Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

Semnan University

ISSN: 2821-0549

Research Article

Investigating the Effect of Nanosilica on the Morphology and Physical Properties of Asphalt Binder, the Changes in Moisture Damage and Mechanical Performance of Asphalt Mixture

Mahmoud Malakouti Olounabadi[1*], Mohammad Dehghani[2], Abdolreza Fazeli[1], Babak Golchin[3], Ramin Meshkabadi[4]

[1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, I. R. Iran.
[2] MSc., Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, I. R. Iran.
[3] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I. R. Iran.
[4] Assistant Professor, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-08-13
Revised: 2024-08-31
Accepted: 2024-08-31

Keywords:

Mechanical properties;
Asphalt mixture;
Nano-silica;
Moisture damage.

ABSTRACT

Although bitumen makes up only a small portion of asphalt mixtures, it significantly impacts their performance. Over the past few decades, bitumen modifier additives, such as nano-silica, have been utilized to enhance asphalt performance. This research aims to investigate the influence of nano-silica on the mechanical properties of asphalt and bitumen mixtures. The study utilized crushed stone materials with grading No. 4 of the Iran Road Pavement code, 70-60 pure bitumen, and nano-silica in varying amounts (2%, 4%, and 6% by weight of bitumen). Marshall and resilient modulus tests were employed to evaluate the mechanical properties of asphalt mixtures, while Marshall's resistance ratio was used to assess moisture sensitivity. Additionally, tests on penetration degree, softening point, and elasticity were conducted to evaluate the effect of nanosilica on bitumen properties. The findings revealed that modification of bitumen with nanosilica led to decreased penetration, increased softening point, and reduced plasticity. Furthermore, the use of nano-silica improved Marshall strength and reduced Marshall's flow in asphalt mixtures, with a 6% addition of nano-silica increasing strength by 41% compared to the control sample. The addition of nano-silica also enhanced the moisture sensitivity of the mixtures and increased the resilient modulus by 95% compared to control asphalt samples.

*** Corresponding author.**
E-mail address: malakooti@pgu.ac.ir

How to cite this article: Malakouti Oloun Abadi, M., Dehghani, M., Fazeli, A., Golchin, B., & Meshkabadi, R. (2024). Investigating the Effect of Nanosilica on the Morphology and Physical Properties of Asphalt Binder, the Changes in Moisture Damage and Mechanical Performance of Asphalt Mixture. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, *10*(2), 23-38. doi: 10.22075/jtie.2024.35020.1683

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

Semnan University

مقاله پژوهشی

بررسی اثر نانوسیلیس بر مورفولوژی و خواص فیزیکی قیر و تغییرات رفتار رطوبتی و مکانیکی مخلوط آسفالتی

محمود ملکوتی علون‌آبادی[۱*]، محمد دهقانی[۲]، عبدالرضا فاضلی[۱]، بابک گلچین[۳]، رامین مشک‌آبادی[۴]

[۱] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

[۲] کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

[۳] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

[۴] استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

واژگان کلیدی:

خصوصیات مکانیکی،

مخلوط آسفالتی،

نانوسیلیس،

آسیب رطوبتی.

چکیده

اگرچه وزن قیر در مخلوط‌های آسفالتی مقدار ناچیزی است، لیکن، اثر مهمی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد. در دهه‌های گذشته، جهت بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی از افزودنی‌های اصلاح‌کننده قیر استفاده شده است. یکی از این افزودنی‌ها در اصلاح رفتار قیرها، افزودنی نانوسیلیس می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی و قیر است. بدین منظور از مصالح سنگی شکسته با دانه‌بندی شماره ٤ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران، قیر ٦٠-٧٠ خالص و نانوسیلیس با مقادیر ٢، ٤ و ٦ درصد وزنی قیر استفاده گردید. برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش‌های استقامت و روانی مارشال و مدول برجهندگی و به منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش نسبت مقاومت مارشال استفاده شد. برای ارزیابی تأثیر نانوسیلیس بر مشخصات قیر از آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و کشش‌پذیری (خاصیت انگمی) استفاده گردید. اصلاح قیر با نانوسیلیس موجب کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و کاهش شکل‌پذیری (خاصیت انگمی) قیر شد. نتایج تأثیر آزمایش‌ها بر مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که استفاده از نانوسیلیس برای اصلاح قیر موجب افزایش استقامت مارشال و کاهش روانی مارشال می‌شود؛ به‌طوری که افزودن ٦ درصد نانوسیلیس به قیر باعث افزایش ٤١ درصدی استقامت نسبت به نمونه شاهد می‌شود. همچنین، افزودن نانوسیلیس باعث کاهش روانی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد. علاوه بر این، استفاده از نانوسیلیس، حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهد. افزودن ٦ درصد نانوسیلیس به قیر باعث افزایش ۹۵ درصدی مدول برجهندگی نسبت به نمونه‌های آسفالتی شاهد می‌شود.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: malakooti@pgu.ac.ir

استناد به این مقاله: ملکوتی علون آبادی, محمود, دهقانی, محمد, فاضلی, عبدالرضا, گلچین, بابک & ,مشک آبادی, رامین. (۱۴۰۳). بررسی اثر نانوسیلیس بر مورفولوژی و خواص فیزیکی قیر و تغییرات رفتار رطوبتی و مکانیکی مخلوط آسفالتی. *مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل*, ۱۰(۲), ۲۳-۳۸ .

doi: 10.22075/jtie.2024.35020.1683

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱. مقدمه

فناوری نانو، فناوری نوینی است که خواص مواد را در ابعاد نانو کنترل نموده و بهبود می‌دهد. زمانی که مواد در ابعاد نانوذره به‌کار گرفته می‌شوند، خواص فیزیکی و شیمیایی محصول مربوطه را به صورت معناداری تغییر می‌دهند (سنگوپتا و سرکار، ۲۰۱۵). نانومواد توانسته‌اند مقاومت مکانیکی مواد را افزایش دهند، بدون آنکه وزن این مواد به شکل قابل توجهی افزایش یابد. این مواد، گاهی ویژگی‌های الکتریکی و حرارتی بعضی از مواد را بهبود داده و کارایی آن‌ها را در صنعت گسترش می‌دهند. از طرفی، تعدادی از نانومواد وجود دارند که به عنوان یک کاتالیزور فعال عمل نموده، واکنش‌های شیمیایی را بهبود می‌دهند. این مواد در مواردی قادرند آلیاژهای سبک‌تری تولید کنند. همچنین، شرایطی را ایجاد می‌نمایند که دوام مواد را افزایش داده و طول عمر آن‌ها را بهبود دهند (کاپکو و چن، ۲۰۱٦؛ پاتل و همکاران، ۲۰۲۱؛ تانترا، ۲۰۱٦).

در سال‌های اخیر، فناوری نانو به‌طور قابل توجهی در اصلاح رفتار قیر و مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. این مواد گاه توانسته‌اند ویژگی‌های مقاومتی قیر و مخلوط‌های آسفالتی را در مقابل پدیده خستگی، شیارشدگی و ترک‌های حرارتی بهبود دهند. از طرفی، توانسته‌اند در بحث بهبود حساسیت حرارتی، ارتقا رفتار الاستیسیته، کاهش آلودگی و بهبود کارایی مخلوط آسفالتی نقش ایفا کنند. در مواردی، نانومواد چسبندگی قیر به مصالح سنگی را بهبود داده و میزان پیرشدگی قیر را کاهش می‌دهند. نانولوله کربنی، نانوسیلیس، نانوکربنات کلسیم، نانواکسید روی، نانوآهک هیدراته، نانواکسید مس، نانواکسید آهن، نانورس، نانواکسید آلومینیم و نانواکسید تیتانیم از جمله نانوذراتی هستند که در تحقیقات گذشته در خصوص اثر آن‌ها بر قیر و مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی‌هایی صورت گرفته است (دبارما و همکاران، ۲۰۲۲؛ فنگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ فاسکو و همکاران، ۲۰۲۰، لی و همکاران، ۲۰۱۷؛ یانگ و تیگه، ۲۰۱۳).

در آزمایش‌های مربوط به حضور نانومواد در مخلوط‌های آسفالتی، یو و همکاران (۲۰۱۱) در استفاده از نانورس به این نتیجه رسیدند که نانوماده موجب افزایش مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. احدی و همکاران (۲۰۱۵) روی تأثیر نانومواد بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی گرم مطالعاتی انجام دادند و مشاهده کردند که اضافه کردن دو درصد نانورس در آزمایش عمر خستگی روسازی آسفالتی در سطوح تنش ۲۰۰، ۳۰۰، ٤۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال، موجب افزایش دو برابری عمر خستگی آسفالت می‌گردد. مقدس نژاد و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با نانوذرات کربنات کلسیم پرداختند. ایشان برای ارزیابی رفتار شیارشدگی از آزمایش مدول سختی و خزش دینامیک استفاده کردند و مخلوط‌های آسفالتی را با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از نانوذرات کربنات کلسیم ساختند. نتایج نشان داد که استفاده از این نانوذرات تا مقدار ۱۵ درصد، شیارشدگی مخلوط‌ها را کاهش می‌دهد، لیکن مقدار ۵ درصد مقدار بهینه می‌باشد. عامری و همکاران (a ۲۰۱۵) به‌وسیله آزمایش‌هایی، اثر نانورس را بر رفتار تغییرشکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی بررسی نمودند. ایشان دریافتند که با افزودن نانورس، استقامت مارشال افزایش می‌یابد. از نتایج دیگر این تحقیق این بود که با افزودن نانورس به قیر، ابتدا روانی مخلوط افزایش و سپس با افزایش درصد نانورس، روانی کاهش می‌یابد. حامدی و همکاران (۲۰۲٤) از نانواکسید گرافن در بررسی رفتار رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند. این نانوماده رفتار رطوبتی مخلوط آسفالتی در شرایط سخت محیطی را بهبود داد. عامری و همکاران (a ۲۰۱۵) در پژوهشی، حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانورس را بررسی کردند و نشان دادند که نمونه‌های آسفالتی حاوی ٦ درصد از این افزودنی

کمترین مقدار عریان شدگی را دارا می‌باشند. آن‌ها بیان کردند که دلیل کاهش عریان شدگی با افزایش نانورس، مربوط به افزایش مقدار پوشش قیر روی سنگ‌دانه‌ها و نیز افزایش چسبندگی قیر حاوی نانورس می‌باشد. گلچین و همکاران (۲۰۲۲) از نانواکسید آهن و آلومینیوم برای بررسی چسبندگی قیر به مصالح سنگی استفاده نمودند. ایشان نشان دادند که هر دو نانوماده، چسبندگی قیر به مصالح سنگی را بهبود می‌دهند. عامری و همکاران (۲۰۱٦ b) تأثیر نانورس را بر عمر خستگی آسفالت داغ مورد مطالعه قرار دادند. ایشان از آزمایش‌های مدول کششی غیرمستقیم و خستگی تیر چهارنقطه‌ای استفاده نمودند .نتایج نشان داد که این نانوماده، عمر خستگی را در ۲۵ درجه سلسیوس بهبود می‌دهد؛ اما اثر منفی در دمای ۵ درجه سلسیوس دارد. عامری و همکاران در تحقیقی دیگر، از آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول ارتجاعی و خزش دینامیک برای بررسی اثر نانورس استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با اضافه کردن نانورس بود.

در آزمایش‌های مربوط به حضور نانومواد در قیر، ختاک و همکاران (۲۰۱۲) اثر نانوالیاف کربن را بر ویسکوزیته و مقاومت خستگی قیرها بررسی نموده و نشان دادند که این ماده موجب بهبود مشخصات قیرها می‌شود. حامدی و همکاران (۲۰۲۳) رفتار رئولوژیک قیر را در حضور نانواکسید کبالت بررسی نمودند. نتایج نشان داد که این نانوماده رفتار خستگی و شیارافتادگی قیر را به ترتیب در دمای میانی و زیاد بهبود می‌دهد. یائو و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی بیان کردند که با افزودن نانورس به قیر، ویسکوزیته قیر تغییر یافته و در حدود ۲۵ درصد در محدوده دمای ۱۰۰ تا ۱۹۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. احدی و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که نانولوله‌های کربن در آزمایش درجه نفوذ موجب بهبود رفتار قیر می‌شود و همچنین آزمایش نقطه نرمی نشان می‌دهد که اضافه کردن نانولوله کربنی به قیر باعث افزایش نقطه نرمی قیر می‌گردد. سان و همکاران (۲۰۱۷) در بهبود رفتار قیر با نانومواد و کامپوزیت‌های پلیمری در شرایط دمایی زیاد و کم نشان دادند که قیر اصلاح شده با SBR دارای مناسب‌ترین انعطاف‌پذیری است. این ویژگی، هنگامی که مقدار این ماده بیش از ٤ درصد باشد بهبود می‌یابد. ایشان بیان نمودند که نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر اصلاح شده با نانوسیلیکات و بنتونیت به وضوح افزایش یافته و عملکرد قیر در دمای زیاد بهبود می‌یابد. شیائو و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی اثر نانوذرات کربنی بر مشخصات رئولوژیک قیرهای پیرشده کوتاه‌مدت، به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن این ماده باعث بهبود مشخصات پیرشدگی قیرها خواهد شد.

تعدادی از پژوهشگران اثر نانوسلیس را در رفتار قیر و مخلوط‌های آسفالتی بررسی نمودند. قاسمی و همکاران (۲۰۱۲) در مورد اصلاح رفتار مخلوط آسفالتی با نانوسیلیس یک پژوهش آزمایشگاهی انجام داده و نتیجه گرفتند که افزودن نانوسیلیس به آسفالت باعث استحکام بیشتر و کاهش روانی نمونه‌های اصلاح شده در مقایسه با قیر اصلاح نشده می‌گردد. همچنین، افزایش درصد نانوسیلیس، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۲). هارون و احمد (۲۰۲٤) اثر نانوسیلیس را بر رفتار مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بررسی نمودند. ایشان نشان دادند که این نانوماده می‌تواند عملکرد چنین مخلوط‌هایی را بهبود دهد. جلیلی مجدی (۲۰۱۷) به تحلیل رفتار خستگی مخلوط آسفالتی داغ اصلاح‌شده توسط ترکیب نانوسیلیس و پلیمر استایرن–بوتادین–استایرن پرداختند. نتایج نشان داد که نانوسیلیس با مقدار ۳ درصد دارای عملکرد بهتر نسبت به نمونه بدون نانوسیلیس است. عزت و همکاران (۲۰۱٦) مشاهده نمودند که نانوسیلیس موجب کاهش مقدار درجه نفوذ و افزایش دمای نقطه نرمی قیرها می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مشخصات مصالح مصرفی

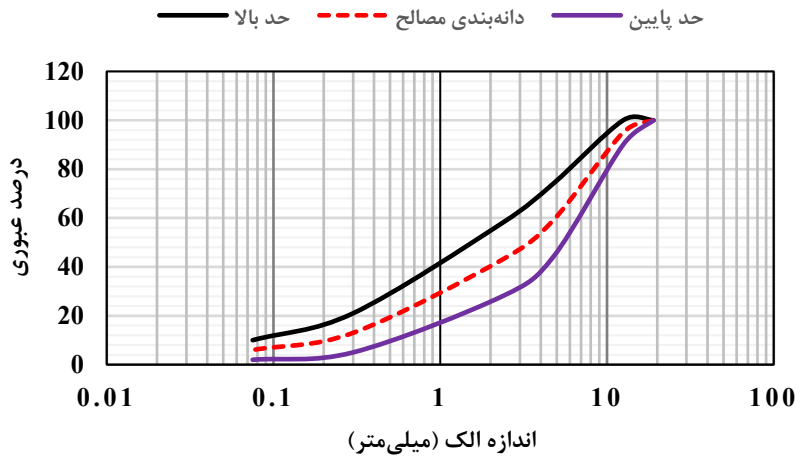
مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از یک کارخانه سنگ‌شکن واقع در شهرستان برازجان در استان بوشهر تهیه شد. دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس دانه‌بندی شماره ٤ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ٢٣٤) صورت گرفت. این دانه‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۱، میزان جذب آب مصالح سنگی را نشان می‌دهد. ارزش ماسه‌ای مصالح سنگی ۸۵ درصد و درصد سایش آن ۱۹ درصد بود. قیر مصرفی مورد استفاده در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۷۰-٦۰ است که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است. از این قیر برای تهیه نمونه‌های حاوی افزودنی نانوسیلیس استفاده شد. ویژگی‌های فنی قیر مصرفی در جدول ۲ نشان داده شده است.

نانوسیلیس مورد مصرف در این پژوهش دارای قطر ذرات ۱۱ تا ۱۳ نانومتر است. این نانومواد از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه گردید. شکل ۲، تصویر این نانوسیلیس را نشان می‌دهد. ترکیب شیمیایی این نانوسیلیس علاوه بر سیلیس شامل درصد بسیار کمی از عناصری نظیر تیتانیوم، کلسیم، سدیم و آهن می‌باشد. خواص فیزیکی نانوسیلیس مورد استفاده در تحقیق در جدول ۳ نشان داده شده است.

این تحقیق تلاش دارد اثر نانوسیلیس را برای مصالح سنگی کشورمان به صورت یک مجموعه ساده ولی کاربردی برای صنعت آسفالت کشور در زمینه رفتار فیزیکی قیر (روانی، درجه نفوذ، شکل‌پذیری قیر)، طرح اختلاط مخلوط آسفالتی (روانی، استقامت مارشال) طراحی رویه آسفالتی (مدول برجهندگی آسفالت) با توجه به نگرانی‌های مربوط به خرابی‌های رطوبتی و با در نظر گرفتن بضاعت‌های تحقیقات دانشگاهی و توجه به تغییرات ساختار قیر (مورفولوژی قیر) ارائه دهد.

۲-۲. تهیه نمونه و آزمون‌های آزمایشگاهی

برای اختلاط قیر با نانوسیلیس، ابتدا قیر تا دمای ١٦٠ درجه سلسیوس گرم شد. سپس نانوسیلیس با استفاده از یک هموژنایزر با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه با قیر داغ مخلوط شد. برای اطمینان از توزیع یکنواخت و جلوگیری از کلوخه‌شدن نانوسیلیس در داخل قیر، این ماده در چند مرحله و به آرامی به قیر اضافه شد. شکل ۳، روش اختلاط قیر با نانوسیلیس در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه خلیج فارس بوشهر را نشان می‌دهد. در این پژوهش، قیر با مقادیر ۲، ٤ و ٦ درصد نانوسیلیس بر اساس وزن قیر اصلاح گردید.



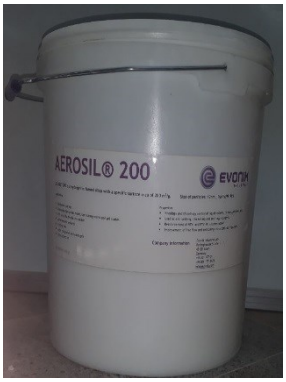
شکل ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی به‌کار رفته

جدول ۱. درصد رطوبت مصالح سنگی

نوع مصالح	وزن در حالت اشباع (W_1)	وزن در حالت خشک (W_2)	میزان جذب آب (درصد)
مصالح سنگی عبوری از الک شماره ٤	۱۰۰۰	۹۹۵/۹	۰/٤۱
مصالح سنگی مانده روی الک شماره ٤	۱۰۰۰	۹۹۹	۰/۱۰

جدول ۲. خصوصیات قیر مورد استفاده

خصوصیات	مقدار	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳٤	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس (kg/m^3)	۱/۰۳	——	ASTM D70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (دهم میلی‌متر)	٦٤	٦۰–۷۰	ASTM D5
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	٥٤	٤۹–٥٦	ASTM D36
انگمی در ۲۵ درجه سلسیوس (سلسیوس‌متر)	۱۰۲	حداقل ۱۰۰	ASTM D113
نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)	۳۰٥	حداقل ۲۳۲	ASTM D92
نقطه احتراق (درجه سلسیوس)	۳۱۷	——	ASTM D70



شکل .۲Error! No text of specified style in document. نانوسیلیس

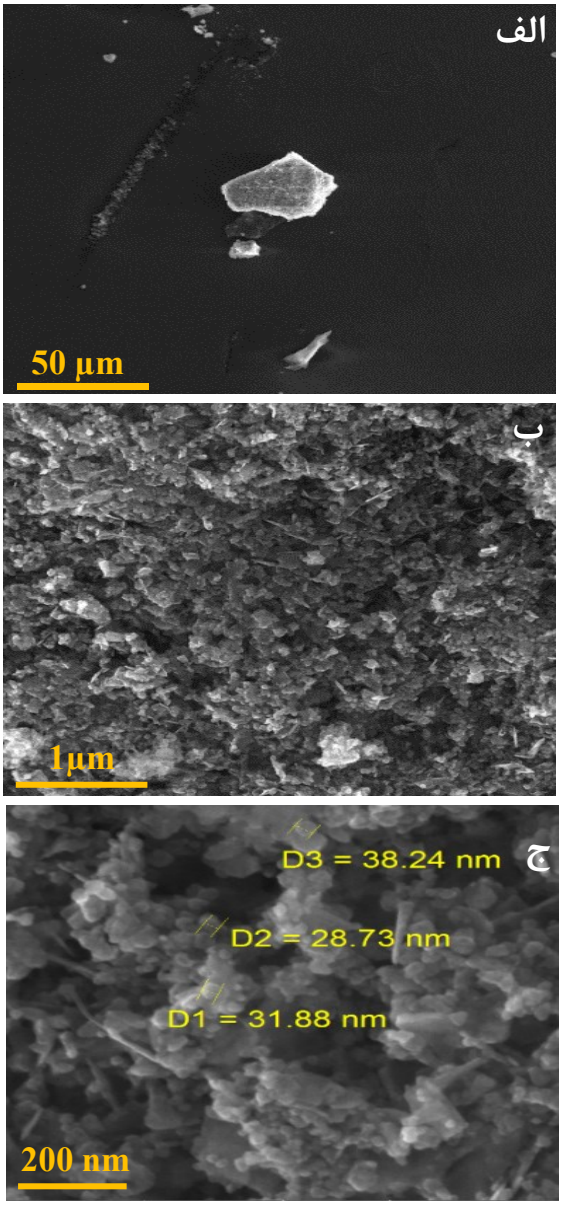
جدول ۳. خصوصیات فیزیکی نانوسیلیس

مشخصات	مقادیر
درصد خلوص	۹۹
اندازه ذرات (نانومتر)	۱۳ – ۱۱
سطح مخصوص (مترمربع بر گرم)	۲۰۰
رنگ	سفید
چگالی واقعی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/٤

شکل ۳. مراحل اختلاط قیر با نانوسیلیس: حرارت دادن به قیر تا ۱٦۰ درجه سلسیوس و اختلاط قیر با نانوسیلیس با دستگاه هموژنایزر

در این پژوهش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی (FESEM) برای بررسی وضعیت ساختار ذرات نانوسیلیس در داخل قیر استفاده شده است. این دستگاه، تصاویری با وضوح تصویر بالا و بدون آسیب رساندن به نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه می‌کند. تصاویر FESEM ریزساختار قیر اصلاح‌شده با نانوسیلیس در بزرگنمایی‌های مختلف در شکل ٤ نشان داده شده است.

شکل ٤–الف نشان می‌دهد که ذرات نانوسیلیس به صورت آگلومره در قیر مشاهده می‌شوند. با توجه به اینکه نسبت سطح به وزن نانوذرات زیاد است، مشاهده چنین ساختاری دور از ذهن نمی‌باشد. در شکل ٤–ب و شکل ٤–ج، که در مقیاس نانومتر هستند، مشاهده می‌شود که نانوذرات، مورفولوژی قیر را به هم زده و مورفولوژی جدیدی را ساخته‌اند.



شکل ٤. آنالیز FESEM قیر اصلاح‌شده با نانوسیلیس

در این تحقیق، نقطه نرمی قیرهای اصلاح‌شده با نانوسیلیس بر اساس استاندارد ASTM D36 اندازه‌گیری شد. شکل ٥-الف نشان‌دهنده وسیله اندازه‌گیری نقطه نرمی و متعلقات آن است. آزمایش درجه نفوذ آزمایش دیگری است که برای تعیین مشخصات فیزیکی قیرها استفاده می‌شود. در این پژوهش، آزمایش درجه نفوذ، طبق استاندارد ASTM D5 انجام شد. این آزمایش برای هر نمونه سه بار انجام می‌شود و میانگین مقادیر به‌دست آمده، به عنوان درجه نفوذ در نظر گرفته می‌شود (شکل ٥-ب). خاصیت انگمی قیر اصلاح‌شده طبق استاندارد ASTM D113 اندازه‌گیری شد. شکل ٥-ج دستگاه تعیین خاصیت انگمی و قالب‌های مربوطه را نشان می‌دهد.

شکل ۵. الف) تعیین نقطه نرمی، ب) درجه نفوذ و ج) شکل‌پذیری (انگمی) قیر

در این تحقیق، به منظور بررسی عملکرد رفتار مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانوسیلیس، دو ترکیب مختلف از نمونه‌ها ساخته شد. ترکیب اول، نمونه شاهد بدون افزودنی نانوسیلیس و ترکیب دوم شامل درصدهای مختلف نانوسیلیس (۲، ٤ و ٦ درصد وزنی قیر بهینه) بود. در طرح اختلاط، از روش اختلاط استاندارد آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳٤) استفاده شد. برای تهیه نمونه‌ها، مصالح سنگی در دمای ۱٦۰ تا ۱۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲٤ ساعت (به منظور از بین رفتن رطوبت مصالح سنگی) گرم و با قیر دارای دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس، مخلوط شدند. در نهایت، نمونه‌های با قطر ٤ اینچ و ارتفاع ۳ اینچ، توسط چکش تراکم مارشال با ۷۵ ضربه (بر اساس ترافیک عبوری سنگین) به هر طرف نمونه، ساخته شدند. نتایج آزمایش مارشال برای تعیین درصد قیر بهینه در جدول ٤ نشان داده شده است. بر اساس نتایج آزمایش مارشال که روی ۱۸ نمونه ساخته شده (سه نمونه به ازای هر درصد قیر) به‌دست آمده است، درصد قیر بهینه ۵ درصد تعیین شد. به منظور جلوگیری از تأثیر مقدار قیر بر نتایج آزمایش در آماده‌سازی سایر نمونه‌های اصلاح شده با نانوسیلیس، از قیر بهینه مخلوط‌های شاهد استفاده شد.

حضور رطوبت در بتن آسفالتی، باعث کاهش چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر شده و در نتیجه موجب تنزل به هم پیوستگی مخلوط می‌شود و ظرفیت باربری روسازی آسفالتی را کاهش می‌دهد. در این تحقیق، برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها، از آزمایش نسبت استقامت مارشال (MSR) استفاده شد. استقامت باقیمانده ، می‌تواند برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های مورد آزمایش، استفاده شود.

جدول ٤. نتایج آزمایش مارشال برای تعیین قیر بهینه

درصد قیر	٤	٤/٥	٥	٥/٥	٥/٥	٦/٥
وزن مخصوص واقعی مخلوط آسفالت (g/cm^3)	٢/١٥	٢/٢	٢/٢٥	٢/٢٥	٢/٢٣	٢/١٩
مقاومت فشاری (کیلونیوتن)	١٣/٠٩	١٣/٨	١٤/٩	١٢/١	١١/٩	١١/٧
روانی (میلی‌متر)	٣/١٥	٣/١	٢/٧	٣/١	٣	٣/١٥
وزن مخصوص حداکثر	٢/٣	٢/٣٢	٢/٣٥	٢/٣١٢	٢/٢٨	٢/٢٣
درصد فضای خالی آسفالت	٦/٥٢	٤/٦٧	٤/٣٧	٢/٦٨	٢/٢	٢/١
درصد حجمی فضای خالی مصالح سنگی	١٢/٥٥	١١	٩/٤	٩/٩	١١/١٧	١١/٨٦

نسبت استقامت مارشال نمونه‌های عمل‌آوری شده به نمونه‌های عمل‌آوری نشده، می‌تواند معیاری برای شناسایی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی باشد. در این راستا، دو گروه از نمونه‌های آسفالتی ترکیب‌های مختلف، با فضای خالی ١ ٤ ± درصد ساخته می‌شود. نمونه‌های گروه اول در حمام آب ٦٠ درجه سلسیوس به مدت ٣٠ دقیقه قرار گرفته، سپس با دستگاه مارشال بارگذاری شده و مقادیر استقامت و روانی مارشال ثبت می‌شوند (نمونه‌های خشک). گروه دوم از نمونه‌ها در حمام آب ٦٠ درجه سلسیوس به مدت ٢٤ ساعت قرار گرفته، و سپس همانند گروه اول تحت بارگذاری قرار می‌گیرند (نمونه‌های عمل‌آوری شده). نسبت استقامت مارشال برای هر کدام از ترکیب‌ها، با استفاده از میانگین استقامت نمونه‌های خشک و نمونه‌های عمل‌آوری شده، با استفاده از رابطه (١) محاسبه می‌شود:

$$MSR = \frac{MS_{cond}}{MS_{uncond}} \times 100 \qquad (١)$$

که در آن MSR نسبت استقامت مارشال، MS_{cond} استقامت مارشال متوسط برای نمونه‌های عمل‌آوری شده برحسب کیلوگرم و MS_{uncond} استقامت مارشال نمونه‌های خشک یا عمل‌آوری نشده برحسب کیلوگرم است.

تعیین مدول برجهندگی در شناخت خصوصیات الاستیک مواد روسازی ضروری است. یک روش برای به‌دست آوردن مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی، استفاده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم است. در این روش، خواص الاستیک مخلوط آسفالتی را می‌توان در قالب اندازه‌گیری تنش و کرنش تحلیل نمود. خروجی این آزمایش، به طور نسبی نشان‌دهنده مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده است. این ادعا وجود دارد که مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتر، دارای مقاومت بیشتری در مقابله با ترک‌های خستگی و دمایی هستند. در این آزمایش، بار فشاری قائم در امتداد قطر نمونه‌های استوانه‌ای اعمال می‌شود. نمونه‌ها بین دو نوار بارگذاری قرار می‌گیرند تا اینکه تنش یکنواخت کششی در صفحه قطری قائم به وجود آید. معمولاً نمونه‌ها در امتداد بارگذاری شکسته می‌شوند. مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی از رابطه (٢) محاسبه می‌شود:

$$M_R = \frac{P\,(\nu + 0.2734)}{TH} \qquad (٢)$$

که در آن، M_R مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی (مگاپاسکال)، P مقاومت فشاری (نیوتن)، ν ضریب پواسون که برای آسفالت ٠/٣٥ می‌باشد، T ضخامت نمونه (میلی‌متر) و H تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر (میلی‌متر) است. مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی به‌دست می‌آید. در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، برای هر متغیر، سه نمونه ساخته شده است و در دمای ٢٥ درجه سلسیوس آزمایش شده‌اند و نتیجه

نهایی از میانگین‌گیری بین این سه نمونه حاصل شده است.

۳. نتایج و بحث

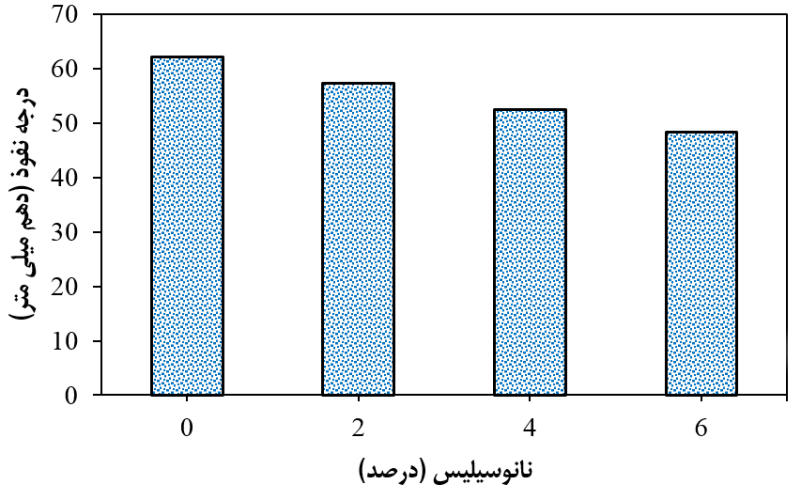
۳-۱. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی قیر

آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و شکل‌پذیری، از آزمایش‌هایی هستند که در تعیین مشخصات فیزیکی قیر استفاده می‌شوند. این آزمایش‌ها روی قیر شاهد و قیر اصلاح‌شده با نانوسیلیس انجام شد. شکل‌های ٦ و ٧ نشان‌دهنده نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی روی قیر شاهد و قیر اصلاح‌شده با نانوسیلیس هستند. می‌توان مشاهده کرد که درجه نفوذ قیرهای اصلاح‌شده با افزایش نانوسیلیس کاهش و نقطه نرمی قیر با افزودن نانوسیلیس افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، نانوسیلیس اثر قابل توجهی بر مشخصات سختی قیر مطالعه شده دارد. افزایش نقطه نرمی قیر موجب بهبود عملکرد آن می‌شود، زیرا قیر با نقطه نرمی بیشتر، دارای حساسیت دمایی کمتر است و مخلوط‌های ساخته شده با این نوع قیر، دارای مقاومت بیشتر در برابر تغییرشکل ماندگار (شیار افتادگی) در دماهای زیاد هستند. نتایج آزمایش شکل‌پذیری (خاصیت انگمی) در شکل ٨ ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که شکل‌پذیری (انگمی) قیرهای اصلاح‌شده، با افزایش مقدار نانوسیلیس، کاهش می‌یابد. شاید بتوان گفت که کاهش مواد روغنی در فاز مالتین و افزایش سختی موجب کاهش شکل‌پذیری قیر می‌شود.

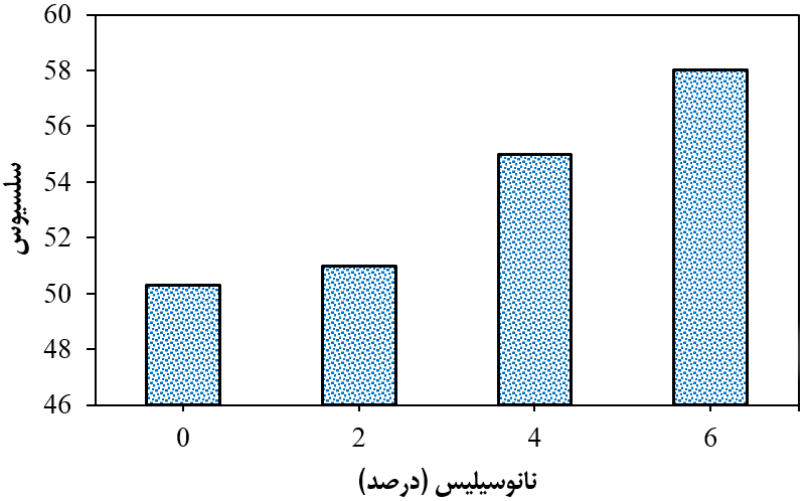
در شکل ٩، تصاویر FESEM مربوط به اضافه شدن صفر، ٢، ٤ و ٦ درصد وزنی نانوذرات سیلیس به آسفالت، به منظور بهبود خواص آن، مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ٩-الف مشاهده می‌شود، آسفالت بدون نانوسیلیس دارای حفراتی می‌باشد و غیرفشرده است که با اضافه کردن نانوذرات سیلیس و با توجه به تمایل شدید نانوذرات سیلیس برای ایجاد یک شبکه به هم پیوسته و فشرده می‌توان خواص آن را بهبود بخشید و سطحی یکنواخت ایجاد نمود. به این منظور، برای استفاده از تمام پتانسیل نانوذرات سیلیس به عنوان تقویت‌کننده خواص آسفالت، نیاز است که این نانوذرات به‌خوبی در آن پراکنده شوند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می شود که با افزایش درصد نانوذرات، سطح ویژه رویه مخلوط افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به چسبندگی بهتر بین قیر و مصالح ریزدانه شود. همچنین، مشاهده می شود که پراکندگی بهتر نانوذرات سیلیس در درصدهای بیشتر اتفاق افتاده است. با توجه به تصاویر، همچنین می توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد نانوذرات سیلیس با پراکندگی خوب، ترک‌های سطحی کاهش پیدا می‌کنند.

۳-۲. نتایج آزمایش استقامت، روانی و نسبت مارشال مخلوط‌های آسفالتی

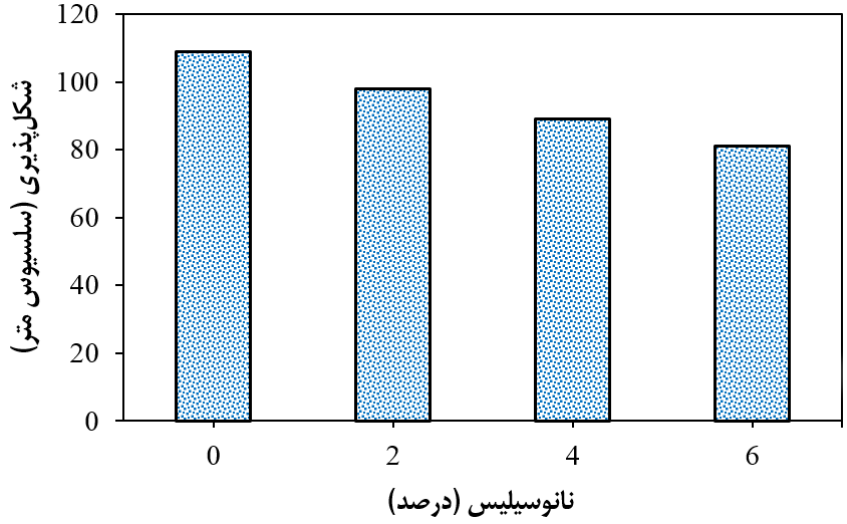
شکل ١٠، نتایج آزمایش استقامت و روانی و نسبت مارشال، مربوط به ترکیب‌های مختلف، را نشان می‌دهد. این نتایج از آزمایش سه نمونه برای هر ترکیب و میانگین‌گیری از آن‌ها به‌دست آمده است. همان‌گونه که در شکل ١٠-الف قابل مشاهده است، استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانوسیلیس، با افزایش درصد نانوسیلیس، روندی افزایشی دارد و بیشترین مقدار استقامت (٧٤/١٩ کیلونیوتن)، متعلق به مخلوط آسفالتی حاوی ٦ درصد نانوسیلیس است.



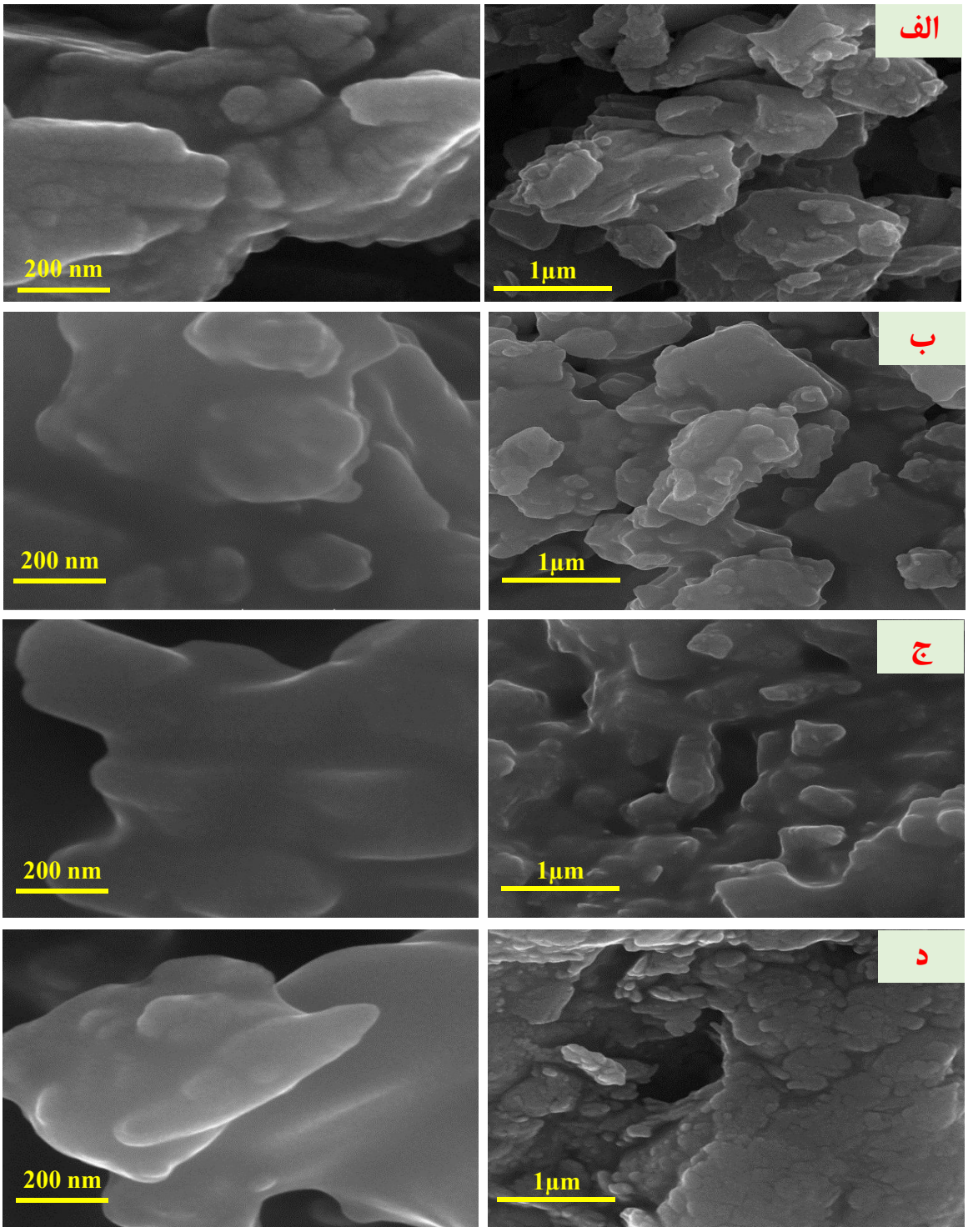
شکل ٦. تأثیر نانوسیلیس بر درجه نفوذ قیر



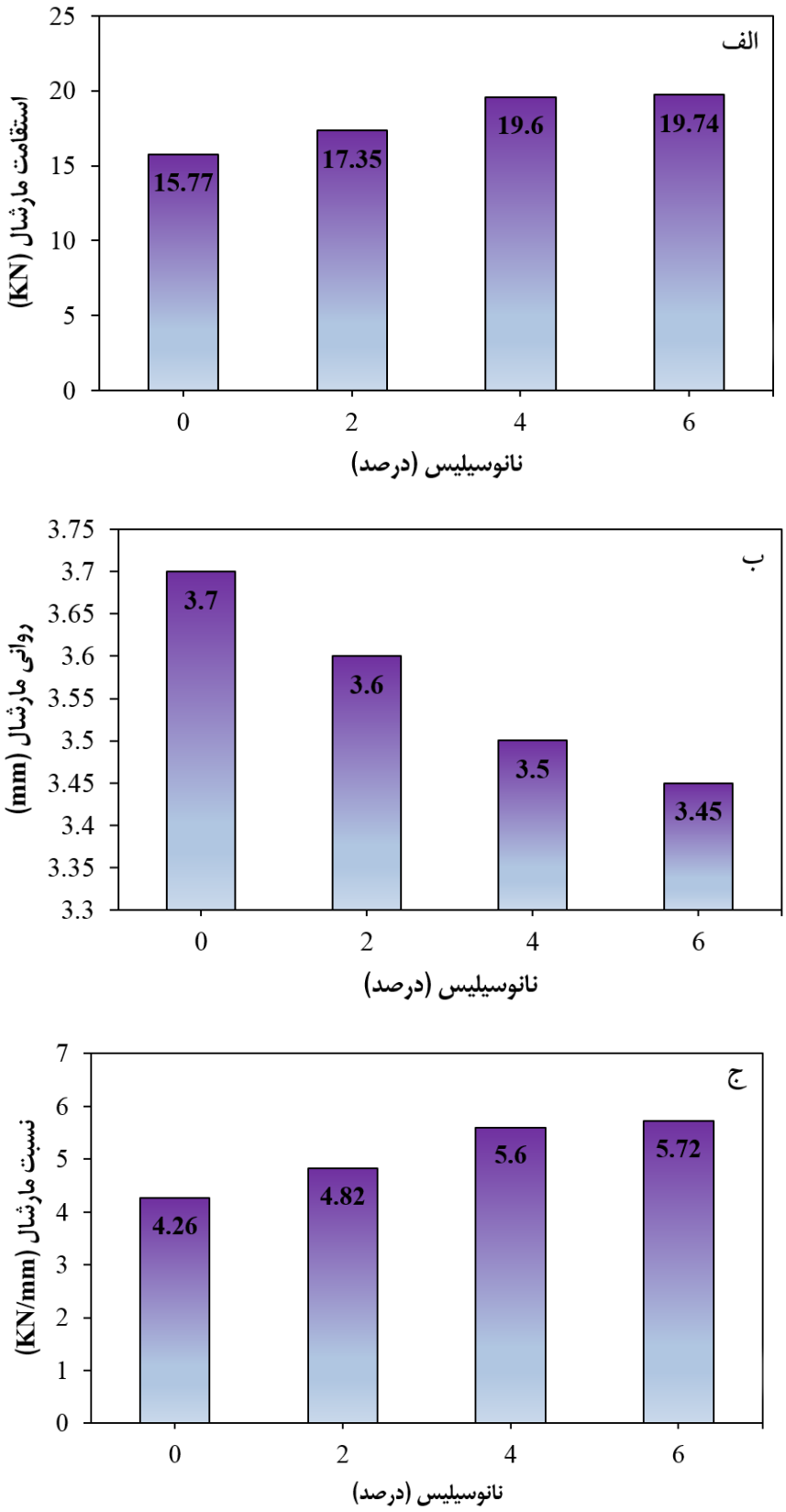
شکل ۷. تأثیر نانوسیلیس بر نقطه نرمی قیر



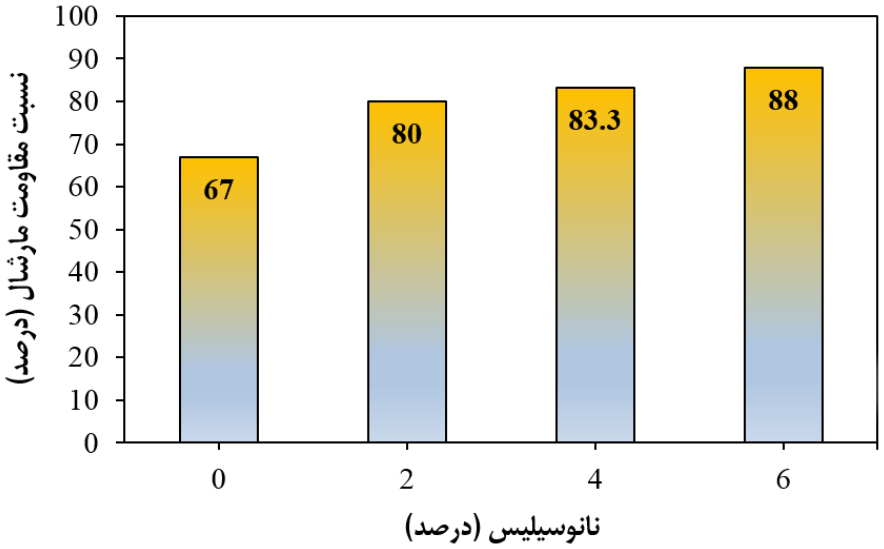
شکل ۸. تأثیر نانوسیلیس بر شکل‌پذیری قیر



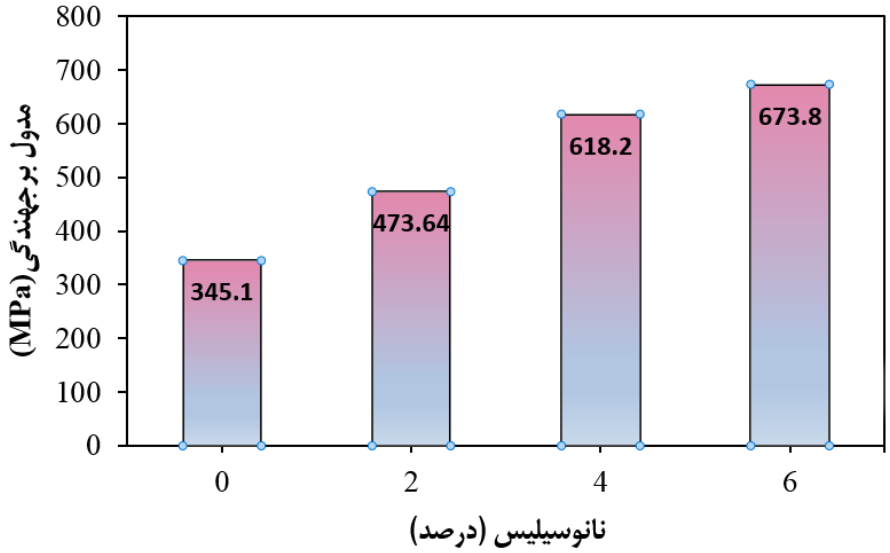
شکل ۹. تصاویر FESEM مربوط به افزودن نانوذرات سیلیس در درصدهای مختلف آسفالت: الف) صفر، ب) ۲، ج) ٤ و د) ٦ و بزرگنمایی مختلف



شکل ۱۰. الف) استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی گرم، ب) روانی مارشال مخلوط‌های آسفالتی گرم و ج) نسبت مارشال (MQ) مخلوط‌های آسفالتی گرم



شکل ۱۱. نسبت مقاومت مارشال (MSR) مخلوط‌های آسفالتی گرم



شکل ۱۲. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

شکل ۱۰- الف نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیس موجب بهبود مقدار استقامت مارشال شده و این مقدار با افزایش درصد نانوسیلیس استفاده شده در قیر، افزایش می‌یابد. نانوسیلیس، به دلیل سختی زیاد، موجب افزایش سختی قیر می‌شود. بنابراین، مخلوط‌های اصلاح شده با نانوسیلیس، نسبت به مخلوط شاهد دارای استقامت بیشتری می‌باشند. افزودن نانوسیلیس به مقادیر ۲، ٤ و ٦ درصد، به ترتیب موجب افزایش ۹/۲، ۲٦ و ٤١ درصد استقامت نسبت به مخلوط شاهد می‌شود. همچنین، شکل ۱۰-ب مقدار روانی مربوط به انواع مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. نتایج، نشان‌دهنده کاهش مقدار روانی با افزایش مقدار نانوسیلیس استفاده شده به منظور اصلاح مخلوط آسفالتی است. شکل ۱۰-ج نشان‌دهنده نتایج به‌دست آمده برای نسبت مارشال (MQ) است. با افزایش مقدار نانوسیلیس در مخلوط‌های آسفالتی، مقدار نسبت مارشال افزایش می‌یابد. به‌طوری که با افزودن نانوسیلیس به مقادیر ۲، ٤ و ٦ درصد، مقدار نسبت مارشال به ترتیب ۱۳، ۳۱ و ۳٤ درصد نسبت به مخلوط شاهد افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیلیس در مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش مقاومت در برابر

تنش برشی و تغییرشکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی مورد نظر می‌شود. حداکثر مقدار نسبت مارشال برای مخلوط اصلاح شده با ٦ درصد نانوسیلیس و برابر با ۷۲/۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر به‌دست آمد.

۳-۳. نتایج و تحلیل آزمایش حساسیت رطوبتی و مدول برجهندگی

یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالت، آسیب‌های رطوبتی است. در این پژوهش، از روش نسبت مارشال (MSR) برای بررسی آسیب‌های رطوبتی استفاده شد. نتایج نسبت مارشال در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش نشان می‌دهد که اصلاح قیر با نانوسیلیس، به طور قابل توجهی موجب افزایش مقاومت مخلوط‌های ساخته شده با آن، در برابر آسیب رطوبتی، می‌شود و با افزایش مقدار نانوسیلیس، مقاومت مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. به‌طوری که استفاده از نانوسیلیس به مقادیر ۲، ٤ و ٦ درصد، مقدار مقاومت در برابر آسیب رطوبتی را به ترتیب به مقدار ۱۹/٤، ۲٤ و ۳۱/۳ درصد افزایش می‌دهد. دلیل این پدیده را می‌توان به سختی قیر نسبت داد. سختی قیر می‌تواند بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار باشد. به‌طور کلی، قیرهای سفت‌تر، به سختی از مصالح سنگی جدا می‌شوند و یا این فرآیند مدت زیادی طول می‌کشد و بنابراین مخلوط‌های ساخته شده با این نوع قیر، مقاومت بیشتری در برابر آسیب رطوبتی دارند. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، استفاده از نانوسیلیس موجب کاهش درجه نفوذ قیر می‌شود و در نتیجه این نانوسیلیس موجب افزایش سختی قیر و بنابراین مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده، می‌شود.

مدول برجهندگی معیاری برای سنجش توانایی مخلوط آسفالت در پخش کردن فشار وارده در لایه آسفالتی است. مقادیر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصدهای مختلف نانوسیلیس در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزودن نانوسیلیس به مقدار ۲، ٤ و ٦ درصد، مقدار مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. البته لازم به ذکر است که با افزایش نانوسیلیس از ٤ درصد به ٦ درصد، شیب افزایشی مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. از آنجا که نانوسیلیس مورد استفاده در این پژوهش دارای سطح ویژه بسیار زیاد است، ذرات نانوسیلیس در شبکه قیر پخش و باعث مسلح شدن قیر شده‌اند که تغییرات در شبکه قیر می‌تواند باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های الاستیک و افزایش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی شود. مدول برجهندگی یکی از پارامترهای مهم در سازوکار طراحی روسازی است. افزایش مدول برجهندگی می‌تواند باعث کنترل ترک‌های ناشی از بارگذاری شود و همچنین از آنجا که مدول برجهندگی در تعیین ضخامت آسفالت تأثیر مستقیم دارد، می‌توان با افزایش مدول برجهندگی، ضخامت آسفالت را کاهش داد. این بدان معناست که استفاده از مخلوط آسفالتی ساخته شده با نانوسیلیس، ضخامت لایه‌های آسفالتی را کاهش داده و صرفه‌جویی اقتصادی قابل قبولی را می‌تواند ایجاد کند.

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مقدار مناسب افزودن نانوسیلیس در مخلوط‌های آسفالتی معمولاً بین ۲ تا ٦ درصد وزن قیر است. با این حال، درصد بهینه دقیق می‌تواند بسته به عوامل مختلفی مانند نوع قیر، ترکیب مخلوط آسفالتی و ویژگی‌های خاص نانوسیلیس مانند اندازه، سطح و واکنش‌پذیری آن تغییر یابد. انجام آزمایش‌های تجربی برای تعیین بهترین درصد برای شرایط و مواد خاص ضروری است. در این تحقیق، مدول برجهندگی با افزودن نانوسیلیس تا ٦ درصد افزایش یافت؛ اما با افزایش از ٤ درصد تا ٦ درصد نرخ افزایش مدول نسبت به قبل کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که احتمالاً نرخ رشد مدول برجهندگی در مقادیر بیشتر از ٦ درصد، کاهش خواهد یافت.

٤. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر استفاده از نانوسیلیس، بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و قیر انجام شد. برای این منظور، از آزمایش‌های استقامت و روانی مارشال و آزمایش نسبت مقاومت مارشال (MSR) برای بررسی حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی و آزمایش مدول برجهندگی استفاده شد. همچنین، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و شکل‌پذیری روی قیرهای اصلاح‌شده انجام گرفت. بر اساس آزمایش‌های انجام شده، نتایج زیر حاصل شد:

- اصلاح قیر توسط نانوسیلیس موجب کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی قیر می‌شود. همچنین، استفاده از نانوسیلیس در قیر موجب کاهش شکل‌پذیری آن می‌شود.
- مقدار استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی، با افزودن ٦ درصد نانوسیلیس، ٤١ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته و روانی مارشال، ۷ درصد کاهش می‌یابد. این روند موجب افزایش ٣٤ درصدی نسبت مارشال (MQ) مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه شاهد شده و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر شیارافتادگی ارتقا می‌دهد.
- نتایج حاصل از آزمایش‌های رطوبتی نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح‌شده با ٦ درصد نانوسیلیس، موجب افزایش ۳۱ درصدی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی، در برابر آسیب‌های رطوبتی نسبت به نمونه شاهد می‌شوند.
- نتایج حاصل از آزمایش مدول برجهندگی نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح‌شده با ٦ درصد نانوسیلیس، موجب افزایش مدول برجهندگی به میزان ۹۵ درصد می‌شوند.
- با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش FESEM، مخلوط‌آسفالتی بدون نانوسیلیس دارای حفراتی بوده و غیرفشرده است. اضافه کردن نانوسیلیس و با توجه به تمایل شدید نانوسیلیس برای ایجاد یک شبکه به هم پیوسته و فشرده می‌تواند خواص قیر را بهبود بخشیده و سطحی یکنواخت ایجاد کند.
- با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش FESEM مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نانوذرات، سطح ویژه رویه مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به چسبندگی بهتر بین قیر و مصالح ریزدانه شود.

۵. مراجع

Ahadi, M. R., Shafipour, A. and Saberi, P. 2015. "The effect of nanomaterials on the performance of hot asphalt mixtures". Third National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering, Semnan, February 23. [In Persian]

Ameri, M., Vamegh, M., Rohoolamini, H. and Bemana, K. 2015a. "Evaluation of nanoclay effects on the permanent deformation of hot mix asphalt". Modares Civ. Eng. J., 15(3): 149-158. [In Persian]

Ameri, M., Vamegh, M., Rouholamini, H. and Bemana, K. 2015b. "Evaluation of moisture susceptibility in hot mix asphalt (HMA) containing nanoclay". Quart. J. Transport. Eng., 6(4): 613-626. [In Persian]

Ameri, M., Nobakht, S., Bemana, K., Vamegh, M. and Rooholamini, H. 2016a. "Effects of nanoclay on hot mix asphalt performance". Petrol. Sci. Tech., 34(8): 747-753.

Ameri, M., Nobakht, S., Bemana, K., Rooholamini, H. and Vamegh, M. 2016b. "Effect of nanoclay on fatigue life of hot mix asphalt". Petrol. Sci. Tech., 34(11-12): 1021-1025.

Capco, D. G. and Chen, Y. 2014. “Nanomaterial”. Adv. Exp. Med. Biol., 811.
Debbarma, K., Debnath, B. and Sarkar, P. P. 2022. “A comprehensive review on the usage of nanomaterials in asphalt mixes”. Constr. Build. Mater., 361: 129634.
Ezzat, H., El-Badawy, S., Gabr, A., Zaki, E. S. I. and Breakah, T. 2016. “Evaluation of asphalt binders modified with nanoclay and nanosilica”. Proc. Eng., 143: 1260-1267.
Fang, C., Yu, R., Liu, S. and Li, Y. 2013. “Nanomaterials applied in asphalt modification: A review”. J. Mater. Sci. Tech., 29(7): 589-594.
Fusco, R., Moretti, L., Fiore, N. and D’Andrea, A. 2020. “Behavior evaluation of bituminous mixtures reinforced with nano-sized additives: A review”. Sustain., 12(19): 8044.
Ghasemi, M., Marandi, S. M., Tahmooresi, M., Kamali, J. and Taherzade, R. 2012. “Modification of stone matrix asphalt with nano-SiO2”. J. Basic Appl. Sci. Res., 2(2): 1338-1344.
Golchin, B., Hekmat, A. and Hamedi, G. H. 2022. “Effects of metallic nano materials on the cohesion and adhesion properties of asphalt binders and aggregates using surface free energy method”. J. Civ. Environ. Eng., 52(108): 117-126.
Hamedi, G. H., Pakenari, M. M., Tabrizi, M. T. and Pirbasti, Z. R. 2023. “Effect of nano-cobalt oxide on the rheological behavior of asphalt binder and mechanical characteristics of hot mix asphalt”. Adv. Civ. Eng., 2023(1): 7353949.
Hamedi, G. H., Moghadasnejad, F. and Azarhoosh, A. 2024. “Assessing the influence of nano graphene oxide application in mitigating the adverse effects of runoff pH on the moisture susceptibility of asphalt concretes”. Constr. Build. Mater., 438: 137182.
Haroon, W. and Ahmad, N. 2024. “Effect of nano silica on the performance of modified crumb rubber bitumen and asphalt mixtures”. Innov. Infrastruct. Solut., 9(7): 280.
Jalili Majdi, A. 2017. “Fatigue behavior analysis of hot mix asphalt modified by the combination of nanosilica and polystyrene butadiene styrene”. 2nd International Conference of Civil Engineering, Architecture and Crisis Management, July 7. [In Persian]
Khattak, M. J., Khattab, A., Rizvi, H. R. and Zhang, P. 2012. “The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology”. Constr. Build. Mater., 30: 257-264.
Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z. and Huang, J. 2017. “Developments of nano materials and technologies on asphalt materials-A review”. Constr. Build. Mater., 143: 633-648.
Moghadasnezhad, F., Azarhoush, A. and Hamedi, G. 2015. “Evaluation of rutting in asphalt mixtures modified with calcium carbonate nanoparticles”. 7th Iranian Bitumen and Asphalt Conference, December 15.
Patel, J. K., Patel, A. and Bhatia, D. 2021. “Introduction to nanomaterials and nanotechnology”. In: Emerging technologies for nanoparticle manufacturing (pp. 3-23). Springer.
Sengupta, A. and Sarkar, C. K. 2015. “Introduction to nano: Basics to nanoscience and nanotechnology”. Springer.
Standard, A. 2012. “Standard test method for indirect tensile (IDT) strength of bituminous mixtures”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
Sun, L., Xin, X. and Ren, J. 2017. “Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance”. Constr. Build. Mater., 133: 358-366.
Tantra, R. 2016. “Nanomaterial characterization: An introduction”. John Wiley & Sons.
Xiao, F., Amirkhanian, A. N. and Amirkhanian, S. N. 2011. “Influence of carbon nanoparticles on the rheological characteristics of short-term aged asphalt binders”. J. Mater. Civ. Eng., 23(4): 423-431.
Yang, J. and Tighe, S. 2013. “A review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures”. Proc.-Soc. Behav. Sci., 96: 1269-1276.
Yao, H., You, Z., Li, L., Shi, X., Goh, S. W., Mills-Beale, J. and Wingard, D. 2012. “Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay”. Constr. Build. Mater., 35: 159-170.
You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q. and Goh, S. W. 2011. “Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization”. Constr. Build. Mater., 25(2): 1072-1078.