



Semnan University



Evaluation and Modeling of Fatigue in Asphalt Mixtures Containing Expanded Clay Aggregates (LECA) and Nano-Alumina Modified Bitumen Based on Bitumen Fatigue Parameters

Ghasem Tahmouresi^a, Mohsen Amouzadeh Omrani^{b*}, Hassan Divandari^{c*}, Ali Seyedkazemi^a

^a Department of Civil Engineering, Am. C., Islamic Azad University, Amol, I. R. Iran.

^b Department of Civil Engineering, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, I. R. Iran.

^c Department of Civil Engineering, CT. C., Islamic Azad University, Tehran, I. R. Iran,

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-09-30

Revised: 2025-12-05

Accepted: 2025-12-16

Keywords:

Nano- Al_2O_3 ,

Expanded clay aggregates (LECA),

Dynamic creep,

Fatigue life,

Regression modeling.

ABSTRACT

The use of Nano- Al_2O_3 to enhance durability of asphalt mixtures containing expanded clay aggregates (LECA) represents a sustainable and innovative approach in pavement engineering. In this study, 85–100 penetration-grade bitumen was modified with 0%, 1%, 2%, and 3% Nano- Al_2O_3 using a high-shear mixer, and the binder was evaluated through physical and rheological tests, including penetration, softening point, ductility, and kinematic viscosity. The RTFO and PAV aging processes were subsequently applied, and the aged binders were examined using DSR test to assess their rheological behavior. Moreover, asphalt mixtures incorporating 0%, 25%, and 50% LECA were subjected to Marshall stability, dynamic creep, and fatigue life tests to investigate the combined effects of these additives on mechanical performance, creep behavior, and fatigue resistance. The physical tests of bitumen indicated that Nano- Al_2O_3 addition improved the softening point, provided controlled stiffness, enhanced ductility, and increased viscosity. Rheological results showed that Nano- Al_2O_3 reduced mass loss and improved rutting and fatigue indices, indicating delayed cracking and increased pavement durability. Dynamic creep tests revealed that the incorporation of Nano- Al_2O_3 and optimal LECA replacement reduced cumulative strain and slowed the accelerated growth rate in the tertiary creep phase. Fatigue life tests demonstrated that the 25% LECA + 2% Al_2O_3 mixture exhibited the best performance, confirming that although elevated temperature and high stress levels accelerate fatigue damage, this mixture effectively mitigated these adverse effects and delayed deterioration. Regression modeling indicated that percentages of Nano- Al_2O_3 and LECA aggregates had a significant impact ($p < 0.05$) on fatigue life. The models achieved high coefficients of determination ($R^2 = 0.928, 0.947, \text{ and } 0.937$ for 0%, 25%, and 50% LECA, respectively), accurately predicting the fatigue behavior of the mixtures. These results demonstrate the suitability and generalizability of the models for design of durable asphalt pavements.

* Corresponding author.

E-mail address: m_amouzadeh@yahoo.com

How to cite this article: Tahmouresi, G. , Amouzadeh Omrani, M. , Divandari, H. and Seyedkazemi, A. (2026). Evaluation and Modeling of Fatigue in Asphalt Mixtures Containing Lightweight Expanded Clay Aggregates (LECA) and Nano-Alumina Modified Bitumen Based on Bitumen Fatigue Parameters. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(4), 49-78. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.39226.1739>

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



مقاله پژوهشی

ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانواکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر

قاسم طهمورسی^۱، محسن عموزاده عمرانی^۲، حسن دیواندری^۳، علی سیدکاظمی^۱

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران.

^۳ گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

استفاده از نانواکسید آلومینیوم برای افزایش دوام مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا)، رویکردی پایدار و نوین در مهندسی روسازی محسوب می‌شود. در این پژوهش، قیر ۸۵-۱۰۰ با افزودن صفر، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ وزنی نانواکسید آلومینیوم با میکسر دور بالا، ترکیب شد و آزمون‌های فیزیکی و رئولوژیک قیر شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش‌پذیری و ویسکوزیته سینماتیک انجام شد. سپس نمونه‌ها با فرایندهای RTFO و PAV آماده‌سازی شده و برای تحلیل رئولوژیک با آزمون DSR مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، مخلوط‌های آسفالتی با جایگزینی صفر، ۲۵ و ۵۰ درصد دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا)، تحت آزمون‌های مارشال، خزش دینامیک و عمر خستگی قرار گرفتند تا اثر ترکیبی این افزودنی‌ها بر خواص مکانیکی، رفتار خزشی و مقاومت خستگی ارزیابی شود. نتایج آزمون‌های فیزیکی قیر نشان داد که افزودن نانواکسید آلومینیوم موجب بهبود نقطه نرمی، سفتی کنترل‌شده، کشش‌پذیری و ویسکوزیته قیر شد. براساس نتایج آزمون‌های رئولوژیک قیر، با افزودن نانومواد، افت وزنی کاهش یافته و شاخص‌های شیارشدگی و خستگی بهبود یافته، که بیانگر تأخیر در ترک‌خوردگی و افزایش دوام روسازی است. خزش دینامیک نشان داد که افزودن نانو و جایگزینی بهینه دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا)، کرنش تجمعی را کاهش داده و نرخ رشد شتابی فاز نهایی خزش را کند می‌کند. آزمون عمر خستگی نیز بهترین عملکرد را برای ترکیب 2%AL₂O₃+25%LECA نشان داد که گرچه افزایش دما و سطح تنش موجب تسریع آسیب‌پذیری خستگی می‌شوند، اما این ترکیب توانست اثرات ناشی از آن را تا حد زیادی کنترل کند. مدل‌سازی رگرسیونی نشان داد که درصد نانو و دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) تأثیر معناداری ($p < 0.05$) بر عمر خستگی دارند. مدل‌ها با ضریب تعیین بالا برابر ۰/۹۲۸، ۰/۹۴۷ و ۰/۹۳۷ به ترتیب برای صفر، ۲۵٪ و ۵۰٪ دانه‌های رس منبسط‌شونده توانستند رفتار خستگی مخلوط‌ها را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کنند. این نتایج نشان‌دهنده برازش مناسب و قابلیت تعمیم مدل‌ها در طراحی روسازی‌های آسفالتی است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

واژه‌های کلیدی:

دانه‌های رس منبسط‌شونده

(لیکا)،

نانواکسید آلومینیوم،

خزش دینامیک،

عمر خستگی،

مدل‌سازی رگرسیونی.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m_amouzadeh@yahoo.com

استناد به این مقاله: طهمورسی، قاسم، عموزاده عمرانی، محسن، دیواندری، حسن و سیدکاظمی، علی. (۱۴۰۴). ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۱(۴)، ۷۸-۴۹. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.39226.1739>

۱. مقدمه

افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی سطح می‌شود. نتایج لوسا و همکاران (۲۰۱۸) نیز تأیید کرد که جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های معمولی با سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) باعث افزایش مدول سفیدی، کاهش تغییر شکل شیارشدگی و بهبود اصطکاک سطح می‌شود، که ضمن ارتقای ایمنی جاده، کاهش تولید صدا را نیز به همراه دارد. در همین راستا، آگوستیناچو و اولیتا (۲۰۰۴) بر افزایش چسبندگی سطحی و دوام آسفالت در برابر عوامل محیطی تأکید کردند. دوسوزا کمپلو و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که سنگدانه‌های مصنوعی حاصل از سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) در مناطق کمبود سنگدانه طبیعی، عملکرد مکانیکی و دوام روسازی را بهبود می‌بخشد. مطالعات خان و مراویرا (۲۰۱۰) نیز استفاده از مخلوط‌های آسفالتی سبک‌وزن را در مناطق سردسیری بررسی کردند و دریافتند که هدایت حرارتی کمتر و ظرفیت گرمایی ویژه بالاتر موجب کاهش نفوذ یخبندان به لایه‌های زیرین و افزایش دوام روسازی می‌شود. عربانی و حامدی (۲۰۱۵) نیز نشان دادند که جایگزینی ۱۰ تا ۲۰ درصد ریزدانه‌ها با سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) باعث بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی و حساسیت رطوبتی می‌شود، و بیشترین اثر در نمونه‌های ۱۰ درصدی مشاهده شد.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزودن نانو ذرات به قیر می‌تواند خواص خستگی و عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. پژوهشگران در مطالعه‌ای نشان دادند که افزودن نانورس به قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دوام نمونه‌ها را در سطوح مختلف کرنش افزایش داده و عمر خستگی آن‌ها را بهبود می‌بخشد (عموزاده عمرانی و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین، در تحقیق دیگر، محققین گزارش کردند که نانوکربنات کلسیم می‌تواند عملکرد مکانیکی قیر را افزایش داده و مقاومت آن را در برابر خستگی بهبود بخشد (عموزاده عمرانی و باباگلی، ۲۰۲۳). با توجه به

بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی یکی از چالش‌های اساسی مهندسی حمل‌ونقل است، چرا که افزایش بارهای ترافیکی، تغییرات شدید دمایی و شرایط محیطی نامساعد باعث کاهش دوام و ایمنی جاده‌ها می‌شوند (طهمورسی و همکاران، ۲۰۲۵، عموزاده عمرانی، ۲۰۲۳). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مصالح نوین می‌تواند دوام مخلوط‌های آسفالتی را در برابر خستگی، شیارشدگی و رطوبت بهبود بخشد. به‌عنوان نمونه، به‌کارگیری پودر کربن آمورف موجب افزایش مقاومت خستگی و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های لاستیک‌دار شده است (زیاری و همکاران، ۲۰۱۹) و استفاده از خرده‌لاستیک در مخلوط‌های کم‌انرژی نیز عملکرد آن‌ها را در برابر شیارشدگی و خستگی بهبود داده است. منظور از مخلوط‌های کم‌انرژی، مخلوط‌های آسفالتی است که در دمای کمتر از دمای معمول تولید و مترکم می‌شوند تا مصرف انرژی کاهش یابد و اثرات زیست‌محیطی کمتر شود (مقیم و همکاران، ۲۰۲۳). این نتایج نشان می‌دهد که بهره‌گیری از مواد و مصالح نوین می‌تواند رویکردی مؤثر برای ارتقای عملکرد روسازی‌های آسفالتی سنتی باشد. نوآوری در طراحی و استفاده از مصالح پیشرفته، از جمله سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا)، فرصت‌های قابل‌توجهی برای ارتقای کیفیت، کاهش وزن روسازی و بهبود عملکرد حرارتی و مکانیکی فراهم می‌آورد (شن و همکاران، ۲۰۰۸؛ لوسا و همکاران، ۲۰۱۸). اگرچه تحقیقات روی سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) از چند دهه پیش آغاز شده، ولی بیشتر مطالعات اولیه به کاربرد آن در بتن یا زیرسازی راه‌آهن محدود بوده است (آگوستیناچو و اولیتا، ۲۰۰۴).

شن و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که افزودن سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) به مخلوط آسفالتی موجب بهبود مقاومت سایشی، کاهش شیارشدگی و

بنابراین، انجام تحقیقات جامع‌تر برای ارزیابی عملکرد واقعی و مدل‌سازی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سبک دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) بر اساس پارامتر خستگی قیر، و تعیین بهترین نسبت‌های جایگزینی و اصلاح با نانوذرات، خلأ پژوهشی مهم در این حوزه محسوب می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت ترکیبی از آزمون‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های آماری انجام شده است. ابتدا با اجرای آزمون‌های آزمایشگاهی روی مصالح واقعی و بر اساس استانداردهای معتبر بین‌المللی، رفتار مخلوط آسفالتی و تأثیر اجزای سازنده آن بررسی می‌شود. سپس با بهره‌گیری از نتایج این آزمون‌ها، مدل‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانواکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر (G^*) (Sinđ) ارائه می‌گردد. در این مطالعه، برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی عمر خستگی، از دو نرم‌افزار SPSS و Excel استفاده شده است.

۲-۱. مشخصات مواد و مصالح مصرفی

در این بخش، به معرفی مواد و مصالح مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها شامل سنگدانه‌ها، دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا)، قیر و افزودنی نانواکسید آلومینیوم پرداخته شده است. هدف از این بررسی، ارزیابی تأثیر هر یک از این مصالح بر خواص مکانیکی و عملکردی روسازی‌های انعطاف‌پذیر است. مشخصات مواد و مصالح مصرفی به شرح زیر ارائه می‌شود.

۲-۱-۱. قیر

در آزمون‌های این پژوهش، قیر PG 58-22 با درجه نفوذ ۸۵-۱۰۰ بوده و از پالایشگاه پاسارگاد تبریز تهیه شد. در جدول ۱، مشخصات فنی قیر مطابق با استانداردهای مربوطه ارائه گردیده است.

محدودیت‌های سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) از جمله مقاومت مکانیکی نسبتاً پایین و افزایش مصرف قیر، اصلاح سطحی این سبک‌دانه‌ها با نانوذرات مانند نانواکسید آلومینیوم پیشنهاد شده است. نانوذرات آلومینیوم به دلیل خواص مکانیکی و شیمیایی بالا، توانایی ایجاد پیوند بهتر با قیر و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی را فراهم می‌کنند (طهمورسی و همکاران، ۲۰۲۵). مطالعات اخیر نشان داده که افزودن نانواکسید آلومینیوم به قیرهای اصلاح‌شده می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود خواص مکانیکی، رئولوژیک و دوام مخلوط‌های آسفالتی داشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که این نانوذره با افزایش سفتی و مدول پیچیده، مقاومت در برابر شیارشدگی و تغییرشکل دائمی را بهبود می‌بخشد و عمر خستگی مخلوط را افزایش می‌دهد (جی و همکاران، ۲۰۲۳؛ سان و همکاران، ۲۰۲۳؛ بات و میر، ۲۰۲۴؛ عدنان و ونگ، ۲۰۲۴). همچنین، نانواکسید آلومینیوم باعث بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها و ارتقای عملکرد در دماهای بالا و پایین می‌شود. در مجموع، این یافته‌ها تأکید می‌کنند که به‌کارگیری نانواکسید آلومینیوم راهکاری مؤثر برای ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و اصلاح مشکلاتی همچون شیارشدگی و خستگی را فراهم کند. این اصلاح می‌تواند دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی را در دماهای بالا و متوسط بهبود بخشد و زمینه‌ای برای کاربرد صنعتی سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) فراهم کند. به طور کلی، مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا)، می‌تواند مزایایی چون کاهش وزن روسازی، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، بهبود عملکرد حرارتی و ارتقای دوام در شرایط محیطی سخت را فراهم آورد. با این حال، محدودیت‌هایی همچون افزایش مصرف قیر، نیاز به بهینه‌سازی درصد جایگزینی سنگدانه‌ها و کمبود مطالعات میدانی در مقیاس بزرگ همچنان پابرجاست.

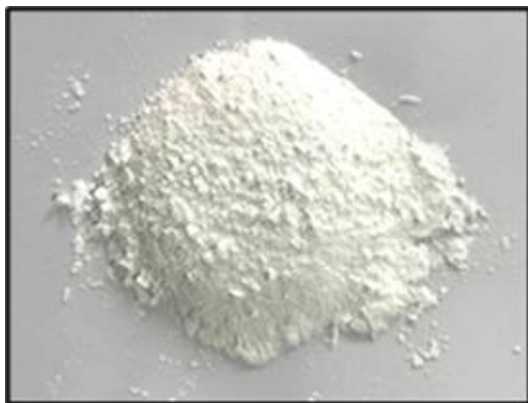
۲-۱-۲. افزودنی نانو اکسید آلومینیوم

نانو اکسید آلومینیوم مورد استفاده در این پژوهش شامل ۵۰ درصد آلفا و ۵۰ درصد گاما و تولید شرکت US-NANO آمریکا است و از شرکت پارسیان مرک نوین نانو تهیه شد. تصویر نانو ذرات مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است. مشخصات پایه‌ای نانو اکسید آلومینیوم مصرفی در جدول ۲ و آنالیز شیمیایی آن در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس اطلاعات شرکت سازنده، اندازه متوسط ذرات حدود ۵۰ نانومتر است که این اندازه کوچک موجب افزایش سطح ویژه حدود $35 \text{ m}^2/\text{g}$ و در نتیجه بهبود سطح تماس با قیر می‌شود. افزایش سطح تماس نانو ذرات با فاز آلی قیر می‌تواند منجر به بهبود برهم‌کنش فیزیکی و افزایش کارایی تقویت‌کنندگی آن‌ها در خواص مکانیکی قیر گردد.

۲-۱-۳. مصالح سنگی مورد استفاده

دانه‌بندی مصالح سنگی یکی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده عملکرد مخلوط‌های آسفالتی است. در این تحقیق، مصالح سنگی از شرکت باروساز شمال واقع در شهرستان منجیل تهیه شد و براساس نتایج تجزیه شیمیایی XRF

در جدول ۴، که توسط شرکت بیم‌گستر تابان انجام شد، مصالح سنگی از نوع آهکی تشخیص داده شد. دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه مطابق استانداردهای ASTM C136 و AASHTO T27 و دانه‌بندی فیلر بر اساس ASTM D546 و AASHTO T37 انجام گرفت. مشخصات مصالح سنگی، وزن مخصوص و جذب آب به ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، منحنی دانه‌بندی حاصل در محدوده دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) قرار داشته و با آن انطباق دارد.



شکل ۱. نانو اکسید آلومینیوم مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۱. مشخصات فنی قیر اولیه مورد استفاده

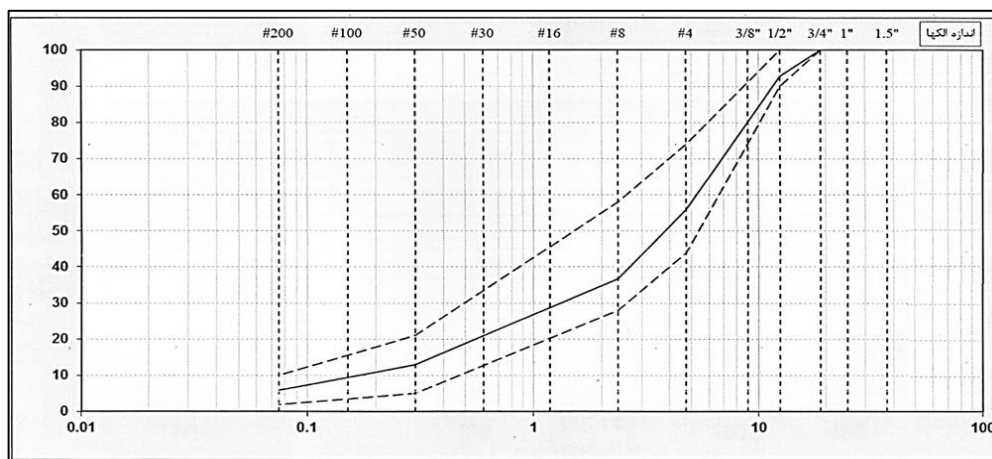
مقدار	حدود مشخصات قیر	روش استاندارد		مشخصه
		ASTM	AASHTO	
۹۳	۸۵-۱۰۰	D5	T 49	رجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)، در 25°C ، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه
۴۶	۴۵-۵۲	D36	T 53	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)، در آب مقطر
۱۰۶	۱۰۰ min	D131	T 51	ش‌پذیری (سانتی‌متر)، در 25°C ، ۵ سانتی‌متر بر دقیقه
۳۰۸	۲۳۲ min	D92	T 48	نقطه اشتعال، ظرف روباز کلپولند (درجه سلسیوس)
۹۹/۷	۹۹/۵ min	D2042	T 44	حلالیت در تری‌کلرواتیلن (درصد)
۱/۰۲	۱/۰۱ - ۱/۰۵	D70	T 228	زن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، در 25°C
۵۹۰	-	D2170	T 201	کندروانی (سانتی استوک)، در 120°C
۳۲۰	-	D2170	T 201	کندروانی (سانتی استوک)، در 135°C
۱۸۹	-	D2170	T 201	کندروانی (سانتی استوک)، در 160°C

جدول ۲. مشخصات پایه‌ای نانو اکسید آلومینیوم مصرفی در پژوهش

فرمول شیمیایی	چگالی ویژه g/cm ³	اندازه ذرات nm	سطح ویژه m ² /g	رنگ	PH	درصد خلوص	ریخت شناسی	درصد جذب آب	نقطه ذوب °C	ساختار بلورنگاری
Al ₂ O ₃	۳/۹۸	۵۰	۳۵	سفید	۷	۹۹/۹٪	کروی	< ۰/۲	۲۰۲۲	لوزی

جدول ۳. آنالیز شیمیایی نانو اکسید آلومینیوم مورد استفاده در پژوهش

Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	SiO ₂
% 99.9	< 0.002	< 0.001	< 0.03	< 0.002	< 0.01	< 0.02



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی به همراه حدود مشخصات

جدول ۴. آنالیز شیمیایی سنگدانه‌های مورد استفاده در پژوهش

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	Sr (%)
5.56	1.67	0.376	47.82	5.701	0.241	0.175	0.733	0.146	0.056	0.024

جدول ۵. نتایج آزمون مرغوبیت مصالح سنگی

حدود مشخصات		مقدار / نتیجه	روش استاندارد		مشخصه / آزمون
حداکثر	حداقل		ASTM	AASHTO	
مصالح سنگی درشت‌دانه					
-	-	B	C131	T96	افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس (درصد)
-	-	۵۰۰			نوع دانه‌بندی
۳۵	-	۱۴			تعداد دور
-	-	۰/۵	C88	T 104	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)
-	-	۰/۷	D4791		سنگدانه‌های پهن و دراز، نسبت ۵ به ۱ (درصد)
-	-	۹۵	D5821		شکستگی مصالح سنگی (درصد)
-	-	۹۴		در یک جبهه	
-	-				در دو جبهه

ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر

مصالح سنگی ریزدانه					
۴	-	N. P	D4318	T89 T90	دامنه خمیری (PI)
-	-	غیرقابل تعیین			حد خمیری (PL)
-	-	غیرقابل تعیین			حد روانی (LL)
۱۵	-	۱	C88	T104	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)
-	۵۰	۶۶	D2419	T176	ارزش ماسه‌ای مصالح سیلوی سرد (درصد)
-	-	۴۶/۲	C1252	T304	گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه، روش آزمون A (درصد)
-	-	بدون ناخالصی آلی	C40	T21	وجود مواد ناخالص آلی (دارای ناخالصی یا بدون ناخالصی آلی)

جدول ۶. وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی

جذب آب (درصد)	وزن مخصوص (g/cm^3)		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۱/۴	۲/۶۳۹	۲/۷۴۲	مصالح مانده روی الک شماره ۴
۱/۹	۲/۶۳۳	۲/۷۷۴	مصالح رد شده از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-	۲/۶۸۸		مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰
۲/۶۳۹			وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (G_{agg}) یا (G_{sb})
۳/۰۸۰			وزن مخصوص سیمان
۲/۸۷۱			وزن مخصوص مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰ به همراه ۳ درصد سیمان جایگزین فیلر مصالح شود
۲/۶۴۹			وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی در صورتی که ۳ درصد سیمان جایگزین فیلر مصالح شود

۲-۱-۴. دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا)

می‌تواند به افزایش چسبندگی بین ذرات و قیر در مخلوط‌های آسفالتی کمک کند و پراکندگی یکنواخت نانومواد را تسهیل نماید. در این مطالعه از دانه‌های درشت‌دانه سبک‌دانه لیکا باقی‌مانده روی الک نمره ۴ استفاده شد. خصوصیات فیزیکی آن‌ها در جدول ۷ و آنالیز شیمیایی این سبک‌دانه‌ها بر اساس آزمون XRF در جدول ۸ گزارش شده است. نتایج جذب آب دانه‌های لیکا در جدول ۷، حدود ۱۸ درصد است. این ویژگی به دلیل ساختار متخلخل و پوسته خارجی نسبتاً نازک این مصالح است. جذب زیاد آب سبب می‌شود بخش معینی از قیر در زمان اختلاط، به درون منافذ دانه‌ها نفوذ کند و

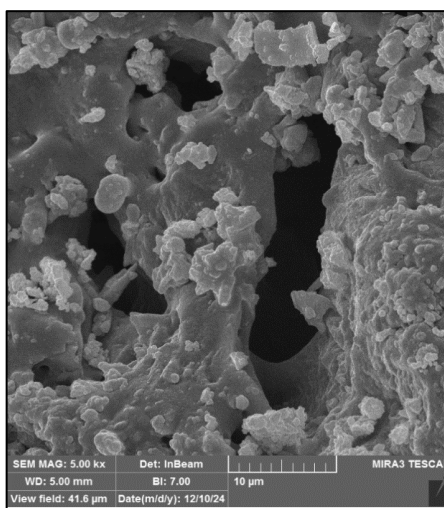
سبک‌دانه رس منبسط‌شده (لیکا) به دلیل وزن کم، جایگزین مناسبی برای سنگدانه‌های معمولی در مخلوط‌های آسفالتی محسوب می‌شود و به‌ویژه در روسازی زمین‌های نامناسب مانند خاک‌های سست، همچنین در ساخت روسازی پل‌ها و پارکینگ‌های طبقاتی کاربرد دارد. تصویری از دانه‌های لیکای مورد استفاده در شکل ۳، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از آن نیز در شکل ۴ ارائه شده است. تصویر SEM نشان می‌دهد که دانه‌های لیکا دارای سطحی ناصاف و ساختار متخلخل هستند. وجود حفره‌ها و برجستگی‌های سطحی

بهبود ساختار رئولوژیک قیر، چسبندگی قیر با سطح دانه‌های لیکا را تا حدی تقویت کرده و میزان آسیب‌پذیری مخلوط در برابر رطوبت کاهش می‌یابد. به همین دلیل، نمونه‌های حاوی نانوذرات، عملکرد پایدارتری نسبت به نمونه‌های فاقد نانوماده نشان می‌دهند.

در نتیجه سطح تماس واقعی قیر با سطح خارجی سنگدانه کاهش یابد. کاهش این سطح تماس، چسبندگی قیر با مصالح سنگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند حساسیت مخلوط را در برابر پدیده رطوبت‌زدگی افزایش دهد؛ زیرا حضور آب در منافذ دانه‌های لیکا می‌تواند موجب جداشدگی قیر از سطح این دانه‌ها شود. با این حال، افزودن نانواکسید آلومینیوم با افزایش قطبیت و



شکل ۳. دانه‌های لیکای مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) دانه‌های لیکا

جدول ۷. خصوصیات فیزیکی دانه‌های لیکا

عنوان نمونه	دانسیته (g/cm^3)	شاخص جذب آب سریع (%)	ارزش ضربه‌ای
LECA	۰/۴۸	۱۸	۲۸

ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر

جدول ۸. آنالیز شیمیایی دانه‌های رس منبسط‌شونده

ترکیبات	درصد (%)	ترکیبات	غلظت (ppm)
SiO ₂	۵۷/۳۶۳	La	۳۵
Al ₂ O ₃	۱۴/۷۸۳	Ce	۳
Fe ₂ O ₃	۹/۴۵۹	Zr	۱۶۰
CaO	۴/۰۶۴	Zn	۱۴۳
MgO	۳/۶۶۹	V	۸۱
Na ₂ O	۱/۲۶۶	Sr	۸۲۷
K ₂ O	۲/۸۹۹	Ni	۵۷
TiO ₂	۰/۷۳۳	Cu	۱۰۶
MnO	۰/۱۴۶	Cr	۳۸
P ₂ O ₅	۰/۱۶۹	Co	۴۵
LOI	۰/۶۶	Cl	۲۰۳
-	-	S	۸۵۹

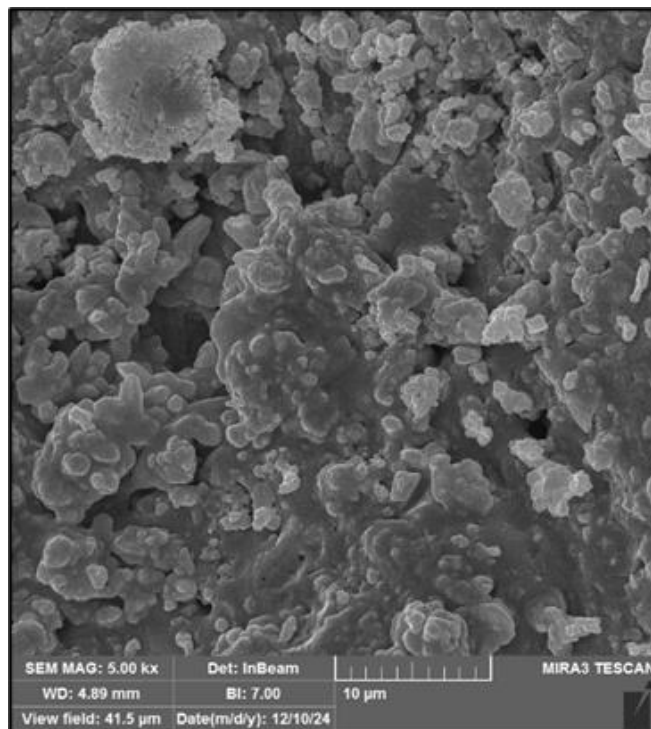
می‌شود، نانوذرات اکسید آلومینیوم به صورت نسبتاً یکنواخت در ماتریس قیر توزیع شده‌اند و تجمعات مشخص با ابعاد بزرگ دیده نمی‌شود. حضور ساختارهای دانه‌ای و خوشه‌های کوچک، نشان‌دهنده‌ی فرآیند اختلاط مناسب و شکست اولیه‌ی آگلومرها در مرحله‌ی پیش‌پراکنش است. مناطق روشن‌تر نشان‌دهنده‌ی تراکم بیشتر نانوذرات بوده و توزیع آن‌ها بیانگر عملکرد مؤثر میکسر برش بالا در پراکندگی نانوذرات و جلوگیری از کلوخه‌شدن قابل توجه آن‌ها است. این ریزساختار، همگن بودن ترکیب قیر و نانو اکسید آلومینیوم را تأیید می‌کند. شکل ۷، نمایانگر برنامه آزمون‌های انجام‌شده در این پژوهش است.



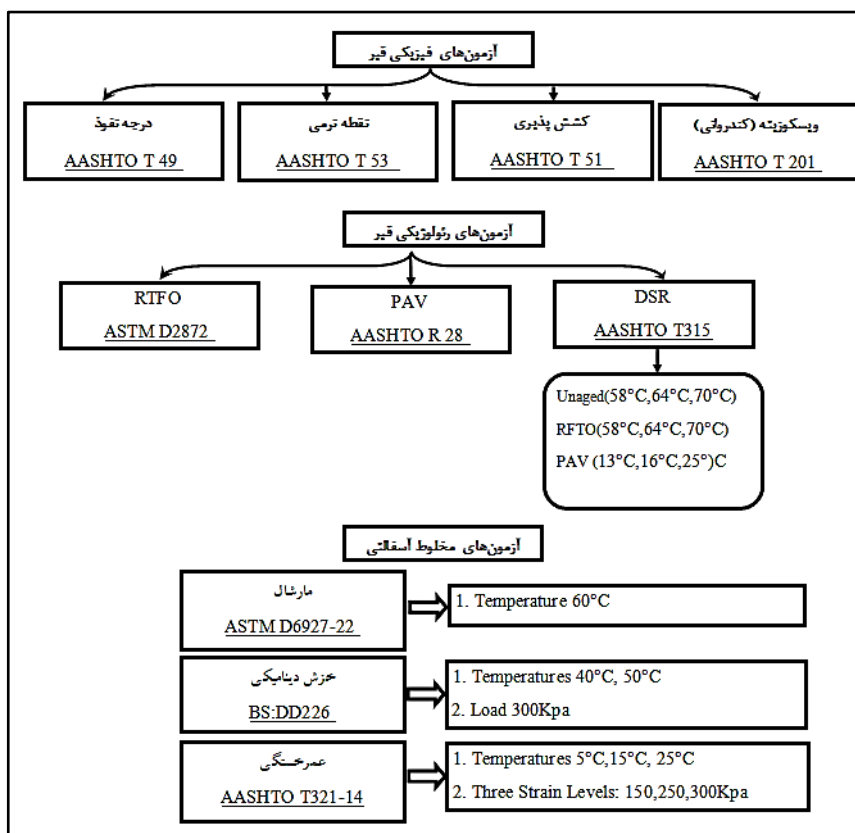
شکل ۵. میکسر دور بالا استفاده شده در پژوهش حاضر

۲-۲. اختلاط قیر و نانو اکسید آلومینیوم

در این پژوهش، جهت جلوگیری از کلوخه‌شدن نانوذرات و دستیابی به توزیع یکنواخت، نانوذرات اکسید آلومینیوم ابتدا در حلال کرسین پیش‌پراکنش شد. برای این منظور، نانوذرات به تدریج به کرسین اضافه شده و مخلوط حاصل به مدت ۴۰ دقیقه تحت میکس با میکسر برش بالا و سرعت ۲۰۰۰۰ rpm قرار گرفت. در طول فرآیند، دمای محلول کمتر از ۵۰ °C نگه داشته شد تا از تغییر خواص حلال و تجمع ثانویه ذرات جلوگیری شود. به منظور ارزیابی کیفیت پراکنش، محلول از نظر پایداری، یکنواختی ظاهری و عدم رسوب‌گذاری در بازه‌های زمانی مختلف پایش شد و نتایج نشان داد که شرایط فوق بهترین ساختار پراکنش را فراهم می‌کند. در مرحله بعد، محلول آماده‌شده حاوی نانوذرات به تدریج به قیر پیش‌گرم‌شده در دمای ۱۵۰ °C اضافه شد و اختلاط نهایی به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ rpm انجام گرفت. سه سطح ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی نانو اکسید آلومینیوم نسبت به جرم قیر مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۵، تصویر میکسر دور بالا و شکل ۶، تصویر SEM با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر، ساختار ریز قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده



شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از اختلاط قیر و نانواکسید آلومینیوم



شکل ۷. چارت انجام آزمون‌ها در این پژوهش

۲-۳. آزمون‌های آزمایشگاهی

۲-۳-۱. آزمون‌های فیزیکی و رئولوژیک قیر

۲-۳-۱-۱. آزمون‌های فیزیکی

به منظور ارزیابی خواص فیزیکی قیر اولیه و اصلاح‌شده، آزمون‌های نقطه نرمی، درجه نفوذ، کشش‌پذیری و ویسکوزیته انجام شد. آزمون درجه نفوذ در دمای 25°C و طبق استاندارد (2015) AASHTO T 49 اجرا شد، در حالی که نقطه نرمی با استاندارد (2006) AASHTO T 53 به منظور بررسی حساسیت حرارتی قیر تعیین گردید. کشش‌پذیری بر اساس استاندارد (2018) AASHTO T 51 در دمای 25°C و سرعت کشش 5 سانتی‌متر در دقیقه و ویسکوزیته طبق استاندارد (2010) AASHTO T 201 (MP19) در دماهای 120°C ، 135°C و 160°C اندازه‌گیری شد تا رفتار جریان و مقاومت حرارتی قیر مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲-۳-۱-۲. آزمون‌های رئولوژیک

آزمون رئومتر برشی دینامیک (DSR) برای سنجش خواص ویسکوالاستیک قیر و ارزیابی مقاومت آن در برابر خستگی و شیارشدگی در دماهای میانه و بالا استفاده می‌شود و دو پارامتر اصلی، یعنی مدول برشی (G^*) و زاویه فاز (δ) را تعیین می‌کند. میزان تنش دینامیک اعمال‌شده در این آزمون با رابطه زیر بیان می‌شود (لی و همکاران، 2015):

$$\tau = \tau_0 \times \sin(\omega t) \quad (1)$$

در رابطه (1)، τ تنش برشی دینامیک در لحظه τ_0 تنش برشی حداکثر؛ ω فرکانس زاویه‌ای (rad/s) و t زمان (s) است.

آزمون مطابق با استاندارد (2012) AASHTO

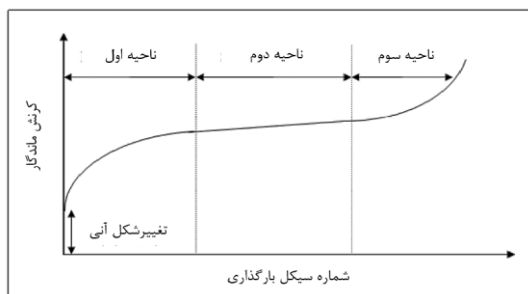
T315-22 در فرکانس 10 rad/s انجام شد. برای ارزیابی مقاومت قیر در برابر شیارشدگی، نمونه‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت در دماهای بالای 58، 64 و 70°C مورد آزمون قرار گرفتند. همچنین، برای بررسی مقاومت

در برابر خستگی، نمونه‌های پیرشده بلندمدت در دماهای میانه 13، 16 و 25°C آزمایش شدند، زیرا ترک‌های ناشی از خستگی عمدتاً در این محدوده دمایی رخ می‌دهند.

۲-۳-۲. آزمون‌های مخلوط‌های آسفالتی

۲-۳-۲-۱. آزمون خزش دینامیک

آزمون خزش دینامیک برای بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی انجام شد. تغییر شکل در سه ناحیه اصلی رخ می‌دهد: ناحیه اول با کاهش تدریجی نرخ کرنش و تغییر حجم، ناحیه دوم با نرخ کرنش تقریباً ثابت و افزایش نسبی تغییر شکل برشی، و ناحیه سوم با افزایش شتاب‌دار کرنش و تغییر شکل پلاستیک تا رسیدن به شکست. خروجی اصلی این آزمون نمودار کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری است و تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عنوان عدد روانی تعریف می‌شود، که رابطه مستقیم با مقاومت برشی مخلوط دارد و شاخص مناسبی برای پیش‌بینی شیارشدگی محسوب می‌شود در شکل 8، نمونه‌ای از منحنی ایجاد شده در مخلوط آسفالتی تحت آزمون خزش دینامیک نشان داده شده است (اوزارووسکی، 2007؛ ویتچاک، 2007).



شکل 8. نواحی تغییر شکل ایجاد شده در مخلوط آسفالتی

تحت آزمون خزش دینامیک (اوزارووسکی، 2007).

۲-۳-۲-۲. آزمون خستگی

این آزمون به منظور ارزیابی رفتار خستگی مخلوط آسفالتی گرم مطابق با استاندارد (2014) AASHTO T 321-14 انجام شد. از دستگاه خمش چهارنقطه‌ای ساخت شرکت

که منتهی به شکست خستگی می‌شوند (نیوکمب و کوئینتاس، ۲۰۰۲).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج آزمون‌های فیزیکی و رئولوژیک قیر

۳-۱-۱. نتایج آزمون‌های فیزیکی قیر

در جدول ۹، نتایج آزمایش‌های فیزیکی قیر اصلاح‌شده با افزودنی نانواکسید آلومینیوم نشان داد که این نانوذرات تأثیر قابل توجهی بر خواص قیر دارند. نقطه نرمی بر اساس استاندارد AASHTO T 53 با افزایش درصد نانوذرات از ۴۶°C به ۵۰°C افزایش یافت که بیانگر بهبود مقاومت قیر در برابر جریان در دماهای بالا و پایداری حرارتی بیشتر است. درجه نفوذ طبق استاندارد AASHTO T 49 از ۹۳ به ۶۰ کاهش یافت و سختی قیر افزایش یافت، به طوری که قابلیت جریان آن تحت بار کاهش یافته و دوام آسفالت افزایش می‌یابد. کشش‌پذیری بر اساس استاندارد AASHTO T 51 از ۱۰۶ سانتی‌متر به ۱۱۶ سانتی‌متر افزایش پیدا کرد که انعطاف‌پذیری قیر را بهبود داده و احتمال ترک خوردگی تحت تنش‌های حرارتی و مکانیکی را کاهش می‌دهد. همچنین، ویسکوزیته سیستماتیک طبق استاندارد AASHTO T 201 در دماهای مختلف به‌طور قابل توجهی افزایش یافت، به طوری که در ۱۶۰°C از ۱۸۹ به ۵۹۸ سانتی‌استوک رسید، که بیانگر کاهش جریان‌پذیری قیر در دماهای بالا و افزایش کارایی آن در فرآیندهای تولید آسفالت است. به‌طور کلی، افزودن نانوذرات آلومینیوم باعث افزایش مقاومت حرارتی، سفتی کنترل‌شده، انعطاف‌پذیری بهتر و بهبود کارایی فرآیند قیر می‌شود. افزایش ویسکوزیته قیر در حضور نانواکسید آلومینیوم عمدتاً ناشی از برهم‌کنش‌های سطحی و شیمیایی میان گروه‌های هیدروکسیل نانوذرات و اجزای قطبی قیر است. گروه‌های OH- آلومینا با آسفالتن‌ها و رزین‌ها پیوندهای هیدروژنی و نیروهای بین‌مولکولی قوی‌تری ایجاد کرده و موجب

ITC استرالیا استفاده گردید. آزمون خستگی می‌تواند در دو حالت بارگذاری تنش ثابت یا کرنش ثابت اجرا شود، که حالت کرنش ثابت رایج‌تر است، زیرا نتایج آن با مشاهدات میدانی و کارگاهی قابل مقایسه‌تر هستند (عموزاده عمرانی و مدرس، ۲۰۱۹). بر این اساس، در این پژوهش، از روش کرنش ثابت استفاده شد. کلیه آزمون‌ها در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سلسیوس، در سطوح تنش ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ کیلوپاسکال و فرکانس ۱۰ هرتز انجام شدند. نمونه‌های آسفالتی به شکل تیر مستطیل با ابعاد ۵۰ × ۶۰ × ۳۸۰ میلی‌متر و رواداری ± 6 میلی‌متر ساخته شدند. تعداد چرخه‌ها تا گسیختگی به‌عنوان برآوردی از عمر مفید روسازی در نظر گرفته شد. روابط (۲) تا (۴) مورد استفاده در محاسبه پارامترها خستگی خمش چهارنقطه‌ای:

$$\sigma_t = \frac{G_0 P}{bh^2} \quad (2)$$

$$\epsilon_t = \frac{12h^3 \times 10^6}{3G_0^2 - 4G_i^2} \quad (3)$$

$$E = \left[\frac{pG_i}{8bh} \right] \times \left[\frac{3G_0^2 - 4G_i^2}{4h^2 + k(1+\nu)} \right] \quad (4)$$

σ_t بیشینه تنش کششی بر حسب کیلوپاسکال، P بار وارد شده بر نمونه بر حسب کیلونیوتن، b میانگین عرض نمونه بر حسب میلی‌متر، h میانگین ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر، G_0 طول گیج خارجی (۳۵۵ میلی‌متر)، ϵ_t کرنش کششی بر حسب میکرو استرین، h میانگین تغییر مکان در وسط تیر بر حسب میلی‌متر، G_i طول گیج داخل، E_s سختی خمشی بر حسب مگاپاسکال، E مدول الاستیسیته بر حسب مگاپاسکال، k نسبت تنش برشی واقعی به تنش برشی متوسط، ν ضریب پواسون. در رابطه (۵)، ارتباط بین کرنش خمشی در زیر لایه آسفالتی و ایجاد ترک ناشی از خستگی در آن لایه، نشان داده شده است:

$$\epsilon_f = K_1 (N_f)^{K_2} \quad (5)$$

که ϵ_f کرنش کششی در اثر خمش در زیر لایه آسفالت گرم، K_1 و K_2 مقادیر ثابت، N_f تعداد سیکل‌های بارگذاری

ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر

شکل‌گیری ریزخوشه‌های پایدار و کاهش تحرک زنجیره‌های هیدروکربنی می‌شوند. این محدودشدگی حرکتی و تقویت شبکه پیوندی درون قیر، جریان ویسکوز آزاد را مهار کرده و مدول برشی را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه ویسکوزیته در دماهای ۱۲۰ تا ۱۶۰ درجه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

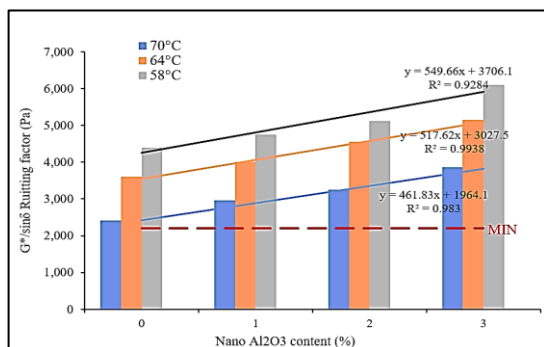
جدول ۹. نتایج آزمون‌های فیزیکی قیر اصلاح شده با افزودنی نانو اکسید آلومینیوم

درصد نانو اکسید آلومینیوم				شرح آزمون
۰٪	۱٪	۲٪	۳٪	
۴۶	۴۷	۴۹	۵۰	نقطه نرمی (°C)
۹۳	۶۷	۶۳	۶۰	درجه نفوذ (mm / ۰/۱)
۱۰۶	۱۱۰	۱۱۳	۱۱۶	کشش‌پذیری (سانتی‌متر)
۵۹۰	۷۲۴	۷۹۲	۸۶۱	ویسکوزیته سیستماتیک در دمای ۱۲۰ درجه (سانتی استوک)
۴۱۷	۵۸۲	۶۶۳	۷۳۶	ویسکوزیته سیستماتیک در دمای ۱۳۵ درجه (سانتی استوک)
۱۸۹	۳۵۲	۴۶۱	۵۹۸	ویسکوزیته سیستماتیک در دمای ۱۶۰ درجه (سانتی استوک)

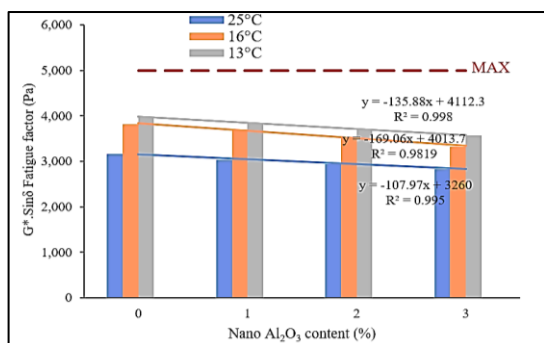
مقدار $G^* \cdot \sin \delta$ مؤسسه شارپ (۵۰۰۰ پاسکال) است. مطابق نمودار، برای تمام نمونه‌ها اعم از قیر خالص و قیرهای اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم، مقادیر شاخص با افزایش دما کاهش یافته و در بیشترین دما، فاکتور ترک‌خوردگی کمترین مقدار را دارد. همچنین، با افزایش درصد افزودنی نانومواد، مقادیر شاخص خستگی کاهش می‌یابد. به این ترتیب در بیشترین دما و بیشترین درصد افزودنی نانو اکسید آلومینیوم، کمترین ترک‌خوردگی ناشی از خستگی مشاهده می‌شود. این به علت آن است که اولاً شل شدن قیر در نتیجه افزایش دما، باعث کاهش مدول مختلط برشی (G^*) می‌شود. ثانیاً، نانو اکسید آلومینیوم که طی فرایند ترمودینامیک به قیر افزوده شده است توانسته به خوبی عملکرد رئولوژیک قیر را بهبود بخشد. مقادیر $G^* \cdot \sin \delta$ برای قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم را در برابر پدیده خستگی بهبود بخشیده است. در نتیجه می‌توان از این قیر در راه‌های با آمد و شد فراوان که مستعد وقوع ترک‌های ناشی از تعداد آمد و شد است، استفاده نمود و وقوع این ترک‌ها در روسازی را تا جای ممکن به تأخیر

۳-۱-۲. نتایج آزمون‌های رئولوژیک قیر

آزمون RTFO بر اساس استاندارد ASTM D2872-19 انجام شد. نتایج افت وزنی در جدول ۱۰ نشان می‌دهد که افزودن نانو اکسید آلومینیوم باعث کاهش افت وزنی قیر از ۰/۰۶ درصد به ۰/۰۴ تا ۰/۰۵ درصد می‌شود. با توجه به معیار مؤسسه شارپ که حداکثر افت وزنی قیر در این آزمون را ۱ درصد در نظر می‌گیرد، نتایج کاملاً در محدوده مجاز و بسیار کمتر از حد استاندارد قرار دارد. نتایج نمودار شکل ۹، تغییرات فاکتور شیارشدگی ($G^*/\sin \delta$) قیر اولیه و قیر پیرنشده حاوی درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم در تمامی دماها بیش از ۱ کیلو پاسکال تعیین شده توسط شارپ است. نتایج در شکل ۱۰ نشان داد که فاکتور شیارشدگی ($G^*/\sin \delta$)، نمونه‌های قیر پیر شده کوتاه‌مدت در تمامی سطوح دمایی بیش از حداقل مقدار مؤسسه شارپ (۲/۲ کیلو پاسکال) است. شکل ۱۱، تغییرات فاکتور خستگی ($G^* \cdot \sin \delta$) را در دماهای میانه ۱۳، ۱۶ و ۲۵ نشان می‌دهد. نمونه‌های قیر پیر شده بلندمدت در تمامی سطوح دمایی کمتر از



شکل ۱۰. فاکتور شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) قیرهای اصلاح شده با درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم در حالت پیرشده کوتاه مدت RTFO



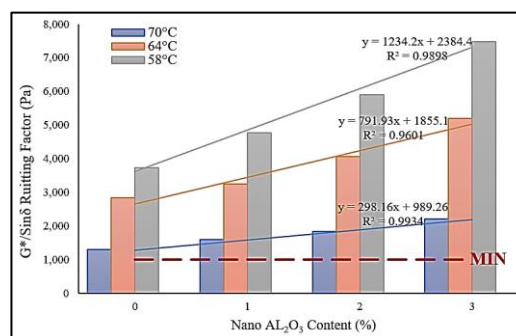
شکل ۱۱. فاکتور خستگی ($G^*/\sin\delta$) قیرهای اصلاح شده با درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم در حالت پیرشده بلندمدت PAV

همچنین لازم به ذکر است که در برخی نمونه‌های شیارشده، مقدار مدول پیچیده کمتر از نمونه‌های عادی است. این کاهش را می‌توان به اثرات هندسی شیار و تمرکز تنش در ناحیه شیار نسبت داد، نه به تغییر در خواص ذاتی ویسکوالاستیک ماده. اگرچه زاویه فاز تغییر قابل توجهی نداشت، حضور شیار سبب افزایش تغییرشکل موضعی و تمرکز تنش شده و در نتیجه مدول مؤثر نمونه کاهش می‌یابد. این رفتار با گزارش‌های پیشین در باره تأثیر ناپیوستگی‌های هندسی بر سختی مؤثر نمونه‌ها سازگار است و نشان می‌دهد که کاهش سفتی در نمونه‌های شیارشده با وجود اثرات مثبت اصلاح با نانوذرات و بهبود رفتار خزشی قابل انتظار و از نظر مکانیکی قابل توضیح است (البیاتی و همکاران، ۲۰۲۴؛

انداخت. افزایش درصد نانو اکسید آلومینیوم در تمامی دماهای آزمون موجب کاهش فاکتور خستگی ($G^*/\sin\delta$) می‌شود. این رفتار به تغییرات ساختاری قیر در حضور نانوذرات مربوط است. در درصدهای بالاتر، نانوذرات با ایجاد پیوندهای فیزیکی و افزایش درجه نظم در ماتریس قیر، سهم بخشی از رفتار ویسکوز قیر را کاهش داده و جزء الاستیک ماده پررنگ‌تر می‌شود. در چنین شرایطی، زاویه فاز کاهش یافته و قیر توانایی بیشتری برای تحمل و بازیابی تغییرشکل‌های مکرر ناشی از بارگذاری‌های ترافیکی پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، در نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانو اکسید آلومینیوم، کاهش $G^*/\sin\delta$ ناشی از کاهش مدول برشی مؤثر و افزایش سهم رفتار ارتجاعی است که در نهایت موجب کاهش تنش‌های داخلی و تأخیر در آغاز ترک خوردگی ناشی از خستگی می‌شود. این موضوع کاملاً با روند مشاهده شده در نمودارهای شکل ۱۱ مطابقت دارد و نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با این درصد افزودنی در شرایط بارگذاری تکراری عملکرد مناسب‌تری نسبت به قیر پایه دارد.

جدول ۱۰. افت وزنی قیر اصلاح شده

درصدافزودنی نانو اکسید آلومینیوم	۰	۱	۲	۳
افت وزنی قیر اصلاح شده (٪)	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵



شکل ۹. فاکتور شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) قیرهای اصلاح شده با درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم در حالت پیرشده RTFO

راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، که ۸۰۰ کیلوگرم است، را برآورده کرده‌اند. این کاهش مقاومت، به علت کمتر بودن سفتی دانه‌های لیکا نسبت به مصالح سنگی درشت‌دانه است. این موضوع به ماهیت فیزیکی دانه‌های لیکا مربوط است؛ زیرا این دانه‌ها دارای تخلخل زیاد و مقاومت کمتری نسبت به مصالح سنگی معمولی هستند. در نتیجه، بخشی از قیر به داخل منافذ دانه‌های لیکا نفوذ کرده و سطح تماس مؤثر قیر-سنگدانه کاهش پیدا می‌کند. کاهش این سطح تماس، چسبندگی قیر به مصالح و همچنین مقاومت کششی مخلوط را کاهش می‌دهد و این امر نهایتاً در مقدار استقامت مارشال منعکس می‌شود. با این حال، افزودن نانو اکسید آلومینیوم باعث بهبود ساختار قیر و افزایش چسبندگی آن شده و در نتیجه بخشی از این افت مقاومت جبران می‌گردد. نکته حائز اهمیت آن است که بعد از افزودن قیر اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم استقامت مارشال روند صعودی داشته و قابل مقایسه با نمونه‌های کنترلی است. به عنوان مثال، استقامت مارشال نمونه کنترلی $0\%LECA+0\%Al_2O_3$ برابر 1421 کیلوگرم است، در حالی که افزودن دانه‌های لیکا $25\%LECA$ و $50\%LECA$ باعث کاهش استقامت مارشال به ترتیب برابر 1323 و 1200 کیلوگرم می‌شود. حال، افزودن نانو اکسید آلومینیوم توانسته بخش عمده این کاهش مقاومت مارشال در اثر افزودن سبک‌دانه‌های لیکا را جبران کند به گونه‌ای که $25\%LECA+1\%Al_2O_3$ و $50\%LECA+3\%Al_2O_3$ به ترتیب مقاومت مارشال برابر 1595 و 1455 کیلوگرم برسد و از نمونه‌های کنترلی بیشتر شود.

الحمدو و البیاتی، (۲۰۲۵). از سوی دیگر، استفاده از نانو اکسید آلومینیوم موجب افزایش سفتی، بهبود مقاومت خزشی و تأخیر در آغاز تغییر شکل پلاستیک می‌شود و در نتیجه می‌تواند نقش مهمی در ارتقای عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ایفا کند.

۲-۳. نتایج آزمون‌های مخلوط آسفالتی

۱-۲-۳. برنامه آزمون‌ها، طرح اختلاط و آماده‌سازی

نمونه‌ها

مطابق جدول ۱۱، از ۱۲ نوع مخلوط مختلف استفاده شده و روی هر یک، دو آزمون شیارشدگی و خستگی انجام گرفته است. نمونه‌های قیری شامل درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم (صفر، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی قیر) و مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های حجمی متفاوت دانه‌های رس منبسط‌شده (صفر، ۲۵ و ۵۰ درصد) جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه مطابق جدول ۱۲ می‌باشند. مقدار قیر بهینه بر اساس طرح اختلاط مارشال مطابق جدول ۱۳ به دست آمد. استفاده از درصد قیر بهینه برای هر یک از طرح‌های اختلاط به این دلیل انتخاب شد که حضور دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) به عنوان سنگدانه سبک با تخلخل بالا، تأثیر مستقیم بر ظرفیت جذب قیر و حجم فضای خالی مخلوط دارد. سنگدانه‌های لیکا دارای تخلخل و ظرفیت جذب بالاتری نسبت به سنگدانه‌های معمولی هستند؛ بنابراین استفاده از یک مقدار قیر ثابت در تمامی طرح‌ها می‌توانست باعث ایجاد عدم تعادل در شرایط عملکردی شود، به طوری که برخی مخلوط‌ها دچار کمبود قیر و برخی دیگر دچار قیر اضافی می‌شدند. همانگونه که در جدول ۱۳ مشخص است، استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی با افزودن درصد‌های بیشتر دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه، در مقایسه با مخلوط‌های کنترلی کاهش می‌یابد. با این حال، تمامی مخلوط‌ها حداقل استقامت مارشال تعیین شده توسط آیین‌نامه روسازی آسفالتی

جدول ۱۱. نمونه‌های مخلوط آسفالتی مورد نیاز در هر سری از آزمون بر اساس متغیرهای مستقل

درصد افزودنی نانو اکسید آلومینیوم				دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا)
۳	۲	۱	۰	
0% LECA+3%AL ₂ O ₃	0% LECA+2%AL ₂ O ₃	0% LECA+1%AL ₂ O ₃	Asphalt cement	%۰
25% LECA+3%AL ₂ O ₃	25% LECA+2%AL ₂ O ₃	25% LECA+1%AL ₂ O ₃	25% LECA+0%AL ₂ O ₃	%۲۵
50% LECA+3%AL ₂ O ₃	50% LECA+2%AL ₂ O ₃	50% LECA+1%AL ₂ O ₃	50% LECA+0%AL ₂ O ₃	%۵۰
مجموع تعداد نمونه‌ها در هر سری از آزمون ۱۲ عدد است.				

جدول ۱۲. نحوه جایگزینی حجمی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) جایگزین درشت‌دانه در اختلاط نمونه‌های آسفالتی

شماره نمونه	درصد افزودنی سیک‌دانه رس منبسط‌شده (لیکا)	حجم کل سنگدانه درشت‌دانه برای ساخت ۱۰۰۰ سانتی‌متر مکعب نمونه آسفالتی (cm ³)	حجم لیكای جایگزین شده (cm ³)	حجم باقیمانده سنگدانه درشت (cm ³)	نسبت حجمی لیکا به کل مصالح درشت‌دانه
۱	۰	۷۰۰	۰	۱۰۰۰	۰
۲	%۲۵	۷۰۰	۱۷۵	۵۲۵	%۲۵
۳	%۵۰	۷۰۰	۳۵۰	۳۵۰	%۵۰

جدول ۱۳. نتایج طرح اختلاط مارشال جهت تعیین مقادیر فیر بهینه

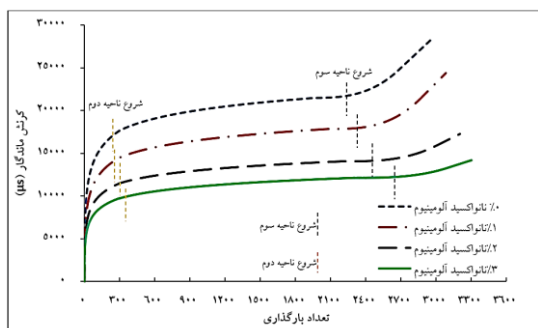
نماد اختصاصی	چگالی (kg/ m ³)	استقامت مارشال (kg)	VMA (%)	VFM (%)	Void (%)	Flow (mm)	درصد فیر بهینه
Asphalt cement	۲۳۷۵	۱۴۲۱	۱۵/۱۳	۶۸/۲۵	۳/۷۰	۳/۴۰	۵/۸
0% LECA+1% AL ₂ O ₃	۲۳۷۸	۱۵۰۵	۱۵/۰۷	۶۸/۱۰	۳/۶۲	۳/۳۲	۵/۵
0% LECA+2% AL ₂ O ₃	۲۳۸۰	۱۵۶۰	۱۵/۱۰	۶۸/۱۴	۳/۶۵	۳/۳۵	۵/۳
0% LECA+3% AL ₂ O ₃	۲۳۸۲	۱۵۸۵	۱۵/۱۲	۶۸/۲۱	۳/۶۸	۳/۳۸	۵/۶
25% LECA	۲۰۷۹	۱۳۲۳	۱۸/۴۵	۷۲/۶۰	۴/۲۸	۳/۱۹	۶/۶
25% LECA+1% AL ₂ O ₃	۲۰۸۴	۱۵۹۵	۱۸/۱۲	۷۳/۱۲	۴/۱۸	۳/۱۷	۶/۵
25% LECA+2% AL ₂ O ₃	۲۰۸۶	۱۶۴۳	۱۸/۲۵	۷۲/۱۹	۴/۲۱	۳/۱۵	۶/۳
25% LECA+3% AL ₂ O ₃	۲۰۸۹	۱۶۷۷	۱۸/۴۱	۷۲/۸۷	۴/۲۷	۳/۱۲	۶/۱
50% LECA	۱۵۵۹	۱۲۰۰	۱۹/۸۲	۷۴/۱۵	۴/۹۲	۲/۱۵	۶/۸
50% LECA+1% AL ₂ O ₃	۱۵۶۲	۱۳۹۲	۱۹/۶۸	۷۳/۹۷	۴/۸۴	۲/۰۹	۶/۷
50% LECA+2% AL ₂ O ₃	۱۵۶۵	۱۴۱۲	۱۹/۷۴	۷۴/۱۰	۴/۸۷	۲/۱۲	۶/۴
50% LECA+3% AL ₂ O ₃	۱۵۶۷	۱۴۵۵	۱۹/۸۰	۷۴/۱۲	۴/۸۹	۲/۱۴	۶/۲

۲-۲-۳. نتایج آزمون خزش دینامیک

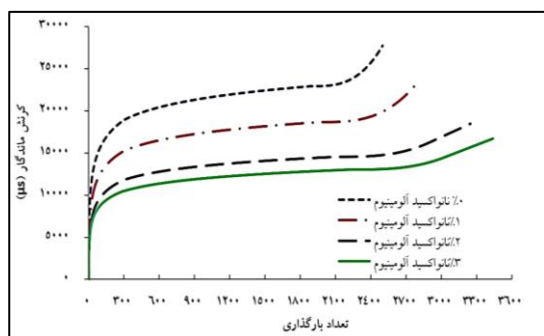
در این پژوهش، بارگذاری دینامیک بر نمونه‌های استوانه‌ای مخلوط آسفالتی با قطر ۴ اینچ تهیه و در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس تحت بارگذاری نیمه‌سینوسی با سطح تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال براساس استاندارد BS:DD226 انجام شد. مدت زمان آزمایش ۳۶۰۰ ثانیه و مدت هر سیکل بارگذاری ۱ ثانیه بود. آزمون‌ها با دستگاه UTM 14 و نرم‌افزار منطبق با آیین‌نامه استرالیا AS2891.12.1 انجام شد که با استانداردهای اروپا، انگلستان و آمریکا نیز همخوانی دارد. نتایج کرنش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری در شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ نشان می‌دهد که مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانواکسید آلومینیوم، کرنش نهایی کمتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی با قیر خالص دارند. همه منحنی‌ها الگوی کلاسیک سه‌مرحله‌ای خزش را نشان می‌دهند، رشد سریع اولیه^۱ در چند صد سیکل اول، سپس یک فاز تقریباً پایدار با شیب کم^۲ و در انتها یک افزایش شتاب‌دار^۳ در سیکل‌های نهایی در نمونه‌های بدون نانوماده. این رشد اولیه شدیدتر و ورود به فاز شتاب‌دار سریع‌تر است؛ به عبارت دیگر، نرخ کرنش مؤثر در فاز اولیه برای نمونه‌های فاقد نانو به‌طور چشمگیری بیشتر است. افزایش درصد نانواکسید آلومینیوم تا ۳ درصد وزنی قیر همواره خمیدگی منحنی را به سمت پایین می‌برد و مقدار کرنش تجمعی نهایی را کاهش می‌دهد. به‌صورت تقریبی، نمونه‌های ۳ درصد نانو به میزان ۲۰ تا ۴۰ درصد تنش نهایی کمتری نسبت به نمونه بدون نانوماده نشان می‌دهند و همچنین شیب فاز ثانویه و شدت شتاب در فاز نهایی در آن‌ها به‌طور محسوس کمتر است. این نشان می‌دهد که نانواکسید آلومینیوم باعث تقویت پیوند ماتریس قیر و افزایش مقاومت ویسکوالاستیک در برابر خزش شده است. بنابراین هم نرخ اولیه و هم نرخ افزایش

نهایی کاهش می‌یابد. مقایسه صفر، ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی، ۲۵ درصد دانه‌های لیکا نسبت به حالت بدون دانه‌های لیکا عملکرد خزشی را بهبود می‌بخشد (سطح منحنی‌ها پایین‌تر می‌آیند)؛ یعنی ترکیب ۲۵ درصد دانه‌های لیکا با نانو منجر به کمترین کرنش تجمعی شده است. در حالی که افزایش جایگزینی تا ۵۰ درصد عملکرد را تضعیف می‌کند. در نمودار مربوط به ۵۰ درصد دانه‌های لیکا، مقادیر کرنش کلی افزایش یافته و تفاوت مثبت اثر نانو کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، نسبت به حالت بهینه (۲۵٪ لیکا + ۳٪ نانواکسید آلومینیوم)، حالت ۵۰ درصد دانه‌های لیکا ممکن است کرنش نهایی را ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش دهد، و همین‌طور شیب نهایی را تندتر کند که علامت کاهش پایداری خزشی است. مقایسه درصدهای نانواکسید آلومینیوم داخل هر سطح جایگزینی و نتیجه کلی در هر سه سطح جایگزینی، ترتیب رفتار از ضعیف‌ترین به بهترین ۰٪ نانو < ۱٪ < ۲٪ < ۳٪ است؛ یعنی ۳ درصد بهترین مقاومت خزشی را دارد. اما بزرگی بهبود ناشی از نانو نسبت به اثر منفی افزایش زیاد دانه‌های لیکا متفاوت است. وقتی دانه‌های لیکا تا ۲۵ درصد باشد، اثر مثبت نانواکسید آلومینیوم برجسته و قابل توجه است؛ اما وقتی دانه‌های لیکا به ۵۰ درصد می‌رسد، اثر مفید نانواکسید آلومینیوم کاهش می‌یابد و حتی در برخی بازه‌ها منحنی‌های ۳ درصد نانو نزدیک به ۱ و ۲ درصد نانواکسید آلومینیوم می‌شوند. بنابراین بهترین ترکیب مشاهده‌شده در نمودارها ۲۵ درصد دانه‌های لیکا همراه با ۲ درصد نانواکسید آلومینیوم است. این ترکیب کمترین کرنش تجمعی، کمترین شیب فاز ثانویه و کندترین شتاب نهایی را دارد. نتایج عددی جریان در شکل ۱۸ به‌خوبی نشان

در برابر تغییر شکل دائمی می‌شود که ناشی از ماهیت سبک و متخلخل این مصالح است. اما حضور نانو اکسید آلومینیوم با ایجاد ساختاری مترکم‌تر، افزایش چسبندگی خمیر قیر به مصالح و بهبود رفتار بین‌سطحی، توانسته است اثرات منفی دانه‌های لیکا را تا حد زیادی جبران نماید. همچنین مشاهده می‌شود که اثر مثبت نانو اکسید آلومینیوم در دماهای بالاتر برجسته‌تر است، زیرا توانایی آن در افزایش مقاومت خزشی و تأخیر در شروع تغییر شکل پلاستیک به خوبی نمایان است.



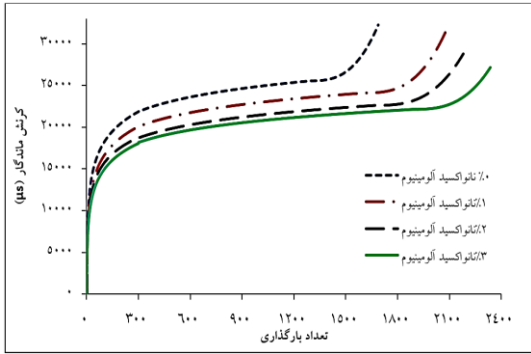
شکل ۱۲. کرنش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری برای نمونه‌های بدون دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) در دمای ۴۰ °C و تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال



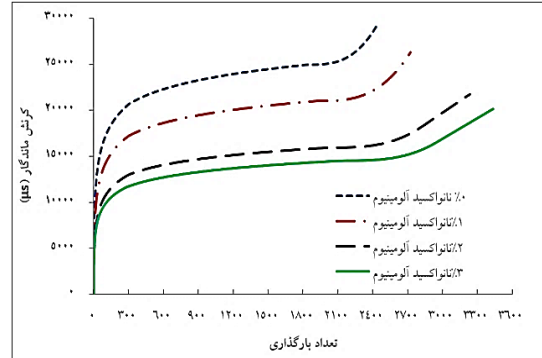
شکل ۱۳. کرنش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری برای نمونه‌های حاوی ۲۵٪ دانه‌های رس منبسط شده (لیکا) جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۴۰ °C و تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال

می‌دهد که تأثیر ترکیبی دما، میزان دانه‌های لیکا و درصد نانو اکسید آلومینیوم نقش تعیین‌کننده‌ای بر رفتار رئولوژیک مخلوط‌های آسفالتی دارد. در شرایط بارگذاری تکراری (سطح تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال) و دمای بالا (۵۰ درجه سلسیوس)، عدد روانی مخلوط شاهد (0%LECA+0%AL2O3) برابر ۲۰۰۰ بوده که با افزایش درصد نانو اکسید آلومینیوم تا ۳ درصد به ۲۵۰۰ رسیده است؛ یعنی بهبودی نزدیک به ۲۵ درصد. این روند افزایشی در حضور ۲۵ و ۵۰ درصد دانه‌های لیکا نیز مشاهده می‌شود، به طوری که در حالت ۵۰ درصد دانه‌های لیکا، عدد روانی از ۱۸۰۰ به ۲۳۵۰ افزایش یافته است (۳۰ درصد افزایش)، که نشان‌دهنده توانایی نانو اکسید آلومینیوم در کاهش اثرات منفی استفاده از دانه‌های لیکا بر پایداری مخلوط آسفالتی است. نانو ذرات اکسید آلومینیوم با اندازه کوچک و انرژی سطحی بالا، چسبندگی در محل اتصال قیر و سنگدانه را افزایش داده و لغزش بین‌فازی را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، حضور یکنواخت آن‌ها موجب افزایش مدول دینامیک قیر، کاهش سهم رفتار ویسکوز و محدود شدن جریان خزشی در دماهای بالا می‌شود. نانو ذرات با پرکردن ریزحفرات و کاهش مسیرهای تغییر شکل، انتقال تنش را کارآمدتر کرده و در نتیجه نرخ کرنش اولیه و ثانویه کاهش یافته و ورود به فاز شتاب‌دار خزش به تأخیر می‌افتد. در دمای کمتر (۴۰ درجه سلسیوس) به طور کلی مقادیر عدد روانی بیشتر بوده‌اند. به عنوان مثال در نمونه فاقد دانه‌های لیکا، عدد روانی از ۲۴۵۰ در حالت بدون نانو به ۲۸۵۰ در حضور ۳ درصد نانو افزایش یافته است. همچنین در نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد دانه‌های لیکا، گرچه کاهش محسوس عدد روانی نسبت به نمونه‌های بدون دانه‌های لیکا مشاهده شد (۲۳۰۰) در حالت بدون نانو، اما استفاده از ۳ درصد نانو اکسید آلومینیوم این مقدار را به ۲۶۵۰ رسانده است. به طور کلی، افزایش درصد دانه‌های لیکا سبب افت مقاومت و کاهش پایداری

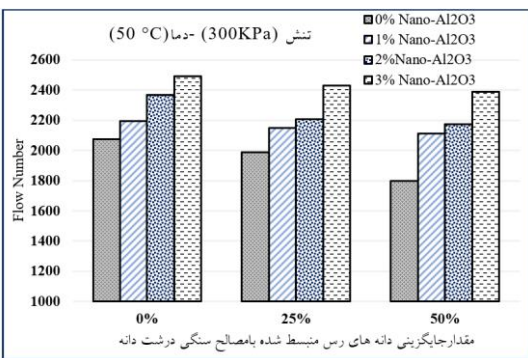
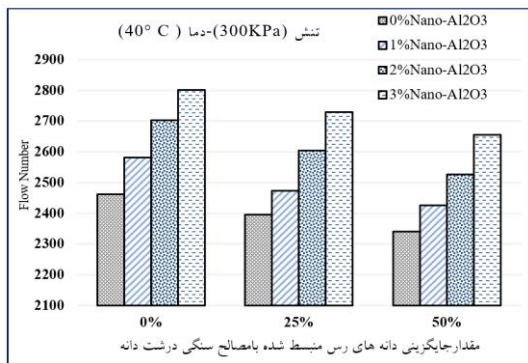
ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانواکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر



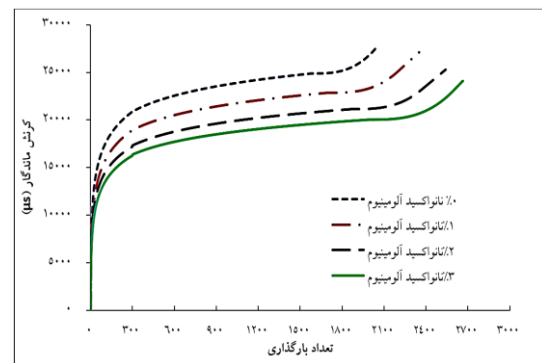
شکل ۱۷. کرش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری برای نمونه‌های حاوی ۵۰٪ دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۵۰ °C و تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال



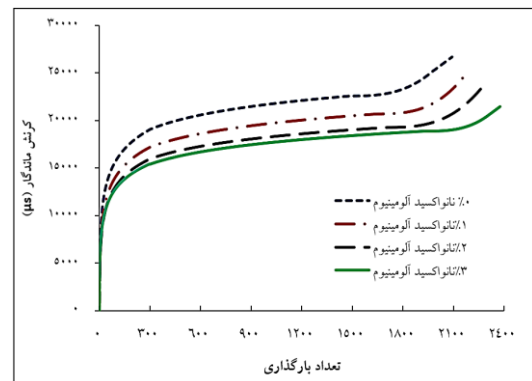
شکل ۱۴. کرش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری برای نمونه‌های حاوی ۵۰٪ دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۴۰ °C و تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۱۸. مقادیر میانگین عدد روانی نمونه‌های آسفالتی در تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال و دمای الف: ۴۰ °C و ب: ۵۰ °C



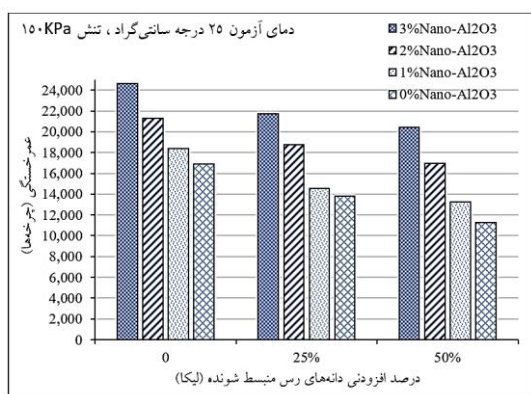
شکل ۱۵. کرش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری برای نمونه‌های بدون دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) در دمای ۵۰ °C و تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال.



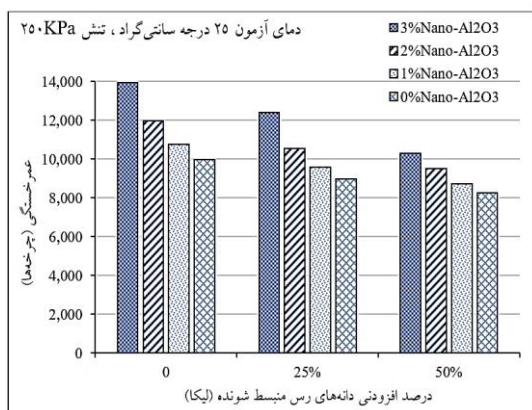
شکل ۱۶. کرش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری برای نمونه‌های حاوی ۲۵٪ دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۵۰ °C و تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال

۳-۲-۳. نتایج آزمون خستگی خمشی تیر چهارنقطه‌ای نانواکسید آلومینیوم به‌عنوان پل بین ذرات ماتریس عمل می‌کند، باعث افزایش مدول مؤثر در دماهای بالا، کاهش نرخ رشد ریزترک و بهبود چسبندگی فاز قیر پرکننده می‌شود؛ دانه‌های لیکا در درصد بهینه به‌عنوان جزء

خستگی را فراهم می‌کند، زیرا نانوذرات خواص مکانیکی قیر را تقویت می‌کنند و دانه‌های لیکا اثرات مخرب دمای بالا را کاهش می‌دهد. به طور کلی، کمترین تعداد چرخه‌ها در دمای بالا و تنش بالا بدون افزودنی‌ها و بیشترین تعداد چرخه‌ها با دمای پایین، تنش کم و ترکیب بهینه ۲ درصد نانو اکسید آلومینیوم و ۲۵ درصد دانه‌های لیکا مشاهده می‌شود، که نشان می‌دهد این ترکیب می‌تواند عمر مفید آسفالت‌های داغ و مقاومت خستگی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.



شکل ۱۹. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در تنش ۱۵۰ کیلوپاسکال

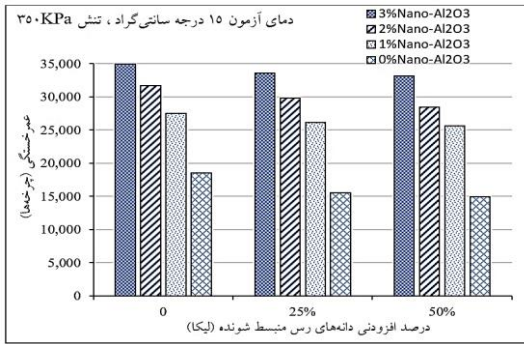


شکل ۲۰. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در تنش ۲۵۰ کیلوپاسکال

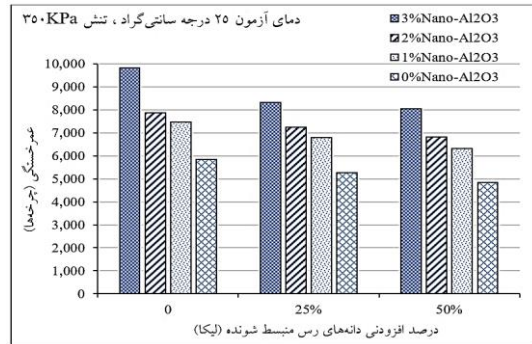
متخلخل، توزیع کرنش را هموارتر کرده و با افزایش اصطکاک داخلی، از تمرکز تنش جلوگیری می‌کند. این ترکیب، به شرط پراکنش یکنواخت (اجتناب از تجمع نانو) و کنترل ویسکوزیته مخلوط (که با افزایش نانو ویسکوزیته کاری بالا می‌رود)، بهترین تعادل بین سختی مقاوم و جذب انرژی ضربه را فراهم می‌آورد. شکل‌های ۱۹ تا ۲۷، نمودار نتایج آزمون عمر خستگی در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ °C با سطح تنش مختلف ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ kPa را نشان می‌دهند. شکل ۲۸، تحلیل اثر دما و سطح تنش بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا را نشان می‌دهد. هم‌افزایش سطح تنش (150 → 350 kPa) و هم‌افزایش دما (5 → 25 °C) به‌طور معنی‌داری عمر خستگی را کاهش می‌دهند. بنابراین اثر ترکیبی دمای بالا و تنش زیاد، کمترین چرخه عمر خستگی را دارد. در دمای پایین °C ۵ و تنش کم ۱۵۰ kPa، نمونه‌ها بیشترین تعداد چرخه‌ها را تجربه می‌کنند (محدوده ۸۰,۰۰۰ تا ۹۵,۰۰۰)، که بیانگر مقاومت خستگی بالای قیر اصلاح شده تحت شرایط کم تنش و دمای پایین است. با افزایش تنش به ۳۵۰ kPa یا دما به ۲۵ °C، تعداد چرخه‌ها به شدت کاهش یافته و به محدوده ۵,۶۰۰ تا ۱۶,۰۰۰ می‌رسد. این کاهش شدید نشان‌دهنده اثر ترکیبی نرم شدن ماتریس قیر با افزایش دما و تمرکز کرنش ناشی از تنش بالا بر تسریع شکست خستگی است. افزودن دانه‌های لیکا تا ۲۵ درصد باعث افزایش توزیع کرنش‌ها و در شرایط تنش متوسط تا بالا، کاهش عمر خستگی را کنترل می‌کند.

اثر درصد نانوذرات اکسید آلومینیوم نیز قابل توجه است. افزودن ۲ درصد نانو باعث افزایش تعداد چرخه‌ها در تمام شرایط دما و تنش می‌شود و می‌تواند عمر خستگی را ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش دهد. این اثر به دلیل تقویت ماتریس قیر، پراکنش یکنواخت ذرات نانو و بهبود چسبندگی بین فازها است. ترکیب ۲ درصد نانو اکسید آلومینیوم با ۲۵ درصد دانه‌های لیکا بیشترین مقاومت

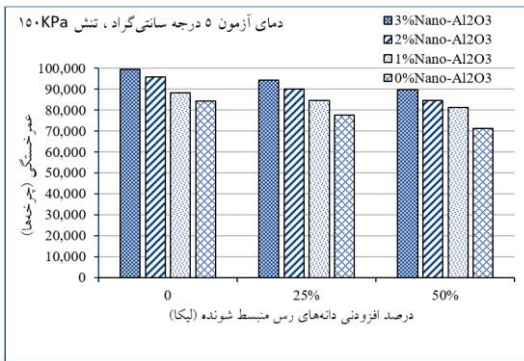
ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر



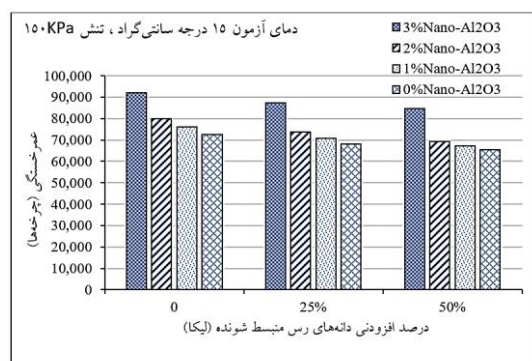
شکل ۲۴. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۱۵ درجه سلسیوس در تنش ۲۵۰ کیلوپاسکال



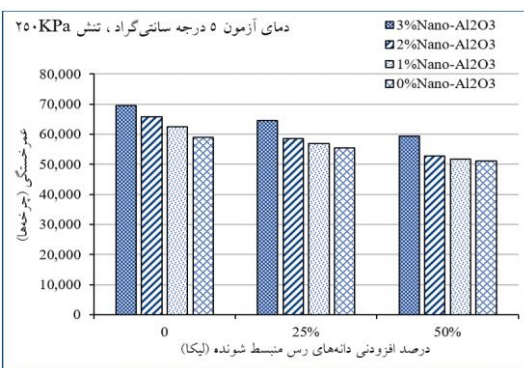
شکل ۲۱. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در تنش ۳۵۰ کیلوپاسکال



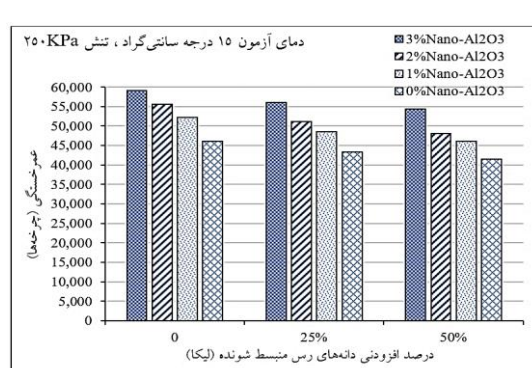
شکل ۲۵. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۵ درجه سلسیوس در تنش ۱۵۰ کیلوپاسکال



شکل ۲۲. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۱۵ درجه سلسیوس در تنش ۱۵۰ کیلوپاسکال



شکل ۲۶. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۵ درجه سلسیوس در تنش ۲۵۰ کیلوپاسکال



شکل ۲۳. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۱۵ درجه سلسیوس در تنش ۲۵۰ کیلوپاسکال

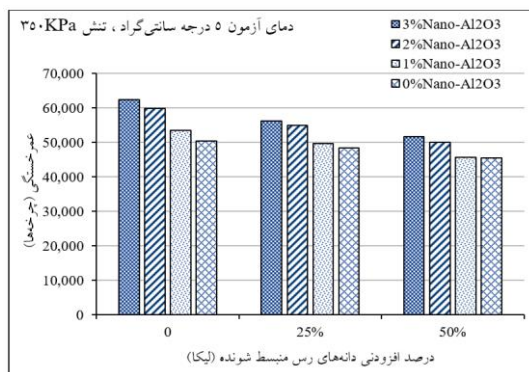
که N_f تعداد سیکل‌های بارگذاری منتهی به شکست خستگی، K_1 و K_2 مقادیر ثابت و ϵ_f کرنش کششی در اثر خمش در زیر لایه آسفالت گرم است.

۴-۱. ارائه مدل پیش‌بینی خستگی مخلوط آسفالت

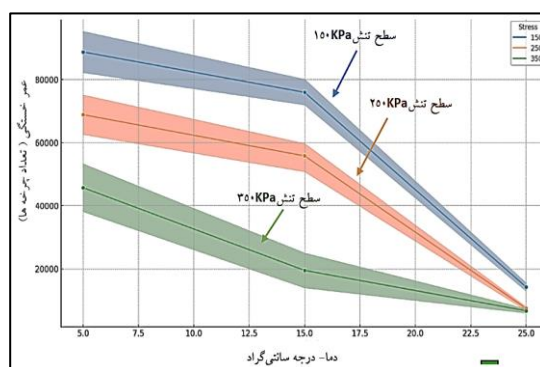
حاوی دانه‌های لیکا و اصلاح شده با نانومواد

در این بخش به ارائه مدل‌های عملکردی براساس نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. ارائه مدل‌های مربوط به پیش‌بینی پارامترهایی مانند خستگی براساس تحلیل‌های آماری صورت پذیرفت. مشخصات متغیرهای وابسته و مستقل در جداول ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. در این بخش، بر اساس نتایج آزمایشگاهی عمر خستگی مخلوط‌های مختلف، به ارائه روابطی برای پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های لیکا و اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم با درصد‌های مختلف نانومواد پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۲۹، ۳۰ و ۳۱ تخمین پارامترهای مدل خستگی برای مخلوط‌های با درصد‌های مختلف دانه‌های لیکا و اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم ارائه شده است. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SPSS Statistics 27 و به روش تحلیل رگرسیون و واریانس (ANOVA) صورت پذیرفته است. سطح معناداری در این آزمون‌ها ۵ درصد در نظر گرفته شده است. به منظور سنجش معناداری مدل‌های ارائه شده، لازم است تا عدد ستون sig. از جدول ANOVA کمتر از ۰/۰۵ (سطح معناداری آزمون‌ها) باشد.

یکی از اصلی‌ترین پیش‌فرض‌های روش تحلیل رگرسیون و واریانس آن است که توزیع داده‌های متغیر وابسته باید به صورت نرمال باشد. بدین منظور، ابتدا و پیش از تمامی تحلیل‌های صورت گرفته در این بخش، نرمال بودن متغیر وابسته به وسیله آزمون کولموگروف-



شکل ۲۷. تغییرات عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه در دمای ۵ درجه سلسیوس در تنش ۳۵۰ کیلوپاسکال



شکل ۲۸. اثر دما و سطح تنش بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و حاوی دانه‌های لیکا

۴. ارائه مدل‌های عملکردی

ترک‌خوردگی ناشی از خستگی لایه آسفالتی از کرنش‌های کششی پی در پی حاصل از بارگذاری ترافیکی به وجود می‌آید که طبق تحلیل سازه‌ای، حداکثر آن در زیر لایه قیری قرار دارد. ترک پس از به وجود آمدن رو به بالا انتشار پیدا می‌کند و سبب تضعیف تدریجی سازه می‌گردد. در مدل آزمایشگاهی زیر رابطه (۶) بین کرنش خمشی در زیر لایه آسفالتی و ایجاد ترک ناشی از خستگی در آن لایه نشان داده شده است:

$$\epsilon_f = K_1 (N_f)^{K_2} \quad (6)$$

1- Analysis OF Variance

ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر

جدول ۱۵. مشخصات متغیرهای مستقل پژوهش

نماد	نوع متغیر	متغیر
$G^* \cdot \sin \delta$	مستقل	پارامتر خستگی قیر
A	مستقل	درصد افزودنی نانو اکسید آلومینیوم
L	مستقل	درصد افزودن دانه‌های لیکا جایگزین درشت‌دانه
T	مستقل	دما
S	مستقل	تنش

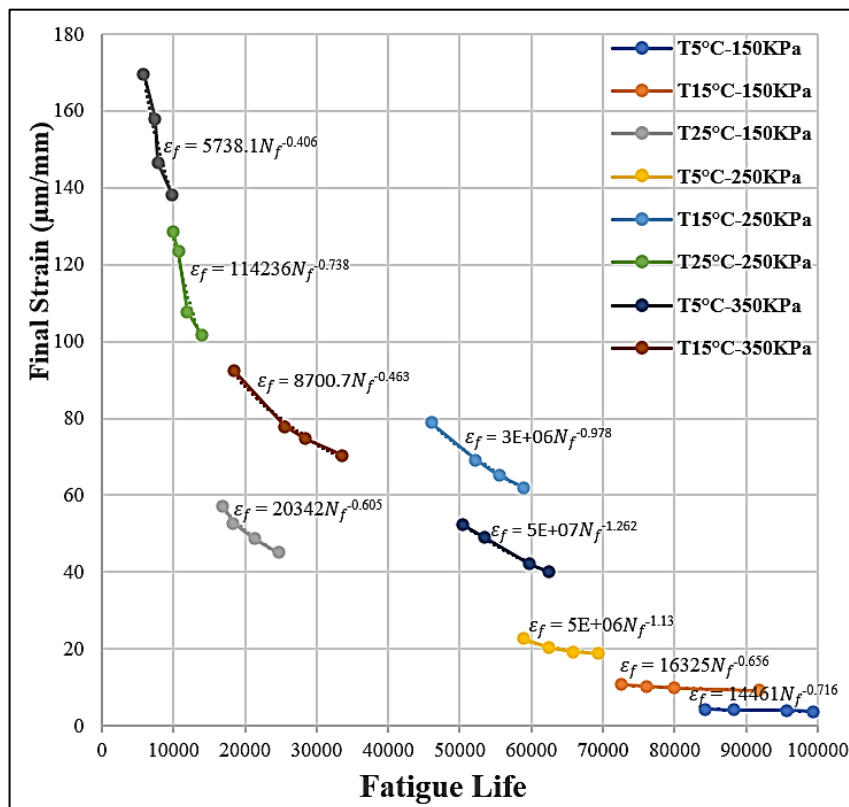
اسمیرنوف صورت پذیرفته است. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در جدول ۱۶ برای درصدهای مختلف دانه‌های لیکا نشان داده شده است.

جدول ۱۴. مشخصات متغیرهای وابسته پژوهش

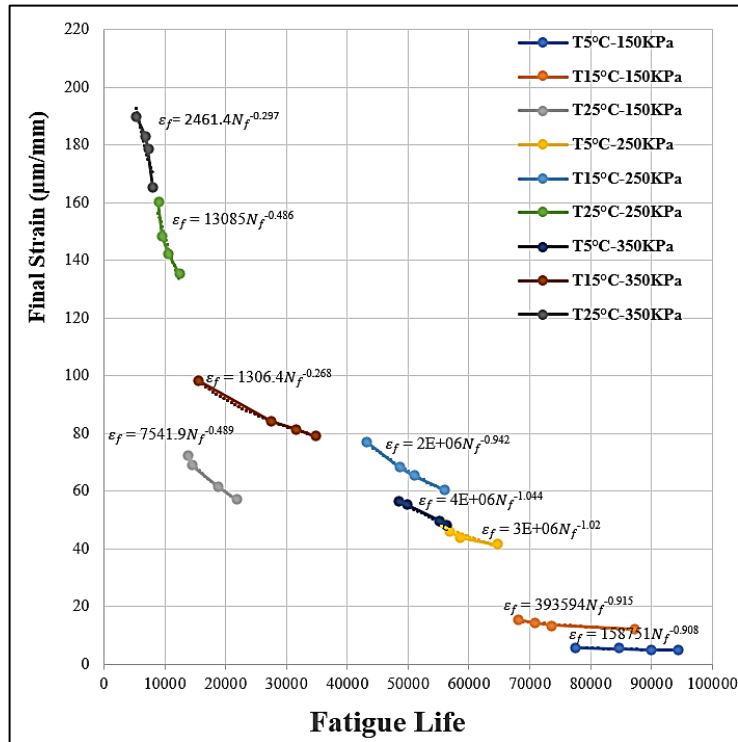
متغیر	نوع متغیر	نماد
عمر خستگی مخلوط آسفالتی	وابسته	NF

جدول ۱۶. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای خستگی مخلوط آسفالتی با درصدهای مختلف دانه‌های لیکا و اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم

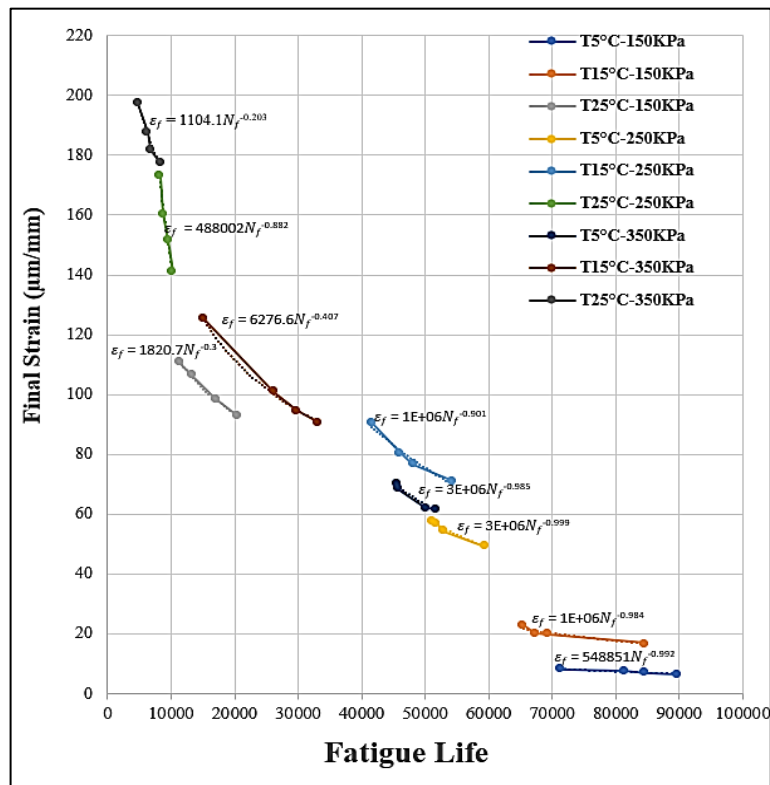
Variable	Symbol	LECA (%)	Statistic	df	Sig.
Fatigue life of samples	NF	0	0.142	36	0.064
		25	0.141	36	0.070
		50	0.142	36	0.066



شکل ۲۹. تخمین پارامترهای مدل خستگی برای مخلوط‌های بدون دانه‌های لیکا و اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم



شکل ۳۰. تخمین پارامترهای مدل خستگی برای مخلوط‌های حاوی ۲۵٪ دانه‌های لیکا جایگزین مصالح درشت‌دانه و اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم



شکل ۳۱. تخمین پارامترهای مدل خستگی برای مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ دانه‌های لیکا جایگزین مصالح درشت‌دانه و اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم

ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانوآکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر

استفاده از مقدار پارامتر خستگی قیر ($G^*.Sin\delta$) پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه دمای مشترک دو آزمایش ۲۵ درجه سلسیوس بوده است، روابط زیر تنها برای این دما قابل استفاده است.

مدل ارائه شده برای پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی بدون دانه‌های لیکا و اصلاح شده با نانوآکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (رابطه ۷) به همراه نتایج تحلیل واریانس جداول ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

$$NF = 76436.23 + (62.776 S) - (15.88 G^*.Sin\delta) \quad (7)$$

۲-۴. مدل خستگی مخلوط‌های حاوی دانه‌های لیکا جایگزین درشت‌دانه و اصلاح شده با نانوآکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر ($G^*.Sin\delta$) در دمای ۲۵ °C

با توجه به اینکه یکی از خروجی‌های آزمایش رنومتر برش دینامیک مقدار پارامتر خستگی قیر ($G^*.Sin\delta$) بوده که بیانگر خستگی در قیر است و از آنجایی که آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم به توصیف خستگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌پردازد، در این بخش به ارائه روابطی برای پیش‌بینی خستگی در مخلوط آسفالتی با

جدول ۱۷. خلاصه نتایج تحلیل ANOVA مدل خستگی مخلوط‌های بدون دانه‌های لیکا و اصلاح شده با نانوآکسید

آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	359804726.7	2	179902363.4	70.512	<.001 ^b
	Residual	22962434.19	9	2551381.576		
	Total	382767160.9	11			

a. Dependent Variable: NF
b. Predictors: (Constant), $G^*.sin\delta$, S

جدول ۱۸. نتایج مدل پیش‌بینی خستگی مخلوط‌های بدون دانه‌های لیکا و اصلاح شده با نانوآکسید آلومینیوم

در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

Coefficients ^a								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	76436.232	11466.528		6.666	<.001		
	S	-62.776	5.647	-.908	-11.116	<.001	1.000	1.000
	$G^*.sin\delta$	-15.887	3.803	-.341	-4.178	.002	1.000	1.000

a. Dependent Variable: NF

نشان داده شده است.

$$NF = 68266.94 + (51.89 S) - (14.65 G^*.Sin\delta) \quad (8)$$

مدل ارائه شده برای پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ درصد دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه و اصلاح شده با نانوآکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (رابطه ۸) به همراه نتایج تحلیل واریانس در جداول ۱۹ و ۲۰

جدول ۱۹. خلاصه نتایج تحلیل ANOVA مدل خستگی مخلوط‌های حاوی ۲۵٪ دانه‌های لیکا جایگزین درشت‌دانه و اصلاح شده با نانواکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	253315918.0	2	126657959.0	52.262	<.001 ^b
	Residual	21811847.03	9	2423538.559		
	Total	275127765.0	11			

a. Dependent Variable: NF
b. Predictors: (Constant), G*.sinδ, S

جدول ۲۰. نتایج مدل پیش‌بینی خستگی مخلوط‌های حاوی ۲۵٪ دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه و اصلاح شده با نانواکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

Coefficients ^a								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	68266.940	11175.557		6.109	<.001		
	S	-51.891	5.504	-.885	-9.428	<.001	1.000	1.000
	G*.sinδ	-14.656	3.706	-.371	-3.955	.003	1.000	1.000

a. Dependent Variable: NF

مدل ارائه شده برای پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰ درصد دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه و اصلاح شده با نانواکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (رابطه ۹) به همراه نتایج تحلیل واریانس در جداول ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است.

$$NF = 66366.9 + (44.56 S) - (14.988 G \cdot \sin \delta) \quad (9)$$

جدول ۲۱. خلاصه نتایج تحلیل ANOVA مدل خستگی مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ دانه‌های لیکا جایگزین درشت‌دانه و اصلاح شده با نانواکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	198509321.2	2	99254660.61	32.679	<.001 ^b
	Residual	27335725.44	9	3037302.827		
	Total	225845046.7	11			

a. Dependent Variable: NF
b. Predictors: (Constant), G*.sinδ, S

ارزیابی و مدل‌سازی خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دانه‌های رس منبسط‌شده (لیکا) و قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم بر اساس پارامتر خستگی قیر

جدول ۲۲. نتایج مدل پیش‌بینی خستگی مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ دانه‌های لیکا جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه و اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

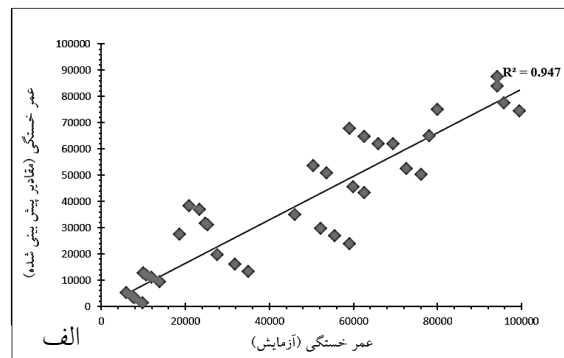
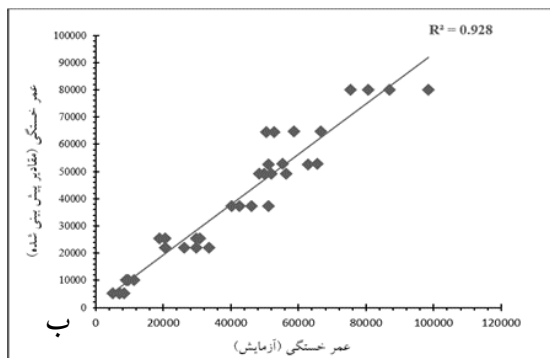
Coefficients ^a							
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	66366.905	12510.892		5.305	<.001	
	S	-44.564	6.162	-.839	-7.232	<.001	1.000
	G*.sin θ	-14.988	4.149	-.419	-3.612	.006	1.000

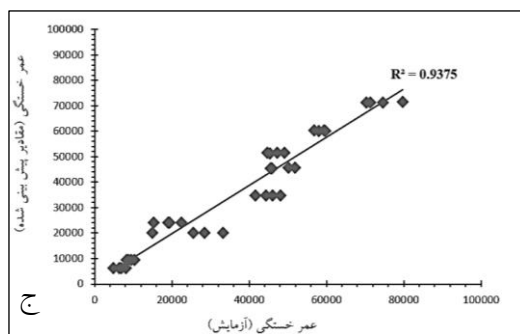
a. Dependent Variable: NF

۳-۴. اعتبارسنجی مدل ارائه شده

روش تقسیم داده‌ها به نسبت ۸۰ به ۲۰ به عنوان یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های اعتبارسنجی مدل‌های آماری و یادگیری ماشین، از بروز پدیده برازش بیش از حد جلوگیری کرده و قابلیت تعمیم مدل را بهبود می‌بخشد (جیمز و همکاران، ۲۰۱۳؛ هستی و همکاران، ۲۰۰۹). برای اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی ارائه شده، داده‌ها به نسبت ۸۰ درصد برای آموزش مدل و ۲۰ درصد برای آزمون و ارزیابی عملکرد آن تقسیم شدند. در این روش، نمونه‌هایی که در فرایند ساخت مدل به کار نرفته بودند، به عنوان مجموعه آزمون وارد مدل‌ها شدند و نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های تجربی (آزمایشگاهی) مقایسه گردید. برای این منظور، داده‌های موجود شامل ۳۶ نمونه برای هر یک از درصد‌های مختلف دانه‌های لیکا (صفر، ۲۵٪ و ۵۰٪)، به صورت

تصادفی به دو مجموعه جداگانه شامل ۲۸ نمونه برای آموزش مدل و ۸ نمونه برای آزمون تقسیم شد. مدل رگرسیون خطی درصد‌های مختلف دانه‌های لیکا روی داده‌های آموزش ساخته شد و سپس عملکرد آن روی هر دو مجموعه آموزش و آزمون ارزیابی گردید. نمودارهای مربوط به این مقایسه در شکل ۳۲ نمایش داده شده‌اند که بیانگر توانایی مدل‌ها در پیش‌بینی دقیق رفتار نمونه‌های جدید است. برای ارزیابی کمی عملکرد مدل‌ها، ضریب تعیین (R^2) برای نمونه‌های با مقادیر صفر، ۲۵٪ و ۵۰٪ دانه‌های لیکا به ترتیب ۰/۹۴۷، ۰/۹۲۸ و ۰/۹۳۷ بود که در شکل‌های مذکور قابل مشاهده است و نشان می‌دهند مدل‌ها قادر به توضیح درصد بالایی از تغییرات داده‌های آزمایشگاهی هستند. همچنین، پیش‌بینی عمر خستگی به عنوان شاخص کلیدی در ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با دقت قابل قبول انجام شده است.





شکل ۳۲. مقایسه مقادیر به دست آمده از آزمایش (واقعی) و مقادیر پیش بینی مدل رگرسیون خستگی برای نمونه‌های حاوی: الف، صفر، ب، ۲۵٪ ج، ۵۰٪ دانه‌های لیکا جایگزین درشت دانه

نتیجه گیری

دماها بالاتر از استاندارد شارپ (1KPa) و برای نمونه‌های پیرشده کوتاه مدت بیش از $2/2\text{ KPa}$ بود. شاخص خستگی بلندمدت قیر $G^*\sin\delta$ کمتر از 5000 پاسکال بوده و با افزایش درصد نانو، کمترین ترک خوردگی ناشی از خستگی در بیشترین دما مشاهده شد، که نشان دهنده بهبود عملکرد رئولوژیک و تأخیر در ترک‌های روسازی است.

نتایج نشان داد که افزودن نانو اکسید آلومینیوم و جایگزینی بهینه دانه‌های لیکا تأثیر قابل توجهی بر رفتار خزشی و رئولوژیک مخلوط آسفالتی دارد. بهترین عملکرد با ترکیب $25\%\text{LECA} + 2\%\text{Al}_2\text{O}_3$ حاصل شد که کمترین کرنش تجمعی، کمترین شیب فاز ثانویه و کندترین شتاب نهایی را نشان داد. نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانو نسبت به نمونه‌های بدون نانو، کاهش ۲۰ تا ۴۰ درصد در کرنش نهایی و افزایش ۲۵ تا ۳۰ درصدی عدد روانی در دماهای بالای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که نانو اکسید آلومینیوم با بهبود چسبندگی خمیر قیر و تراکم ماتریس، می‌تواند اثر منفی مصالح سبک و متخلخل را جبران کرده و پایداری مخلوط آسفالتی را در برابر تغییر شکل دائمی افزایش دهد.

افزایش سطح تنش و دما، عمر خستگی را به طور قابل

نتایج آزمایش مارشال نشان داد که جایگزینی ۲۵ درصد دانه‌های رس منبسط‌شونده (لیکا) مقاومت مارشال را به 1323 kg کاهش داد، اما افزودن ۲ و ۳ درصد نانو اکسید آلومینیوم این مقدار را به ترتیب به 1643 kg و 1677 kg افزایش داد (افزایش ۲۴ و ۲۷ درصدی). همچنین تمامی مخلوط‌ها حداقل الزامات آیین‌نامه‌ای را برآورده کردند.

نتایج آزمون‌های فیزیکی قیر اصلاح‌شده با نانو اکسید آلومینیوم نشان داد که افزایش درصد افزودن نانو تأثیر قابل توجهی بر خواص قیر داشته است. نقطه نرمی از $46\text{ }^\circ\text{C}$ در نمونه بدون نانو به $50\text{ }^\circ\text{C}$ در نمونه با ۳٪ نانو افزایش یافت. درجه نفوذ از $3/9\text{ mm}$ به 6 mm کاهش یافت (کاهش ۳۵/۵ درصد) و سختی قیر افزایش یافت. کشش‌پذیری از 106 cm به 116 cm رسید (افزایش ۹/۴ درصد). ویسکوزیته سیستماتیک در دمای $120\text{ }^\circ\text{C}$ از 590 cSt به 861 cSt (افزایش ۴۵/۸٪)، در دمای $135\text{ }^\circ\text{C}$ از 417 cSt به 736 cSt (افزایش ۷۶/۵ درصد) و در دمای $160\text{ }^\circ\text{C}$ از 189 cSt به 598 cSt (افزایش ۲۱۶/۹ درصد) افزایش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده افزایش پایداری حرارتی، سفتی کنترل‌شده و انعطاف‌پذیری مناسب قیر اصلاح‌شده هستند.

فاکتور شیارشدگی کوتاه مدت قیر $G^*/\sin\delta$ در تمام

نسبت ۸۰ درصد آموزش و ۲۰ درصد آزمون تقسیم شدند تا از برآزش بیش از حد جلوگیری شود. مدل‌های رگرسیون خطی ساخته شده، با ضریب تعیین (R^2) ۰/۹۴۷، ۰/۹۲۸ و ۰/۹۳۷ به ترتیب برای صفر، ۲۵٪ و ۵۰٪ دانه‌های لیکا، توانستند عمر خستگی مخلوط‌ها را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کنند. این نتایج نشان‌دهنده قابلیت تعمیم بالای مدل‌ها و کاربرد آن‌ها در طراحی روسازی‌های آسفالتی است.

۶. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

۷. مشارکت‌های نویسندگان

کلیه نویسندگان در تهیه مقاله همکاری داشته‌اند.

۸. منابع مالی

این اثر تحت حمایت هیچ سازمان یا موسسه ای انجام نشده است.

۹. تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

توجهی کاهش می‌دهد؛ تعداد چرخه‌ها از ۹۵,۰۰۰ در شرایط با سطح تنش کم و دمای پایین (۱۵۰ kPa و ۱۵ °C) (۵) به محدوده ۵,۶۰۰ تا ۱۶,۰۰۰ در شرایط با سطح تنش بالا و دمای بالا (۳۵۰ kPa و ۲۵ °C) کاهش می‌یابد. افزودن ۲ درصد نانو اکسید آلومینیوم موجب تقویت ماتریس قیر و افزایش چسبندگی بین فازها شد و مقاومت خستگی را بهبود بخشید. همچنین، افزودن ۲۵ درصد دانه‌های لیکا جایگزین درشت‌دانه‌ها کرنش تجمعی در نقاط بحرانی نمونه را به طور میانگین ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش داد و توزیع بار مکانیکی را یکنواخت‌تر کرد، که منجر به کنترل اثرات مخرب دما و تنش بالا گردید. بهترین عملکرد خستگی با ترکیب ۲۵% LECA + 2% Al₂O₃ حاصل شد، به طوری که بیشترین تعداد چرخه‌ها و کمترین نرخ رشد شتابی شکست مشاهده شد، که نشان‌دهنده بهبود چشمگیر مقاومت خستگی روسازی است.

تحلیل رگرسیون و ANOVA با نرم‌افزار SPSS نشان داد که متغیرهای مستقل شامل درصد نانو اکسید آلومینیوم و دانه‌های لیکا تأثیر معناداری ($p < 0.05$) بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی دارند. نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف تأیید شد. داده‌ها به

۱۰. مراجع

- Adnan, A. M., & Wang, J. 2024. "Investigation of the effects of nano-Al₂O₃ addition on compatibility, rutting and fatigue properties of styrene-butadiene-rubber modified asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 416: 135267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135267>
- Agostinacchio, M., & Olita, S. 2004. "Use of expanded clay for the mix design of high-grip bituminous wearing courses". In *Proceedings of SIIV 2004, 2nd International Congress: New Technologies and Modeling Tools for Roads—Applications to Design and Management*. Retrieved from <https://www.siiv.net>
- Albayati, A. H., Oukaili, N. K., Moudhafar, M. M., Allawi, A. A., Said, A. I., & Ibrahim, T. H. 2024. "Experimental study to investigate the performance-related properties of modified asphalt concrete using nanomaterials Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂". *Mater.*, 17(17): 4279. <https://doi.org/10.3390/ma17174279>
- Al-Hamdou, Y. M., & Albayati, A. H. 2025. "The influence of nanomaterials on the permanent deformation of hot mix asphalt". *Eng., Technol. Appl. Sci. Res.*, 15(4): 25538–25544. <https://doi.org/10.48084/etasr.12244>
- Amouzadeh Omrani, M. 2023. "Laboratory comparison of mechanical properties of emulsified cold recycled asphalt containing cement kiln dust and steel slag with recycled asphalt containing cement". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 9(3): 57-79.
- Amouzadeh Omrani, M., Babagoli, R., & Soleimanpour, M. 2025. "Experimental study of the fatigue behavior of asphalt binder and mixture containing nanoclay through Time-Sweep, Strain-Sweep and bending beam methods". *Quart. J. Transport. Eng.*, 16(3): 4685-4717.

- Amouzadeh Omrani, M., & Modarres, A. 2019. "Stiffness and fatigue behavior of emulsified cold recycled mixture containing waste powder additives: Mechanical and microstructural analysis". *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(6): 04019061. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002704](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002704)
- Amoozadeh, O. M., & Babagoli, R. 2023. "Evaluation of the effect of nano-calcium carbonate mechanical performance of asphalt binder and mixture". *Transport. Res. J.*, 25(2): 123-135.
- Arabani, M., & Hamed, H. 2015. "Evaluation of the effects of lightweight expanded clay aggregates on the mechanical properties of porous asphalt". *J. Civ. Urban Eng.*, 5(1): 23-30.
- Bhat, F. S., & Mir, M. A. 2024. "Nano- Al_2O_3 composite on intermediate and high-temperature properties of neat and modified asphalt binders and their effect on hot mix asphalt mixtures". *J. Clean. Prod.*, 380: 132456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.132456>
- De Sousa Campelo, T., Zimmer, A., & Bragança, S. R. 2024. "Evaluation and improvement of a nonexpansive clay for the production of lightweight aggregates using glass waste and silicon carbide". *Constr. Build. Mater.*, 439: 137428. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.137428>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. 2009. "The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction". 2nd ed., Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. 2013. "An introduction to statistical learning: with applications in R (Vol. 103)". New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Ji, Z., Wu, X., Zhang, Y., & Milani, G. 2023. "Aging behavior and mechanism evolution of nano- Al_2O_3 /Styrene-Butadiene-Styrene-modified asphalt under thermal-oxidative aging". *Mater.*, 16(17): 5866. <https://doi.org/10.3390/ma16175866>
- Khan, A., & Mrawira, D. 2010. "Investigation of the use of lightweight aggregate hot-mixed asphalt in flexible pavements in frost susceptible areas". *J. Mater. Civ. Eng.*, 22(2): 171-178. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:2\(171\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:2(171))
- Li, R., Karki, P., Hao, P., & Bhasin, A. 2015. "Rheological and low temperature properties of asphalt composites containing rock asphalts". *Constr. Build. Mater.*, 96: 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.150>
- Losa, M., Leandri, P., & Bacci, R. 2008. "Mechanical and performance-related properties of asphalt mixes containing expanded clay aggregate". *Transport. Res. Record*, 2051(1): 23-30. <https://doi.org/10.3141/2051-04>
- Moghimi, S., Shafabakhsh, G., & Divandari, H. 2023. "Evaluation of rutting, fatigue, and moisture resistance of low-energy Asphalt mixtures modified by crumb rubber". *Adv. Civ. Eng.*, 2023(1): 6668963. <https://doi.org/10.1155/2023/6668963>
- Newcomb, D. E., & Quintus, H. V. 2002. "Hot Mix Asphalt Technology". CRC Press.
- Shen, D. H., Wu, C. M., & Du, J. C. 2008. "Performance evaluation of porous asphalt with granulated synthetic lightweight aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 22(5): 902-910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.008>
- Sun, L., Zhang, Y., & Zhang, Y. 2023. "Influence of nano- Al_2O_3 on the evolution of molecular characteristics and rheological properties of SBS-modified asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.*, 35(3): 04023029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.00016088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.00016088)
- Tahmouresi, G., Amouzadeh Omrani, M., Divandari, H., & Seyedkazemi, A. 2025. "Experimental investigation of the mechanical properties of asphalt mixtures containing lightweight expanded clay aggregate replacing coarse aggregates and modified with nano- Al_2O_3 ". *Int. J. Pavement Eng.*, 26(1): 2532690. <https://doi.org/10.1080/10298436.2025.2532690>
- Uzarowski, L. 2007. "The development of asphalt mix creep parameters and finite element modeling of asphalt rutting". Doctoral dissertation, University of Nottingham.
- Witzak, M. W. 2007. "Specification criteria for simple performance tests for rutting (Vol. 580)". Transportation Research Board.
- Ziari, H., Divandari, H., Hajiloo, M., & Amini, A. 2019. "Investigating the effect of amorphous carbon powder on the moisture sensitivity, fatigue performance and rutting resistance of rubberized asphalt concrete mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 217: 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.039>