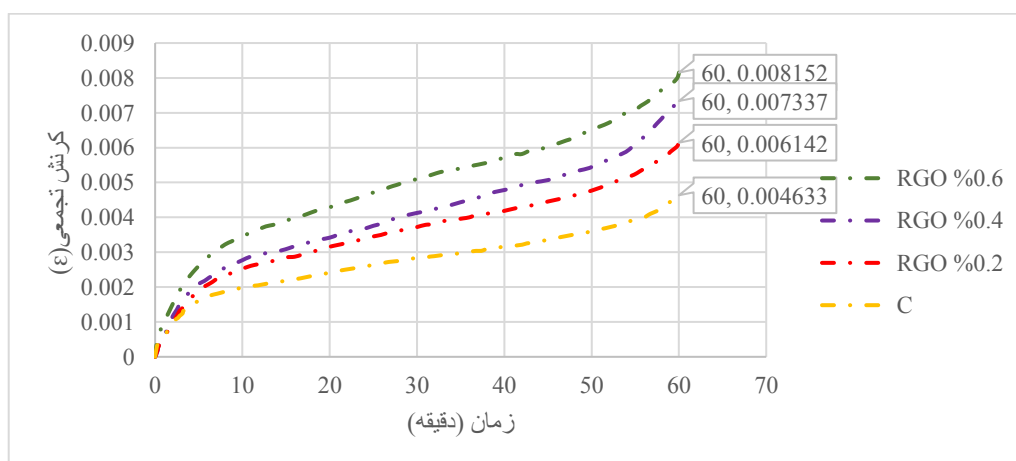
۴-۳. آزمایش خزش استاتیک

نتایج مربوط به تغییرات کرنش تجمعی نمونه‌های آسفالتی نسبت به زمان در شکل ۹ ارائه شده است. به طور کلی، تغییرات کرنش تجمعی در این نمودار را می‌توان به سه ناحیه تقسیم کرد. در ناحیه اول، نمونه آسفالتی به سرعت تغییر شکل می‌دهد و این قسمت با تغییر وضعیت و فشردن سنگدانه‌ها همراه است. در ناحیه دوم، تغییرات کرنش تجمعی تقریباً پایدار شده و با شیبی ثابت افزایش می‌یابد. این شرایط احتمالاً ناشی از جای‌گیری مجدد سنگدانه‌ها و درگیری بین آنها و تکیه کردن آنها به یکدیگر است. نهایتاً، در ناحیه سوم، مجدداً تغییرات کرنش تجمعی با سرعت زیادی افزایش می‌یابد که منجر به اضمحلال کامل نمونه آسفالتی می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده (شکل ۹)، افزایش نانو RGO باعث افزایش کرنش تجمعی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. این نتیجه می‌تواند به دلیل افزایش نرمی و انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی به علت افزایش مقدار افزودنی در مخلوط باشد. در واقع، وجود نانو اکسید گرافن کاهش یافته در مخلوط آسفالتی منجر به افزایش انعطاف‌پذیری و در نهایت افزایش تغییر شکل دائمی

نمونه‌ها می‌شود. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، مخلوط‌های حاوی نانو اکسید گرافن کاهش یافته نسبت به مخلوط کنترلی دارای کرنش تجمعی نهایی بیشتری هستند که از این لحاظ عملکرد قابل قبولی در برابر تغییر شکل به حساب نمی‌آید. همچنین، با توجه به شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی افزودنی نانو RGO دارای سختی خزشی کمتری نسبت به نمونه کنترلی هستند. نتایج به دست آمده از این آزمایش با نتایج مطالعات قبلی در مورد تأثیر مشتقات گرافیت بر مقاومت در برابر تغییر شکل در مخلوط‌های آسفالتی در تناقض است. به عنوان مثال، عدنان و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که استفاده از نانو اکسید گرافن در مخلوط آسفالتی باعث کاهش کرنش ماندگار در آزمایش خزش دینامیک شده است. یافته‌های حفیظ و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که پلاکت‌های نانوگرافن مقاومت در برابر شیارشدگی را در آزمایش ویل تراک افزایش می‌دهند. این تفاوت در نتایج ممکن است به دلیل تفاوت در نوع بارگذاری در آزمایش خزش استاتیک باشد. از آنجا که بارگذاری در این آزمایش یکنواخت و بدون تکرار بارگذاری و باربرداری است، این روش بارگذاری اجازه نمی‌دهد تا

از روش‌های دینامیک هم برای افزایش دقت نتایج استفاده کرد؛ زیرا آزمایش خزش استاتیک نمی‌تواند خاصیت ارتجاعی و کشسانی مواد افزودنی را در بهبود مقاومت در برابر تغییرشکل ماندگار مخلوط‌های آسفالتی نشان دهد. به علاوه این که در مخلوط‌های آسفالتی SMA وظیفه اصلی باربری و مقاومت در برابر تغییرشکل بر عهده ساختار سنگ‌دانه‌ای درشت مخلوط آسفالتی است و در واقع این پارامتر اصطکاک بین اجزای سنگی مخلوط آسفالتی است که وظیفه اصلی مقاومت در برابر تنش‌های فشاری را بر عهده دارد. به همین دلیل، هرچه اصطکاک بین اجزای این ساختار سنگی افزایش یابد، می‌توان شاهد بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل بود. همچنین، با توجه به این که افزایش ویسکوزیته قیر می‌تواند باعث افزایش ضخامت لایه قیری روی بافت سنگ‌دانه‌ها شود، این افزایش ضخامت لایه قیر روی بافت سنگ‌دانه‌ها می‌تواند باعث کاهش اصطکاک بین سطح سنگ‌دانه‌ها شود (یان و همکاران، ۲۰۲۰). لذا، از آنجایی که در مطالعه حاضر شاهد افزایش ویسکوزیته نمونه‌های قیر اصلاح‌شده با نانواکسید گرافن کاهش یافته بودیم، لذا این عامل را می‌توان در کاهش اصطکاک ساختار سنگی مخلوط SMA مؤثر دانست.

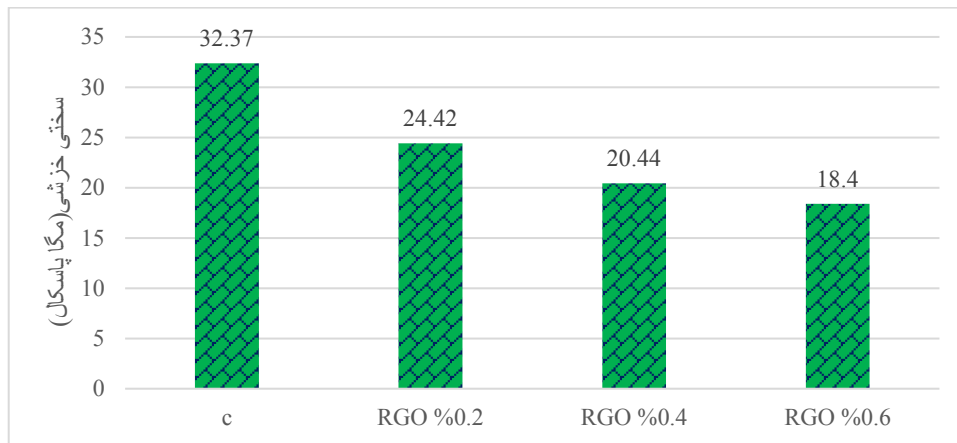
نمونه آسفالتی زمان لازم برای بازگشت به حالت اولیه پس از بارگذاری را پیدا کند. بنابراین، این آزمایش نمی‌تواند تأثیر خواص کشسانی مواد افزودنی بر بهبود مقاومت نمونه آسفالتی در برابر تغییرشکل را نشان دهد. بنابراین، نتایج مقاومت در برابر تغییرشکل در آزمایش خزش استاتیک ممکن است برای برخی از افزودنی‌ها در مقایسه با سایر آزمایش‌هایی که برای بررسی تغییرشکل مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود متفاوت باشد (مانند آزمایش خزش دینامیک و آزمایش ویل تراک^۱). یافته‌های بقایی مقدم و همکاران (۲۰۱۷) این واقعیت را تأیید می‌کند؛ زیرا آنها گزارش کردند که افزودن یک درصد ماده PET^۲ به مخلوط آسفالتی، تغییرشکل ماندگار تحت بارگذاری استاتیک را افزایش داده و تغییرشکل ماندگار تحت بارگذاری دینامیک را در مقایسه با نمونه شاهد کاهش می‌دهد. در نهایت، می‌توان گفت که با توجه به مطالعات قبلی، نتایج تغییرشکل نمونه‌های حاوی نانو RGO تحت بارگذاری‌های دینامیک امکان دارد متفاوت با نتایج حاصل از آزمایش خزش استاتیک باشد. به همین دلیل، نمی‌توان برای بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو RGO در برابر تغییرشکل‌های ماندگار تنها به نتایج آزمون خزش استاتیک اکتفا کرد. بلکه باید



شکل ۹. نمودار تغییرات کرنش تجمعی نسبت به زمان نمونه‌های آسفالتی

²- Polyethylene terephthalate

¹- Wheel track



شکل ۱۰. مقادیر مدول سختی خزشی نمونه‌های آسفالتی

در شکل ۱۲ نشان داده شده است، افزودن نانو RGO در مخلوط‌های SMA باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها در مقایسه با مخلوط شاهد در شرایط خشک می‌شود و مقاومت چسبندگی یا مقاومت کششی در مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهد. همچنین، حفیظ و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که نانوپلاکت‌های گرافن با خواص کشسانی خود، مقاومت کششی قیر را بهبود می‌بخشند، که با نتایج مخلوط‌های حاوی نانو اکسید گرافن کاهش‌یافته در مطالعه حاضر مطابقت دارد. بر اساس نتایج نمونه‌های خشک، می‌توان دریافت که در مخلوط‌های حاوی نانو اکسید گرافن کاهش‌یافته، با افزایش مقدار این ماده تا ۰/۴ درصد، یک روند صعودی در مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی دیده می‌شود. اما با تغییر مقدار آن از ۰/۴ درصد به ۰/۶ درصد، روند تغییر کرده و حالت نزولی پیدا می‌کند. به طوری که با افزودن ۰/۲ و ۰/۴ درصد از این افزودنی به مخلوط‌های آسفالتی، افزایش ۲۰ و ۲۶ درصدی در مقاومت چسبندگی نمونه‌های خشک مشاهده شد. در حالی که افزودن ۰/۶ درصد از این ماده نانو به مخلوط آسفالتی تنها باعث بهبود ۱۰ درصدی مقاومت چسبندگی در حالت خشک شد. از آنجایی که در این مطالعه مشاهده شد که مکانیسم شکست در نمونه‌های خشک از نوع شکست در

۴-۴. آزمایش بیرون‌کشیدگی (مقاومت چسبندگی پول آف)

برای برآورد قدرت چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمون بیرون‌کشیدگی یا کشش مستقیم در این مطالعه استفاده شد. طبق مطالعات قبلی، دو مکانیسم خرابی در مخلوط‌های آسفالتی در این آزمایش وجود دارد. به این صورت که اگر کمتر از ۵۰ درصد از فیلم‌های قیر از روی سنگ‌دانه‌ها جدا شوند، مکانیسم خرابی از نوع خرابی در پیوستگی^۱ مصالح نامیده می‌شود. در غیر این صورت، اگر بیش از ۵۰ درصد از فیلم‌های قیری از سنگ‌دانه‌ها جدا شوند، مکانیسم خرابی از نوع خرابی در چسبندگی^۲ بین مصالح نامیده می‌شود (کانیتپونگ و همکاران، ۲۰۰۵). همانطور که در این تحقیق پیش‌بینی می‌شد، به دلیل نفوذ آب به فضاهای خالی نمونه‌های عمل‌آوری شده، قدرت اتصال بین قیر و سنگ‌دانه‌ها در این نمونه‌ها کاهش‌یافته و باعث ایجاد مکانیسم خرابی از نوع چسبندگی شده است (شکل ۱۱-ب). اما در مورد نمونه‌های عمل‌آوری نشده، مشاهده شد که مکانیسم شکست از نوع پیوستگی بوده و به طور معمول در این نوع مکانیسم، شکستی در سنگ‌دانه‌ها مشاهده شد و در واقع مکانیسم خرابی از محل سنگ‌دانه‌ها رخ داد (شکل ۱۱-الف). همانطور که

²- Adhesive failure

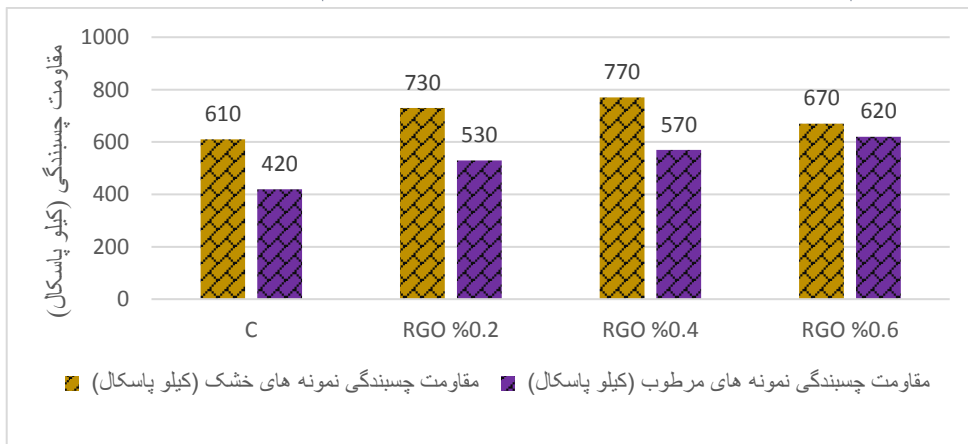
¹- Cohesive failure

درصد نانو RGO در نمونه‌های عمل‌آوری شده منجر به بهبود قدرت چسبندگی (مقاومت کششی) شده و روند صعودی را در آن ایجاد می‌کند. به طوری که اضافه شدن ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد از نانو اکسید گرافن کاهش یافته به مخلوط‌های آسفالتی باعث بهبود به ترتیب ۲۶٪، ۳۶٪ و ۴۸٪ در مقاومت کششی یا قدرت چسبندگی نمونه‌های مرطوب در مقایسه با نمونه شاهد شد. این روند صعودی به خوبی تأثیر افزودنی نانو بر افزایش انسجام ذرات قیر، بهبود چسبندگی و قفل‌شدگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها را نشان می‌دهد. این عامل، یک سیستم الاستیک عالی را در مخلوط آسفالتی ایجاد می‌کند که مقاومت در برابر تنش-های کششی را افزایش می‌دهد.

پیوستگی بوده و مکانیسم خرابی از محل سنگ‌دانه‌ها و با شکستن آنها رخ داده است (شکل ۱۱- الف)، این تغییرات در روند ممکن است به دلیل وجود سنگ‌دانه‌های ضعیف و یا شکست و ترک خوردن سنگ‌دانه‌ها در فرایند تراکم مخلوط آسفالتی باشد که باعث می‌شود مکانیسم خرابی در نمونه‌های خشک از این نقاط ضعیف رخ دهد و مقاومت چسبندگی (مقاومت کششی) مخلوط آسفالتی کاهش یابد و در روند نتایج اختلال ایجاد کند. طبق شکل ۱۲، به دلیل قرار گرفتن نمونه‌های عمل‌آوری شده در چرخه ذوب و یخ، مقاومت چسبندگی (مقاومت کششی) مخلوط‌ها در مقایسه با نمونه‌های عمل‌آوری نشده کاهش می‌یابد. همچنین، همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، افزایش



شکل ۱۱. الف) مکانیسم خرابی در پیوستگی در نمونه‌های خشک و ب) مکانیسم خرابی در چسبندگی در نمونه‌های مرطوب



شکل ۱۲. نتایج آزمایش بیرون‌کشیدگی برای نمونه‌های آسفالتی

جدول ۶. نتایج آنالیز آماری ANOVA

آزمایش کشش غیرمستقیم							
Source of variation		Sum of squares	df	Mean squares	F-value	P-value	Acceptance
Nano RGO content	Between groups	397.744	1	397.744	139.577	.000	Accepted
	Within groups	28.496	10	2.850			
	Total	426.241	11				
آزمایش خزش استاتیک							
Source of variation		Sum of squares	df	Mean squares	F-value	P-value	Acceptance
Nano RGO content	Between groups	317.374	1	317.374	51.650	.000	Accepted
	Within groups	61.447	10	6.145			
	Total	378.821	11				
آزمایش بیرون کشیدگی							
Source of variation		Sum of squares	df	Mean squares	F-value	P-value	Acceptance
Nano RGO content	Between groups	25600	1	25600	11.424	.007	Accepted
	Within groups	22408	10	2240.8			
	Total	48008	11				

۴-۵. آنالیز آماری

پس از بررسی تأثیر نانواکسید گرافن کاهش یافته بر خصوصیات مکانیکی مخلوط SMA توسط آزمایش‌های مختلف مکانیکی، در این قسمت، قابل توجه بودن و معنی دار بودن تأثیر این نانوماده بر خصوصیات مخلوط آسفالتی در آزمایش‌های مختلف مکانیکی به وسیله‌ی شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این منظور، در این مطالعه، تست آنالیز واریانس یک طرفه ANOVA با استفاده از نرم‌افزار SPSS روی داده‌ها انجام شد و نتایج در جدول ۶ خلاصه شده است. فرض صفر در این آنالیز این بود که میانگین تفاوت‌ها در میانگین مقادیر پارامترهای مختلف برای مخلوط‌های کنترلی و مخلوط‌های اصلاح شده با ماده نانو با هم برابر است. همچنین، تفاوت‌های معنی دار این گونه تعریف شد که مقدار پارامتر p-value کمتر از ۰/۰۵ (سطح اطمینان ۹۵٪) باشد (فخری و همکاران، ۲۰۲۲). در این بررسی، ANOVA برای آزمایش کشش غیرمستقیم روی پارامتر

TSR، برای آزمایش خزش استاتیک روی پارامتر سختی خزشی و برای آزمایش بیرون کشیدگی روی پارامتر مقاومت چسبندگی (مقاومت کششی) در شرایط خشک انجام شده است. با توجه به جدول ۶ می‌توان گفت که از آنجایی که مقدار پارامتر P-value کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، فرضیه صفر برای نشان می‌دهد که تأثیر نانو RGO در بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی قابل توجه بوده است. همچنین، با توجه به نتایج این جدول مشاهده می‌شود که فرض صفر برای آزمایش خزش استاتیک نیز رد شده است و این امر نشان از تأثیر قابل توجه نانو RGO در مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل را دارد. در آزمایش بیرون کشیدگی نیز همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، مقدار پارامتر P-value برابر با ۰/۰۰۷ می‌باشد که این مقدار کمتر از ۰/۰۵ است و نشان از رد فرض صفر دارد و در واقع می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر نانو RGO بر مقاومت چسبندگی (مقاومت کششی) نیز قابل توجه و معنی دار بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی، تلاش شد تا اثر نانواکسید گرافن کاهش‌یافته (RGO) به عنوان افزودنی اصلاح‌کننده بر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای (SMA) ارزیابی شود. برای این منظور، آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم، آزمایش خزش استاتیک و آزمون بیرون‌کشیدگی (مقاومت چسبندگی پول آف) روی مخلوط‌های SMA اصلاح‌شده با سه درصد مختلف نانو RGO، مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، آزمایش‌های رایج قیر روی قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده انجام شد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، نتایج این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- آزمایش‌های رایج قیر نشان داد که استفاده از نانواکسید گرافن کاهش‌یافته در قیر خالص منجر به افزایش نقطه نرمی، وزن مخصوص و ویسکوزیته می‌شود و همچنین باعث کاهش خواص نفوذپذیری و شکل‌پذیری قیر می‌گردد.

- افزودن نانواکسید گرافن کاهش‌یافته به مخلوط SMA باعث بهبود اتصال بین قیر و سنگ‌دانه‌ها و کاهش ایجاد ترک‌های ریز در مقیاس نانو می‌شود، که این مسئله باعث افزایش قابل توجه مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی در حالت خشک و مرطوب شد. همچنین، این نانوماده، با بهبود تنش کششی سطحی بین قیر و سنگ‌دانه، باعث افزایش کیفیت تماس قیر و سنگ‌دانه می‌شود که در نتیجه

۶. مراجع

- Abo-Qudais, S. 2007. "The effects of damage evaluation techniques on the prediction of environmental damage in asphalt mixtures". *Build. Environ.*, 42(1): 288-296.
- Adnan, A. M., Luo, X., Lü, C., Wang, J. and Huang, Z. 2020. "Improving mechanics behavior of hot mix asphalt using graphene-oxide". *Constr. Build. Mater.*, 254: 119261.
- Aravind, S., Isac, A. J. and Aparajith, S. 2018. "Construction of porous asphalt pavement using graphene". *Int. J. Recent Trends Eng. Res.*, 4: 475-481.
- Fakhri, M. and Mottahed, A. R. 2021. "Improving moisture and fracture resistance of warm mix asphalt containing RAP and nanoclay additive". *Constr. Build. Mater.*, 272: 121900.

افزایش شاخص TSR و بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را در پی دارد.

- آزمایش خزش استاتیک نشان داد که اضافه شدن نانواکسید گرافن کاهش‌یافته در مخلوط آسفالتی باعث افزایش کرنش جمعی و کاهش سختی خزشی می‌شود، که در واقع نشان می‌دهد مخلوط‌های اصلاح‌شده با ماده نانو مقاومت خوبی در برابر تغییرشکل‌های ماندگار ندارند. اما با توجه به اینکه آزمون خزش استاتیک، به دلیل نوع بارگذاری آن، توانایی بررسی تأثیر ماده افزودنی بر خاصیت کشسانی و الاستیک مخلوط آسفالتی را ندارد، نیاز است که برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، رفتار تغییرشکل مخلوط‌های آسفالتی تحت بارگذاری دینامیک هم مورد بررسی قرار گیرد.

- افزودن نانواکسید گرافن کاهش‌یافته، میزان قفل و بست و چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها را بهبود می‌بخشد، که در نهایت منجر به ایجاد یک سیستم الاستیک عالی در مخلوط آسفالتی می‌شود. در نتیجه، این فرآیند میزان قدرت چسبندگی و مقاومت کششی مستقیم (مقاومت چسبندگی) را در شرایط خشک و مرطوب افزایش می‌دهد.

نتایج آنالیز آماری ANOVA نشان داد که تأثیر نانو RGO بر مخلوط SMA در آزمایش‌های مکانیکی انجام شده در این مطالعه قابل توجه و معنی‌دار بوده است.

- Fakhri, M., Javadi, S., Sedghi, R., Arzjani, D. and Zarrinpour, Y. 2019. "Effects of deicing agents on moisture susceptibility of the WMA containing recycled crumb rubber". *Constr. Build. Mater.*, 227: 116581.
- Fakhri, M., Shahryari, E. and Ahmadi, T. 2022. "Investigate the use of recycled polyvinyl chloride (PVC) particles in improving the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA)". *Constr. Build. Mater.*, 326: 126780.
- Habibnejad, A., Ziari, H., Hajiloo, M., Abarghoie, M. and Karimi, P. 2020. "Laboratory evaluation of stone mastic asphalt containing amorphous carbon powder as filler material". *Constr. Build. Mater.*, 243: 118280.
- Hafeez, M., Ahmad, N., Kamal, M. A., Rafi, J., Zaidi, S. B. A. and Nasir, M. A. 2019. "Experimental investigation into the structural and functional performance of graphene nano-platelet (GNP)-doped asphalt". *Appl. Sci.*, 9(4): 686.
- Han, M., Li, J., Muhammad, Y., Hou, D., Zhang, F., Yin, Y. and Duan, S. 2018. "Effect of polystyrene grafted graphene nanoplatelets on the physical and chemical properties of asphalt binder". *Constr. Build. Mater.*, 174: 108-119.
- Jyothirmai, B., Kiranmai, M. H. and Vagdevi, K. 2020. "Graphene reinforces asphalt—doubles durability of road". In: *AIP Conference Proceedings*, 2269(1): 030085, AIP Publishing LLC.
- Kanitpong, K. and Bahia, H. 2005. "Relating adhesion and cohesion of asphalts to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures". *Transport. Res. Record*, 1901(1): 33-43.
- Khiavi, A. K. and Mansoori, S. 2017. "The performance of hot mix asphalt in dynamic and static creep tests". *Petrol. Sci. Technol.*, 35(15): 1627-1634.
- Liu, K., Zhu, J., Zhang, K., Wu, J., Yin, J. and Shi, X. 2019. "Effects of mixing sequence on mechanical properties of graphene oxide and warm mix additive composite modified asphalt binder". *Constr. Build. Mater.*, 217: 301-309.
- Lori, A. R., Hassani, A. and Sedghi, R. 2019. "Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 197: 130-142.
- Moghaddam, T. B., Soltani, M., and Karim, M. R. 2014. "Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads". *Construction and Building Materials*, 65, 487-494.
- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Gámiz, F. and Rubio-Gámez, M. C. 2018. "Mechanical and thermal properties of graphene modified asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 180: 265-274.
- Muniandy, R. and Aburkaba, E. E. 2010. "Effect of filler type and particle size on moisture susceptibility of stone mastic asphalt mixtures". *Austral. J. Basic Appl. Sci.*, 4(11): 5522-5532.
- Razavi, S. H. and Kavussi, A. 2020. "The role of nanomaterials in reducing moisture damage of asphalt mixes". *Constr. Build. Mater.*, 239: 117827.
- Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghobadipour, B. and Adresi, M. 2019. "Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete". *Constr. Build. Mater.*, 211: 88-98.
- Saltan, M., Terzi, S., and Karahancer, S. 2019. "Mechanical behavior of bitumen and hot-mix asphalt modified with zinc oxide nanoparticle". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(3), 04018399.
- Singh, B. B., Mohanty, F., Das, S. S. and Swain, S. K. 2020. "Graphene sandwiched crumb rubber dispersed hot mix asphalt". *J. Traffic Transport. Eng. (English Edition)*, 7(5): 652-667.
- Sivashankari, P. R. and Prabaharan, M. 2017. "Chitosan/carbon-based nanomaterials as scaffolds for tissue engineering". In: *Biopolymer-Based Composites*, pp. 381-397, Woodhead Publishing.
- Su, Z., Muhammad, Y., Sahibzada, M., Li, J., Meng, F., Wei, Y., ... & Zhang, L. 2019. "Preparation and properties of aminated graphene fiber incorporated modified asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 229: 116836.
- Su, M., Si, C., Zhang, Z. and Zhang, H. 2020. "Molecular dynamics study on influence of Nano-ZnO/SBS on physical properties and molecular structure of asphalt binder". *Fuel*, 263, 116777.
- Tarcan, R., Todor-Boer, O., Petrovai, I., Leordean, C., Astilean, S. and Botiz, I. 2020. "Reduced graphene oxide today". *J. Mater. Chem. C*, 8(4): 1198-1224.
- Wang, R., Qi, Z., Li, R. and Yue, J. 2020. "Investigation of the effect of aging on the thermodynamic parameters and the intrinsic healing capability of graphene oxide modified asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 230: 116984.
- Wang, R., Yue, M., Xiong, Y. and Yue, J. 2021. "Experimental study on mechanism, aging, rheology and fatigue performance of carbon nanomaterial/SBS-modified asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 268: 121189.
- Wu, S. and Tahri, O. 2021. "State-of-art carbon and graphene family nanomaterials for asphalt modification". *Road Mater. Pavement Design*, 22(4): 735-756.
- Yan, K., Sun, H., You, L. and Wu, S. 2020. "Characteristics of waste tire rubber (WTR) and amorphous poly alpha olefin (APAO) compound modified porous asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 253: 119071.

- Yang, J. and Tighe, S. 2013. "A review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures". *Proc.-Soc. Behav. Sci.*, 96: 1269-1276.
- Yang, Q., Qian, Y., Fan, Z., Lin, J., Wang, D., Zhong, J. and Oeser, M. 2021. "Exploiting the synergetic effects of graphene and carbon nanotubes on the mechanical properties of bitumen composites". *Carbon*, 172: 402-413.
- Zeng, Q., Liu, Y., Liu, Q., Liu, P., He, Y. and Zeng, Y. 2020. "Preparation and modification mechanism analysis of graphene oxide modified asphalts". *Constr. Build. Mater.*, 238: 117706.
- Zhang, D. and Luo, R. 2019. "Using the surface free energy (SFE) method to investigate the effects of additives on moisture susceptibility of asphalt mixtures". *Int. J. Adhes. Adhes.*, 95: 102437.
- Zhang, H., Gao, Y., Guo, G., Zhao, B. and Yu, J. 2018. "Effects of ZnO particle size on properties of asphalt and asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 159: 578-586.
- Zhu, J., Zhang, K., Liu, K. and Shi, X. 2019. "Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide". *Constr. Build. Mater.*, 217: 273-282.
- Zhu, J., Zhang, K., Liu, K. and Shi, X. 2020. "Adhesion characteristics of graphene oxide modified asphalt unveiled by surface free energy and AFM-scanned micro-morphology". *Constr. Build. Mater.*, 244: 118404.