



## بررسی خصوصیات رئولوژیکی قیر و خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید مس

غلام حسین حامدی\*

گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

**تاریخچه داوری:**  
دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۱۷  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷

**کلمات کلیدی:**  
مخلوط آسفالت گرم  
نانو اکسید مس  
شیارشده‌گی  
ترک خوردگی خستگی  
رئومتر برش دینامیکی

**خلاصه:** گسترش شبکه حمل و نقل سبب شده است تا نیاز بیشتری به آنالیز هزینه چرخه عمر و افزایش طول عمر مخلوط‌های آسفالتی احساس شود. به منظور بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی روش‌های متعددی وجود دارد که یکی از آن‌ها اصلاح قیر با استفاده از مواد اصلاح کننده است. در سال‌های اخیر با ابداع و گسترش تولید انواع نانومواد توجه خاصی به استفاده از این مواد برای بهبود خواص رئولوژیکی قیر معطوف شده است. بر این اساس، در این پژوهش به بررسی تاثیر نانو اکسید مس بر رفتار رئولوژیکی قیر و خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالت پرداخته شده است. از این رو، از آزمایش رئومتر برش دینامیکی برای تعیین مشخصات قیرهای پایه و اصلاح شده در دماهای میانی و بالا و همچنین آزمایش‌های خستگی به روش کشش غیرمستقیم و خزش دینامیکی به منظور بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در مقابل ترک خوردگی خستگی و شیارشده‌گی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های رئولوژیکی قیر نشان می‌دهد که استفاده از نانو اکسید مس در ۱ و ۲ درصد وزن قیر باعث بهبود پارامتر شیارشده‌گی به ترتیب در قیرهای پیر نشده و پیر شده بین ۳۴۳-۴۹ و ۲۵۰-۵۷ درصد و همچنین بهبود پارامتر خستگی در قیرهای پیر شده‌ی بلند مدت از ۴۰-۱۱ درصد شده است. نتایج آزمایش‌های خستگی نشان می‌دهد عمر نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد از این افزودنی در دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۱۶-۹ و ۳۱-۶ درصد بهبود یابد. همچنین، نتایج پتانسیل شیارشده‌گی نشان می‌دهد استفاده از ۱ و ۲ درصد نانو اکسید مس باعث کاهش تغییر شکل ماندگار به ترتیب ۳۵-۱۳ و ۳۷-۱۸ درصد شده است.

### ۱- مقدمه

فاکتورهای خارجی و فاکتورهای داخلی ارتباط دارد. فاکتورهای خارجی ویژگی‌هایی هستند که به عوامل محیطی مانند شرایط آب و هوایی، زهکشی و ترافیک ارتباط دارند. فاکتورهای داخلی ویژگی‌هایی هستند که به طرح اختلاط مخلوط آسفالتی ارتباط دارند که از میان آن‌ها می‌توان به خصوصیات و مقدار سنگدانه، خصوصیات و مقدار قیر، خصوصیات فیلر و طرح اختلاط مخلوط آسفالتی اشاره کرد [۲]. قیر با اینکه حجم کمی از مخلوط آسفالتی را به خود اختصاص داده است اما نقش آن در دماهای مختلف بر روی خرابی‌های مختلف مخلوط آسفالتی بسیار حائز اهمیت است. این ماده در دماهای بالا بر روی سختی مخلوط آسفالتی، در دماهای میانی بر روی سختی مخلوط آسفالتی و چسبندگی قیر-سنگدانه و در دماهای پایین بر

در اثر عبور وسایل نقلیه سنگین و همچنین اضافه بارهایی که این وسایل نقلیه حمل می‌کنند، تکراری از بارهای مختلف به راه وارد می‌شود. این بارها باعث ایجاد تنش‌های گسترده‌ای (چون خستگی) در روسازی شده، که باعث خرابی‌های مختلف در روسازی می‌شوند. وجود زمستان‌های سرد و یا تابستان‌های بسیار گرم، تغییرات دمایی، بارندگی زیاد و تداوم دوره‌های یخ زدن و ذوب شدن باعث ایجاد تنش‌های بزرگی در روسازی می‌شود که عامل دیگری برای خرابی‌های متداول روسازی راه هستند [۱].

عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر خرابی‌ها به دو عامل اصلی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hamed@guilan.ac.ir

آسفالتی می شود. همچنین نتایج تحقیقات آن‌ها تغییر چندان در پارامتر خستگی را نشان نداد.

شفابخش و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۶] رفتار خستگی و شیارشدگی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید تیتانیوم را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم و خزش دینامیکی بر روی نمونه های آسفالتی انجام شد. نتایج آزمایش ها بیانگر این می باشند که نمونه های حاوی ۵ درصد نانو اکسید تیتانیوم دارای بیشترین عمر خستگی و کمترین تغییر شکل ماندگار می باشند.

ژیانگ و همکاران [۱۷] به بررسی ارزیابی عملکرد رئولوژیک قیر حاوی نانو سیلیکا پرداختند. نتایج نشان داد که با افزودن نانو سیلیکا، مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک خوردگی افزایش یافته است. همچنین، مبارکی و همکاران به بررسی تاثیر خصوصیات رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم در سه مقدار ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی قیر پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از اصلاح کننده موجب مقاومت در برابر شیارشدگی، که توسط فاکتور سختی نشان داده شده است، می شود. علاوه بر این، زیاری و همکاران [۱۹] تاثیر نانو تیوب کربن را بر عملکرد قیر مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از این افزودنی، خصوصیات کلاسیک (مانند نقطه نرمی، درجه نفوذ و ...) و عملکردی (مانند مدول مختلط، زاویه فاز، فاکتور خستگی و شیارشدگی) را بهبود می بخشد.

شفابخش و سجادی [۲۰] در مطالعه‌ی خود به بررسی نانو اکسید مس به منظور بهبود خصوصیات قیر در ۲/۵، ۳ و ۵ درصد جرم قیر پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داده است که استفاده از نانو اکسید روی باعث شده است تا خصوصیات رئولوژی قیر اصلاح شده به میزان قابل توجهی در برابر ترک خوردگی های خستگی (در دمای میانی) و حرارتی (دمای پایین) بهبود یابد. در مطالعه‌ی دیگری، به بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید مس بر روی خصوصیات رئولوژی قیر و خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با این ماده پرداخته شد. از ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد از نانو اکسید مس در نمونه های قیر اصلاح شده استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش های رئومتر برش دینامیکی و رئومتر تیرچه خمشی مقدار ۱/۵ درصد به عنوان مقدار بهینه در نظر تعیین شده است که هم در برابر خصوصیات رئولوژیکی و هم در برابر خصوصیات عملکردی

روی سختی مخلوط آسفالتی و قابلیت تحمل تنش ناشی از تغییرات درجه‌ی حرارت اهمیت بسیاری دارد [۴-۲].

به منظور بهبود خصوصیات رئولوژیکی قیر در دماهای مختلف و نیز عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر خرابی های مختلف روش های مختلفی وجود دارد. استفاده از مصالح مرغوب، اصلاح قیر، اصلاح دانه بندی، استفاده از فیلر مناسب و به کارگیری افزودنی های مختلف در طول سال های گذشته مورد نظر محققان مختلف بوده است. استفاده از افزودنی ها با توجه به نوع مخلوط آسفالتی، شرایط آب و هوایی و متغیرهای طرح اختلاط از ده های پیشین مورد توجه قرار گرفته است [۵]. رشد نانو تکنولوژی و ویژگی هایی که استفاده از این مواد به همراه داشته، باعث افزایش توجه به این خانواده از مواد در طی دو دهه‌ی اخیر شده است. انواع مختلف نانومواد به علت دوام در بلند مدت و استفاده چند هدفی در تکنولوژی ساخت راه ها و اصلاح خصوصیات مخلوط آسفالتی مورد توجه قرار گرفته اند [۶].

#### ۱-۱- مطالعات پیشین

گایل [۸] با افزودن ۲٪ نانوس، عمر خستگی نمونه های آسفالتی را در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد تا ۲ برابر افزایش داد. اما در دمای ۵ درجه سانتی گراد نانوس بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی تاثیر منفی گذاشته و باعث کاهش ۲۰ درصدی آن شده است. همچنین جهرمی و همکاران [۹] با افزودن ۷٪ نانوس عمر خستگی مخلوط آسفالتی را در دمای ۲۵ درجه تا ۱/۷ برابر افزایش داده اند.

ختاک و همکاران [۱۴] اثر نانوالیاف کربن را بر خواص رئولوژیکی قیر بررسی کردند. نتایج بر اساس مدول برشی مختلط<sup>۱</sup> ( $G^*$ ) و زاویه فاز<sup>۲</sup> ( $\delta$ ) نشان داد که پارامتر خستگی ( $G^*/\sin\delta$ ) قیر اصلاح شده با مقادیر ۲ و ۲/۵ درصد نانوالیاف کربن در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد ۲ تا ۳ برابر افزایش می یابد. همچنین پارامتر شیار شدگی ( $G^*/\sin\delta$ ) با افزودن نانوالیاف کربن تا ۲ برابر افزایش می یابد.

شن و همکاران [۱۵] در پژوهشی در سال ۲۰۱۱ از نانو آهک هیدراته با میانگین ذرات ۶۰۰ نانومتر استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزودن نانو آهک هیدراته باعث افزایش ۱۵ درصدی مقاومت کششی و افزایش ۸ درصدی نسبت مقاومت کششی<sup>۳</sup> نمونه های

1

2

3 Tensile strength ratio (TSR)

مخلوط آسفالتی در برابر این خرابی‌ها روش‌های متعددی وجود دارد که یکی از پرکاربردترین این روش‌ها استفاده از افزودنی‌های اصلاح کننده‌ی قیر و به تبع آن مخلوط آسفالتی است. یکی از افزودنی‌هایی که در طی سال‌های اخیر کاربرد فراوانی در مطالعات پژوهشی داشته است، نانومواد هستند که علی‌رغم اینکه نتایج فنی آن‌ها عموماً مناسب بوده است اما با توجه به قیمت بالای این مواد، استفاده از آن‌ها در پروژه‌های اجرایی فراگیر نشده است. بر این اساس، در این پژوهش تاثیر استفاده از نانو اکسید مس به عنوان اصلاح کننده‌ی قیر بر روی خصوصیات رئولوژیکی قیر و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل انتخاب این ماده هزینه تهیه پایین آن است که باعث می‌شود ضعف عمومی استفاده از نانومواد تا حدی پوشش داده شود. مهم‌ترین اهداف این پژوهش عبارتند از:

- بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید مس بر خصوصیات رئولوژیکی قیر در دمای میانی،
- بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید مس بر خصوصیات رئولوژیکی قیر در دمای بالا،
- بررسی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید مس و مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی کنترل، و
- بررسی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو اکسید مس و مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی کنترل

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، تأثیر نانو اکسید مس بر پارامترهای رئولوژیک قیر شامل مدول مختلط ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) در دماهای میانی و بالا با استفاده از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR) اندازه‌گیری شده است. سپس، پارامترهای مرتبط با عملکرد قیر در برابر ترک خوردگی خستگی ( $G^* \sin \delta$ ) و شیارشدگی ( $G^* / \sin \delta$ ) محاسبه شده است. همچنین، تأثیر نانو اکسید مس بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی در دماهای میانی و بالا مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از آزمایش خستگی به روش مقاومت کشش غیرمستقیم برای تعیین عمر خستگی در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد تحت ۵ سطح تنش مختلف و آزمایش شیارشدگی با استفاده از بارگذاری تکراری در دماهای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد تحت ۲ سطح تنش

بهترین نتیجه را داشته است [۲۱]. در مطالعه‌ای، صدیق [۶] به بررسی تاثیر دو نوع نانوماده کربنات کلسیم و اکسید مس در ۳ و ۵ درصد جرم قیر بر روی خصوصیات مختلف قیر و مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داده است استفاده از نانومواد باعث کاهش تغییر شکل و بهبود دوام قیر شده است. استفاده از این دو نوع نانوماده باعث افزایش ویسکوزیته و نقطه نرمی شده و درجه نفوذ قیر اصلاح شده را کاهش داده است.

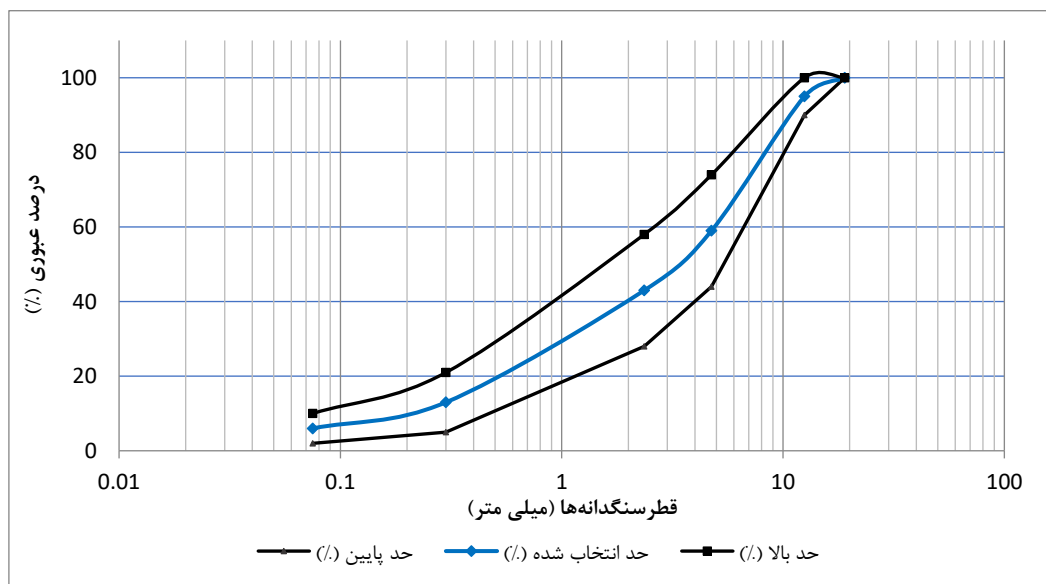
رضوان و ایزدی [۲۲] به بررسی دو نوع نانوماده (اکسید آهن و اکسید آلومینیوم) به عنوان اصلاح کننده‌ی قیر بر خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. نتایج روش لاتمن اصلاح شده نشان می‌دهد که استفاده از مواد نانو باعث افزایش شاخص نسبت کشش غیر مستقیم در نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده گشته است. در مطالعه‌ی دیگری، به ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خستگی و مدول سفتی مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه بر اثر افزودن درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه حاوی ۰/۱۶٪ نانو اکسید آلومینیوم بهترین نتایج را در آزمایش‌های مدول سفتی و عمر خستگی داشته‌اند [۲۳]. شعبانی و همکاران [۲۴] در مطالعه‌ی به بررسی میزان کارایی و تاثیر همزمان نانو اکسید آلومینیوم و پودر لاستیک بازیافتی به عنوان افزودنی در قیر به منظور بهبود عملکرد آن در برابر خرابی‌های ناشی از تغییر شکل و خستگی پرداختند. جهت دستیابی به اهداف این پژوهش ابتدا قیر با ۲۰ درصد پودر لاستیک و درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم (۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی قیر) ترکیب و سپس تحت آزمایشات کلاسیک و رئولوژی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم در دماهای متوسط و بالا بهبود یافت.

### ۲-۱- بیان پژوهش و اهداف

خرابی‌های مختلفی در مخلوط‌های آسفالتی در نتیجه ضعف در خصوصیات مصالح و اثر شرایط محیطی و ترافیکی رخ می‌دهد که ترک خوردگی خستگی در دمای میانی و شیارشدگی در دمای بالا دو مورد از مهم‌ترین این خرابی‌های هستند. به منظور بهبود عملکرد

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های قیر PG 64-16  
Table 1. Results of bitumen PG 64-16

| نتیجه آزمایش  | مشخصات                 | روش آزمایش                             |
|---|------------------------|--|
| ۶۷  | بین ۶۰-۷۰              | درجه‌ی نفوذ (یک دهم میلی‌متر)          |
| ۵۱  | بین ۴۹-۵۶              | نقطه‌ی نرمی (درجه سانتی‌گراد)          |
| ۲۹۲   | حداقل ۲۳۰              | نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)          |
| ۰/۳۲  | حداکثر ۳               | ویسکوزیته چرخشی در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد |
| <b>رئومتر برش دینامیکی بدون پیرشدگی</b>                   |                        |  |
| پارامتر شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ )<br>۱/۵              | حداقل ۱ کیلوپاسکال     | دمای آزمایش<br>۶۴ درجه سانتی‌گراد      |
| <b>رئومتر برش دینامیکی با پیرشدگی کوتاه مدت</b>           |                        |  |
| پارامتر شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ )<br>۳/۱              | حداقل ۲/۲ کیلوپاسکال   | دمای آزمایش<br>۶۴ درجه سانتی‌گراد      |
| <b>رئومتر برش دینامیکی با پیرشدگی کوتاه مدت و بلندمدت</b> |                        |  |
| پارامتر خستگی ( $G^*\sin\delta$ )<br>۲۹۵۰                 | حداکثر ۵۰۰۰ کیلوپاسکال | دمای آزمایش<br>۲۵ درجه سانتی‌گراد      |
| <b>رئومتر تیرچه خمشی</b>                                  |                        |  |
| ۱۴۷   | حداکثر ۳۰۰             | دمای آزمایش                            |
| ۰/۳۲۹۹  | حداقل ۰/۳              | ۲۵ درجه سانتی‌گراد                     |



شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش [۲۵]  
Fig. 1. Aggregate gradation used in this study [25]

۶۴ PG-۱۶ شرکت آذر دوام یول تبریز استفاده شده است. نتایج

مختلف بررسی شده است.

آزمایش‌های انجام شده روی این قیر در جدول ۱ ارائه شده است.

سنگدانه پایه مورد استفاده در این پژوهش، سنگدانه‌های سیلیسی

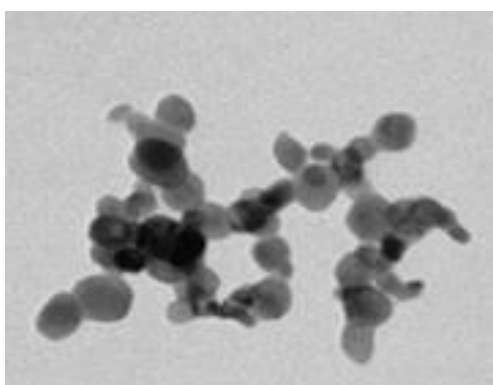
۱-۲- مصالح مصرفی

بوده است که دانه‌بندی آن بر اساس دانه‌بندی شماره ۴ از جدول ۱-۹

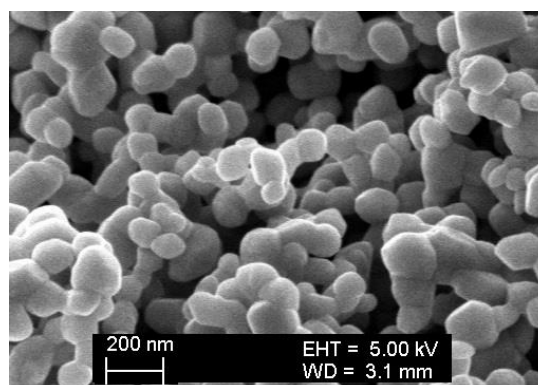
در این پژوهش از قیر با درجه‌ی نفوذ ۶۰-۷۰ و درجه عملکردی

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش  
**Table 2. Physical properties of aggregates used in this study**

| حدود آیین‌نامه | گرانیت  | استاندارد   | آزمایش                         |
|----------------|---------|-------------|--------------------------------|
| -----          | ۲/۶۵۴   |             | حجمی                           |
| -----          | ۲/۲/۶۶۷ | ASTM C 127  | وزن مخصوص (قسمت<br>درشت دانه)  |
| -----          | ۲/۶۵۹   |             | ظاهری                          |
| -----          | ۲/۶۵۹   |             | حجمی                           |
| -----          | ۲/۶۶۱   | ASTM C 128  | وزن مخصوص (قسمت<br>ریزدانه)    |
| -----          | ۲/۶۵۱   |             | ظاهری                          |
| -----          | ۲/۵۴    | ASTM D854   | وزن ویژه (فیلر)                |
| حداکثر ۳۰      | ۱۹      | ASTM C 131  | حداکثر سایش لس آنجلس           |
| ۲/۸            | ۱/۳     | ASTM C127   | حداکثر جذب آب                  |
| حداکثر ۱۵      | ۱۰      | ASTM D 4791 | ذرات سوزنی و پولکی             |
| براساس ترافیک  | ۹۲      | ASTM D 5821 | درصد شکستگی                    |
| حداکثر ۸       | ۵       | ASTM C 88   | دوام در برابر سولفات سدیم سدیم |



ب: عکس TEM از نانوآکسید مس



الف: عکس SEM از نانوآکسید مس

شکل ۲. عکس میکروسکوپی از نانوآکسید مس  
**Fig. 2. SEM photo of copper nanoxide**

نمونه‌های مخلوط آسفالتی از ترافیک سنگین استفاده شده است. در این پژوهش از نانوآکسید فلز مس در دو درصد جرم قیر استفاده شده است. خصوصیات نانومواد مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است. برای ارزیابی اندازه نانو ذرات و بررسی توزیع نانوذرات در قیر، از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. شکل ظاهری این نانوذرات تقریباً دایره‌ای بوده است و شکل ۲، شکل ظاهری این نانوذرات را نشان می‌دهد. این موضوع باعث می‌شود تا این ماده مساحت سطح ویژه بزرگتری در مقایسه با سایر نانومواد

نشریه ۲۳۴ است که اندازه حداکثر سنگدانه‌ها و اندازه حداکثر اسمی سنگدانه‌های این دانه‌بندی به ترتیب برابر ۱۹ و ۱۲/۵ میلی‌متر هستند [۲۵]. این مصالح به صورت شکسته از کارخانه آسفالت تهیه شده است و پس از تهیه در آزمایشگاه کاملاً شسته و خشک شده است. ساختار این دانه‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. فیلر مورد استفاده در ساخت نمونه‌های همان فیلر سنگدانه‌ای اصلی بوده است. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. در روند آزمایش‌های کنترل کیفیت و ساخت

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی دو نوع نانوماده مورد استفاده در این پژوهش [۲۷]

Table 3. Physical properties of two types of nanomaterials used in this study [27]

| ویژگی  | نانواکسید مس              |
|--|---------------------------|
| فرمول شیمیایی                                      | CuO                       |
| درصد خلوص  | ۹۹/۹                      |
| رنگ  | قهوه‌ای تیره مایل به مشکی |
| ساختار سازه‌ای                                     | منوکیلینیک کروی           |
| جرم مخصوص حقیقی <sup>۱</sup> (gr/cm <sup>3</sup> ) | ۲/۴                       |
| مساحت سطح ویژه با استفاده از دستگاه                | ۳۲                        |
| میانگین اندازه ذرات (nm)                           | ۸۰                        |
| جرم مخصوص ظاهری <sup>۲</sup> (gr/cm <sup>3</sup> ) | ۰/۳۷                      |
| درجه اسیدیته                                       | ۸/۳                       |
| درصد آب  | ۰/۵≤                      |

داشته باشد. سطح ویژه بزرگتر باعث می‌شود تا این ماده خصوصیات پرکنندگی بیشتر داشته باشد که بر روی سخت قیر در دمای بالا و پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه در دماهای پایین و میانی دارای اهمیت بسیار است.

نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که درصد استفاده از نانواکسید مس بین ۰/۵ تا ۴/۵ درصد وزن قیر انتخاب شده است [۲۱ و ۲۰ و ۶]. نتایج بررسی‌های انجام شده در این مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد سختی قیر در دمای پایین و پارامتر خستگی در ۲ درصد بهینه بوده است [۲۰]. همچنین، نتایج پژوهش دیگری نشان داده است که مساحت سطح ویژه بالای نانواکسید مس در مقایسه با سایر نانومواد باعث می‌شود تا استفاده از این ماده در درصد‌های بالا باعث بسط حجم قیر و تاثیر منفی روی خصوصیات رئولوژیکی قیر شود مقدار ۱/۵ درصد از این ماده به عنوان مقدار بهینه پیشنهاد شود [۲۱]. بر اساس مطالب گفته شده در این پژوهش از مقادیر ۱ و ۲ درصد از نانو اکسید مس به عنوان اصلاح کننده‌ی قیر استفاده شده است. نتایج پژوهش حاضر در نهایت نشان داده است استفاده از ۱ و ۲ درصد نانواکسید مس می‌تواند باعث بهبود قابل توجه در خصوصیات رئولوژی قیر و عملکردی مخلوط آسفالتی شود و با توجه به هزینه‌های تهیه نانومواد و اصلاح قیر می‌توان گفت استفاده از درصد‌های بالاتر توجیه ندارد.

برای تولید نانوذرات اکسید مس از آسیاب گلوله ای سیاره ای استفاده شده است. در این نوع آسیاب، چهار پارامتر سرعت چرخش، زمان چرخش، نسبت گلوله به اکسید مس و عامل کنترل کننده فرآیند<sup>۱</sup> (PCA) از متغیرهای فرآیند آسیاب می‌باشند. عامل کنترل کننده فرآیند به گروهی از افزودنی‌ها اطلاق می‌شود که در فرآیند آسیاب کاری استفاده می‌شود. این مواد با ایجاد تعادل بین شکستن پیوند مواد و اتصال دوباره آن‌ها در فرآیند آسیاب کاری، در نهایت باعث ایجاد ساختاری پایدار می‌شوند [۲۶]. از ایزوپروپانول به عنوان PCA در این پژوهش استفاده شد. ایزوپروپانول از خانواده الکل‌ها بوده و با ایجاد دافعه بین ذرات نانواکسید مس، از بهم چسبیدن آن‌ها به یکدیگر جلوگیری می‌کند. عملیات آسیاب کردن با به کار بردن PCA به میزان ۱ درصد وزنی اکسید مس نیز انجام شد.

در این پژوهش برای اختلاط قیر پایه با نانواکسید مس از همزن دور بالا استفاده شده است. بر اساس مطالعات پیشین، برای اختلاط نانواکسید مس با قیر سرعت دوران ۳۵۰۰ rpm، دمای اختلاط ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و زمان اختلاط ۴۰ دقیقه انتخاب شده است [۲۹] و [۲۸]. در این پژوهش، برای حصول اطمینان از پخش مناسب نانومواد در قیر از قسمت‌های مختلف ظرف قیر اصلاح شده ۴ نمونه برداشتند و آزمایش‌های DSR را بر روی این نمونه‌های انجام دادند. نتایج

1 Process Control Agent

استفاده می‌شود. این کار با اندازه‌گیری خواص ویسکوز و الاستیک یک نمونه لعاب نازک چسباننده قیری که بین صفحه نوسان کننده و یک صفحه ثابت قرار دارد، انجام می‌شود. آزمایش رئومتر برش دینامیکی جهت اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک دینامیک قیر آسفالتی  $(G^*, \delta)$  در دمای میانی و بالا مطابق با استاندارد AASHTO T315 [32] به کار می‌رود.  $G^*$  نسبت حداکثر تنش برشی ( $\tau_{max}$ ) به حداکثر کرنش برشی ( $\gamma_{max}$ ) است. فاصله زمانی بین تنش اعمال شده و کرنش حاصل، زاویه فاز  $\delta$  نامیده می‌شود. برای یک ماده کاملاً الاستیک، زاویه فاز،  $\delta$  صفر و تمام تغییر شکل‌ها موقت است. برای یک ماده ویسکوز (مانند قیر گرم)، زاویه فاز به ۹۰ درجه نزدیک می‌شود و تمام تغییر شکل‌ها ماندگار است [33].

برای تعیین فاکتور شیارشدگی از آزمایش DSR در دمای بالا استفاده می‌شود که این آزمایش هم روی نمونه‌های قیر پیر نشده و هم روی نمونه‌های قیر RTFO آزمایش می‌شود. مطابق مشخصات آشتو، مقدار فاکتور شیارشدگی  $(G^*/\sin\delta)$  باید حداقل ۱ و ۲/۲ کیلو پاسکال به ترتیب برای قیرهای پیر نشده و پیر شده RTFO باشد. همچنین، هنگامی که نتایج آزمایش DSR برای نمونه‌های قیری پیر شده توسط PAV مورد بررسی قرار می‌گیرد،  $G^* \sin\delta$  به عنوان فاکتور خستگی معرفی می‌گردد که مطابق مشخصات آشتو باید دارای حداکثر مقدار ۵۰۰۰ کیلو پاسکال باشد. از نقطه نظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی مقادیر کمتر فاکتور خستگی مطلوب تر است [33].

در این پژوهش، برای نمونه‌های پیر شده با RTFO از صفحات موازی با قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت نمونه ۱ میلی‌متر و برای نمونه‌های پیر شده با PAV از صفحات موازی با قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت نمونه ۲ میلی‌متر استفاده گردید. همچنین خواص رئولوژی قیر با و بدون نانو اکسید مس در دمای پایین به وسیله رئومتر تیرچه خمشی مطابق با استاندارد AASHTO T313 [34] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### ۲-۲-۲- ساخت نمونه‌ها و تعیین درصد قیر بهینه

ساخت و تراکم نمونه‌های مخلوط آسفالتی با استفاده به ترتیب با استفاده از همزن دستی و متراکم کننده‌ی مارشال انجام شده است. دمای اختلاط مخلوط آسفالتی به نحوی انتخاب شده است که

بررسی مقادیر خروجی این ۴ نمونه نشان داده است که پخش افزودنی نانو به خوبی در فضای قیر انجام شده است و قیر حاصل همگن است.

#### ۲-۲-۲- آزمایش‌ها

##### ۲-۲-۱- آزمایش‌های قیر

در این پژوهش، نمونه‌های قیری با و بدون نانو اکسید مس تحت پیرشدگی کوتاه مدت به وسیله آزمایش اثر حرارت و هوا بر لایه نازک متحرک قیر (RTFO) قرار گرفته‌اند. گرمکن RTFO باید در دمای پیرشدگی،  $163 \pm 0.5$  درجه سانتی‌گراد، برای حداقل ۱۶ ساعت قبل از استفاده، گرم شود. ترموستات باید تنظیم شود تا ظرف مدت ۱۰ دقیقه پس از قرار گیری بطری‌های نمونه به این دما بازگردد. بطری‌ها درون قفسه قرار داده می‌شوند و هر شکاف پیر نشده با بطری‌های خالی پر می‌شود. قفسه باید با نرخ  $15 \pm 0.2$  دور در دقیقه چرخش کرده و جریان هوا باید با نرخ  $4000 \pm 200$  میلی‌لیتر در دقیقه تنظیم شود. نمونه‌ها در این شرایط برای ۸۵ دقیقه مطابق با استاندارد AASHTO T240 نگهداری می‌شوند [30]. هدف اصلی از روش RTFO تهیه مواد قیری پیر شده برای آزمایش‌های DSR به منظور بررسی قیرهای پیر شده کوتاه مدت در برابر شیارشدگی است.

پیرشدگی بلند مدت به وسیله محفظه پیرشدگی تحت فشار (PAV) روی نمونه‌های قیری که قبلاً با روش RTFO پیر شده‌اند، مطابق با استاندارد AASHTO R28 [31] صورت گرفته است. نمونه‌های قیر در دستگاه تحت فشار ۲۰۷۰ کیلو پاسکال و با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ ساعت قرار می‌گیرند. در این دستگاه ۱۰ سینی قرار دارد که روی هر کدام می‌توان ۵۰ گرم قیر قرار داد. قیر خروجی از آزمایش PAV جهت انجام آزمایش DSR در دمای میانی و تعیین معیار خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

قیر یک ماده ویسکوالاستیک است، به این معنی که به طور همزمان رفتار یک ماده الاستیک (مانند نوار لاستیکی) و یک ماده ویسکوز را نشان می‌دهد. رابطه بین این دو ویژگی برای اندازه‌گیری توانایی چسباننده به مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار و ترک خوردگی خستگی استفاده می‌شود. برای مقاومت در برابر شیارشدگی، یک چسباننده باید سفت و الاستیک باشد؛ برای مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی، چسباننده باید انعطاف پذیر و الاستیک باشد. تعادل بین این دو یک نیاز اساسی است. رئومتر برش دینامیکی (DSR) برای توصیف رفتار ویسکوز و الاستیک چسباننده قیری

آسفالتی گرم در برابر ترک خوردگی دارد. این آزمایش به دو صورت بارگذاری با تنش ثابت و بارگذاری با کرنش ثابت توسط دستگاه ناتینگهام انجام می‌گیرد. بارگذاری با تنش ثابت مزیت بیشتری بر دیگری دارد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مطالعات میدانی نشان می‌دهد که نتایج این آزمایش همبستگی بهتری با نتایج میدانی روسازی‌های با لایه مخلوط‌های آسفالتی ضخیم (معمولا لایه آسفالتی با ضخامت بیش از ۱۰ سانتی‌متر را ضخیم می‌گویند) دارد [۳۳]. با توجه به اینکه ترافیک مد نظر در این پژوهش سنگین در نظر گرفته شده است، طبق طراحی سازه‌ای مقدار ضخامت لایه آسفالتی بیش از ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در این آزمون، ابتدا نمونه‌ها با ارتفاع ۴۰ و قطر ۱۰۱ میلی‌متر تحت تنش تعیین شده قرار گرفتند. بارگذاری تکراری هاورساین با فرکانس ۱ هرترز در راستای قطر نمونه و با مدت زمان بارگذاری و باربرداری ۰/۱ ثانیه و مدت زمان استراحت ۰/۴ ثانیه بر نمونه‌ها اعمال شدند. کرنش ایجاد شده در نمونه توسط دو حسگر به طور پیوسته اندازه‌گیری شد. پایان آزمایش زمانی در نظر گرفته شد که تغییر شکل عمودی در نمونه به ۸ میلی‌متر برسد. در این آزمون، پارامترهای مربوط به خستگی مانند عمر خستگی و یا تعداد سیکل‌های منجر شکست ناشی از خستگی و تغییر شکل عمودی نمونه‌ها تعیین شد. طبق توصیه استاندارد EN ۱۲۶۹۷-۲۴ مورد استفاده در این پژوهش تنش اعمالی باید به گونه‌ای باشد که پس از ۱۰ تکرار بار کرنش کششی در بازه ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکروکرنش بوده و دمای آزمایش در بازه ۲ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد باشد [۳۶]. بر این اساس، آزمون خستگی تحت تنش‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال و تحت دو دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. قاب بارگذاری این آزمون در دستگاه ناتینگهام مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۳ نشان داده شده است.

آزمون بارگذاری محوری تکراری<sup>۱</sup> (RLA) به منظور تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی استفاده شد. این آزمون، یک آزمایش محاسباتی با بارگذاری متناوب جهت بررسی قابلیت تغییر شکل (برگشت‌پذیر و دائمی) است که با آن امکان تعیین دو ویژگی مدول بر جهندگی و مدول تغییر شکل دائمی مصالح (برحسب MPa) وجود دارد. در این آزمایش بار به تعداد چند هزار

ویسکوزیته قیر در این مرحله به بازه  $20 \pm 170$  سانتی استوکس باشد [۲۵]. دمای اختلاط قیر و سنگدانه برای قیرهای پایه، اصلاح شده با ۱ و ۲ درصد نانوآکسید مس به ترتیب ۱۵۲، ۱۵۸ و ۱۶۳ درجه‌ی سانتی‌گراد به دست آمده است. قابل ذکر است که مصالح سنگی پیش از اختلاط به مدت حداقل ۴ ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است و سپس به دمای اختلاط با قیر رسیده است.

طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس روش مارشال انجام شده است. در این روش ابتدا باید نمودارهای درصد قیر بهینه برای ترکیب پایه ترسیم شوند. تعیین درصد قیر بهینه در این پژوهش بر اساس دستورالعمل MS-۲ انستیتو آسفالت تعیین شده است [۳۵]. این مراحل در ادامه آورده شده است:

۱- پس از رسم نمودارهای مارشال، درصد قیر متناظر با موارد زیر را به دست آورید:

• الف: درصد قیر متناظر با حداکثر استقامت (Stability)  
 • ب: درصد قیر متناظر با حداکثر وزن مخصوص (Unit Weight)  
 • درصد قیر متناظر با مقدار متوسط بازه حفرات هوا (AV) که در این پژوهش بازه حفرات هوا ۳-۵ است که ۴ به عنوان میانگین انتخاب می‌شود.

۲- میانگین سه درصد قیر ذکر شده به دست آید.  
 ۳- برای مقدار قیر میانگین مرحله قبل، بر روی نمودارهای رسم شده مقادیر پارامترهای متناظر با آن درصد قیر به دست آید:

• الف: استقامت (Stability)  
 • ب: روانی (Flow)  
 • حفرات هوا (AV)  
 • حفرات مابین مصالح سنگی (VMA)  
 ۴- پارامترهای به دست آمده با مقادیر جدول‌های MS-۲ کنترل شده‌اند [۳۵].

## ۲-۲-۳- آزمایش‌های مخلوط آسفالتی

در این پژوهش، آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم (ITFT) به منظور پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط آسفالتی استفاده شد. رفتار خستگی یک روسازی انعطاف‌پذیر تأثیر مستقیمی بر مقاومت مخلوط

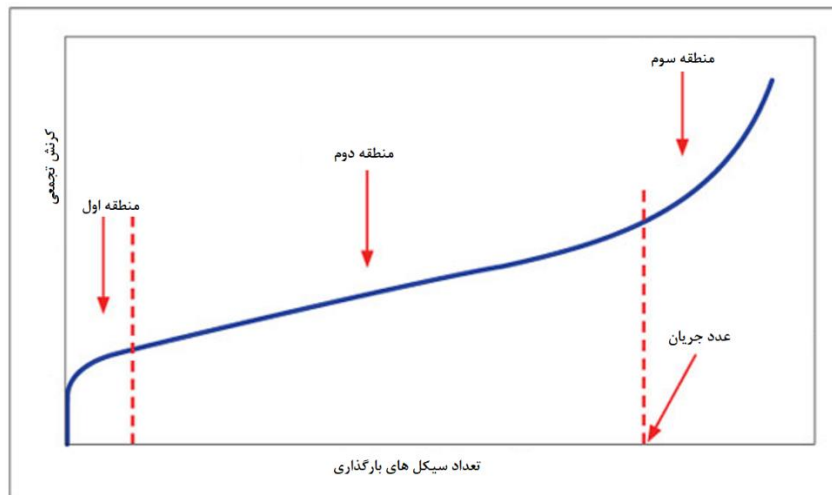
1 Repeated load axial test





شکل ۳. قاب بارگذاری آزمون خستگی کشش غیرمستقیم در دستگاه ناتینگهام مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 3. Indirect fatigue load test frame in Nottingham machine used in this study



شکل ۴. نمودار کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل های بارگذاری، حاصل از آزمایش خزش دینامیکی

Fig. 4. Summary strain diagram against the number of loading cycles obtained from dynamic creep tests

که روند افزایش کرنش تجمعی مجدداً به سرعت افزایش می یابد. بر اساس نتایج آزمایش FHWA-ALF Phase II، نواحی دوم و سوم در اواخر عمر روسازی اتفاق می افتد [۳۸]. سه مرحله مشاهده شده در آزمایش بار محوری تکرار شونده نمونه های آسفالتی، عیناً در شرایط واقعی تکرار می شود. در حقیقت این رفتار در تغییر شکل دائم (منحنی سه مرحله ای) از خصوصیات اساسی مخلوط آسفالتی است [۳۹].

در این پژوهش، آزمون خزش دینامیکی در دو تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال و تحت دو دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد بر اساس

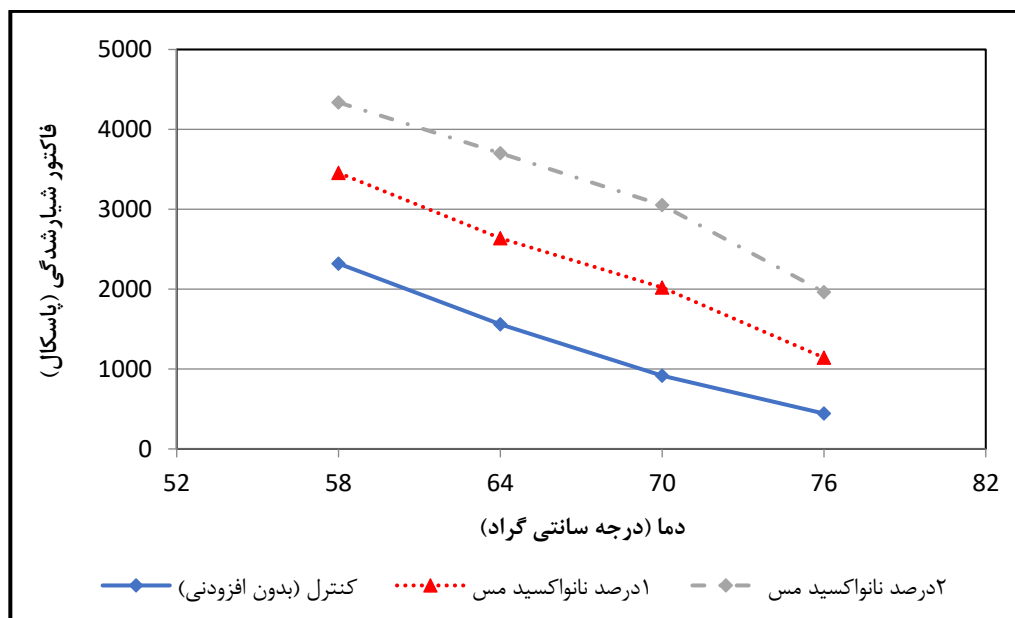
سیکل به نمونه اعمال شده و در نهایت تغییر شکل دائمی تجمعی، به صورت تابعی از تعداد تکرار بار رسم می گردد [۳۷]. شکل ۴ نمونه ای از این نمودار را نشان می دهد.

همان گونه که در شکل دیده می شود، نمودار از سه قسمت مجزا تشکیل شده است: ناحیه ابتدایی<sup>۱</sup> که در آن تغییر مکان های دائم سریعاً روی هم انباشته می شود، ناحیه دوم<sup>۲</sup> که افزایش کرنش های تجمعی با شیبی ملایم و تقریباً ثابت صورت می پذیرد و ناحیه سوم<sup>۳</sup>

1Primary Zone  
2Secondary Zone  
3Tertiary zone



شکل ۵. قاب بارگذاری آزمون بارگذاری محوری تکراری در دستگاه ناتینگهام مورد استفاده در این پژوهش  
Figure 5. Repeated axial loading test load frame in Nottingham machine used in this study



شکل ۶. فاکتور شیارشدگی در قیرهای پیر نشده  
Fig. 6. Rutting factor in unrefined bitumen

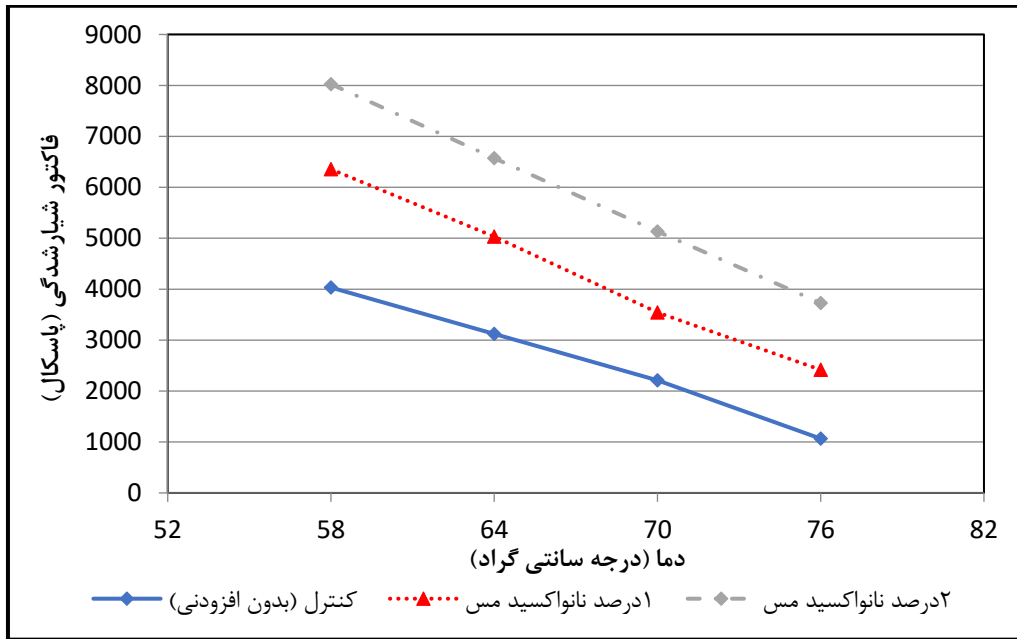
اصلاح شده در مقایسه با قیرهای پایه در تمامی دماها (۵۸ تا ۷۶ درجه سانتی گراد) دارای فاکتور شیارشدگی بزرگتری هستند. مقادیر بیشتر فاکتور شیارشدگی بیانگر این می باشد که قیرهای اصلاح شده حساسیت کمتری به شیارشدگی یا تغییر شکل ماندگار از خود نشان می دهند. به طور مثال، در دمای ۵۸ درجه مقدار پارامتر شیارشدگی قیر پایه ۲/۳۲ کیلوپاسکال است که در نتیجه ۱ و ۲ درصد افزودنی به ترتیب به ۳/۴۶ و ۴/۳۴ کیلوپاسکال رسیده است. این مقادیر به ترتیب ۴۹ و ۸۷ درصد افزایش را نشان می دهد. این روند در دماهای ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی گراد نیز مشاهده می شود. نتایج این دو شکل نشان

استاندارد ۱۲۶۹۷ EN-۲۵ انجام شده است [۴۰]. تنش مورد نظر به تعداد ۲۰۰۰ سیکل به صورت پالس های نیمه سینوسی به نمونه وارد شده و تغییر شکل به طور پیوسته توسط دو حسگر اندازه گیری شد. قاب بارگذاری این آزمون در دستگاه ناتینگهام مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۵ نشان داده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

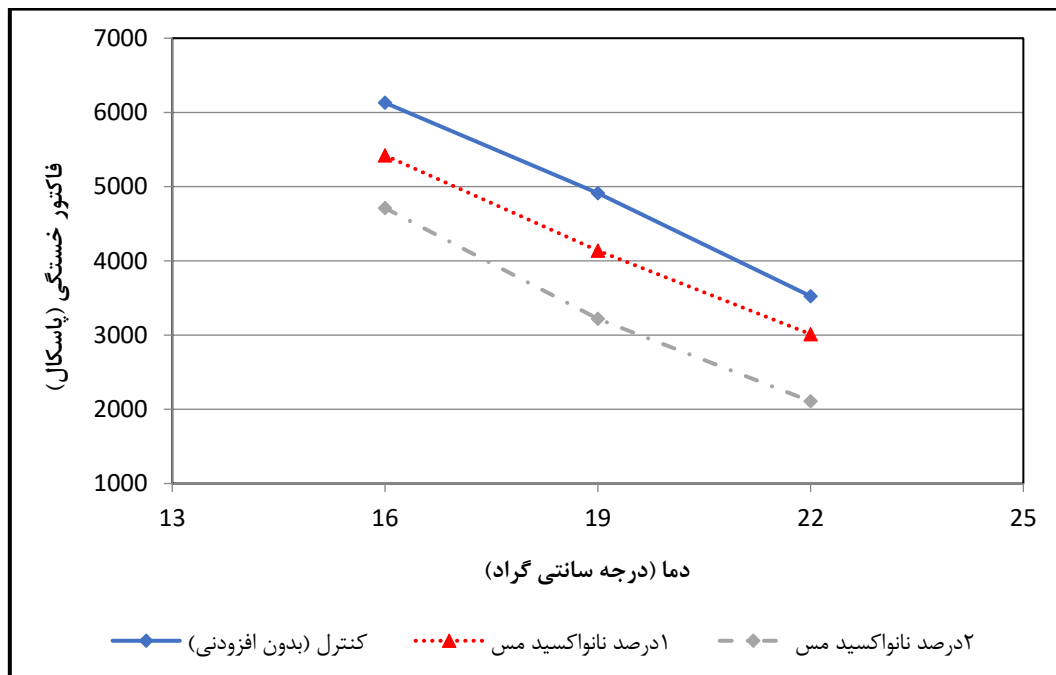
#### ۳-۱- نتایج آزمایش رئولوژیکی قیر

همانطور که در شکل های ۶ و ۷ مشاهده می شود، قیرهای



شکل ۷. فاکتور شیاردگی در قیرهای پیر شده RTFO

Fig. 7. Rutting factor in RTFO bitumen



شکل ۸. فاکتور خستگی در قیرهای پیر شده PAV

Fig. 8. Fatigue factor in PAV bitumen

شده برای نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانو اکسید مس در حالت کنترل و پیر شده به ترتیب ۱/۱۴ و ۲/۴۲ کیلو پاسکال است. مقادیر معادل این دو حالت در نمونه‌های قیری حاوی ۲ درصد اکسید مس به ترتیب ۱/۹۶ و ۳/۷۳ کیلو پاسکال شده است. این موضوع نشان می‌دهد که

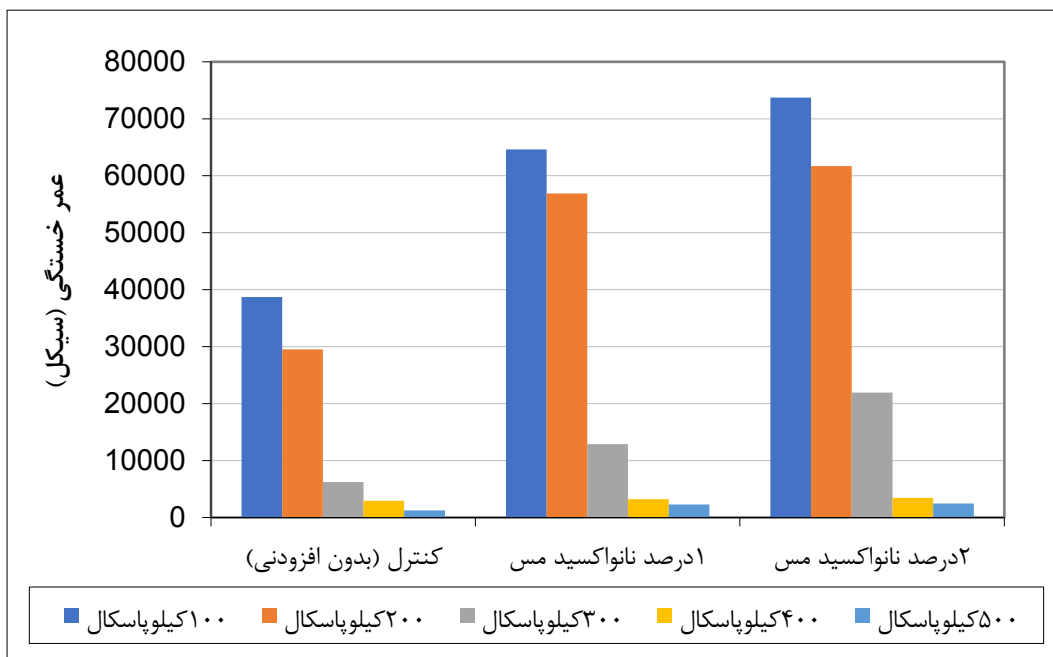
می‌دهد نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد از این ماده باعث شده‌اند تا در دمای ۷۶ درجه معیارهای شیاردگی قیر ( $G^*/\sin\delta$ ) حداقل ۱ و ۲/۲ کیلو پاسکال به ترتیب برای قیرهای پیر نشده و پیر شده توسط (RTFO) رعایت شده باشد. مقدار پارامتر شیاردگی در دمای ذکر

قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای کنترل کمتر باشد. همچنین، ساختار پیوسته نانوذرات در فضای قیر باعث می‌شود تا فاصله زمان بین اعمال تنش و ایجاد کرنش کاهش یابد که این موضوع باعث افزایش خصوصیات الاستیک قیر اصلاح شده می‌شود که باعث کاهش در فاکتور خستگی و بهبود در عملکرد قیر اصلاح شده در برابر این نوع خرابی می‌شود.

### ۳-۲- آزمایش روی مخلوط‌های آسفالتی

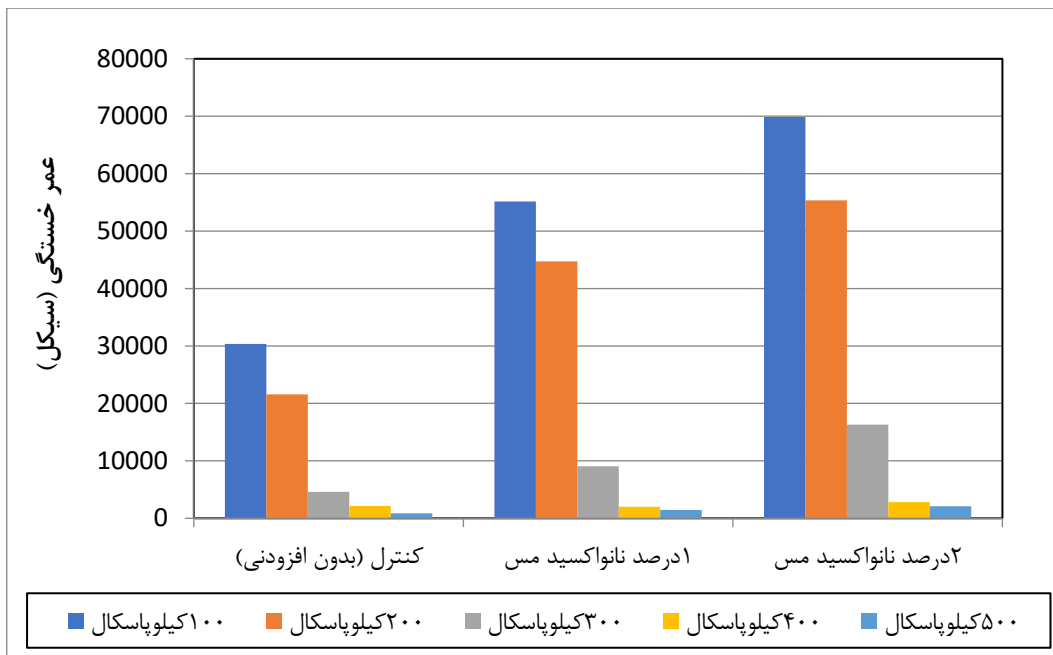
در شکل‌های ۹ و ۱۰ تعداد سیکل‌های بارگذاری منجر به شکست نمونه‌های آسفالتی برای مخلوط‌های کنترل و اصلاح شده با نانوآکسید مس در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی نمایش داده شده است. با توجه به شکل‌های زیر ملاحظه می‌شود که نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با نانوآکسید مس به طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد خستگی بهتری در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی ساده از خود بروز می‌دهند. قیر در حالت کلی خصوصیات اسیدی ضعیفی دارد [۴۱] و چسبندگی قیر با سنگدانه‌های اسیدی مانند گرانیت که دارای درصد بالای  $\text{SiO}_2$  هستند، به خوبی ایجاد نمی‌شود [۴۱ و ۴۲]. اکسید مس نیز خصوصیات اسیدی دارد [۴۳] و استفاده از آن ذرات نانوآکسید مس باعث می‌شود تا خصوصیات اسیدی قیر افزایش یابد. افزایش در خصوصیات بازی قیر سبب می‌شود تا چسبندگی آن با سنگدانه‌های گرانیتی مورد استفاده در این پژوهش که خصوصیات اسیدی دارند، کاهش یابد. استفاده از نانوذرات باعث می‌شود تا مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیر به شدت افزایش یابد [۴۵ و ۴۴]. این مورد در مورد نانوآکسید مس که ساختار آمورف و غیرقطبی دارد، نیز صادق است [۴۶]. این موضوع باعث می‌شود تا چسبندگی قیرهای اصلاح شده با نانوآکسید مس از طریق پیوندهای غیرقطبی با سنگدانه به شدت افزایش یابد. ذکر این نکته ضروری است که مولفه‌های اسیدی و بازی قیر که در چسبندگی مهم هستند، در مقایسه با مولفه‌ی غیرقطبی آن بسیار کوچک هستند و نقش پیوندهای غیرقطبی در چسبندگی قیر-سنگدانه بسیار مهم‌تر از نقش خصوصیات قطبی این دو ماده است. بر این اساس، می‌توان گفت استفاده از نانوآکسید مس باعث بهبود چسبندگی قیر-سنگدانه و افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده می‌شود. استفاده از نانوآکسید مس مورد استفاده در این پژوهش باعث

استفاده از نانوآکسید مس می‌تواند عملکرد قیرهای اصلاح شده در شرایط آب و هوایی گرم را به میزان قابل توجهی بهبود دهد. دلیل اصلی بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا را می‌توان ایجاد شبکه پیوسته نانومواد در فاز پیوسته قیر دانست. اتصال قوی بین ذرات نانومواد باعث می‌شود تا سختی قیر اصلاح شده در مقایسه با قیر کنترل افزایش یابد و مقاومت آن در برابر شیارشدگی افزایش یابد. همچنین، اتصال بین ذرات نانو در فاز پیوسته قیر باعث می‌شود تا خصوصیات الاستیک قیر اصلاح شده در مقابل قیر پایه افزایش یابد که این موضوع سبب می‌شود تا اختلاف فاز بین تنش و کرنش در قیرهای اصلاح شده کاهش یابد و رفتار قیر به رفتار ماده الاستیک خالص نزدیک‌تر شود. در این پژوهش مقادیر فاکتور خستگی در دماهای ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد و نتایج آن در شکل ۷ ارائه گردید. قیرهای اصلاح شده با نانوآکسید مس در هر دو مقدار (۱ و ۲ درصد وزن قیر) دارای مقادیر کمتر فاکتور خستگی در مقایسه با قیر پایه می‌باشند. مقدار پارامتر خستگی در قیر پایه در دمای ۱۶ درجه سانتی‌گراد ۶/۱۳ کیلوپاسکال بوده است که در نتیجه استفاده از ۱ و ۲ درصد نانوآکسید مس به ترتیب به ۵/۴۲ و ۴/۴۷ کیلوپاسکال کاهش یافته است. این روند در دو دمای ۱۹ و ۲۲ درجه سانتی‌گراد نیز وجود دارد. در ۱۹ درجه سانتی‌گراد استفاده از ۱ و ۲ درصد نانوآکسید مس باعث به ترتیب ۱۶ و ۳۴ درصد کاهش در پارامتر خستگی شده است. این مقادیر در نتیجه استفاده از ۲ درصد نانوآکسید روی به ترتیب باعث ۱۵ و ۴۰ درصد کاهش در پارامتر خستگی شده‌اند. در نتیجه می‌توان انتظار داشت مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای اصلاح شده با نانوآکسید مس دارای عمر خستگی بیشتری در مقایسه با مخلوط‌های کنترل باشند. همچنین همانطور که مشاهده می‌شود در دمای ۱۶ درجه سانتی‌گراد استفاده از نانوآکسید مس با مقادیر ۱ و ۲ درصد توانسته است یک درجه عملکرد قیر پایه را بهبود ببخشد. با توجه به اینکه ترک‌خوردگی خستگی در واقعیت در زمانی رخ می‌دهد که قیر در اثر تابش نور خورشید و حرکت هوای گرم پیر شده است، آزمایش DSR برای تعیین پتانسیل ترک‌خوردگی خستگی نیز روی قیرهای پیر شده بلند مدت انجام می‌شود. استفاده از نانومواد باعث می‌شود تا نرخ پیرشدگی در قیر کاهش یابد زیرا این مواد به عنوان مانعی برای تبخیر ذرات سبک قیر و نیز تغییر در ساختار مولکولی قیر هستند. این موضوع باعث می‌شود تا پتانسیل ترک‌خوردگی در



شکل ۹. تعداد سیکل‌های منجر به شکست در آزمایش خستگی در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد

Fig. 9. The number of cycles leading to failure in the fatigue test at 5 °C



شکل ۱۰. تعداد سیکل‌های منجر به شکست در آزمایش خستگی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 10. The number of cycles leading to failure in the fatigue test at 20 °C

افزایش سختی باعث می‌شود تا انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی کاهش یابد و عمر خستگی آن کاهش یابد. در آزمایش‌هایی که با روش تنش ثابت روی مخلوط‌های آسفالتی ضخیم انجام می‌شوند، برآیند این دو تاثیر، که یکی مثبت و دیگری منفی است، به نحوی است که عمر

می‌شود تا سختی مخلوط آسفالتی افزایش یابد. افزایش سختی دو تاثیر متفاوت بر عمر خستگی دارد. تاثیر اول این است که باعث می‌شود تا مقدار کرنش کششی در زیر لایه رویه کاهش یابد که باعث افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی می‌شود. تاثیر دوم این است که

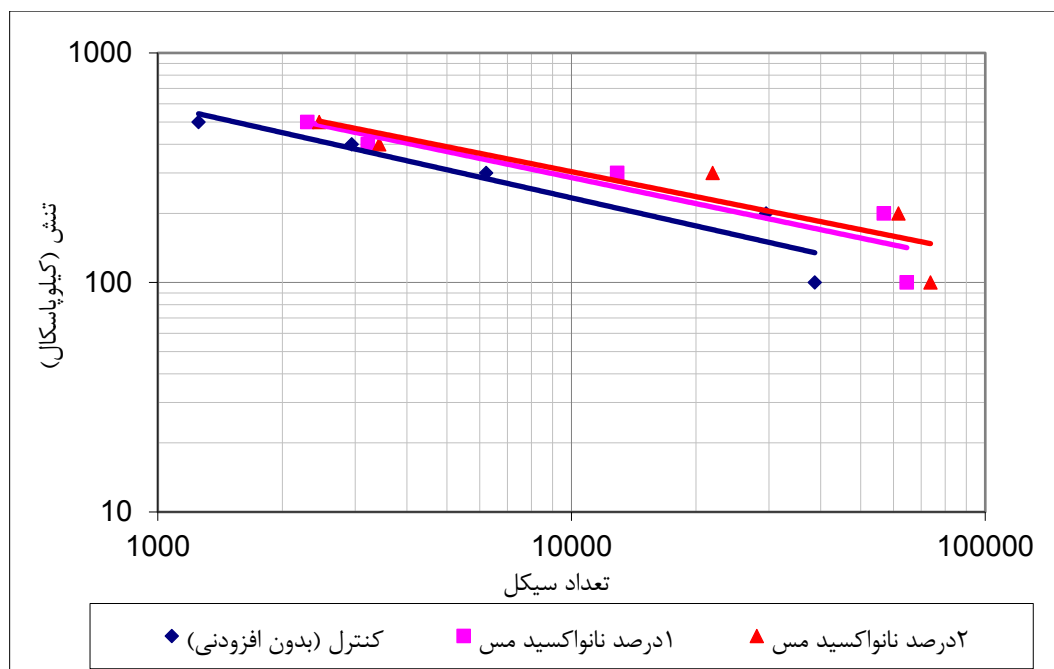
همچنین با افزایش دما از میزان عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی کاسته می‌شود. این امر به دلیل حساسیت بالای مدول ارتجاعی نمونه‌های آسفالتی نسبت به تغییرات دماست. به گونه‌ای که با افزایش دما و در نتیجه کاهش مدول ارتجاعی نمونه‌ها، کاهش عمر خستگی نمونه‌ها تحت بارگذاری سیکلی ایجاد می‌شود. نتایج این دو دسته نمودار نشان می‌دهد که استفاده از سطح تنش بالاتر باعث کاهش در میزان عمر خستگی می‌شود. در واقع، افزایش در سطح تنش باعث افزایش میزان کرنش کششی در نمونه‌ها می‌شود که عمر خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. نکته قابل توجه افزایش در سطح تنش از ۲۰۰ به ۳۰۰ کیلوپاسکال است که عمر خستگی را به شدت در همه نمونه‌ها کاهش می‌دهد.

نتایج عمر خستگی در ۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که استفاده از نانوآکسید مس باعث شده است تا عمر خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. این افزایش در دو درصد از ماده افزودنی نانو نسبت به نمونه‌های کنترلی بسیار مشهود است.

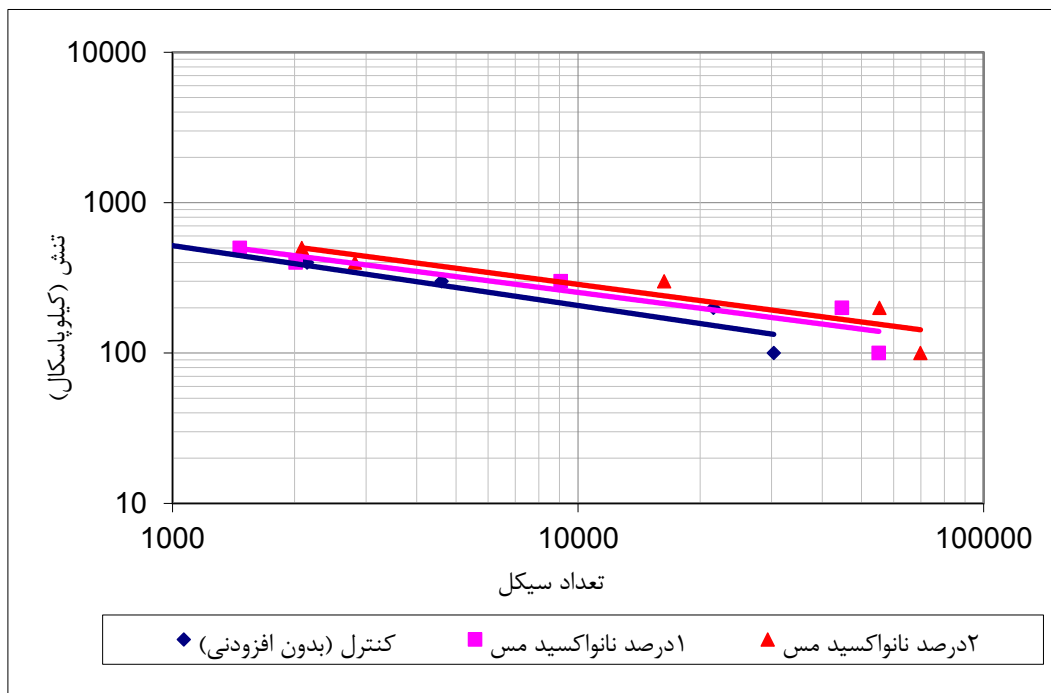
در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات خستگی بر روی نمونه‌های آسفالتی ساده و حاوی نانوآکسید مس پرداخته شده است. در این اشکال، خطوط رگرسیون از میان نمونه‌ها

خستگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد.

نتایج عمر خستگی در سطح تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که استفاده از ۱ و ۲ درصد نانوآکسید مس باعث شده است تا عمر خستگی از ۳۸۷۲۴ سیکل به ترتیب به ۶۴۶۲۴ و ۷۳۷۱۹ سیکل برسد که به ترتیب معادل ۳۷ و ۹۰ درصد است. این روند در مورد سایر سطوح تنش در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است. نتایج عمر خستگی در ۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز مشابه با ۵ درجه سانتی‌گراد است. به این صورت که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و سطح تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال عمر خستگی ۳۰۳۶۴ سیکل بوده است که در نتیجه استفاده از ۱ و ۲ درصد نانوآکسید مس به ترتیب عمر خستگی به ۵۵۱۵۵ و ۷۳۷۱۹ سیکل رسیده است. این افزایش در عمر خستگی در دو درصد مختلف استفاده از نانوآکسید مس به ترتیب معادل ۸۲ و ۱۳۰ درصد می‌باشد. مقایسه نتایج پارامتر خستگی در قیر و مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد استفاده از نانومواد در افزایش عمر خستگی در نمونه‌های مخلوط آسفالتی تاثیر بهتری داشته‌اند. یکی از دلایل اصلی این موضوع را می‌توان به تاثیر نانوآکسید مس بر خصوصیات چسبندگی قیر-سنگدانه مرتبط دانست که در مورد آزمایش‌های قیر این موضوع مطرح نیست.



شکل ۱۱. مقایسه رفتار خستگی مخلوطها در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد  
 Fig. 11. Comparison of the fatigue behavior of mixtures at 5 °C



شکل ۱۲. مقایسه رفتار خستگی مخلوطها در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد  
 Fig. 12. Comparison of the fatigue behavior of mixtures at 20 °C

جدول ۴. معادله خستگی و ضرایب آن در نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده با CuO  
 Table 4. Fatigue equation and its coefficients in simple and modified asphalt samples with CuO

| ردیف | دمای | نوع مخلوط              | ضریب تعیین | K <sub>2</sub> | K <sub>1</sub> | معادله خستگی                 |
|------|------|------------------------|------------|----------------|----------------|------------------------------|
| ۱    | ۵    | کنترل                  | ۰/۸۸۷۵     | ۰/۴۰۶          | ۹۸۷۳           | $N_f = 9873 \sigma^{-0.406}$ |
| ۲    | ۵    | قیر پایه با ۲ درصد CuO | ۰/۸۵۲۵     | ۰/۳۷۷          | ۹۲۰۹           | $N_f = 9209 \sigma^{-0.377}$ |
| ۳    | ۵    | قیر پایه با ۴ درصد CuO | ۰/۸۱۷۴     | ۰/۳۶۱          | ۸۴۵۲           | $N_f = 8452 \sigma^{-0.361}$ |
| ۴    | ۲۰   | کنترل                  | ۰/۸۹۴۹     | ۰/۳۹۸          | ۸۱۱۰           | $N_f = 8110 \sigma^{-0.398}$ |
| ۵    | ۲۰   | قیر پایه با ۲ درصد CuO | ۰/۸۵۹      | ۰/۳۵           | ۶۳۳۶           | $N_f = 6336 \sigma^{-0.35}$  |
| ۶    | ۲۰   | قیر پایه با ۴ درصد CuO | ۰/۸۴۷      | ۰/۳۵۷          | ۷۶۷۲           | $N_f = 7672 \sigma^{-0.357}$ |

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد افزایش در میزان سطح تنش باعث می‌شود تا عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به میزان قابل توجهی کاهش یابد. آنالیز نتایج به دست آمده از خستگی بهبود عمده ای در عمر خستگی مخلوط‌های اصلاح شده با نانو اکسید مس را نشان می‌دهد. معادله خستگی، مقادیر K<sub>۱</sub> و K<sub>۲</sub> و ضرایب همبستگی

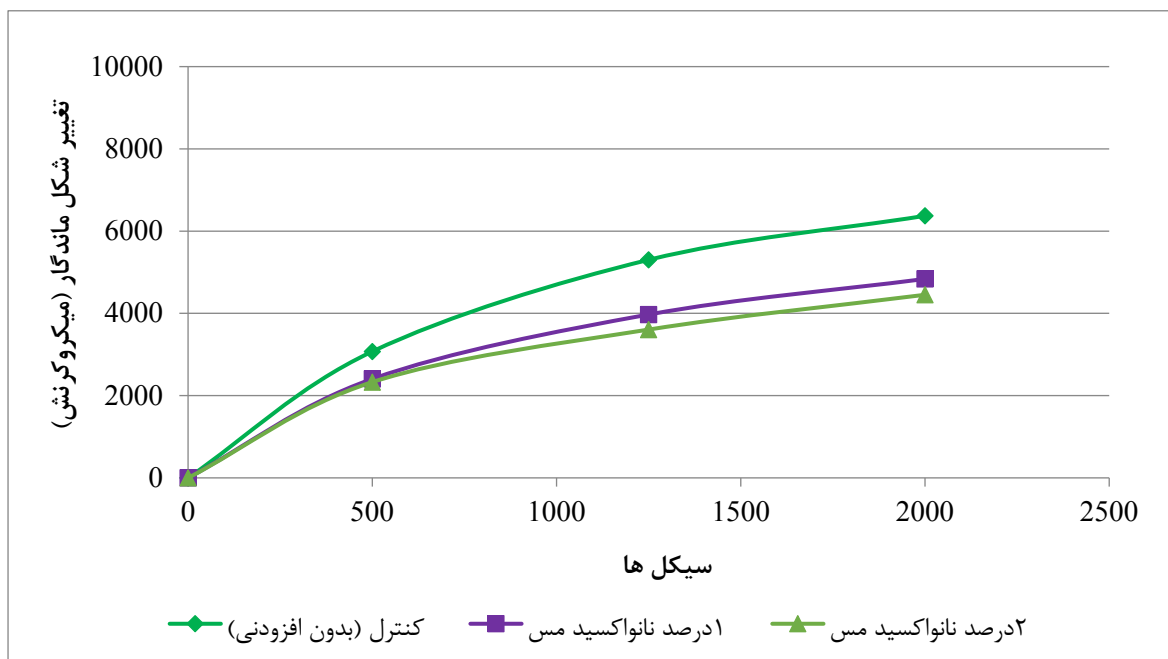
در هر سطح تنش رسم شد. نتایج حاصله یک رابطه خطی مناسب بین لگاریتم تنش و لگاریتم عمر خستگی را نشان می‌دهد. همانطور که از داده‌های ارائه شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توان مشاهده نمود استفاده از نانو اکسید مس باعث شده است تا در یک مقدار تنش ثابت مقدار عمر خستگی به میزان قابل توجهی افزایش یابد. همچنین، نتایج

در سطح تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود مقدار تغییر شکل ماندگار در انتهای سیکل ۲۰۰۰ به ۶۳۷۲ میکرو کرنش رسیده است که این مقدار در نتیجه ۱ و ۲ درصد از نانو اکسید مس به ترتیب به ۴۸۳۷ و ۴۴۵۲ میکرو کرنش کاهش یافته است. مقادیر تغییر شکل ماندگار در سطح تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال از سطح تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر است اما در سطح تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال نیز نمودارها وارد فاز سوم خزش نشده‌اند. مقدار تغییر شکل ماندگار در این سطح تنش در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از نانو اکسید مس به ترتیب در ۱ و ۲ درصد جرم قیر باعث شده است تا مقدار تغییر شکل ماندگار از ۸۱۰۲ میکرو کرنش به ترتیب به ۵۹۰۴ و ۵۴۲۷ کاهش یابد که این تغییرات معادل با ۲۷ و ۳۳ درصد است.

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نتایج آزمایش خزش دینامیکی به منظور تعیین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و تحت دو سطح تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. نتایج شکل ۱۴ در سطح تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد که استفاده از ۱ و ۲ درصد نانو اکسید مس به میزان قابل ملاحظه‌ای مقدار تغییر شکل ماندگار نمونه‌های اصلاح شده را کاهش

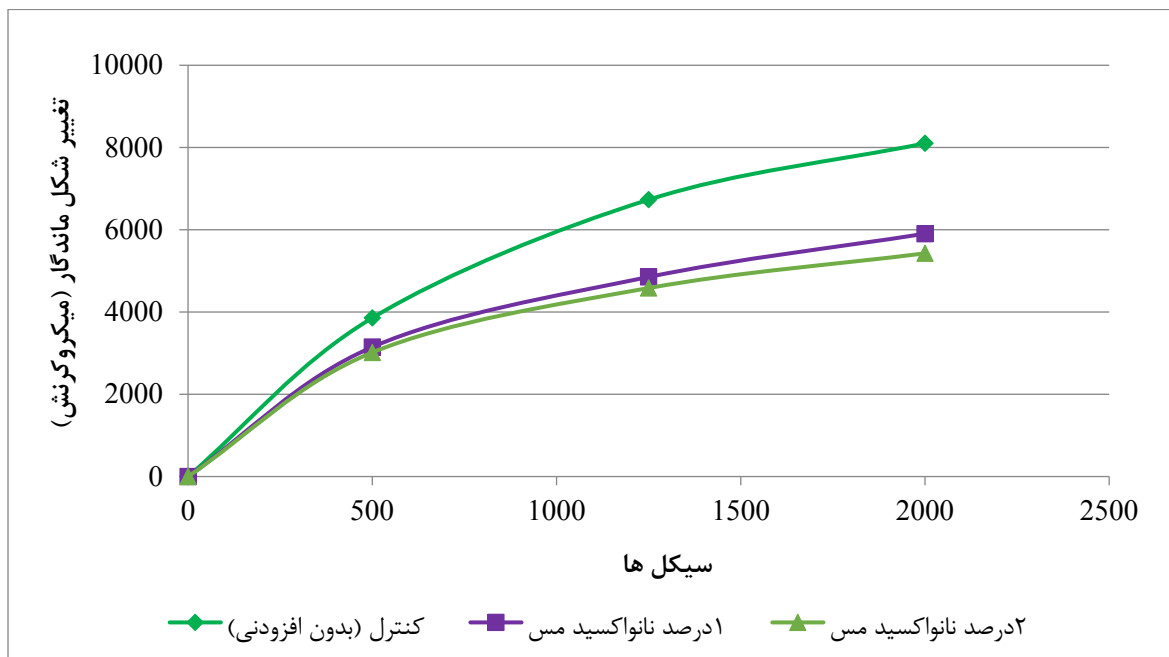
مربوط به هر یک از مخلوط‌ها در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که از داده‌های ارائه شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود مدل‌های ارائه شده دارای مقادیر  $R^2$  بالای ۰/۸۰ هستند که می‌توان نشان دهنده ارتباط بین عمر خستگی و تنش اعمال شده بر اساس مدل توانی مورد استفاده باشد.

نتایج مربوط به آزمایش شیارشدگی با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نتایج آزمایش خزش دینامیکی در ۴۰ درجه سانتی‌گراد را به ترتیب در سطح تنش ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. استفاده از افزودنی نانو اکسید مس سبب شده است تا مقدار تغییر شکل ماندگار در انتهای سیکل ۲۰۰۰ به میزان قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه‌های کنترل کاهش یابد. نانو اکسید مس ساختار آمورف دارد. این ساختار علاوه بر ایجاد پیوندهای غیرقطبی با قیر که باعث تقویت چسبندگی آن با سنگدانه می‌شود، می‌تواند باعث افزایش سختی قیر در دماهای بالا شوند که مقاومت آن در برابر شیارشدگی را کاهش می‌دهد. این کاهش در نمونه‌های ۱ درصد نسبت به نمونه کنترل بسیار قابل توجه است اما تفاوت مشهودی در نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد مشاهده نمی‌شود. به طور مثال،

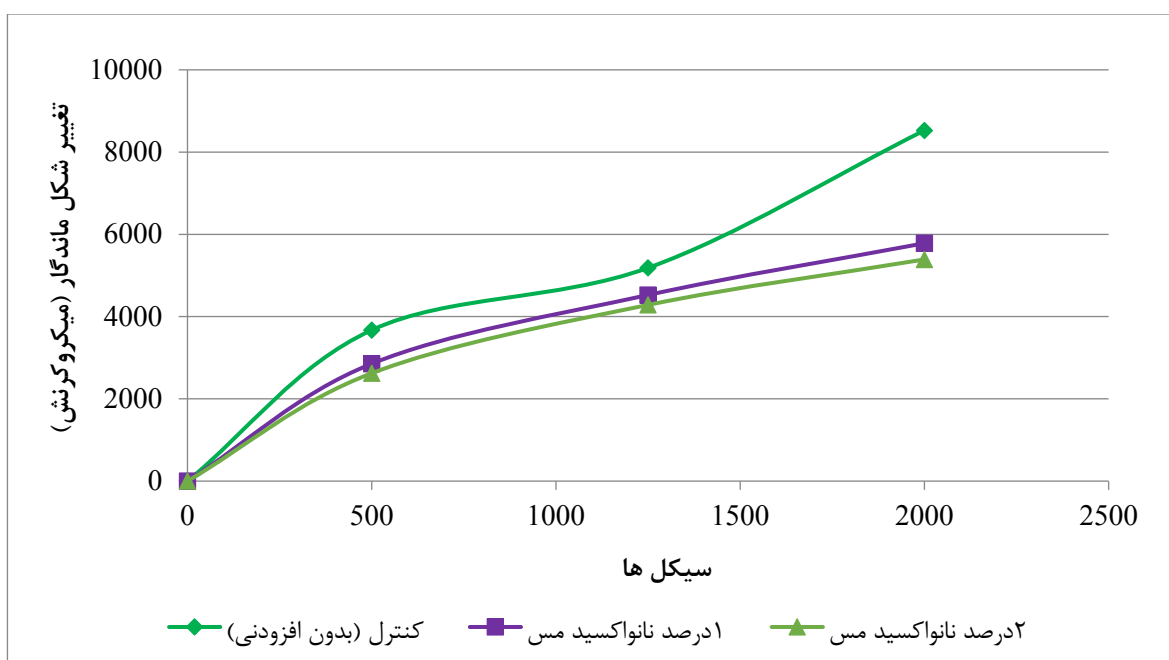


شکل ۱۳. تغییر شکل ماندگار در ۴۰ درجه سانتی‌گراد و تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال  
 Fig. 13. Permanent deformation at 40 °C and 200 kPa stress





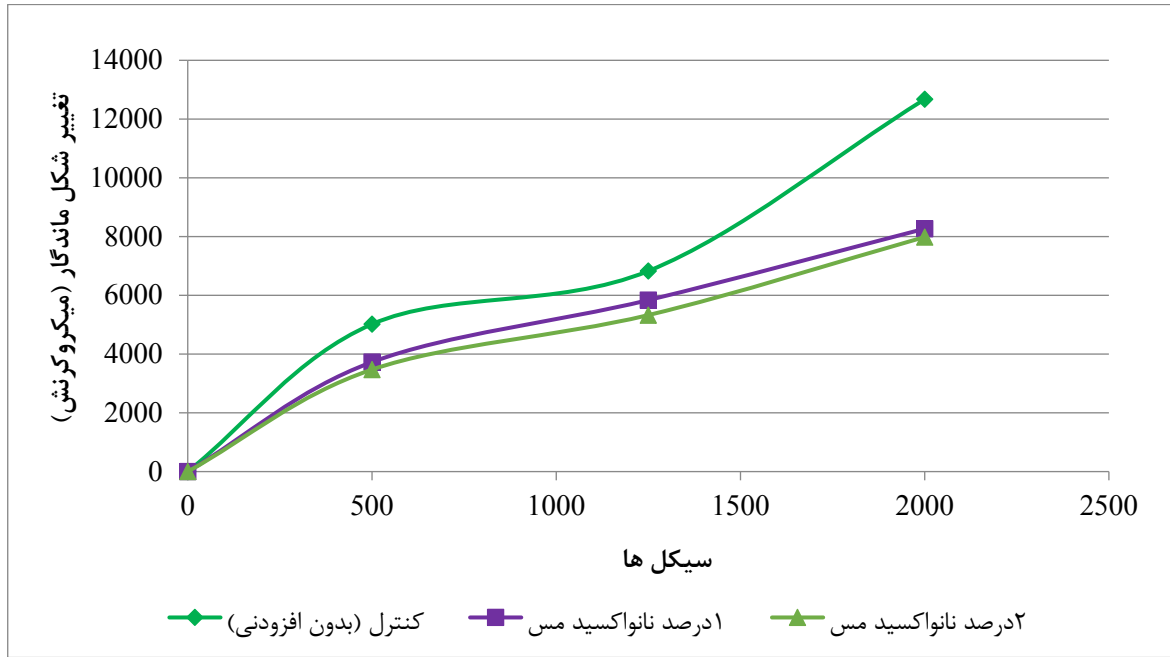
شکل ۱۴. تغییر شکل ماندگار در ۴۰ درجه سانتی گراد و تنش ۴۰۰ کیلو پاسکال  
 Fig. 14. Permanent deformation at 40 °C and 400 kPa stress



شکل ۱۵. تغییر شکل ماندگار در ۶۰ درجه سانتی گراد و تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال  
 Fig. 15. Permanent deformation at 60 °C and 200 kPa stress

که نشان دهنده‌ی به ترتیب ۳۲ و ۳۷ درصد کاهش می‌باشد. همچنین، نتایج شکل ۱۶ نیز نشان می‌دهد استفاده از افزودنی نانو اکسید مس باعث شده است تا مقدار کرنش نهایی در سیکل ۲۰۰۰ در نتیجه استفاده از ۱ و ۲ درصد از این ماده به ترتیب ۳۵ و ۳۷ درصد کاهش

داده است. مقدار تغییر شکل ماندگار در انتهای سیکل ۲۰۰۰ در دمای ۶۰ درجه و سطح تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال (شکل ۱۵) نشان می‌دهد استفاده از ۱ و ۲ درصد از نانو اکسید مس باعث شده است تا مقدار کرنش نهایی از ۸۵۲۶ به ترتیب به ۵۷۸۳ و ۵۳۸۹ میکرو کرنش برسد



شکل ۱۶. تغییر شکل ماندگار در ۶۰ درجه سانتی‌گراد و تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 16. Permanent deformation at 60 °C and 400 kPa stress

بین ۳۸ تا ۴۹ درصد بوده است که هر چه دما افزایش یافته است، این درصدها نیز بیشتر شده است. به نحوی که در دمای ۷۶ درجه مقدار افزایش پارامتر شیارشدگی روی نمونه‌های قیری پیر نشده حاوی ۱ و ۲ درصد اکسید مس نسبت به نمونه قیر پایه ۱۵۸ و ۳۴۳ درصد افزایش ایجاد شده است. این پارامتر در مورد قیرهای پیر شده نیز وجود دارد. به نحوی که در ۱ درصد از نانو اکسید مس و دمای ۵۸ درجه مقدار افزایش در پارامتر شیارشدگی این قیرها ۵۸ درصد بوده است که در دمای ۷۶ درجه سانتی‌گراد و مقدار ۲ درصد نانو اکسید مس به ۲۴۹ درصد بهبود رسیده است.

۲- افزودنی نانو اکسید مس خصوصیات خستگی قیرهای اصلاح شده را بهبود می بخشد، در نتیجه در مخلوط های حاوی قیرهای اصلاح شده ترک های خستگی زودرس به تاخیر می افتد. مقدار پارامتر خستگی در نتیجه استفاده از ۱ درصد نانو اکسید مس در دماهای مختلف بین ۱۲ تا ۱۵ درصد بوده است. استفاده از ۲ درصد نانو اکسید مس نیز باعث شده است تا مقدار پارامتر خستگی قیرهای اصلاح شده در دماهای مختلف از ۲۳ تا ۴۰ درصد افزایش پیدا کند. دلیل اصلی این موضوع را می توان افزایش خصوصیات الاستیک قیر اصلاح شده دانست که باعث می شود انرژی هدر رفته آن در سیکل های بارگذاری کاهش یابد.

یابد. از روی نتایج این دو شکل می توان مشاهده نمود در هر دو سطح تنش نمودار مربوط به نمونه های کنترل (بدون افزودنی) وارد فاز سوم خزش شده است اما این مطلب در نمونه های اصلاح شده هنوز ایجاد نشده است. همانطور که انتظار می رود، مقدار عدد جریان در سطح تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال از سطح تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال کمتر است.

#### ۴- جمع بندی

این پژوهش جهت بررسی تأثیر افزودنی نانو اکسید مس بر خواص ویسکوالاستیک قیر و همچنین ارزیابی رفتار شیارشدگی و خستگی به وسیله رثومتر برش دینامیکی و ارزیابی رفتار آن ها در دمای میانی و بالا پرداخته است.

مهم ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

۱- استفاده از نانو اکسید مس فاکتور شیارشدگی در قیرهای اصلاح شده را افزایش می دهد، که این مشخصه می تواند به کاهش پتانسیل شیارشدگی مخلوط های آسفالتی حاوی این قیرها در دماهای بالا منجر شود. دلیل اصلی این رخداد را می توان افزایش سختی و کاهش حساسیت دمایی قیر در نتیجه استفاده از نانو اکسید مس دانست. مقدار افزایش در پارامتر شیارشدگی قیرهای پیر نشده در دمای ۵۸ درجه در اثر استفاده از ۱ و ۲ درصد از نانو اکسید مس

عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی خستگی و شیارشدگی شده است. این در حالی است که استفاده از ۲ درصد از این ماده تفاوت قابل توجهی در پارامترهای مورد بحث نسبت به نمونه‌های حاوی ۱ درصد از نانواکسید مس ندارد. با توجه به هزینه نسبتاً بالاتر نانو مواد نسبت به قیر، استفاده از یک درصد از این افزودنی مقرون به صرفه‌تر به نظر می‌رسد.

۶- یکی از مواردی که در استفاده از نانوذرات مطرح هست، بحث هزینه تهیه و اصلاح قیر با این مواد است. ذکر این نکته ضروری است این پژوهش در مقیاس پژوهشی انجام شده و هدف تعیین خصوصیات مخلوط آسفالتی در دماهای میانی و بالا در نتیجه استفاده از نانواکسید مس بوده است اما در مقیاس‌های صنعتی این موضوع نیازمند آنالیز هزینه چرخه عمر و در نظر گرفتن هزینه‌های تهیه و اصلاح قیر است. البته، از سویی دیگر باید توجه داشت که استفاده از این ماده به میزان قابل توجهی باعث کاهش دو خرابی اصلی مخلوط آسفالتی (ترک‌خوردگی خستگی و شیارشدگی) شده است که می‌تواند باعث افزایش عمر روسازی به میزان قابل توجهی شود. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، استفاده از مقدار ۱ درصد از نانواکسید مس می‌تواند در بهبود فنی و حتی کاهش هزینه‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر موثر باشد.

### مراجع

- [1] A.R. Azarhoosh, Evaluating fatigue of asphalt mixtures using surface free energy method, Amirkabir University of Technology, 2018.
- [2] F.M. Nejad, A.R. Azarhoosh, G.H. Hamed, M.J. Azarhoosh, Characterization of permanent deformation resistance of precipitated calcium carbonate modified asphalt mixture, Journal of Civil Engineering and Management, 622-615 (2015) (5)21.
- [3] F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, G.H. Hamed, Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt—a laboratory study, Road Materials and Pavement Design, 756-746 (2014) (3)15.
- [4] D. Sowah-Kuma, Assessment of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavement Mixes and Rheological Performance of Asphalt Binders, 2014.
- [5] J. Yang, S. Tighe, A review of advances of nanotechnology

۳- استفاده از نانواکسید مس باعث شده است تا میزان تغییر شکل ماندگار نمونه‌های اصلاح شده با این ماده در مقایسه با نمونه‌های کنترل به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. همچنین، نمودارهای شیارشدگی نشان می‌دهد که استفاده از نانومواد باعث شده است تا تعداد سیکل برای ورود مخلوط‌های آسفالتی برای ورود به فاز سوم نمودار خزش افزایش یابد که این موضوع نشان دهنده‌ی مقاومت بالاتر مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در برابر شیارشدگی است. در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سطح تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال استفاده از ۱ درصد نانواکسید مس باعث کاهش ۲۲ تا ۲۶ درصد در مقدار تغییر شکل ماندگار و در سطح تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال بین ۲۴ تا ۳۲ درصد بوده است. این روند در مورد استفاده از ۲ درصد نانواکسید مس در همین دما و سطح تنش‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب بین ۱۷ تا ۳۷ و ۲۲ تا ۳۷ بوده است. همین روند در مورد نتایج تغییر شکل ماندگار در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز وجود دارد. در واقع، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از ۲ درصد نانواکسید مس تفاوت چندانی در عملکرد مخلوط آسفالتی در مقایسه با ۱ درصد نانواکسید مس ایجاد نمی‌کند.

۴- استفاده از نانواکسید مس باعث شده است تا عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در دو دما و پنج سطح تنش به کار رفته در این پژوهش افزایش یابد. این موضوع باعث می‌شود تا مخلوط‌های آسفالتی در دمای میانی عملکرد بهتری از خود نشان دهند. این افزایش در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد در نتیجه استفاده از ۱ و ۲ درصد نانواکسید مس به ترتیب بین ۹ تا ۱۰۷ درصد و ۱۷ تا ۲۵۲ درصد بوده است. این افزایش در عمر خستگی در دمای ۲۰ درجه نیز وجود داشته است. به نحوی که در نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی ۱ و ۲ درصد نانواکسید مس به ترتیب بین ۶ تا ۱۰۷ درصد و ۳۱ تا ۲۵۳ درصد افزایش در عمر خستگی ایجاد شده است. دلیل اصلی این رخداد را می‌توان شکل‌گیری پیوندهای غیرقطبی بین قیر اصلاح شده و سنگدانه‌های اسیدی دانست که سبب می‌شود تا مقدار کرنش کششی تحت بارگذاری کاهش یابد. علاوه بر این، افزایش خصوصیات الاستیک قیر در نتیجه استفاده از نانواکسید مس نیز می‌تواند دلیلی دیگر بر بهبود عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده باشد.

۵- نتایج آزمایش‌های مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ۱ درصد نانواکسید مس باعث بهبود قابل توجه در

- Evaluation the effect of nano-TiO<sub>2</sub> on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 571-566 (2014) 54.
- [17] X. Shi, L. Cai, W. Xu, J. Fan, X. Wang, Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 714-705 (2018) 161.
- [18] M. Mubarak, S.I.A. Ali, A. Ismail, N.I.M. Yusoff, Rheological evaluation of asphalt cements modified with ASA polymer and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles, *Procedia engineering*, 1284-1276 (2016) 143.
- [19] H. Ziari, H. Farahani, A. Goli, S. Sadeghpour Galooyak, The investigation of the impact of carbon nano tube on bitumen and HMA performance, *Petroleum Science and Technology*, 2108-2102 (2014) (17)32.
- [20] G. Shafabakhsh, S. Sajadib, Evaluation of Rheological Behavior of Bitumen Modified with Nano Copper Oxide, *International Journal of Engineering & Technology*, (4.7)7 18-13 (2018).
- [21] S. Karahancer, Investigating the performance of cuprous oxide nano particle modified asphalt binder and hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, (2019) 212 706-698.
- [22] M. Rezvan, A. Izadi, Investigation of the Effect of Iron and Aluminum Nano-oxides on Reduction of Moisture Sensitivity in Hot-mix Asphalt, *Transportation Infrastructures Engineering*, 102-93 (2016) (1)4 (In Persian).
- [23] S. Kordi, Gh. Shafabakhsh, The Feasibility of the effect of nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on behavior of stone mastic asphalt mixtures against dynamic loads, *Transportation Infrastructures Engineering*, 89-64 (2016) (1)2 (In Persian).
- [24] Sh. Shabaani, M. krymanesh, M.M. Hashemi, Evaluation of Aluminium Oxide Nano Effect on Rubber Bitumen Reological Behavior, *Transportation Infrastructures Engineering*, 87-71 (2019) (3)5 (In Persian).
- [25] Iran Highway Asphalt Paving Code No. 234, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Tehran, Iran, 2011 (In Persian).
- [26] M. Pilar, J. Sunol, J. Bonastre, L. Escoda, Influence of in asphalt mixtures, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 1276-1269 (2013) 96.
- [6] S. Ameen, Characterization of Asphalt Binder with Nanocomposite, Near East University, 2018.
- [7] E. Santagata, O. Baglieri, L. Tsantilis, D. Dalmazzo, Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 555-546 (2012) 53.
- [8] D.B. Ghile, Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures, Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, (2006).
- [9] S.G. Jahromi, B. Andalibizade, S. Vossough, Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 1)35B (103-89 (2010).
- [10] Z. You, J. Mills-Beale, J.M. Foley, S. Roy, G.M. Odegard, Q. Dai, S.W. Goh, Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization, *Construction and Building Materials*, 1078-1072 (2011) (2)25.
- [11] G. Liu, Characterization and identification of bituminous materials modified with montmorillonite nanoclay, TU Delft, Delft University of Technology, 2011.
- [12] F. Xiao, A.N. Amirkhanian, S.N. Amirkhanian, Influence of carbon nanoparticles on the rheological characteristics of short-term aged asphalt binders, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 431-423 (2010) (4)23.
- [13] F. Xiao, A.N. Amirkhanian, S.N. Amirkhanian, Long-term ageing influence on rheological characteristics of asphalt binders containing carbon nanoparticles, *International Journal of Pavement Engineering*, (6)12 541-533 (2011).
- [14] M.J. Khattak, A. Khattab, H.R. Rizvi, P. Zhang, The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology, *Construction and Building Materials*, 30 264-257 (2012).
- [15] J. Shen, B. Huang, X. Shu, B. Tang, Size effect of sub nano-scaled hydrated lime on selected properties of HMA, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 252 (2011) (4)4.
- [16] G. Shafabakhsh, S. Mirabdolazimi, M. Sadeghnejad,

- [37] M. Arabani, S.A. Tahami, M. Taghipoor, Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials, *Road Materials and Pavement Design*, (3)18 729-713 (2017).
- [38] A. Topal, B. Sengoz, Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt, *Construction and Building Materials*, (2)19 163-155 (2005).
- [39] S.G. Jahromi, N.A. Ahmadi, S. Vossugh, M. Mortazavi, Effects of nanoclay on rutting and fatigue resistance of bitumen binder, *International journal of materials research*, 389-383 (2012) (3)103.
- [40] B. EN, 25–12697:“Bituminous Mixtures Test Methods for Hot Mix Asphalt, Part 25: Cyclic Compression Test”, British Standard, (2016).
- [41] M. Arabani, G.H. Hamed, Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 811-802 (2010) (6)23.
- [42] N.M. Wasiuddin, Effect of Additives on Surface Free Energy Characteristics of Aggregates and Binders in Hot Mix Asphalt, ProQuest, 2007.
- [43] R. Khan, M.A. Inam, S. Zam Zam, M. Akram, S. Shin, I.T. Yeom, Coagulation and Dissolution of CuO Nanoparticles in the Presence of Dissolved Organic Matter Under Different pH Values, *Sustainability*, 2825 (2019) (10)11.
- [44] H. Behbahani, G.H. Hamed, V.N. Moghaddam Gilani, Effects of asphalt binder modifying with nano hydrated lime on moisture susceptibility of asphalt mixtures with thermodynamically concepts, *Petroleum Science and Technology*, (6-1) 2019.
- [45] A. Azarhoosh, H.F. Abandansari, G.H. Hamed, Surface-Free Energy and Fatigue Performance of Hot-Mix Asphalt Modified with Nano Lime, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04019192 (2019) (9)31.
- [46] S.J. Davarpanah, R. Karimian, F. Piri, Synthesis of copper (II) oxide (CuO) nanoparticles and its application as gas sensor, *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 332-329 (2015) (4)2.
- process control agents in the development of a metastable Fe–Zr based alloy, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 850-848 (2007) (10-8)353.
- [27] D.E. Martinez, Modern pavement management, in: *Silicon Dioxide, Silica (SiO<sub>2</sub>) Nanoparticles – Properties, Applications*, AziNano Company, 2013.
- [28] A. Diab, Z.P. You, H.N. Wang, Using modified creep and recovery tests to evaluate the foam-based warm mix asphalt contained nano hydrated lime, in: *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 2013, pp. 96-90.
- [29] M.S. Kabir, Effect of hydrated lime on the laboratory performance of superpave mixtures, (2008).
- [30] A. T240, Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test), in: *American Association of State and Highway Transportation Officials*, Washington, D.C., 2015.
- [31] A. R28, Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), in: *American Association of State and Highway Transportation Officials*, Washington, D.C., 2015.
- [32] A. T315, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), in: *American Association of State and Highway Transportation Officials*, Washington, D.C., 2015.
- [33] E.R. Brown, P.S. Kandhal, F.L. Roberts, Y.R. Kim, D.-Y. Lee, T.W. Kennedy, *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*, NAPA Research and Education Foundation, 2009.
- [34] A. T313, Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR), in: *American Association of State and Highway Transportation Officials*, Washington, D.C., 2015.
- [35] MS2- Asphalt Mix Design Methods, Asphalt Institute, 2014.
- [36] CEN, Test methods for hot mix asphalt—Part 24: Resistance to fatigue, in: EN24-12697. British Standards Institution London, 2012.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Hamedi Gh. H., *Evaluating the Rheological and Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Modified with Nano Copper Oxide*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4161-4182.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18119.6773](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18119.6773)

