

## بررسی اثر افزودنی نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از طریق تحلیل ضریب آسیب معادل

محمود عامری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حامد روح‌الامینی (مسئول مکاتبات)، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مصطفی وامق، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

کیوان بمانا، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: hamed\_rooholamini@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۰ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۲۹

### چکیده

خستگی ناشی از بارگذاری تکراری ترافیک، به‌عنوان یکی از حالت‌های اصلی خرابی در روسازی‌های آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. افزودن نانورس به قیر، به دلیل سطح تماس فوق‌العاده زیاد مواد نانو، باعث افزایش ویسکوزیته قیر و کاهش شیار شدگی آسفالت می‌شود، از این رو در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از دو نوع نانورس مونت موریلونیت اثر نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای میانی و پائین بررسی شود. به این منظور نمونه‌هایی با درصد افزودنی ۶،۴،۲ درصد با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به قیر ۶۰-۷۰ مصرفی اضافه شد و آزمایش‌های مدول برجهندگی و تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر روی مخلوط‌های ساخته‌شده صورت پذیرفت. نتایج نشانگر افزایش مدول برجهندگی به ازای افزایش درصد نانورس در قیر در هر دو دمای انجام آزمایش است. عمر خستگی و انرژی تلف‌شده آزمایش تیرچه خمشی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. درحالی‌که در دمای پائین کاهش پیدا کرده است. با توجه به ضریب آسیب محاسبه‌شده در آزمایش تیر خمشی، استفاده از افزودنی نانورس به‌طور متوسط سبب کاهش ۱۵٪ ضریب آسیب در دماهای متوسط شده و برای بیش از ۲٪ افزودنی تغییرات محسوسی در ضریب آسیب مشاهده نشده است. در دمای پائین، عملکرد ضعیف این افزودنی باعث افزایش ۳۰٪ ضریب آسیب می‌شود، بنابراین استفاده از این افزودنی در مناطق سردسیر به‌هیچ‌عنوان توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، نانورس، عمر خستگی، ضریب آسیب، مدول برجهندگی

## ۱. مقدمه

مهم‌ترین خصوصیات نانورس‌ها نسبت طول به ضخامت بسیار بالایی تک تک صفحات (از ۳۰۰ به ۱ و ۱۵۰۰ به ۱) است. مساحت ویژه سطح صفحات جدا و پراکنده می‌تواند به ۱۰۰۰ مترمربع بر گرم برسد. به علت ساختار صفحه‌ای، نانورس‌ها خواص مکانیکی مواد پلیمری را تقویت می‌کنند، افزایش استحکام، مدول و ثبات ابعادی از این موارد است. همچنین صفحات نانورس با جلوگیری از نفوذ و عبور گازها به‌عنوان محافظ در برابر رطوبت و مواد شیمیایی استفاده می‌شود [Nguyen and Baird, 2007].

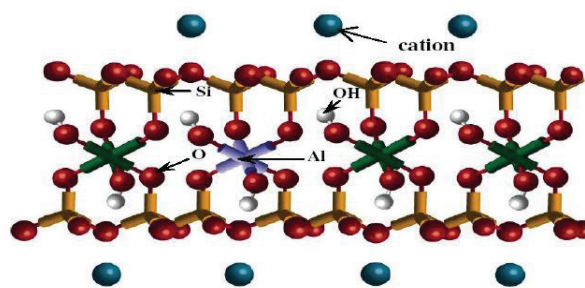
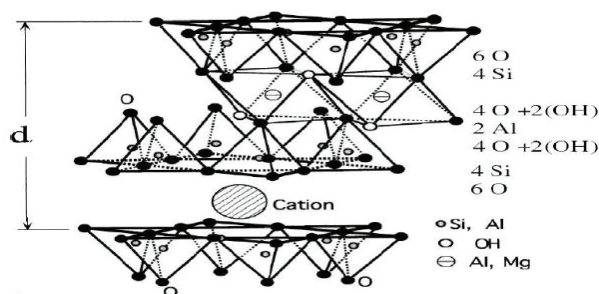
با توجه به اهمیت موضوع و مشخص شدن اثرات مثبت نانو ذرات بر مواد کامپوزیتی، اخیراً تحقیقاتی بر روی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو ذرات انجام شده است. با انجام آزمایش‌های رئولوژیک شارپ بر روی قیر مشخص شد که افزودن نانورس باعث افزایش مدول برشی و ویسکوزیته و همچنین افزایش مقاومت قیر در برابر ترک و شیارشدگی می‌شود [Hui et al. 2012]. بررسی‌های انجام‌شده بر روی دو نوع نانورس مونت موریلونیت به نام‌های تجاری ۱۵-Nanofil و Cloisite 15-A نشانگر کاهش نفوذپذیری و شکل‌پذیری و افزایش نقطه نرمی قیر به ازای مقادیر نانورس تا ۷٪ وزن قیر است. همچنین نمونه‌های آسفالتی حاوی نانورس استحکام مارشال، مدول برجهندگی، خزش بهتری، در مقایسه با نمونه‌های معمولی قیر دارد. در این تحقیق رفتار خستگی توسط آزمایش خستگی قطری مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن نشان‌دهنده افزایش عمر خستگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۲۰٪ در دمای ۵ است [Ghaffarpour, 2011]. در تحقیق مشابه دیگر، افزودن ۲٪ با استفاده از آزمایش خستگی قطری در شرایط

عملکرد کلی مخلوط‌های آسفالتی تا حدود زیادی به خصوصیات و مشخصات فیزیکی این مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده و نیز نحوه توزیع آنها در مخلوط وابسته است. اندرکنش بسیار پیچیده‌ای که بین این سه فاز تشکیل‌دهنده اتفاق می‌افتد، تأثیر بسیار زیادی بر رفتار روسازی‌های آسفالتی می‌گذارد. بنابراین، میکروساختار آنها نقشی بسیار مهم در عملکردشان دارد. ایده استفاده از افزودنی‌های مختلف به قیر به‌منظور اصلاح خواص آن از قبل مورد توجه متخصصین بوده است و بسته به نوع رفتاری که از قیر مدنظر بوده، افزودنی‌های مختلفی به آن اضافه گردیده است.

تحقیقات زیادی بر روی پلیمرهای اصلاح‌شده با نانورس صورت گرفته است، با این حال، اطلاعات کمی در مورد قیرهای اصلاح‌شده با نانورس منتشر شده است. متغیرهایی که تأثیر زیادی بر روی نانو کامپوزیت نهائی دارند شامل انتخاب نوع رس مصرفی، مؤلفه‌های پلیمر مصرفی و نحوه اختلاط مناسب بین این دو برای دستیابی به نانو کامپوزیت ایده آل است [Pinnavaia and Beall, 2000].

بسیاری از انواع رس‌ها سیلیکات‌های آلومینیوم هستند که دارای ساختاری ورقه‌ای شکل، شامل تتراهدرن سیلیکا ( $\text{SiO}_4$ ) و اکتاهدرن آلومینیوم ( $\text{AlO}_6$ ) است که با آرایش‌های متفاوت تشکیل این لایه را می‌دهند. نسبت ۲ به ۱ تتراهدرن به اکتاهدرن رس‌های معدنی را ایجاد می‌کند که رایج‌ترین نوع آن مونت موریلونیت مطابق شکل ۱ است [Lan et al. 1995].

ساختار نانورس‌ها شامل صفحاتی کوچک و نامنظم با ضخامتی در حدود ۱ نانومتر و قطر چند صد نانومتری است. یکی از



شکل ۱. ساختار مونت‌موریلونیت [Lan et al. 1995]

## بررسی اثر افزودنی نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از طریق تحلیل ضریب آسیب معادل

گرفته می‌شود [Van Dijk and Visser, 1977]. در نظر گرفتن پارامترهای مکانیکی (مدول سختی، به‌جای سطح تنش یا کرنش) با توجه به شرایط اولیه کاملاً اصولی نیست و شرایط آسیب درونی مصالح را به‌وضوح مشخص نمی‌کند. به‌منظور غلبه بر این مشکل، یک معیار منطقی شکست با توجه به مفهوم انرژی تلف‌شده توسط هاپمن و پرانک ارائه شد [1991 Pronk and Hopman]. اساس این دو روش بر مبنای تشخیص تعداد سیکل بارگذاری N1 که در آن با به هم پیوستن میکرو ترک‌ها ترک‌های ماکرو ایجاد می‌شود، استوار است [Rowe, 1993].

نگرش متفاوت دیگری که در زمینه مطالعات خستگی ارائه شده است توسط دی بندتو با توجه به تکامل مدول سختی در طول روند آزمایش پیشنهاد شده است. در این روش یک ضریب آسیب خستگی بر اساس دوره غالب آزمایش که تغییرات مدول سختی به‌صورت خطی است تعریف شده است [Di Benedetto et al., 1996]. اخیراً نیز با پیشنهاد روش جدیدی توسط شن و همکارانش تحت عنوان پارامتر نرخ تغییرات انرژی تلف‌شده<sup>۱</sup> (RDEC) که از تقسیم میزان اختلاف انرژی تلف‌شده دو سیکل متوالی بر انرژی تلف‌شده اولیه به‌دست می‌آید که نتایج تحقیقات نشان‌دهنده ارتباط مناسب این روش با عمر خستگی رفتار مخلوط‌های آسفالتی است [Shen et al. 2011].

در تحقیقات انجام‌شده بر روی اثر نانورس در عملکرد خستگی تنها به آنالیز کاهش ۵۰٪ میزان سختی از طریق آزمایش خستگی قطری اتکا شده است. در تحقیق حاضر، به دلیل نقش نانورس در مسلح کردن قیر و از طرفی عملکرد ضعیف آن در دماهای پائین رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانورس توسط تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای در شرایط کرنش ثابت (به‌عنوان یک آزمایش استاندارد توسط ASTM و AASHTO شناخته‌شده است) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین آزمایش مدول برجهنگی که به‌عنوان آزمایش‌ها مرتبط با مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌باشند برای ارزیابی دقیق‌تر مطلب در دستور کار قرار گرفته است. با توجه به قابلیت بیشتر روش‌های انرژی

کنترل تنش، نشان‌دهنده افزایش بیش از ۲ برابری عمر خستگی آسفالت (با توجه به سطح تنش) شده است [Khodadadi, 2007]. تحقیقات انجام‌شده در سال ۲۰۱۲ توسط الشافی و همکاران بر روی قیر و مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانورس نشانگر افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ قیر و ویسکوزیته قیر در دمای ۱۳۵ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و افزایش مقاومت کششی در دمای منفی ۷ و مثبت ۲۵ درجه سانتی‌گراد است [El-Shafie et al. 2012]. هرچه میزان نانورس در قیر افزایش پیدا می‌کند، مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط-ها در حالت خشک، کاهش و در حالت تر افزایش می‌یابد که در مجموع باعث بهبود حساسیت رطوبتی به ازای افزایش درصد نانورس می‌شود [Shu et al. 2011].

خستگی عبارت است از پدیده شکست بر اثر تکرار بار و تغییر و تناوب دینامیکی بار که ممکن است حتی کمتر از مقاومت نهایی استاتیکی آسفالت باشد. مقاومت خستگی یک مخلوط آسفالتی، توانمندی مخلوط در مقابل بارهای خمشی تکراری بدون شکست است. اندازه‌گیری خصوصیات خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی در محدوده‌های ترافیکی، آب و هوایی و شرایط محیطی مختلف، اهمیت ویژه‌ای دارد و فرآیند مهمی در طراحی روسازی‌های آسفالتی جدید است [Loulizi et al. 1999].

یکی از رایج‌ترین روش‌های بررسی آزمایشگاهی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای است که برای لایه‌های ضخیم و نازک به ترتیب در دو شرایط بارگذاری تنش یا کرنش ثابت انجام می‌پذیرد [AASHTO T321]. در روش کنترل تنش، با ثابت نگه‌داشتن میزان تنش، میزان کرنش با تکرار سیکل بارگذاری افزایش می‌یابد و ترک‌های کامل و شکست فیزیکی در نمونه در انتهای انجام آزمایش ایجاد می‌شود. در حالی که در شرایط کنترل کرنش، با ثابت نگه‌داشتن مقدار کرنش میزان تنش کاهش یافته با تکرار بارگذاری ثبت می‌شود. در شرایطی که در تعداد تکرار بالای سیکل بارگذاری سطح تنش کاهش قابل‌ملاحظه‌ای پیدا می‌کند، اما احتمال ایجاد ترک‌های قابل‌مشاهده بسیار کم است. به همین دلیل معیار شکست کاهش ۵۰٪ سختی اولیه در نظر

## محمود عامری، حامد روح الامینی، مصطفی وامق، کیوان بمانا

در جدول ۱ به مقدار ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی قیر مورد استفاده قرار گرفت. دلیل استفاده از این دو نوع نانورس وجود عنصر نیتروژن مثبت ( $N^+$ ) به عنوان اصلاح کننده نانو در ساختار آنها است که در تشکیل پیوند بین ذرات نانو و پیوندهای موجود در قیر مشارکت فعال دارد. تفاوت عمده دو ماده تجاری استفاده شده در نحوه آرایش زنجیره اصلاح کننده استفاده شده است که این آرایش در شکل ۲ نشان داده شده است.

نانورس در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه و با توان ۶۵ کیلووات توسط میکسر آلتراسونی<sup>۲</sup> به قیر مصرفی اضافه شد. برای اطمینان از توزیع یکنواخت و جلوگیری از کلوخه شدن نانورس در قیر، نانورس در ۱۰ مرحله به قیر افزوده شد. تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)<sup>۳</sup> از قیر حاوی ۶٪ نانورس به عنوان بالاترین میزان مصرف نانورس در این تحقیق، نشان دهنده پخش مناسب نانو ذرات رس در قیر استفاده شده است (شکل ۳).

تلف شده در تفسیر نتایج تیرچه خمشی نسبت به روش کلاسیک، تعیین عمر خستگی که کاهش ۵۰٪ در میزان سختی نمونه هاست روش دی بندتو با استفاده از مفهوم ضریب آسیب مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲. مصالح مصرفی

## ۱-۲ قیر

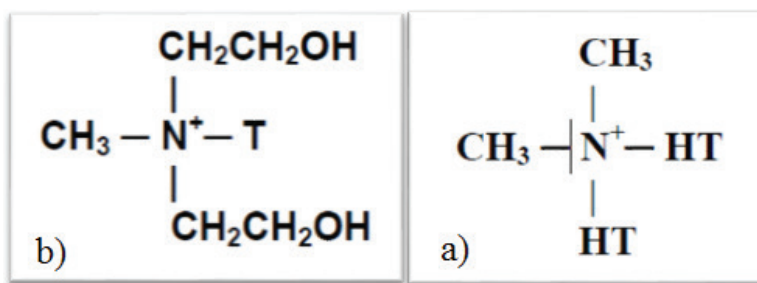
قیر مصرفی مورد استفاده در این تحقیق، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰، تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد تهران با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شده است.

## ۲-۲ افزودنی قیر (نانورس)

افزودن نانو ذرات به سیستم قیر و پلیمر، استحکام سیستم و مدول آن را افزایش می دهد. در این تحقیق نانورس های مونت موریلونیت با نام های تجاری Cloisite 15A و Cloisite 30 با مشخصات مندرج

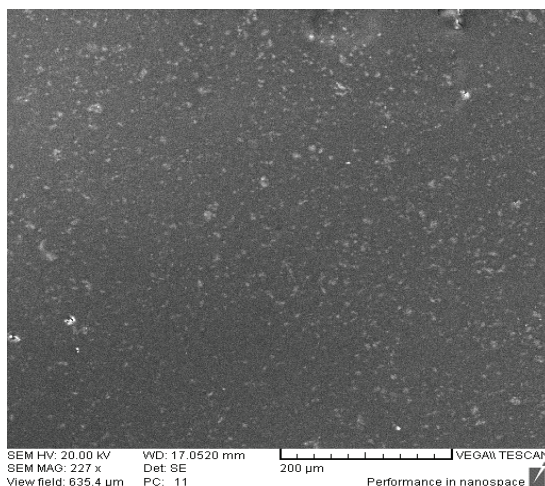
جدول ۱. مشخصات نانورس و قیر مصرفی

روش آزمایش	قیر ۷۰/۶۰	خصوصیات	مشخصات	Cloisite® 15A	Cloisite® 30B
ASTM D-70	۱/۰۳	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد	اصلاح کننده آلی	2M2HT	MT2EtOH
ASTM D-5	۶۴	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد	مقدار اصلاح کننده در ۱۰۰ گرم رس	۱۲۵ میلی گرم	۹۰ میلی گرم
ASTM D-36	۵۴	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)	درصد رطوبت	< ۲%	< ۲%
ASTM D-113	۱۰۲	انگمی در ۲۵ درجه سانتی گراد	کاهش رطوبت در اثر حرارت	۴۳%	۳۰%
ASTM D-92	۳۰۵	نقطه اشتعال			
ASTM D-70	۳۱۷	نقطه احتراق			



شکل ۲. زنجیره اصلاح کننده آلی مورد استفاده در a) cloisite 15-A b) cloisite 15-B

## بررسی اثر افزودنی نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از طریق تحلیل ضریب آسیب معادل



شکل ۳. تصویر از سطح نمونه قیر حاوی نانورس

### ۲-۳ مصالح سنگی

فیزیک مصالح سنگی شامل دانه‌بندی، وجوه شکسته، بافت سطحی، شکل، تعداد دانه‌های پهن و سوزنی (ضریب تورق و تطویل)، مقدار رس، دوام، تمیزی، سختی و جذب آب روی خصوصیات بسیار مهم یک مخلوط بتن آسفالتی شامل سختی، دوام، نفوذپذیری، کارایی، مقاومت خستگی، مقاومت اصطکاکی، و مقاومت خرابی رطوبتی تأثیر می‌گذارد [ASTM, 2013].

در این تحقیق از سنگدانه‌های شکسته آهکی معدن اسب چران واقع در شهرستان رودهن و پودر سنگ آهک (عبوری از الک شماره ۲۰۰) به‌عنوان فیلر استفاده شده است.

ساخت نمونه‌ها در سه مرحله انجام شد:

مرحله اول: شامل ساخت نمونه‌های استاندارد مارشال برای تعیین درصد قیر بهینه

مرحله دوم: ساخت نمونه‌های ژیراتوری برای هر یک از مخلوط‌ها به‌منظور انجام آزمایش مدول برجهندگی (مجموع ۲۱ نمونه)

مرحله سوم: دال‌های آسفالتی که توسط دستگاه تراکم بر اساس استاندارد تراکم مالشی خطی دیپارتمان کلرادو ساخته شد [CDOT, 2009] که از هر دال ساخته‌شده، دو تیر (۲۰٪\*۱۵۰\*۷۲ میلی‌متر) به‌دست‌آمده و برای هر متغیر ۴ تیر مورد آزمایش قرار گرفت (مجموع ۵۶ تیر).

### ۳. آزمایش‌های قیر

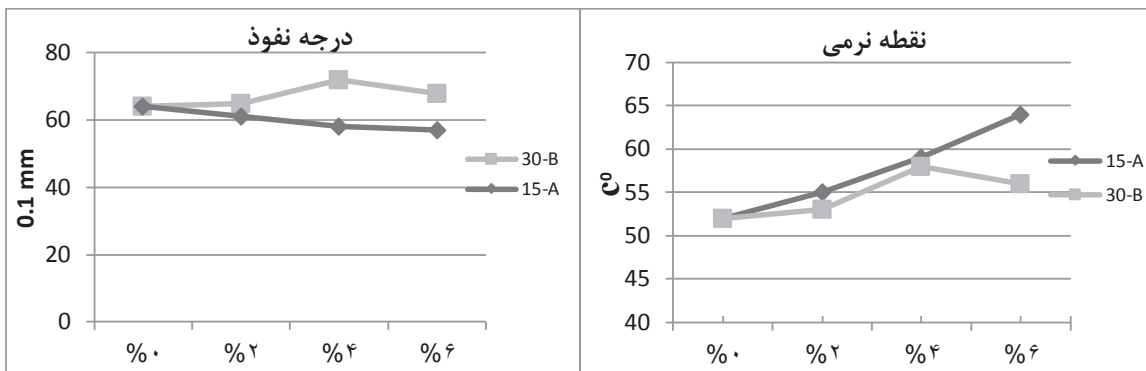
با توجه به شکل ۴، با افزایش درصد نانورس A-15 نفوذپذیری کاهش و نقطه نرمی افزایش می‌یابد، درحالی‌که افزودن نوع B-30 تا ۴ درصد باعث افزایش نفوذپذیری و نقطه نرمی شده است. دلیل این تفاوت رفتاری در دو نوع نانورس را می‌توان در اثر خواص شیمیایی نانورس‌ها جست‌وجو کرد که در سال ۲۰۰۵ توسط آقای جایل موردبحث قرار گرفته است [Ghile, 2005].

### ۴. تعیین قیر بهینه

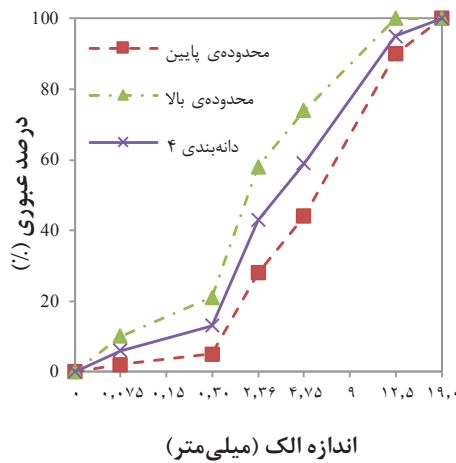
نمونه‌ها بر اساس طرح اختلاط مارشال (ASTM D1599) که این روش جزء روش‌های طرح اختلاط تجربی است، با ارتفاع متوسط ۶۵-۶۰ و قطر ۱۰۲-۱۰۰ میلی‌متر توسط چکش مارشال کوبیده شد. تعداد ضربات لازم برای مدل کردن ترافیک عبوری سنگین، ۷۵ ضربه در هر طرف در نظر گرفته شده است. حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ (شکل ۵) نشریه ۲۳۴ برای استفاده از اندازه‌های مختلف مصالح سنگی انتخاب شد.

مقدار قیر بهینه بر اساس پارامترهای حداکثر وزن مخصوص، حداکثر مقاومت فشاری، روانی، درصد حجمی فضای خالی آسفالت متراکم شده و درصد حجمی فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت متراکم شده به‌دست‌آمده است.

محمود عامری، حامد روح الامینی، مصطفی وامق، کیوان بمانا



شکل ۴. نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر



شکل ۵. حد بالا، پایین و وسط دانه بندی ۴

جدول ۲. نتایج آزمایش مارشال

نوع نمونه	درصد قیر بهینه	استقامت مارشال (Kpa)	روانی (mm)
نمونه شاهد	۴,۹	۸,۷۶	۳,۳۵
15-A	۲٪	۹,۶۱	۳,۷۰
	۴٪	۱۰,۰۶	۳,۷۷
	۶٪	۱۰,۳۷	۳,۶۴
	۲٪	۹,۸۱	۳,۶۲
30-B	۴٪	۱۰,۲۵	۳,۶۴
	۶٪	۱۰,۸۴	۳,۴۵

مقدار قیر لازم برای پوشش سنگدانه‌ها افزایش قابل توجهی دارد.

### ۵. آزمایش تعیین مدول برجهنگی

مدول برجهنگی به عنوان پارامتری مهم در شناسایی عملکرد

با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که با اضافه شدن نانورس تا مقدار ۶٪، استقامت مارشال روند صعودی داشته است که دلیل آن را می‌توان وجود مقاومت مکانیکی بهتر قیر در مخلوط آسفالتی در اثر بالا بودن سطح ویژه نانورس‌ها بیان کرد. همچنین با افزودن نانورس،

## بررسی اثر افزودنی نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از طریق تحلیل ضریب آسیب معادل

۲۵ درجه سانتی‌گراد با بارگذاری سینوسی در فرکانس ۱۰ هرتز و در سطح کرنش ۶۰۰ میکرو استرین انجام گرفته است.

### ۶-۱ سختی اولیه

بر اساس نتایج به دست آمده در شکل ۷ مشاهده می‌شود که در دمای پائین سختی اولیه نمونه‌های حاوی نانورس 15-A و 30-B افزایش چشمگیری داشته است که نشان‌دهنده کاهش انعطاف‌پذیری با اضافه شدن نانورس به قیر بخصوص در مورد نانورس 15-A که سختی تا حدود ۲.۵ برابر نمونه معمولی افزایش یافته است. درحالی‌که در دمای ۲۵ رفتار نانورس‌ها کاملاً متفاوت است. افزایش سختی نوع 15-A و کاهش سختی 30-B با اضافه کردن مقادیر نانورس، بیانگر انعطاف‌پذیری بهتر قیر تولیدی 30-B است.

### ۶-۲ عمر خستگی

مهم‌ترین خروجی دستگاه آزمون خستگی، عمر خستگی است که به‌عنوان ملاک اصلی مقاومت در برابر ترک‌های ناشی از عبور چرخ است. با توجه به اینکه اضافه کردن نانورس به قیر، درصد قیر بهینه را افزایش چشمگیری داده است، انتظار بهبود عمر خستگی پیش‌بینی می‌شد که نتایج ارائه شده در شکل ۸ در دمای ۲۵ درجه مؤید این مطلب است. اما عمر خستگی در دمای ۵ درجه با افزایش درصد نانورس کاهش یافته، که نشان‌دهنده ضعف این مخلوط‌ها در دماهای پائین است که این نتیجه منطبق با نتایج افزایش محسوس سختی اولیه در دمای پائین است.

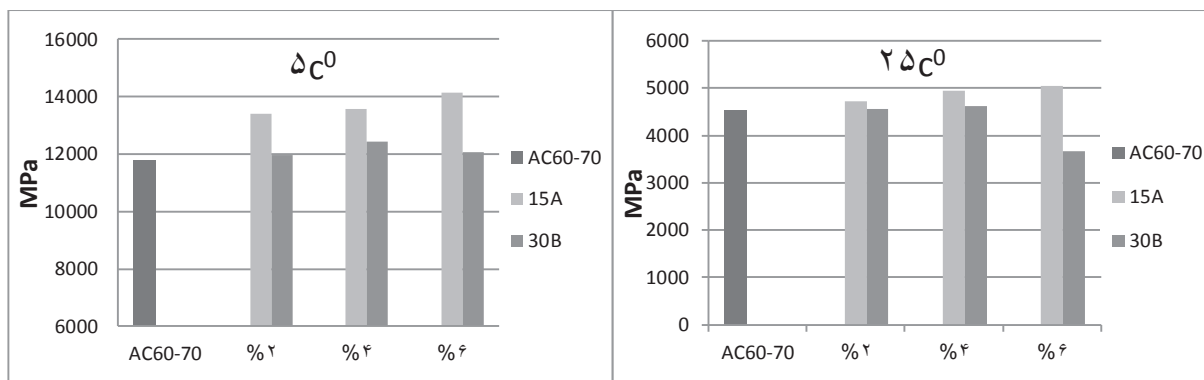
روسازی برای تحلیل پاسخ روسازی به بارگذاری ترافیکی مطرح است. انجام این آزمایش با اندازه‌گیری مقاومت کششی غیرمستقیم در بارگذاری تکراری با استفاده از دستگاه آزمایش UTM صورت می‌پذیرد. در استاندارد ASTM D4123 تعیین مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم بیان شده است. در این تحقیق جهت تعیین مدول برجهنگی از دستگاه UTM بر اساس استاندارد مذکور استفاده شده است.

نمونه‌ها در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد با فرکانس بارگذاری ۱ هرتز و مدت بارگذاری ۰.۱ ثانیه در هر پالس مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، به‌طور کلی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، نانورس باعث افزایش مدول برجهنگی، بخصوص نوع 15-A شده است.

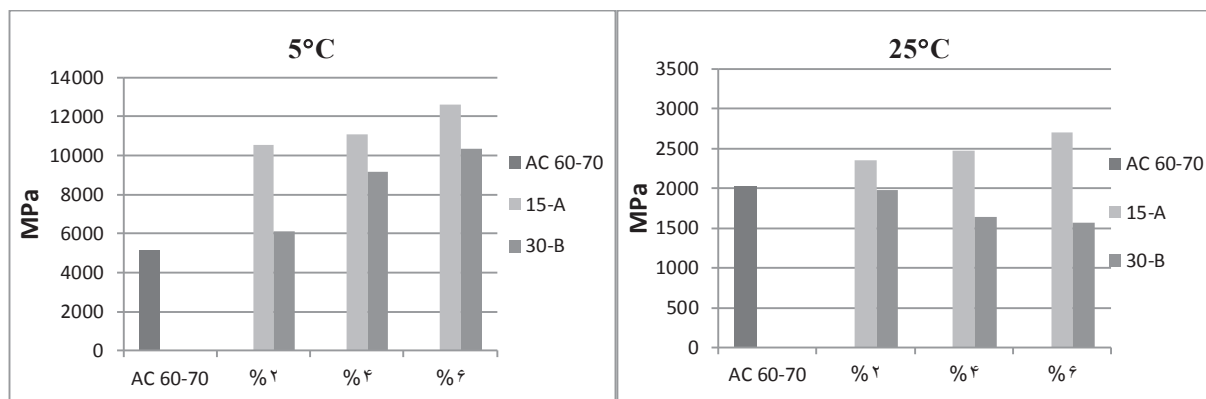
نتایج مدول برجهنگی در دمای ۵ درجه (شکل ۶) گواه بر اثر منفی نانورس‌ها بر قیر در دمای پائین است، به دلیل اینکه افزایش مدول برجهنگی در دمای ۵ درجه نشان‌دهنده کاهش استقامت در برابر ترک‌های حرارتی است [Roberts, 1996].

### ۶. آزمایش تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای

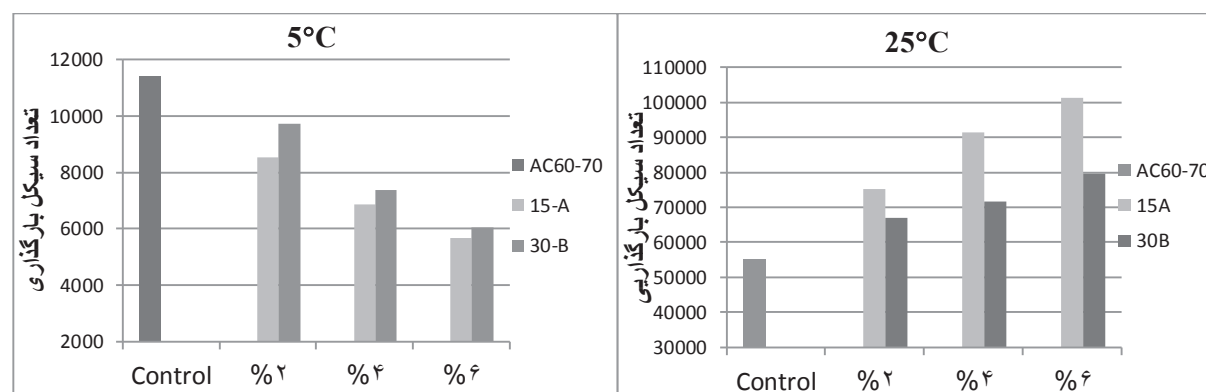
به عقیده کالوش<sup>۴</sup> و همکاران روش آزمایش تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای یکی از روش‌های با قابلیت اطمینان بالا برای پیش‌بینی عمر مخلوط‌های آسفالتی است. [Kaloush et al. 2003]. کلیه آزمایش‌ها مطابق با استاندارد AASHTO T321 در دمای ۵ و



شکل ۶. نتایج آزمایش مدول برجهنگی در دمای ۲۵ و ۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۷. سختی اولیه در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد (مگا پاسکال)



شکل ۸. عمر خستگی در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد

### ۳-۶ انرژی تلف شده

هنگامی که یک ماده تحت بارگذاری خارجی مقاومت می‌کند، مساحت زیر منحنی تنش- کرنش، انرژی وارد شده ماده را نشان می‌دهد.

برای یک ماده غیر الاستیک، از آنجایی که مسیر بارگذاری و باربرداری روی هم قرار نمی‌گیرند، یک فرآیند بارگذاری و باربرداری همیشه همراه با اتلاف انرژی خواهد بود. این پدیده هیستریزیس نامیده می‌شود و مساحت داخل حلقه هیستریزیس تنش- کرنش برای یک فرآیند بارگذاری و باربرداری نشان‌دهنده مقدار انرژی تلف شده برای یک سیکل بارگذاری است. با در نظر گرفتن خصوصیات بنیادی برای تمامی مواد غیرالاستیک که اتلاف انرژی در طول فرآیند بارگذاری دارند، یک مطالعه روی طبیعت اتلاف انرژی، از آن یک ابزار قابل قبول برای ارزیابی خصوصیات خستگی مواد می‌سازد.

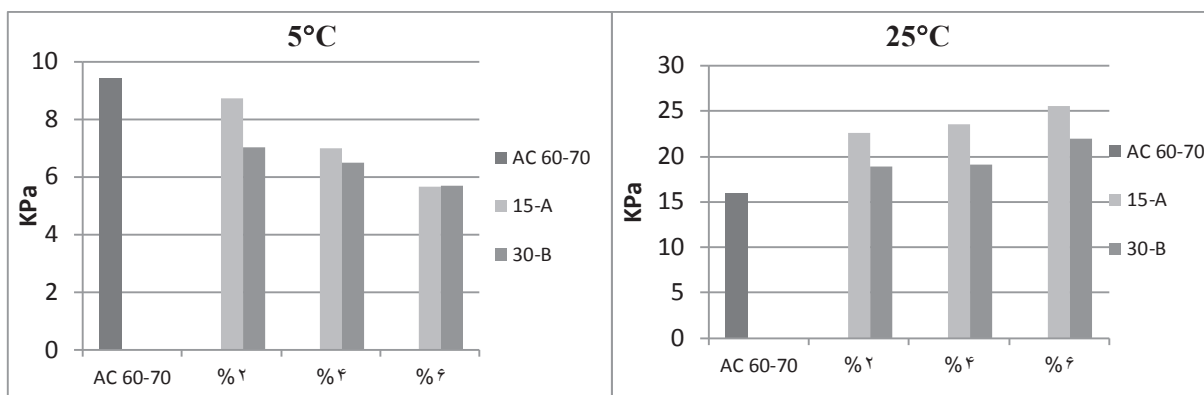
نتایج به دست آمده برای انرژی تلف شده با توجه به شکل ۹ نشان‌دهنده این نکته است که هر چه عمر خستگی یک نمونه بالاتر می‌رود، انرژی تلف شده بیشتری حاصل می‌شود. بنابراین مطابق با نتایج عمر خستگی شاهد انرژی تلف شده بیشتر نانورس 15-A در دمای ۲۵ و عملکرد بهتر نانورس 30-B در دمای ۵ درجه هستیم، ضمن اینکه نتایج انرژی تلف شده نیز بیانگر عدم عملکرد مناسب مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانورس در دمای پائین در بحث خستگی است.

### ۴-۶ ضریب آسیب معادل

از آنجایی که افزودن نانورس به قیر باعث افزایش عمر خستگی (مزیت) و افزایش سختی (عیب) می‌شود، در این تحقیق سعی شده که با محاسبه ضریب آسیب معادل ارائه شده توسط آقای دی بندتو و همکارانش [Di Benedetto et al. 1996] ابتدا قسمتی



بررسی اثر افزودنی نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از طریق تحلیل ضریب آسیب معادل



شکل ۹. انرژی شکست در دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد

برای درصد‌های بالاتر، افزایش سختی نمونه‌ها در اثر استفاده از افزودنی نانورس است که اثر آن بر روی ضریب آسیب از اثر افزایش عمر خستگی بیشتر بوده است.

#### ۷. نتایج

با افزودن نانورس به قیر و پخش شدن این ذرات در قیر خواص مکانیکی قیر بهبود پیدا کرده و به دلیل سطح تماس فوق‌العاده بالای مواد نانو، ویسکوزیته قیر بالا رفته و مشخصات شیار افتادگی آسفالت بهبود قابل توجهی خواهد داشت. این در حالی است که بالا رفتن خاصیت پلاستومری در دماهای پائین باعث بروز ترک‌ها و کاهش عمر خستگی می‌شود. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی و تحلیل دقیق رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانورس توسط آزمایش تیرچه خمشی در دماهای میانی و پائین بوده است.

- نتایج آزمایش نقطه نرمی و درجه نفوذ بیانگر مقاومت بیشتر نانورس 15-A در برابر تغییرات درجه حرارت نسبت به نوع 30-B و قیر معمولی است.

- بکارگیری نانورس به‌عنوان ماده افزودنی به قیر اثر قابل ملاحظه‌ای روی استحکام مارشال و افزایش روانی این نوع مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های شاهد داشته است، همچنین با اضافه شدن این ماده به قیر مقدار قیر موردنیاز برای پوشش سنگ‌دانه‌ها افزایش فراوانی دارد.

- با انجام آزمون مدول برجهندگی مشخص شد که نانورس

از منحنی خستگی که دارای شیب‌خطی غالب است را پیدا کرده (شکل ۱۰) و با استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده ضریب آسیب معادل به‌صورت زیر استخراج می‌شود.

$$D(N) = \frac{E_{00} - E(N)}{E_{00}} \quad (1)$$

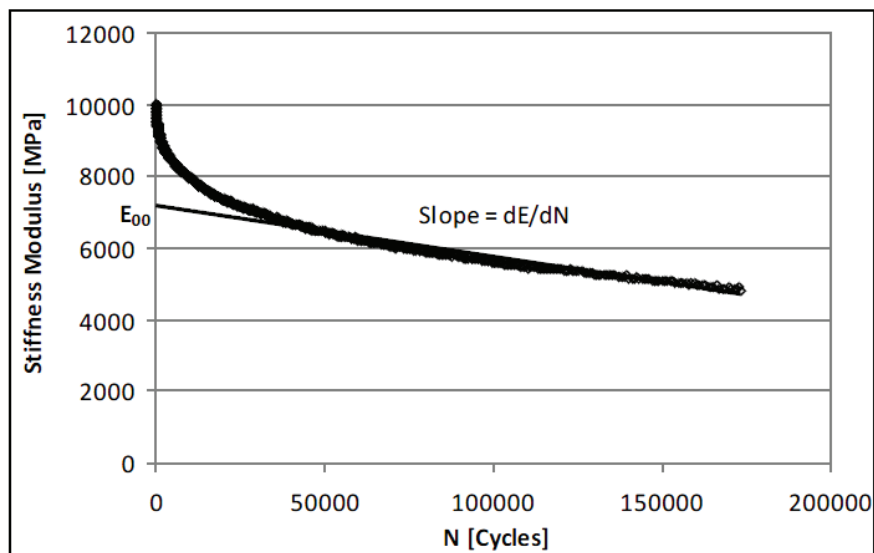
$E(N)$  مدول الاستیسیته در سیکل  $N$  ام ( $\text{MPa}$ ) و  $E_{00}$  مدول الاستیسیته اولیه شیب نمودار است. دی بندتو همچنین ضریب سختی معادل را به‌صورت زیر معرفی کرده است.

$$-a_t = \frac{dD}{dN} = -\frac{1}{E_{00}} \cdot \frac{dE}{dN} \quad (2)$$

با توجه به روش فوق، ضریب آسیب معادل برای نزدیک‌ترین نمونه (ازلحاظ مقدار عمر خستگی) به میانگین نتایج ۳ تیر آزمایش شده برای هر متغیر، محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ مشخص شده است. مقایسه نتایج عمر خستگی با ضریب آسیب معادل نشان‌دهنده حساسیت بالای ضریب آسیب معادل در ارزیابی رفتار خستگی بوده است و در واقع برعکس روش‌های معمول نشان می‌دهد که استفاده بیش از ۲٪ نانو تأثیر مثبتی بر روی رفتار خستگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نداشته است. این در حالی است که در تحقیقات دیگری که آزمایش خستگی قطری انجام شده است با افزایش درصد نانورس تا میزان ۶٪ باعث افزایش عمر خستگی شده است تا جایی که میزان افزایش عمر خستگی در دمای ۲۵ تا حدود ۲ برابر گزارش شده است.

در دمای ۵ درجه، حضور نانورس در مخلوط اثر منفی قابل توجهی داشته است. بهترین درصد افزودنی نانورس برای هر دو نوع مصرفی، ۲ درصد است. دلیل افزایش ضریب آسیب

محمود عامری، حامد روح الامینی، مصطفی وامق، کیوان بمانا



شکل ۱۰. نحوه استخراج پارامترهای مربوط به ضریب آسیب معادل

جدول ۳. ضریب آسیب خستگی به روش دی بندتو

نوع افزودنی	AC	Cloisite 15-A			Cloisite 30-B		
		۲٪	۴٪	۶٪	۲٪	۴٪	۶٪
ضریب آسیب در دمای ۲۵							
$\frac{dE}{dN}$	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۲۳	۰,۰۰۲۳	۰,۰۰۱۶	۰,۰۰۱۴	۰,۰۰۱۳
$E_{00}$	۱۲۲۹	۱۴۳۹	۱۴۶۷	۱۵۲۸	۱۰۹۳	۹۱۸	۸۶۹
$-a_t(10^{-6})$	۱,۷۹	۱,۵۲	۱,۵۴	۱,۵	۱,۴۷	۱,۵۲	۱,۴۹
ضریب آسیب در دمای ۵							
$\frac{dE}{dN}$	۰,۰۱۹۷	۰,۰۳۸۵	۰,۰۴۴۸	۰,۰۵۰۹	۰,۰۴۰۹	۰,۰۴۰۶	۰,۰۵۱۲
$E_{00}$	۲۸۵۳	۵۱۲۴	۵۴۶۷	۵۹۹۹	۴۱۵۴	۴۸۲۴	۵۱۹۱
$-a_t(10^{-6})$	۶,۹۰	۷,۵۰	۸,۲۱	۸,۴۸	۹,۸۴	۹,۵۳	۹,۸۷

افزودنی نانورس، یک گزینه قابل قبول برای بهبود خواص خستگی در دماهای میانی است. از میان دو نوع نانورس استفاده شده، نوع Cloisite 15-A دارای نتایج مقبول تر نسبت به نوع Cloisite 30-B است که از دلایل آن می توان به سازگاری بهتر عامل اصلاح کننده این نانورس با قیر مصرفی اشاره کرد. با توجه به نتایج به دست آمده و تحلیل ضریب آسیب انجام شده، استفاده از ماده نانو به عنوان اصلاح کننده قیر باعث کاهش چشمگیر عملکرد خستگی در دمای پائین شده است. بنابراین استفاده از این ماده در مناطق سردسیر هیچگونه توجیه فنی ندارد.

باعث افزایش مدول برجهنگی در دماهای بالا و پائین می شود که این افزایش در دماهای پائین نشان دهنده ضعف عملکردی این افزودنی در برابر ترک های حرارتی است.

- با توجه به نتایج آزمایش خستگی این گونه به نظر می رسد که مخلوط های حاوی نانورس در دمای بالا با انرژی شکست و عمر خستگی بالاتر قادر به میرا نمودن مقدار بیشتر انرژی در خود و به تبع آن، مقاومت بالاتر در برابر بروز ترک های خستگی می باشند که عکس این رفتار در دمای پائین اتفاق می افتد.

- با توجه به آزمون های صورت گرفته، به نظر می رسد استفاده از

بررسی اثر افزودنی نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از طریق تحلیل ضریب آسیب معادل

- Di Benedetto, H., Ashayer Soltani, A. and Chaverot, P. (1996) "Fatigue damage for bituminous mixtures: a pertinent approach". Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 65, pp.142 - 158.

- El-Shafie, M., Ibrahim, I. M. and Abd El Rahman, A. M. M. (2012) "The addition effects of macro and Nanoclay on the performance of asphalt binder", Egyptian Journal of Petroleum, Vol. 21, No 2, pp. 149-154.

- Ghaffarpour, S., Andalibzade, B. and Vossough, S. (2010) "Engineering properties of Nanoclay modified asphalt concrete mixture", Arabian Journal for Science and Engineering, Vol, 102 35, No 1B.

- Ghile, D. B. (2005) "Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures", Delft University of Technology.

- Hui, Y., Zhanping, Y., Liang, L. and Xianming, S. (2012) "Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay", Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 159-170.

- Kaloush, K., Zborowski, A., Abojaradeh, M., Way, G. B. and Sousa, J. (2003) "Cracking characteristic of asphalt rubber mixture", Fifth International Rilem Conference, Vol. 7, pp. 485-492.

- Lan, T., Kaviratna, P. D. and Pinnavaia, T.J (1995) "Mechanism of clay Tactoid exfoliation in epoxy-clay nanocomposites", Chem Mater, pp. 2144-2150.

- Loulizi, A., Al-Qadi, I. L., Bhutta, S. A. and Flintsch, G. W. (1999) "Evaluation of geosynthetics used as separators", Transportation Research Record, Vol. 1687, pp. 99-1316.

- NCHRP (2010) "Validating the fatigue endurance limit for hot mix asphalt", Report 646.

- Nguyen, Q. T. and Baird, D. G. (2007) "Process for increasing the exfoliation and dispersion of nanoclay particles into polymer matrices using supercritical carbon dioxide", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

- Pinnavaia, T. J. and Beall, G. W. (2000) "Polymer-

به‌منظور ارتقاء عملکرد این نوع نانو پیشنهاد می‌شود، نانورس به همراه مواد پلیمری الاستومر که عملکرد مطلوب در دمای پائین دارند استفاده شود.

#### ۸. پی‌نوشتها

- 1- Ratio of dissipated energy change
- 2- Ultrasonic
- 3- Scanning electron microscope
- 4- Kaloush

#### ۹. مراجع

- خدادادی، احمد، کوکبی، مهرداد و صالحی، سعید (۱۳۸۶) "اثر افزودنی نانورس بر عملکرد درازمدت روسازی‌های آسفالتی"، دومین همایش دانشجویی فناوری نانو، دانشگاه کاشان.

- غفارپور جهرمی، سعید (۱۳۹۰) "تأثیر نانورس و کربنات کلسیم رسوبی بر رفتار مهندسی مخلوط‌های آسفالتی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.

- AASHTO ( 2008) "Standard method of test for determining the fatigue life of compacted hot-mix asphalt (hma) subjected to repeated flexural bending", AASHTO T321, Washington D.C.

- ASTM (2013) "Road and paving materials; Vehicle-pavement systems", Vol. 04-03.

- ASTM (1994) "Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using marshall apparatus", American Society for Testing and Materials, D1559-89.

- ASTM (1995) "Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures", American Society for Testing and Materials, D4123-82.

- Colorado Department of Transportation (CDOT) 2009( "Standard method of test for linear kneading compaction of bituminous mixture", Colorado Procedure Laboratory 5116.

- Shen, S., Airey, G. D., Carpenter S. H. and Huang, H. (2011) "A dissipated energy approach to fatigue evaluation", Road Materials and Pavement Design, 7:1, pp.47-69.

- Shu, W., Akin, M., Zhanping, Y. and Xianming, S. (2011) "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture", Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 195-200.

- Van Dijk, W. and Wiser, W. (1977) "The energy approach to fatigue for pavement design", In Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, 1977, pp. 1-40.

clay nanocomposites", England: John Wiley and Sons Ltd.

- Pronk, A. C. and Hopman, P. C. (1991) "Energy dissipation: the leading factor of fatigue", Proceedings of the conference the United States Strategic Highway Research Program, London, pp. 255-267.

- Roberts, F. L. (1996) "Hot mix asphalt materials, mixture design and construction", Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association Education Foundation, pp.173-181.

- Rowe, G. M. (1993) "Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test", Proceedings of Associations of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, pp. 344-384.