

کاربرد نانو اکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم در مخلوط‌های آسفالتی داغ با هدف ارتقای مقاومت در برابر ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی - یک مطالعه آزمایشگاهی

مسعود محمدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه

سمنان

غلامعلی شفا بخش، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مصطفی صادق‌نژاد*، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان،

رشت

Email: Mostafa.sadeghnejad@guilan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

چکیده

ترک خوردگی حرارتی و حساسیت رطوبتی دو مورد از مهمترین خرابی‌هایی هستند که در دوره بهره‌برداری، روسازی آسفالتی را با تهدیدات جدی مواجه می‌کنند. در این پژوهش، به ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی‌های نانو اکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم به مخلوط‌های آسفالتی HMA به منظور بهبود عملکرد آنها در برابر ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی پرداخته شده است. جهت دستیابی به اهداف این پژوهش، ابتدا قیر با ۰/۹ درصد نانوکربنات کلسیم و ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم ترکیب شده است و برای ارزیابی خصوصیات عملکردی نمونه‌های آسفالتی HMA حاوی افزودنی نانویی، آزمایش‌های خمش نیم‌دایره (SCB) در سه دمای ۵-، ۱۰- و ۱۵- درجه سلسیوس، و کشش غیرمستقیم (لاتمن اصلاح شده) در دو دمای ۱۰ و ۲۰ درجه سلسیوس انجام پذیرفت. بر اساس نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره و کشش غیرمستقیم، بهترین عملکرد و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم می‌باشد که مقدار مقاومت آن در برابر ترک‌های حرارتی حدود ۲۲ درصد بیشتر و حساسیت رطوبتی آن حدود ۶ درصد کمتر از نمونه کنترل می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایش SCB می‌توان دریافت که با افزایش Me از صفر تا حدود ۰/۴-۰/۶ که بارگذاری به صورت ترکیب کششی-برشی است، مقدار چقرمگی شکست کاهش می‌یابد و پس از آن که بارگذاری به سمت کشش خالص می‌رود، افزایش خواهد بود؛ به گونه‌ای که بیشترین مقاومت در برابر ترک خوردگی در حالت کشش خالص اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، ترک خوردگی حرارتی، حساسیت رطوبتی، نانو اکسید کلسیم، نانوکربنات کلسیم.

۱. مقدمه

از مهمترین انواع خرابی‌های روسازی، ترک خوردگی‌های حرارتی و حساسیت رطوبتی است که علاوه بر اینکه به تنهایی قادرند مشکلات زیادی برای روسازی به وجود آورند، حساسیت رطوبتی می‌تواند مقدمه به وقوع پیوستن خرابی‌های دیگر، نظیر شیارشدگی و خستگی، باشد (مهرآرا و خلدایی، ۲۰۱۳؛ نظرکو و همکاران، ۲۰۱۵).

برای دستیابی به روسازی مطلوب و بهبود عملکرد آن در برابر ترک‌ها و آسیب‌های رطوبتی، توجه به اصلاح قیرها با افزودنی‌های مناسب که سبب بهبود عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی شوند بسیار حائز اهمیت می‌باشد (صادق نژاد و شفابخش، ۲۰۱۷). محققین در تلاش هستند تا با افزودن مواد افزودنی مختلف همچون پلیمرها، لاستیک، مواد ضایعاتی و جدیداً نانومواد، مقاومت در برابر ترک خوردگی‌ها، عریان‌شدگی و دیگر خرابی‌ها را افزایش دهند (کیگوندو و رابرتز، ۱۹۸۸؛ آپیگی و همکاران، ۲۰۱۴؛ داس و سینگ، ۲۰۲۱). در این بین، استفاده از نانومواد برای بهبود عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی با توجه به خصوصیات منحصر به فردشان چند سالی است که بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. زارعی و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی تأثیر نانو اکسید سیلیس بر ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌اند. ارزیابی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نانو اکسید سیلیس با بهبود چسبندگی و پیوستگی قیر، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی بهبود بخشیده است.

فرخی و شهریاری (۲۰۲۱) به ارزیابی تأثیر استفاده از نانو ZnO و نانو اکسید گرافن بر عملکرد میزان حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت-دانه پرداخته‌اند. ارزیابی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از درصد‌های مختلف این دو نانوماده قادر است حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت ماستیک

درشت‌دانه را کاهش دهد، که در این بین عملکرد نانو ZnO بهتر از نانو اکسید گرافن بوده است. کلزین و همکاران (۲۰۲۰) طبق جدیدترین مطالعاتی که در مورد نانوذرات اکسید سیلیس، اکسید تیتانیوم و اکسید روی انجام شد دریافتند که این مواد باعث افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی شده‌اند؛ اما کاربرد بیش از حد آنها سبب کاهش مقاومت قیر در برابر خستگی می‌گردد. پیرمحمد و همکاران (۲۰۱۹) مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آهن و نانولوله‌های کربنی (به مقدار ۰/۱، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ درصد وزنی قیر) تحت مود بارگذاری ترکیبی I/II را در دمای ۱۵- درجه سلسیوس پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که نمونه‌های اصلاح شده مقاومت شکست بهتری نسبت به نمونه‌های پایه از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، مقاومت شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی اصلاح شده با CNTs بیشتر از مقاومت شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی اصلاح شده با Fe₂O₃ است. در حقیقت، استفاده از اصلاح‌کننده‌های حاوی نانومواد سبب می‌شود تا چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها بیشتر شده و در نتیجه عملکرد بهتری را داشته باشند. طبق نتایج، مقادیر مناسب استفاده از Fe₂O₃ و CNTs برای اصلاح مخلوط‌های آسفالتی گرم به ترتیب ۰/۸ و ۱/۲ درصد است. لی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر و کاربرد انواع نانوذرات بر مخلوط آسفالتی پرداختند. بر اساس مطالعات آنها، اضافه کردن نانو CaCO₃، SiO₂، TiO₂ و ZnO به مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش قابل توجه مقاومت در برابر ترک خوردگی در دماهای کم و همچنین بهبود عملکرد در دمای زیاد مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد.

فائزی و فرخی (۱۳۹۷) در پژوهشی، به بررسی تأثیر نانوزایکوترم بر مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی در مناطق سردسیر پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که افزودن ۰/۱۵ درصد نانوزایکوترم باعث افزایش مقاومت کششی

را در مقابله با ترک‌های حرارتی و حساسیت رطوبتی بهبود بخشید. هر دو نانوماده مورد بررسی در این تحقیق بر پایه کلسیم بوده که به علت سختی زیاد پیش‌بینی می‌شود که می‌تواند منجر به بهبود سفتی و سختی قیر گردد. با این حال، برای اینکه این سختی بیش از حد سبب بروز مشکلاتی در زمینه عملکرد آسفالت در مقابله با خرابی‌هایی نظیر خستگی نگردد، از این مواد در مقیاس نانو استفاده شده است. دلیل اینکه دو نوع نانوماده اکسید کلسیم و کربنات کلسیم با یکدیگر مقایسه شده‌اند آن است که اکسید کلسیم فعال‌تر از کربنات کلسیم بوده که خستگی می‌باشد. این تحقیق به بررسی این نکته می‌پردازد که آیا این فعالیت می‌تواند سبب بهبود عملکرد در برابر نفوذ رطوبت باشد یا خیر. اهداف مورد نظر این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد:

- ارتقای عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌های حرارتی و حساسیت رطوبتی
- مقایسه تأثیر نانو اکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم بر مقاومت HMA در برابر ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی.

۲. مصالح و آزمایش‌ها

۱-۲. مصالح

مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آسفالتی، از معدن شرکت ماکادم شرق واقع در شهر ورامین تهیه شده و از نوع سنگدانه‌های شکسته آهکی می‌باشد. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش حد وسط دانه‌بندی پیشنهادی نشریه ۲۳۴ با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلی‌متر برای لایه توپکا می‌باشد. حدود این دانه‌بندی در جدول ۱ ارائه شده است. آزمایش دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس استاندارد AASHTO-T27 و همچنین با روش شستشو برای مصالح سنگی ریزدانه انجام پذیرفت. علاوه بر آن، خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی در جدول ۲ آورده

در حالت خشک گردیده است؛ ولی اثربخشی افزودن ۰/۱ درصد نانوزایکوترم بیشتر از افزودن ۰/۱۵ درصد از این ماده بوده است. همچنین، نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داد که با افزودن ترکیبی ۰/۱ درصد نانوزایکوترم و فیلر سیمانی، بیشترین مقاومت کششی به دست آمده است.

یو و همکاران (۲۰۰۷) تحقیقاتی روی قیرهای اصلاح شده با نانوکربنات کلسیم انجام دادند. نتایج نشان داد که نانوکربنات کلسیم، همان‌طور که چقرمگی شکست را در دمای کم بهبود بخشیده است، توانست مقاومت در برابر شیارشدگی را نیز افزایش دهد. همچنین، یکنواخت و پایدار بودن ترکیب نانوکربنات کلسیم و قیر، دلیل عمده بهبود حساسیت دمایی قیر در دماهای زیاد معرفی شده است. گرای و مقدس نژاد (۱۳۹۶) به بررسی تأثیر استفاده از نانوکربنات کلسیم بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی داغ در ۱، ۳ و ۵ سیکل ذوب-یخ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از افزودنی نانوکربنات کلسیم موجب کاهش پتانسیل خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت و نیز افزایش چسبندگی و پیوستگی نمونه‌ها شده است. همچنین، نمونه‌های اصلاح شده با نانوکربنات کلسیم، در شرایط مرطوب و نیز در شرایط خشک، موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم شده است.

همان‌طور که بررسی مقالات و تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، استفاده از نانومواد در اندازه و با شیوه ترکیب کردن مناسب می‌تواند سبب بهبود قابل توجهی در عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی شود. علی‌رغم ویژگی‌های قابل توجه نانو اکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم، این دو نانوماده تا پیش از این چندان مورد توجه محققین نبوده و تحقیقات در خصوص آنها نیاز به بررسی بیشتر دارد. در نتیجه، تحقیق حاضر کوشیده است تا در ادامه تحقیقات گذشته، با استفاده از دو نوع نانوماده اکسید کلسیم و کربنات کلسیم، عملکرد مخلوط آسفالتی HMA

شده است. همچنین، قیر مصرفی در این تحقیق، قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران است که مشخصات آن در جدول ۳ درج گردیده است. مشخصات نانو اکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم مورد استفاده نیز در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی مطابق پیشنهاد نشریه ۲۳۴ برای لایه توپکا

اندازه الک (میلی‌متر)	درصد عبوری	
	حداقل	حداکثر
۱۹	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۰	۱۰۰
۴/۷۵	۴۴	۷۴
۲/۳۶	۲۸	۵۸
۰/۳	۵	۲۱
۰/۰۷۵	۲	۱۰

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

استاندارد آزمایش	مقدار مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
	رویه	آستر		
AASHTO T96	۳۰	۴۰	۲۱/۶	حداکثر سایش به روش لس آنجلس (درصد)
AASHTO T96	۲۵	۳۰	۸	حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (درصد)
ASTM D5821	۹۰	۸۰	۹۳	حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴
ASTM D5821	۲/۵	۲/۵	۱/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
AASHTO T85	۲/۵	۲/۸	۲/۳	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)

جدول ۳. مشخصات قیر ۷۰-۶۰ مورد استفاده

روش انجام آزمایش	محدوده مجاز آیین‌نامه	مقدار	خصوصیات
ASTM D70	-	۱/۰۱	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D5	۶۰-۷۰	۶۶	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (۰/۱ mm)
ASTM D36	۴۹-۵۶	۵۱	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
ASTM D113	>۱۰۰	۱۰۳	قابلیت کشش (انگمی) در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D92	>۲۳۲	۳۰۵	درجه اشتعال (درجه سلسیوس)
ASTM D2042	>۹۹	۹۹/۲	درجه خلوص با تری‌کلور اتیلین (%)

جدول ۴. مشخصات نانومواد مصرفی در این تحقیق

فرمول شیمیایی	ریخت شناسی ^۱	سطح مخصوص ویژه (m ² /g)	وزن مخصوص حجمی (g/cc)	جذب آب (%)	اندازه ذرات (nm)	خلوص (%)
CaO	کروی	۱۰۸	۲/۴۰	۰/۲<	۳۰-۲۰	۹۸/۰
CaCO ₃		۶۰	۲/۴۳		۳۰	۹۹/۹

گرم نموده و در طول نیم ساعت با فواصل زمانی یکسان، ترکیب نانوذرات - حلال به آرامی در میکسر ریخته شده و با ۴۰۰۰ دور بر دقیقه فرآیند اختلاط ادامه یافت تا جایی که مخلوطی همگن از قیر و نانوذرات ایجاد گردید. انتخاب مناسب‌ترین ترکیب همگن بر اساس آزمایش‌های فیزیکی صورت گرفته روی قیر کنترل و اصلاح شده بوده است. در پایان، نمونه‌های آسفالتی این تحقیق به منظور دستیابی به اهداف آن با ترکیبات قیری مطابق جدول ۵ ساخته شدند.

در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته، درصد نانومواد مورد استفاده در قیر بین صفر تا ۰.۵٪ نسبت به وزن قیر متغیر بوده است، زیرا استفاده بیش از این مقدار، طرح را غیراقتصادی می‌نماید. در نتیجه، بر اساس تجربیات موجود از تحقیقات گذشته (قربانی کوچکی، ۱۳۹۸؛ دارابی، ۱۴۰۰) و به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، از درصد بهینه نانو اکسید کلسیم (۱/۵ درصد نسبت به وزن قیر) و نانوکربنات کلسیم (۰/۹ درصد نسبت به وزن قیر) استفاده گردیده است. به منظور انجام اختلاط نهایی، ابتدا قیر را تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس

جدول ۵. مشخصات قیرهای اصلاح شده در این تحقیق

قیر کنترل	قیر اصلاح شده
قیر ۶۰-۷۰	قیر + ۰/۹ درصد نانوکربنات کلسیم
	قیر + ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم

آسفالتی انجام پذیرفت. درخت‌واره تحقیق حاضر در شکل ۱ نمایش داده شده است.

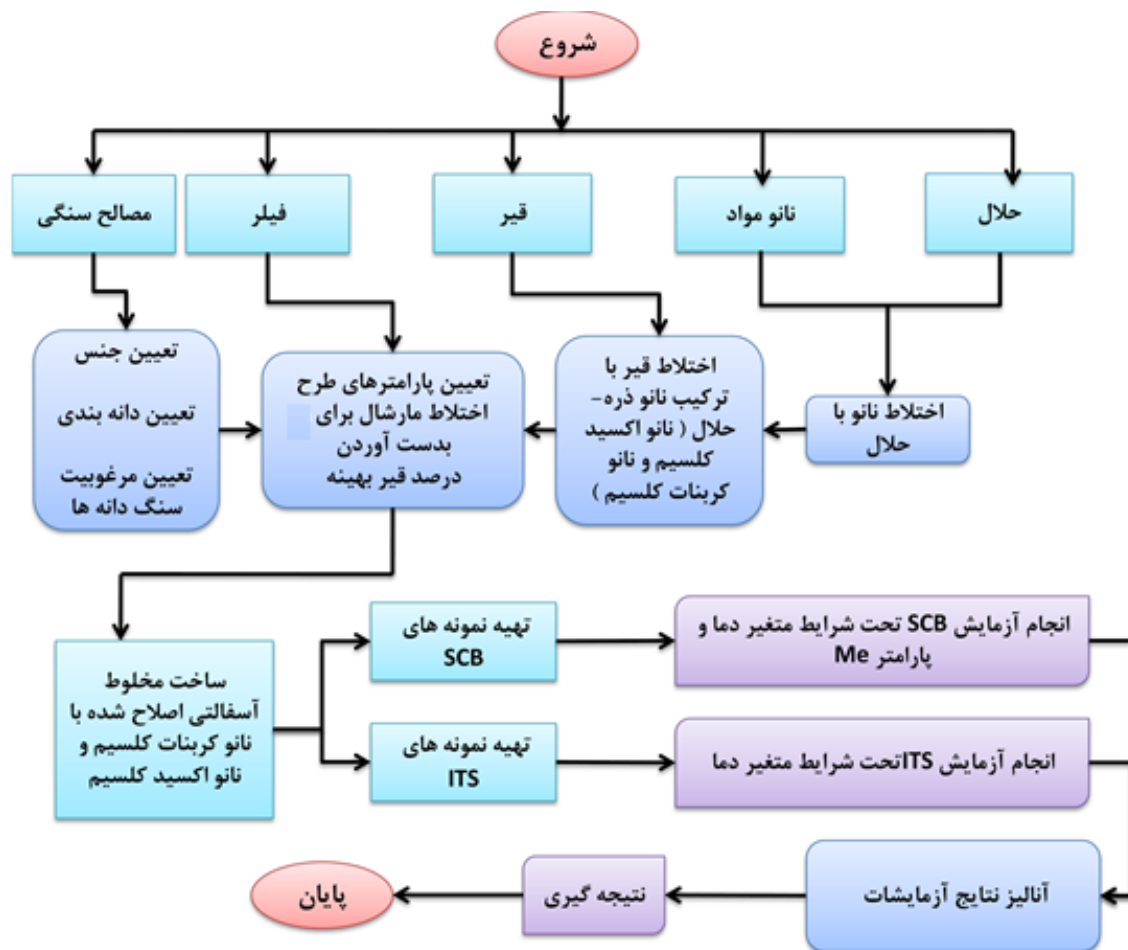
۲-۲-۱. آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB)

نمونه SCB یک صفحه نیم‌دایره با یک بریدگی به طول a میلی‌متر تحت زاویه α با محور مرکزی صفحه است. دستگاه آزمایش به طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است (ماراستینو و همکاران، ۲۰۰۷). نحوه انجام این آزمایش نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. متغیرهای سنجش ترک‌خوردگی نمونه‌های حاوی نانومواد نیز در جدول ۶ نشان داده شده است.

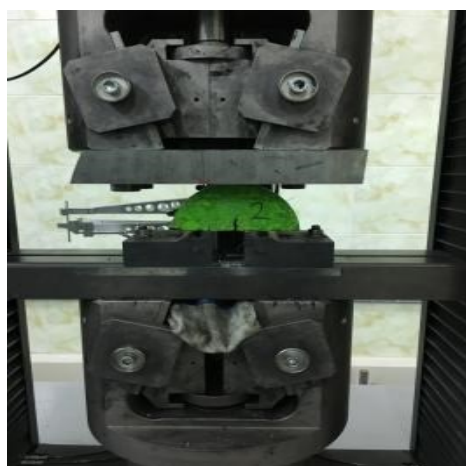
۲-۲. آزمایش‌ها

مقدار قیر بهینه برای نمونه‌های کنترل بر اساس آزمایش‌های مارشال مطابق استاندارد ASTM D1559، ۵ درصد به دست آمده است که این مقدار برای ساخت نمونه‌های کنترل و اصلاح شده با نانو اکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق و برای بررسی میزان مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم، آزمایش‌های خمش نیم‌دایره و کشش غیرمستقیم (لاتمن اصلاح شده) روی مخلوط‌های

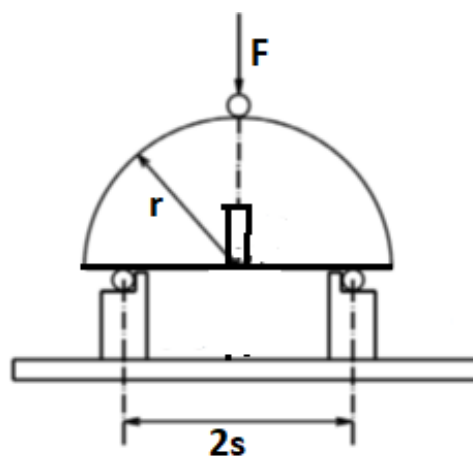
¹ - Morphology



شکل ۱. درخت‌واره تحقیق



شکل ۳. انجام آزمایش خمش نیم‌دایره



شکل ۲. شماتیک دستگاه آزمایش خمش نیم‌دایره

جدول ۶. تعداد نمونه‌ها و متغیرهای سنجش ترک خوردگی

متغیرها	مقدار
درصد نانو مواد	۰، ۰/۹ و ۱/۵
هندسه ترک	عمودی
دما (°C)	۵-، ۱۰-، ۱۵-
نرخ بارگذاری (mm/min)	۱
پارامتر Me	۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰

که در این معادله، P بیشترین نیروی اعمالی جهت شکست نمونه‌ها (کیلو نیوتون)، t ضخامت نمونه‌ها (میلی متر) و d قطر نمونه‌ها (میلی متر) می‌باشد. مقدار TSR معمولاً به صورت درصد و به صورت میانگین ITS نمونه‌های اشباع شده به اشباع نشده به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$TSR = \frac{ITS_{Conditiond}}{ITS_{unConditioned}} \times 100 \quad (2)$$

لاتمن بیان داشت که مخلوط‌های آسفالتی با مقدار بیشتر از ۷۰٪ عموماً کمتر مستعد آسیب‌های رطوبتی، که در مناطق پر بارش اتفاق می‌افتند، خواهند بود. این در حالی است که آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) به تبعیت از AASHTO نسبت مناسب را ۷۵٪ پیشنهاد می‌کند. بنابراین، نمونه‌های آسفالتی که نسبت TSR آنها بیش از ۷۵٪ باشد مستعد خرابی‌های رطوبتی نخواهند بود. متغیرهای سنجش حساسیت رطوبتی نمونه‌های حاوی نانو مواد در جدول ۷ نشان داده شده است.

۲-۲-۲. آزمایش لاتمن اصلاح شده (کشش غیرمستقیم)

یکی از معروف‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش لاتمن اصلاح شده (کشش غیرمستقیم) است. این آزمایش جهت تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های متراکم در حالت خشک و اشباع مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی متر و ضخامت ۵۷/۵ میلی متر متراکم شده و تعداد سه نمونه به صورت عمل‌آوری شده (اشباع) و سه نمونه به صورت عمل‌آوری نشده، مطابق استاندارد آشتو، تحت آزمایش کشش غیرمستقیم بین دو نوار فلزی صلب در راستای قطری نمونه‌ها با نرخ بارگذاری ۵۰ میلی متر بر دقیقه قرار گرفته تا نمونه‌ها گسیخته شوند. نیروی لازم برای گسیختگی نمونه‌ها ثبت می‌گردد. کشش غیرمستقیم (ITS) از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times t \times d} \quad (1)$$

جدول ۷. متغیرهای سنجش حساسیت رطوبتی

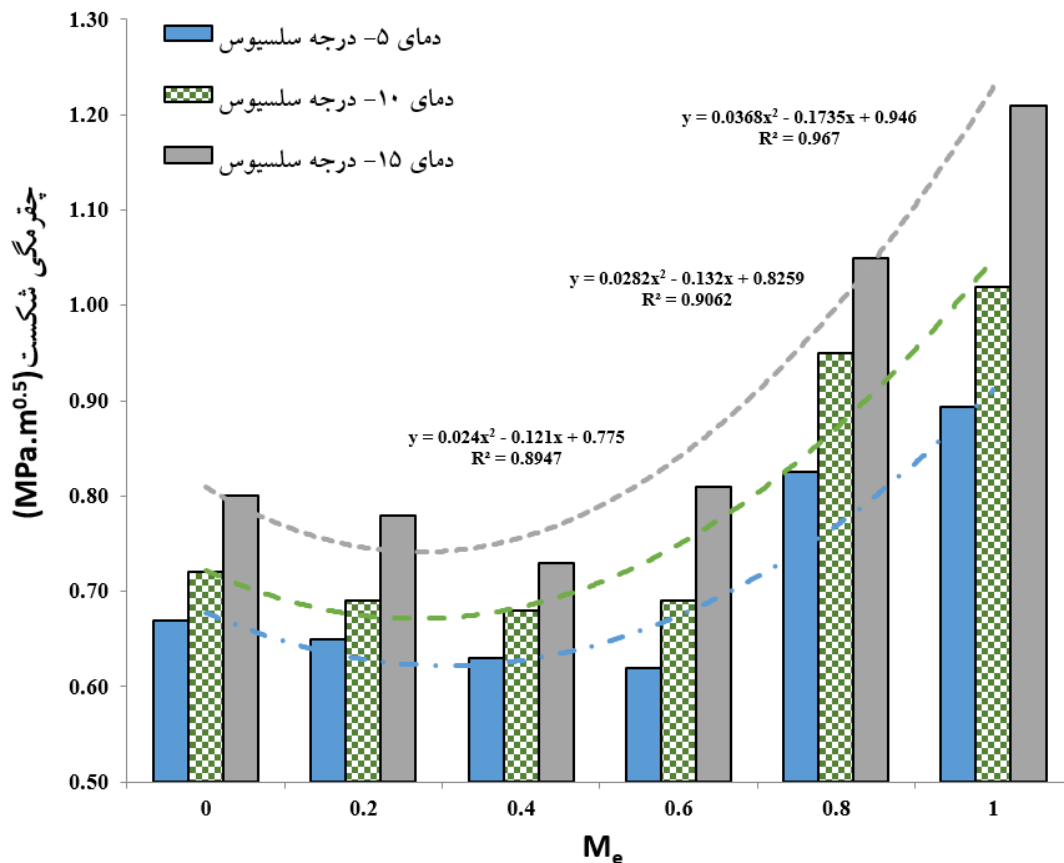
متغیر	مقدار
درصد نانو مواد	۰، ۰/۹ و ۱/۵ درصد
دما (°C)	۱۰ و ۲۰

۳. نتایج و بحث

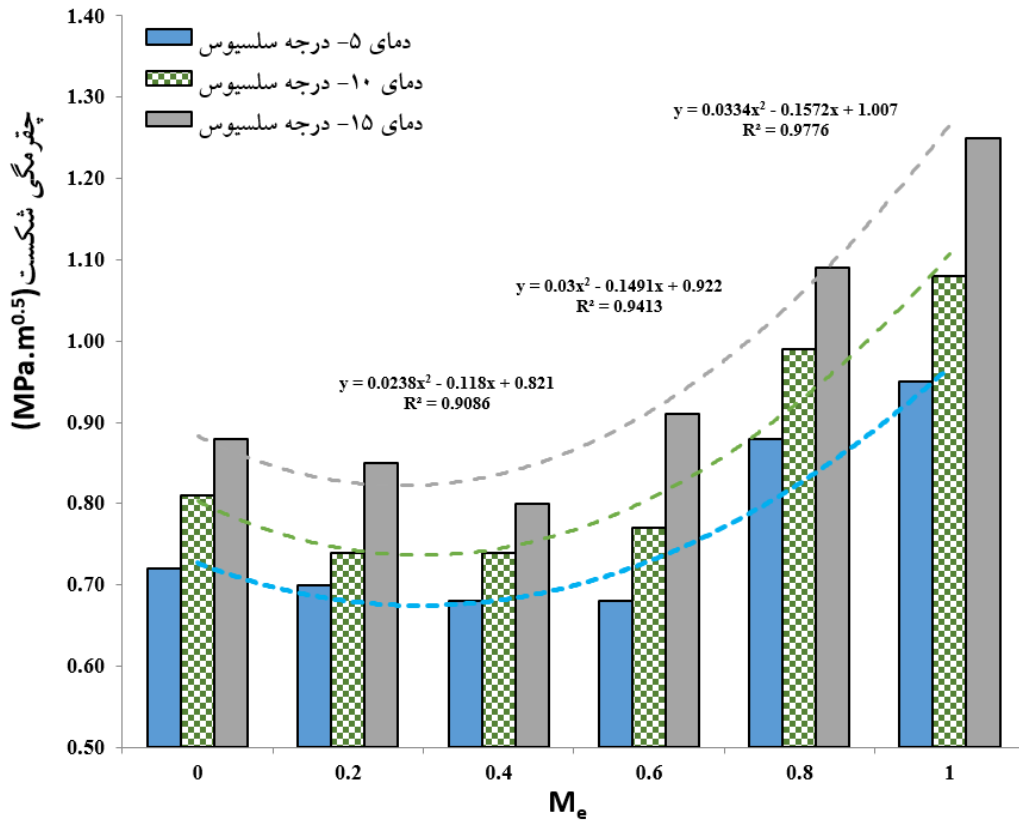
۳-۱. نتایج آزمایش SCB

نتایج این آزمایش در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. ابتدا، بر اساس نتایج این آزمایش، روند تغییر چقرمگی شکست با توجه به تغییرات دما مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، با کاهش دما از ۵- به ۱۰- و ۱۵- درجه سلسیوس و در تمامی نمونه‌ها (کنترل و اصلاح شده)، ضریب شدت (K_{eff}) افزایش یافته است. این موضوع بدان معناست که نمونه‌های آسفالتی در دماهای کمتر عملکرد مناسب‌تری در برابر ترک‌های حرارتی از خود نشان می‌دهند. برای نمونه، در مخلوط‌های آسفالتی ساده (بدون نانو) وقتی $Me=0$ باشد، با کاهش دما، مقدار مقاومت در برابر شکست نمونه‌ها در دمای ۱۵- نسبت به دمای ۵ °C

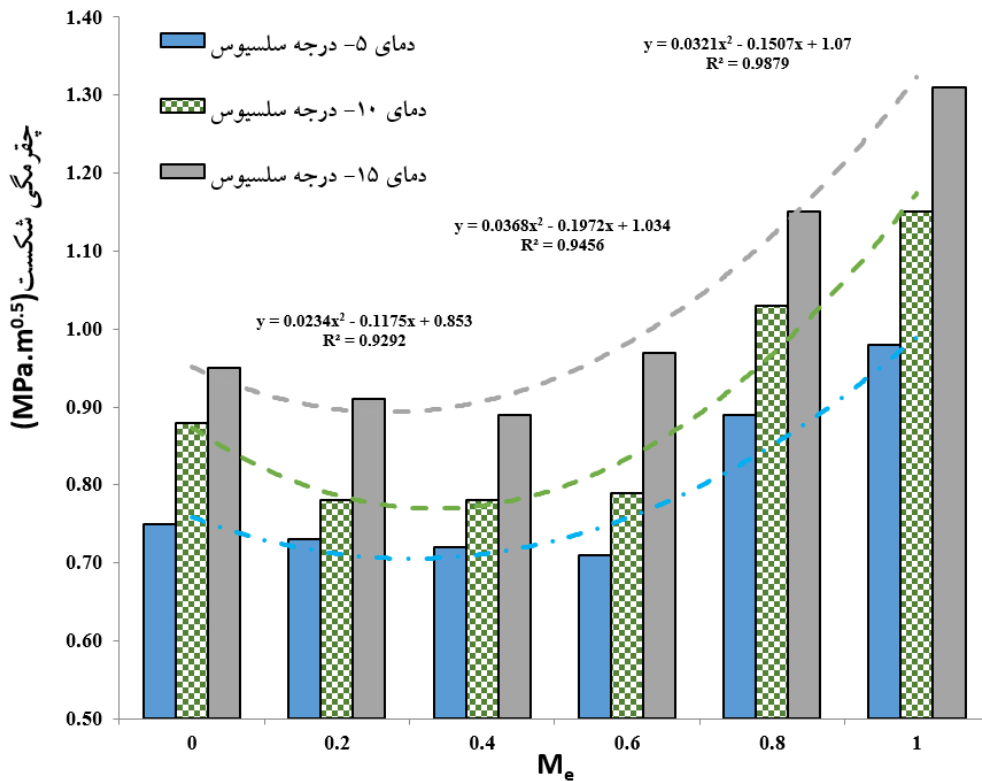
- حدود ۲۰٪ و نسبت به دمای ۱۰ °C حدود ۸٪ بیشتر شده است. این موضوع را می‌توان با تفسیر رفتار قیر در دماهای مختلف بررسی نمود. قیر در دماهای مختلف رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد. به‌گونه‌ای که این ماده در دماهای زیاد رفتار پلاستیک، در دماهای میانی رفتار ویسکوالاستیک و ویسکوالاستوپلاستیک و در دماهای کم رفتار الاستیک دارد. حال، با کاهش دما از ۵ °C به ۱۵-، قیر و مخلوط آسفالتی می‌توانند رفتار الاستیک بیشتری داشته باشند. در نتیجه، مقاومت آنها در برابر آغاز شکست بیشتر خواهد شد. همانطور که از شکل‌ها مشخص است، نتایج این بخش از آزمایش‌ها را می‌توان با یک نمودار درجه دو با ضریب همبستگی بسیار زیاد (>0.85) تخمین زد که نشان از همبستگی خوب نتایج این تحقیق دارد.



شکل ۴. چقرمگی شکست نمونه‌های کنترل (بدون نانو)



شکل ۵. چقرمگی شکست نمونه‌های اصلاح شده با ۱/۹ درصد Nano CaCO₃



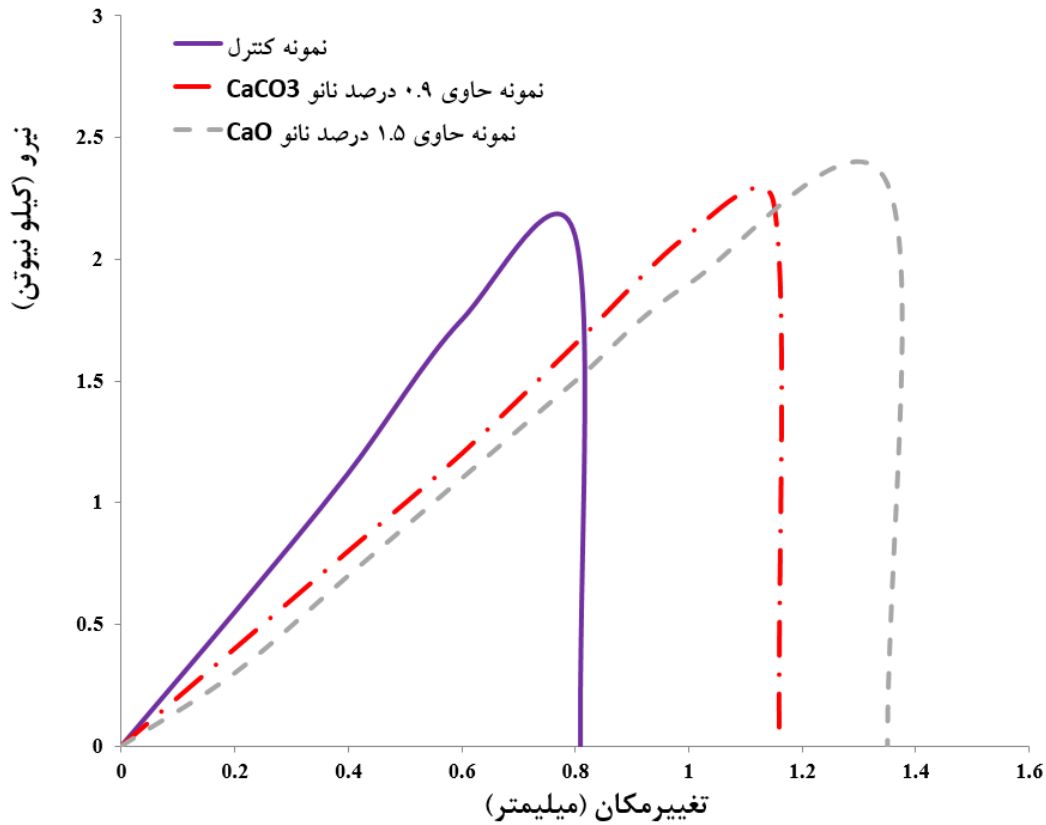
شکل ۶. چقرمگی شکست نمونه‌های اصلاح شده با ۱/۵ درصد Nano CaO

به ترتیب ۷، ۱۳ و ۱۰ درصد افزایش نسبت به نمونه پایه داشته است. اما با اضافه کردن ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم، چقرمگی شکست در سه دمای ۵-، ۱۰- و ۱۵- درجه سلسیوس به ترتیب ۱۲، ۲۲ و ۱۹ درصد می‌باشد. همچنین، در مد $Me=1$ با افزودن ۰/۹ درصد نانوکربنات کلسیم، چقرمگی شکست در سه دمای ۵-، ۱۰- و ۱۵- درجه سلسیوس به ترتیب موجب افزایش ۷، ۶ و ۳ درصدی شده است. حال اینکه با افزودن ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم، چقرمگی شکست در سه دمای ۵-، ۱۰- و ۱۵- درجه سلسیوس به ترتیب ۱۰، ۱۳ و ۸ درصد افزایش یافته است. در نتیجه، با بررسی‌های فوق به خوبی مشخص است که بهترین نمونه برای مقابله با ترک‌های حرارتی، نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم می‌باشد که در دماها و حالات بارگذاری مختلف حدود ۲۲-۸ درصد بهبود را برای چقرمگی شکست نسبت به نمونه کنترل به همراه داشته است.

همانطور که نتایج چقرمگی شکست نشان داد، کاهش دما سبب افزایش چقرمگی شکست و به‌علاوه نیروی شکست می‌شود. اما در دماهای زیر صفر، شکست نمونه‌ها به‌صورت ناگهانی رخ خواهد داد. برای بررسی تأثیر منفی یا مثبت نانومواد بر این شکست ناگهانی، نمودار نیرو-جابجایی در دمای ۵- درجه سلسیوس و $Me=1$ در شکل ۷ ترسیم شده است. همانطور که این نمودار نشان می‌دهد، با افزودن نانومواد، نیروی بیشینه و همچنین تغییر شکل‌پذیری نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل بیشتر شده و بهبود یافته است.

پس از دما، پارامتر دیگر تأثیرگذار بر مقاومت شکست نمونه‌ها، مد بارگذاری می‌باشد. با میل کردن Me به سمت صفر، مد بارگذاری به سمت مد بارگذاری برشی میل می‌کند (مد II - برشی خالص). همچنین، با میل کردن Me به سمت ۱، مد بارگذاری نیز به سمت مد بارگذاری کششی میل می‌کند که نماینده مد I (کششی خالص) می‌باشد. براساس نتایج، می‌توان دریافت که با افزایش Me از صفر تا حدود $0/4 - 0/6$ که بارگذاری به‌صورت ترکیب کششی-برشی می‌باشد، مقدار چقرمگی شکست کاهش و پس از آن که بارگذاری به سمت کشش خالص می‌رود افزایشی خواهد بود. به‌گونه‌ای که بیشترین مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در حالت کشش خالص اتفاق می‌افتد.

مقایسه نمونه‌های حاوی نانومواد و نمونه کنترل در این بخش انجام می‌پذیرد. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن ۰/۹ درصد $Nano CaCO_3$ و ۱/۵ درصد $Nano CaO$ موجب افزایش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی شده است. طبق این نمودارها، بیشترین مقدار افزایش چقرمگی شکست ($1/31$) در مد $Me=1$ با افزودن ۱/۵ درصد $Nano CaO$ در دمای ۱۵- درجه سلسیوس اتفاق افتاده است. همچنین، کمترین مقدار چقرمگی شکست ($0/62$) در مد $Me=0/4$ با افزودن ۰/۹ درصد $Nano CaCO_3$ در دمای ۵- درجه سلسیوس و در نمونه بدون نانو اتفاق افتاده است. به طور کلی، می‌توان گفت در مد $Me=0$ با افزودن ۰/۹ درصد نانوکربنات کلسیم، چقرمگی شکست در سه دمای ۵-، ۱۰- و ۱۵- درجه سلسیوس



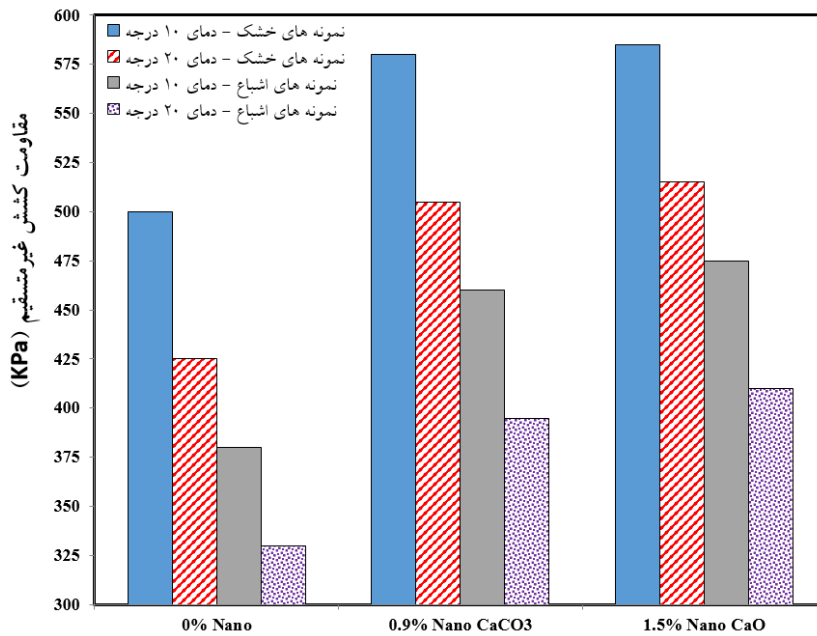
شکل ۷. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌ها در دمای ۵- درجه سلسیوس و $Me=1$

مقادیر در حالت اشباع نیز به ترتیب ۲۱ و ۱۵ درصد بهبود را نشان می‌دهند. همین بهبودها در دمای ۲۰ درجه سلسیوس نیز مشاهده می‌شود که به خوبی تأثیر نانومواد را بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی ثابت می‌کند. این موضوع می‌تواند به دلیل بهبود چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در اثر افزودن نانومواد در مخلوط‌های آسفالتی باشد که دلیل آن می‌تواند نسبت سطح به حجم زیاد نانومواد باشد. نانومواد، با خاصیت سطح به حجم زیاد، می‌توانند پوشاندگی قیر به دور مصالح سنگی را افزایش داده و مقاومت آن را در برابر نفوذ آب بهبود بخشند. این موضوع نشان‌دهنده آن است که افزودن نانومواد توانسته حساسیت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر رطوبت کاهش دهد.

۲-۳. نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده (کشش

غیرمستقیم)

شکل ۸، نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های خشک و اشباع و شکل ۹ نسبت TSR در این نمونه‌ها را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن ۰/۹ درصد نانوکربنات کلسیم و ۱/۵ درصد نانواکسید کلسیم در هر دو حالت خشک و تر سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها شده است. برای مثال، در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک، با افزودن ۰/۹ درصد نانوکربنات کلسیم، ۱۶٪ بیش از نمونه کنترل بوده است. این در حالیکه این مقدار برای نمونه با ۱/۵ درصد نانواکسید کلسیم، ۱۷٪ افزایش را نشان می‌دهد. این



شکل ۸. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS)

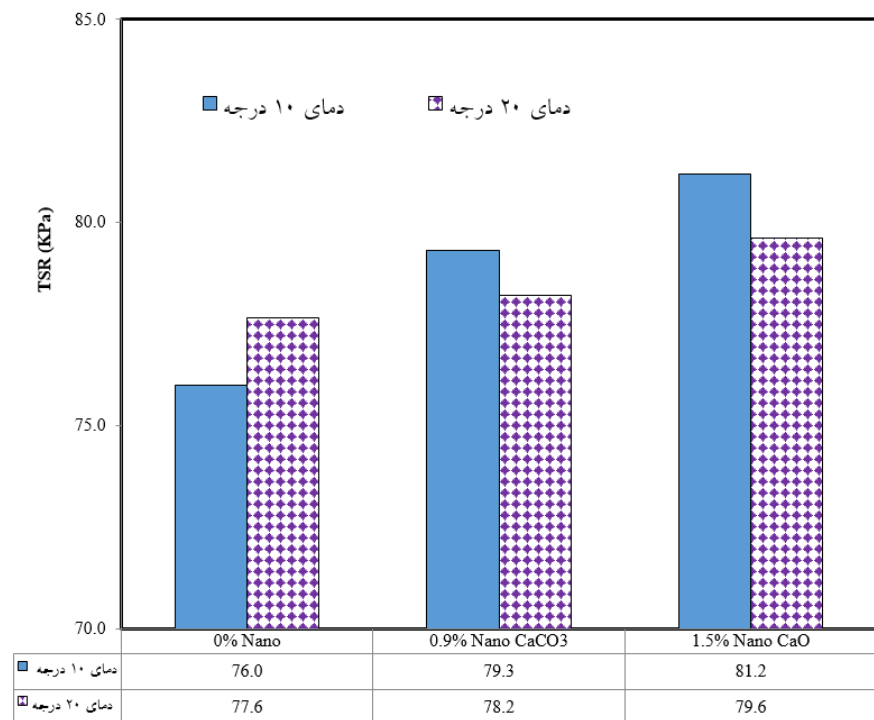
و ۲۰ درجه سلسیوس، مقدار TSR آن حدود ۲ و ۶ درصد بیش از نمونه کنترل می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم با استفاده از آزمایش چقرمگی شکست (SCB) تحت شرایط مد بارگذاری ترکیبی I و II (کشش و برش) در دماهای ۵-، ۱۰- و ۱۵- درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، میزان مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت (حساسیت رطوبتی) با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) در دو حالت خشک (Dry) و تر (Sat) در دو دمای ۱۰ و ۲۰ درجه سلسیوس تحلیل و ارزیابی شده است. عمده‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

همچنین، از نتایج می‌توان دریافت که با کاهش دما از $T=20^{\circ}\text{C}$ به $T=10^{\circ}\text{C}$ ، مقدار مقاومت کششی افزایش یافته است. به عبارتی، می‌توان نتیجه گرفت که در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، با افزودن ۰/۹ درصد نانوکربنات کلسیم و ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم، بهترین عملکرد برای مخلوط‌ها به دست آمده است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های این تحقیق، TSR بیش از حداقل آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (۷۵ درصد) دارند. با این حال، با اضافه شدن ۰/۹ درصد نانوکربنات کلسیم و ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم، این مقدار افزایش یافته است که نشانگر بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی می‌باشد. با مقایسه نمونه‌های مختلف ثابت می‌شود که از نظر شاخص TSR، بهترین عملکرد مربوط به نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانو اکسید کلسیم می‌باشد که در دماهای ۱۰



شکل ۹. نسبت مقاومت نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک (TSR)

- کاهش دما از 5°C به 15°C و 25°C در هر دو نرخ بارگذاری (مد کشش و برش)، افزایش ضریب شدت (Keff) را به همراه داشته که نشان‌دهنده آن است که پتانسیل رشد ترک در نمونه‌های آسفالتی در دمای کم، کمتر است.
- افزودن $1/5$ درصد Nano CaO و $0/9$ درصد Nano CaCO_3 باعث می‌شود تا چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی حداکثر ۲۲ درصد برای نانو اکسید کلسیم و حداکثر ۱۳ درصد برای نانو کربنات کلسیم، نسبت به نمونه کنترل، بهبود یابد.
- بر اساس نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم، با افزودن $1/5$ درصد Nano CaO و $0/9$ درصد Nano CaCO_3 در دماهای 10°C و 20°C سلسیوس، در حالت خشک و تر، میزان مقاومت کششی (ITS) افزایش یافته است. در نتیجه، موجب بهبود و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر نفوذ آب و رطوبت می‌شود.
- بر اساس نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره و کشش غیرمستقیم، بهترین عملکرد و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه حاوی $1/5$ درصد Nano CaO می‌باشد که مقدار مقاومت مخلوط در برابر ترک‌های حرارتی در آن حدود ۲۲ درصد بیش از نمونه کنترل و حساسیت رطوبتی آن حدود ۶ درصد کمتر از آن می‌باشد.
- بهبود عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی با افزودن $1/5$ درصد نانو اکسید کلسیم ادامه داشته و چه بسا این مسأله با افزوده شدن نانومواد بیشتر کماکان ادامه داشته باشد. اما نکته حائز اهمیت آن است که نانومواد عمدتاً افزودنی‌های گرانی هستند که استفاده بیش از حد از آنها سبب غیراقتصادی شدن طرح مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. در زمان خرید مصالح آزمایشگاهی این پژوهش (سال ۱۴۰۰) به ازای هر گرم نانو اکسید کلسیم حدوداً ۵۰ هزار تومان هزینه شده است. از طرفی، با توجه به اینکه قیر بهینه حدوداً ۵ درصد و استفاده از نانومواد بهینه

آسفالتی اضافه شود که در کنار مزایای بسیار زیاد آن، همچون بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی- های حرارتی و رطوبتی بسیار، می‌تواند مقرون به صرفه باشد.

حدوداً ۱/۵ درصد بوده است، پیش‌بینی می‌شود که در هر واحد مخلوط آسفالتی حدوداً ۰/۰۸ درصد نانومواد استفاده شود که در کنار هزینه‌های مخلوط کردن نانومواد در قیر می‌توان بیان داشت رقمی در حدود ۰/۱ درصد به هزینه‌های ساخت مخلوط

۵. مراجع

- فائزی، س. ف. و فرخی، ع. ۱۳۹۷. "تأثیر نانو زایکوترم بر مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی مناطق سردسیر (نمونه موردی: شهرستان سقز)". پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۵(۴). <https://civilica.com/doc/861069>.
- گرایی، ا. و مقدس نژاد، ف. ۱۳۹۶. "بررسی تأثیر استفاده از نانو کربنات کلسیم بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی داغ". مطالعات علوم کاربردی در مهندسی، ۳(۴): ۶۰-۵۰.
- دارایی، ا. ۱۴۰۰. "ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد مخلوط بتن آسفالتی حاوی نانو اکسید کلسیم در برابر خستگی و شیارشدگی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- قربانی کوچکی، ع. ۱۳۹۸. "بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از نانو کربنات کلسیم بر رفتار قیر در برابر خستگی و شیارشدگی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- Mehrara, A. and Khodaii, A. 2013. "A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 38: 423-442.
- Nazarko, J., Radziszewski, P., ..., Vilutiene, T. 2015. "Foresight study of road pavement technologies". *Proc. Eng.*, 122: 129-136.
- Sadeghnejad, M. and Shafabakhsh, G. 2017. "Experimental study on the physical and rheological properties of bitumen modified with different nano materials (Nano SiO₂ & nano TiO₂)". *Int. J. Nanosci. Nanotech.*, 13(3): 253-263.
- Das, A. K. and Singh, D. 2021. "Evaluation of fatigue performance of asphalt mastics composed of nano hydrated lime filler". *Constr. Build. Mater.*, 269: 121322.
- Apeagyei, A. K., Grenfell, J. R. A. and Airey, G. D. 2014. "Observation of reversible moisture damage in asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 60: 73-80.
- Kiggundu, B. M. and Roberts, F. L. 1988. "Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods". National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL.
- Zarei, M., Salehikalam, A., Tabasi, E., Naseri, A., Khordhebinan, M. V. and Negahban, M. 2022. "Pure mode I fracture resistance of hot mix asphalt (HMA) containing nano-SiO₂ under freeze-thaw damage (FTD)". *Constr. Build. Mater.*, 351: 128757.
- Fakhri, M. and 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 Stud. Constr. Mater.*, 15: e00655.
- Kleizienė, R., Paliukaitė, M. and Vaitkus, A. 2020. "Effect of nano SiO₂, TiO₂ and ZnO modification to rheological properties of neat and polymer modified bitumen". *International Symposium on Asphalt Pavement and Environment*, Springer, pp. 325-336.
- Pirmohammad, S., Majd-Shokorlou, Y. and Amani, B. 2019. "Experimental investigation of fracture properties of asphalt mixtures modified with nano Fe₂O₃ and carbon nanotubes". *Road Mater. Pavement Des.*, 21(8): 2321-2343.
- Li, R., Xiao, F., Amirhanian, S., You, Z. and Huang, J. 2017. "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials- A review". *Constr. Build. Mater.*, 143: 633-648.
- Yu, J., Wang, L., Zeng, X., Wu, S. and Li, B. 2007. "Effect of montmorillonite on properties of styrene-butadiene-styrene copolymer modified asphalt". *Polym. Eng. Sci.*, 47(9): 1289-1295.
- Marasteanu, M., Zofka, A., Turos, M., Li, X., Velasquez, R., Li, X., ..., McGraw, J. 2007. "Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements national pooled fund study, 776". Minnesota Department of Transportation.