



## Investigating the effect of using nanomaterials (clay, iron oxide, carbon particles) on improving the functional properties of asphalt

Hassan Divandari<sup>۱</sup>, Ghasem Tahmorsi<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>- Department of Civil Engineering, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.

Email: [h.divandari@gmail.com](mailto:h.divandari@gmail.com)

<sup>۲\*</sup>- PhD Student in Roads and Transportation, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

Email: [ghasemmodern@gmail.co](mailto:ghasemmodern@gmail.co)

### ABSTRACT

Annually, a part of the budget of different countries is spent on repairing and repairing the damages caused to the pavements. In our country, where most of the pavements are asphalt and the low resistance of pavements to dynamic loads and their short service life are among the most important problems in the field of road protection and maintenance, which cause various breakdowns on the road. Instrumentation begins. Nanotechnology is used in pavement engineering due to its unique properties in improving the properties of asphalt mixtures. In the present study, a review of new ideas for the use of nano-clay, nano-iron oxide, carbon nanoparticles with different percentages as a modifying additive in asphalt bitumen has been done. Then, the mechanical properties and behavior and temperature sensitivity properties of the modified asphalt mixture with nanomaterials that have the ability to improve the performance of the flexible asphalt surface are investigated. And the effect of using nanoparticles with lower percentages and better performance for a way resistant to environmental factors with a longer useful life on the asphalt mixture has been obtained. Research shows that the addition of optimal amounts of nanomaterials to modify asphalt bitumen increases the strength, durability, flexibility, fatigue resistance, slip resistance, impermeability and ease of application of asphalt mixtures. Therefore, improving the mentioned properties increases the service life of flexible pavement.

**Keywords:** Nanotechnology, modified bitumen, nanoclay, iron nanoxide, carbon nanoparticles

All rights reserved to Civil & Project Journal.



www.cpjournals.com

## نشریه عمران و پروژه Civil & Project Journal (CPJ)

# بررسی تأثیر استفاده از مواد نانو (رس، اکسید آهن، ذرات کربن) بر بهبود خواص عملکردی آسفالت

حسن دیوانداری<sup>۱\*</sup>، قاسم طهمورسی<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> - گروه مهندسی عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران  
پست الکترونیکی: [h.divandari@gmail.com](mailto:h.divandari@gmail.com)

<sup>۲</sup> - دانشجوی دکترای راه و ترابری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران  
پست الکترونیکی: [ghasemmodern@gmail.com](mailto:ghasemmodern@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۵

### چکیده

سالانه بخشی از بودجه کشورهای مختلف صرف مرمت و بازسازی آسیب های وارده به روسازی ها می شود. در کشور ما که اغلب روکش روسازی ها به صورت آسفالتی بوده و مقاومت کم روسازی ها در برابر بارهای دینامیکی و عمر کوتاه سرویس دهی آنها از مهم ترین مشکلات موجود در زمینه حفاظت و نگهداری راه ها به شمار می آیند که موجب خرابی های مختلف در روسازی راه می شود. فن آوری نانو در مهندسی روسازی به دلیل دارا بودن خصوصیات منحصر به فردش در بهبود ویژگی های مخلوط آسفالت به کار می روند. در پژوهش حاضر مروری بر ایده های جدید جهت استفاده از نانو رس، نانو اکسید آهن، نانو ذرات کربن با درصد های مختلف به عنوان ماده افزودنی اصلاح کننده در قیرو مخلوط آسفالت پرداخته شده است. سپس خواص مکانیکی و رفتار و خصوصیات حساسیت دمایی مخلوط آسفالت اصلاح شده با مواد نانو که قابلیت بهبود بخشیدن به عملکرد سطح آسفالت انعطاف پذیر را دارند بررسی شده است. و تأثیر کاربرد نانو ذرات با درصد های کمتر و عملکرد بهتر برای راهی مقاوم در برابر عوامل محیطی با عمر مفید بیشتر بر روی مخلوط آسفالت بدست آمده است. تحقیقات نشان می دهد افزودن مقادیر بهینه ای از مواد نانو در جهت اصلاح قیرو مخلوط آسفالت موجب استحکام، دوام، انعطاف پذیری، مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر لغزش، نفوذ ناپذیری و سهولت کاربرد مخلوط های آسفالتی می گردد. لذا بهبود خواص ذکر شده سبب افزایش طول عمر سرویس دهی روسازی انعطاف پذیر می شود.

کلمات کلیدی: فناوری نانو، قیرو های اصلاح شده، نانو رس، نان اکسید آهن، نانو ذرات کربن

## ۱- مقدمه

رعایت کیفیت روسازی یکی از مباحث بسیار مهمی است که به لحاظ حفظ منافع ملی لازم است با حساسیت خاصی در طرح های عمرانی مورد توجه قرار گیرد. با بالا رفتن قیمت قیر، توجه به ویژگی های مطلوب مخلوط های آسفالتی از قبیل استحکام، دوام، انعطاف-پذیری، مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر لغزش، نفوذناپذیری، سهولت کاربرد باید بیش از پیش مدنظر قرار گیرد. قیر، ماده چسبنده مخلوط های آسفالتی و جزء ثابت و جدایی ناپذیر آن است. لذا ارزیابی تأثیر قیر در ساختار رویه های آسفالتی ساده نیست. از نخستین مراحل تهیه آسفالت که الزاما باید قیر را گرم کرد، تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی آن آغاز می شود، بعد از پخش و تراکم مخلوط آسفالتی و نیز در طول بهره دهی که رویه آسفالتی مستقیما در معرض تأثیر نور، یخبندان و نوسانات دمای محیط قرار دارد، این فرآیند تغییر بدون وقفه ادامه پیدا می کند. امروزه علاوه بر قیر و مصالح سنگی تشکیل دهنده مخلوط های آسفالتی از مواد دیگری به نام افزودنی ها یا اصلاح کننده های قیر به منظور اصلاح و بهبود برخی از خواص قیر و در نتیجه مخلوط های آسفالتی استفاده می شود. بررسی ها نشان می دهند که بهبود خصوصیات دینامیکی مخلوط های آسفالتی گرم با استفاده از اصلاح و بهبود خواص قیر با استفاده از نانو ذرات می تواند راهکاری مناسبی جهت افزایش قابلیت روسازی های آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی همچنین عوامل مخرب محیطی باشد. مطالعات روز دنیا به سمت استفاده از انواع نانو افزودنی از جمله نانو رس، نانو اکسید آهن، نانو فیبرهای کربن در مخلوط های آسفالت مختلف به عنوان پیوند دهنده و همچنین نحوه تأثیر بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پیش می رود. استفاده از مواد افزودنی در قیر و مخلوط های آسفالتی با هدف بهبود عملکرد آنها در برابر بارهای وارده و شرایط محیطی موضوع اصلی بسیاری از تحقیقاتی است که در سالیان اخیر در زمینه مهندسی روسازی صورت پذیرفته است. هدف استفاده از این مواد افزودنی می تواند یک یا تمامی مواردی از جمله بهبود شرایط آسفالت، کاهش ضخامت روسازی آسفالتی و در نتیجه صرفه جویی اقتصادی، مسایل زیست محیطی و ... باشد. افزودنی های نانویی جزو جدیدترین و بروزترین افزودنی هایی بوده که محققین برای یافتن راهکارهایی به منظور بهبود رفتار مخلوط های آسفالتی مورد استفاده قرار داده اند. مطالعه تحقیقات محققین در چند سال اخیر نشان از تأثیر بالای استفاده از نانو مواد بر روی رفتار مخلوط آسفالتی داشته و نتایج این تحقیقات نشان داده است که قابلیت های بالای تکنولوژی نانو می تواند سبب بهبود پارامترهای مختلف در قیر و مخلوط های آسفالتی گردد.

## ۲- تاریخچه فناوری نانو

علم نانو، مطالعه پدیده ها و دستکاری مواد در مقیاس اتمی و مولکولی بوده که در این مقیاس کوچک، خصوصیات مواد با ویژگی هایشان در مقیاس بزرگ متفاوت است. فناوری نانو، طراحی، شناسایی، تولید و کاربرد ساختارها، طرح ها و سامانه ها با استفاده از کنترل شکل و اندازه مواد در مقیاس نانو می باشد (Simchi, 2008).

فناوری نانو اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط یک مهندس ژاپنی به نام نوریو تانیگوچی<sup>۱</sup> معرفی شد (Taniguchi, 1974). او دقت ساخت قطعات را با اگماض در محدوده ۰/۱ تا ۱۰۰ نانومتر را توصیف کرد. این فناوری در اصل یک تکنولوژی جدید است که فراتر از کنترل مواد و مهندسی در مقیاس میکرومتر می باشد. سپس در سال ۱۹۸۱، به یک رویکرد جدید از ریز ذرات اشاره شد که بیشتر مربوط به معنا و برنامه های کاربردی امروز آن است (Drexler, 1981).

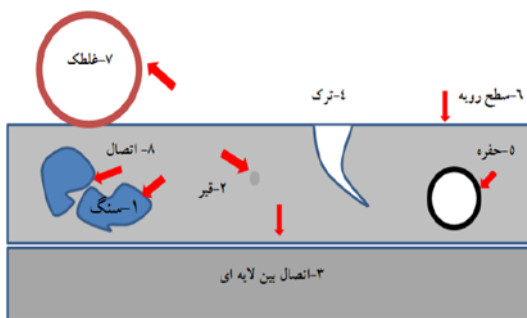
## ۳- استفاده از نانو مواد در مهندسی روسازی راه

کاربرد نانو مواد می تواند ویژگی های آسفالت و بهبود خصوصیات کلیدی از قبیل توان فشاری، توان کششی و پایداری در برابر تحمل بار در دماهای بالا شود (Ghaffarpour and et al., 2010). به طور کلی به نظر می رسد که علم و تکنولوژی نانو پتانسیل پیشرفت قابل توجهی

<sup>۱</sup> Norio Taniguchi

به تکنولوژی روسازی آسفالتی در رشته های زیر ارائه می دهد: ۱- طراحی مواد (توسعه و بهینه سازی) ۲- ساخت مواد (تولید تکنیکی نانو) و ساخت روسازی ۳- ویژگی های مواد (چند عملکردی و تحمل پذیری) ۴- آزمایش مواد و نظارت روسازی با سنسورهای نانویی ۴- مدل سازی فیزیکی - شیمیایی رفتار مواد تا ابعاد نانو (Larsen-Basse and et al., ۲۰۰۵)

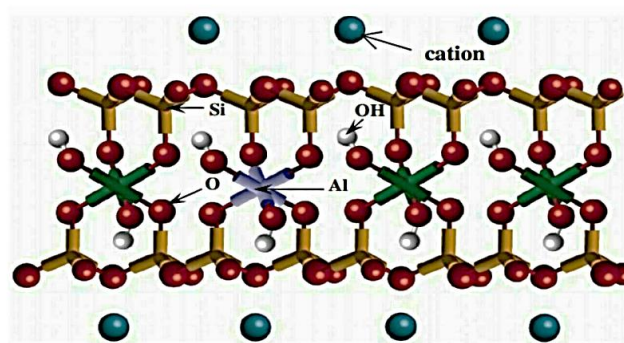
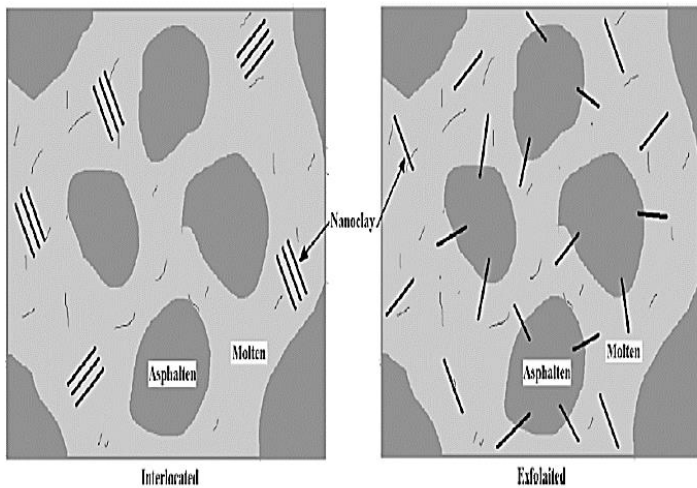
یک بررسی شماتیک روی تمرکز نواحی که علم و تکنولوژی نانو میتواند تکنولوژی روسازی آسفالتی را بهبود دهد در شکل ۱ نشان داده شده است (Van de Ven and et al., ۲۰۰۹).



شکل ۱- بخش های از روسازی برای کاربرد نانو مواد (Van de Ven and et al., ۲۰۰۸).

#### ۴- نانو رس

کانی های رس با ساختمان بلوری شکل خود، بسته به درجه و میزان خلوص، کاربرد وسیعی در تولید کامپوزیت ها دارند. بسیاری از رس ها از سیلیکات آلومین تشکیل شده اند که ساختاری صفحه ای شکل دارند و شامل سیلیکا  $SiO_2$  چهاروجهی پیوند یافته با آلومینا  $AlO_3$  هشت وجهی در شکل های مختلف هستند. شکل ۲ بیانگر ساختمان مونت مورینونت<sup>۲</sup> است. ضخامت لایه ها و صفحات رس حدود یک نانومتر و سطح ویژه بسیار بزرگ و معمولاً بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مترمربع است.



شکل ۲- ساختمان مونت مورینونت (Van de Ven and et al., ۲۰۰۹) شکل ۳- شماتیک قیر و نانو ذرات (Van de Ven and et al., ۲۰۰۹)

تأثیر اصلاح کننده های نانو رسی روی قیرهای پیر شده با رنومتربرشی دینامیکی اندازه گیری شده و آزمایشات تجربی مثل درجه نفوذ و نرمی روی آنها انجام شده است. اثر قیر اصلاح شده نانو رسی روی مخلوط با آزمایشات خستگی، مدول برجهنگی و تنش کششی غیر

<sup>۲</sup> Montmorillonite

مستقیم در دماهای پایین و خزش دینامیکی در دماهای بالا بررسی شده است. اصلاح با نانو رس مانند شکل ۳ می تواند خصوصیات قیر و مخلوط های آسفالتی مثل مقاومت در برابر فرسایش و خصوصیات مکانیکی را بهبود داده و این اصلاحات هنوز در سطح وسیع کاربردی نشده است (Van de Ven and et al., ۲۰۰۹). صفحات رس دارای بار الکتریکی منفی هستند. اما به دلیل وجود یون های مثبت در بین صفحات رس، با یکدیگر تجمع شده و ذره رس را شکل می دهند. رس مونت مورینون اصلاح نشده معمولاً قطبی است و به صورت طبیعی با بسیاری از انواع پلیمرها ناسازگار است.

آزمایشاتی در خصوص تأثیر مونت مورینون روی خصوصیات قیر اصلاح شده با پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن انجام شده است و با مخلوط های ذوب شده با مقادیر مونت مورینون سدیم و مونت مورینون آلی دریافت شده که اضافه کردن مونت مورینون سدیم و مونت مورینون آلی، ویسکوزیته قیر اصلاح شده استایرن-بوتادین-استایرن را افزایش داده است. به علاوه، قیر اصلاح شده نانورس و SBS، مدول مختلط بالاتر و زاویه فازی پایین تر با وجود سفت تر و الاستیک تر شدن قیر داشته است. بنابراین تعیین شده است که قیر اصلاح شده با نانورس، مقاومت شیارشدگی خوبی در مقایسه با قیر خالص با قیر اصلاح شده استایرن-بوتادین-استایرن داشته است. تعیین شده است که قیر اصلاح شده مونت مورینون ممکن است ساختار لایه ای را تشکیل داده در حالی که قیر اصلاح شده مونت مورینون آلی ممکن است ساختار پراکنشی بر اساس نتایج آزمایش اشعه ایکس تشکیل دهد (You and et al., ۲۰۱۷). سیلیکات های لایه بندی شده (نانورس) به طور گسترده ای در اصلاح شبکه های پلیمری برای تحقق بهبود لازم در خصوصیات مکانیکی، دمایی و تحمل پذیری مورد استفاده قرار گرفته شده است.

محققان دریافتند قیر اصلاح شده با نانورس، مدول سفتی را افزایش داده و مقاومت شیارشدگی، تنش کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی و مقاومت مارشال را بهبود بخشیده، اما عملکرد خستگی در دماهای پایین کاهش می دهد (Van de Ven and et al., ۲۰۰۹). همچنین نانو رس ها توان لازم برای بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی را در دماهای بالا و پایین داشته و اثرات نانورس را به این صورت گزارش کرد: ۱- ویسکوزیته قیر افزایش یافته و از این جهت، مقاومت در برابر تغییر شکل های دایمی در دمای بالا، افزایش می یابد. ۲- مدول برشی مختلط، افزایش یافته و بنابراین مقاومت در برابر تغییر شکل های دایمی در دماهای بالا، بهبود می یابد. ۳- اگر نانورس در درصد های بیشتر از ۴٪ افزوده گردد مقاومت در برابر ترک های دمایی پایین، افزایش می یابد (Beale and et al., ۲۰۱۷).

با افزودن نانورس به قیر، زاویه فاز کاهش یافته که می تواند منجر به بهبود رفتار ارتجاعی قیر شود. همچنین با افزایش نانو رس به قیر مدول مختلط برشی قیر افزایش یافته که این مسئله نشان دهند اثر سخت شدگی قیر بر اثر افزودن نانو رس می باشد (Taherkhani and et al., ۲۰۱۳). نانو رس مدول برشی و پیچشی، ویسکوزیته و مقاومت ترک خوردگی در دماهای پایین را بهبود بخشد (You and et al., ۲۰۱۱).

گایل با افزودن ۲٪ نانورس، عمر خستگی نمونه های آسفالتی را در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تا ۲ برابر افزایش داد. اما در دمای ۵ درجه سانتیگراد نانورس بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی تأثیر منفی گذاشته و باعث کاهش ۲۰ درصدی آن شده است (Ghile, ۲۰۰۶). و با افزودن ۷٪ نانورس عمر خستگی مخلوط آسفالتی را در دمای ۲۵ درجه تا ۱/۷ برابر افزایش داده اند (Jahromi and et al., ۲۰۱۰).

## ۵-اکسید آهن

اکسیدهای آهن ترکیب های عموماً طبیعی بوده و به سادگی در آزمایشگاه قابل ستر هستند. انواع اکسید آهن شامل ۱۶ نوع اکسید، هیدروکسید و اکسید هیدروکسید است. این مواد معدنی نتیجه واکنش های آبی در شرایط مختلف PH است. این مواد ترکیب پایه ای O<sub>۲</sub>Fe و یا OH را دارا می باشند ولی ظرفیت آهن و ساختار کلی کریستال متفاوت است. برخی اکسیدهای مهم آهن عبارتند از گوتیت، آکسانیت، لیپیدوکروسیت، مگنتیت و هماتیت. نانو ذرات اکسید آهن شامل انواع ذرات مگهمیت (Fe<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>-γ) و یا مگنتیت (Fe<sub>۳</sub>O<sub>۴</sub>) با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می شود. نانو ذرات با ورود در مهندسی عمران تحول بزرگی در ساخت مواد جدید، آزمایشات و وسایل آزمایشگاهی ایجاد کرده که در پژوهش شفافبخش و همکارانش کاربرد نانو اکسید آهن (Fe<sub>۳</sub>O<sub>۴</sub>) در قیر در راستای اصلاح خصوصیات عملکردی و

مقاومت در برابر شیارشدگی بررسی شد. درصد‌های مشخص ۲ و ۴ و ۶ درصد نانو اکسید آهن با توزیع یکنواخت در قیر باعث کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و ویسکوزیته چرخشی شده و درجه اشتعال قیر نیز افزایش یافت (Shafabakhsh and et al., ۲۰۱۵).

استفاده از نانو اکسید آهن در کاهش پتانسیل خرابی رطوبتی در نمونه های مخلوط آسفالتی نسبت به نانو اکسید آلومینیوم مشهود تر بوده است (Rezvan and et al., ۲۰۱۵) در دانشگاه سمنان در مطالعه ای به بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید آهن بر خصوصیات شیارشدگی مخلوط های آسفالت ماستیک درشت دانه پرداخته شده است. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر نانو اکسید آهن بر شیارشدگی و تغییر شکل های ماندگار مخلوط های آسفالت ماستیک درشت دانه، آزمایشات خزش دینامیکی و شیارشدگی جای چرخ صورت پذیرفته است. نتایج نشان داد که استفاده از ۰/۹٪ نانو اکسید آهن می تواند تا حد قابل توجهی مقاومت مخلوط های آسفالت ماستیک درشت دانه را در برابر شیارشدگی و تغییر شکل های ماندگار بهبود بخشد (Kafashzadeh, ۲۰۱۴).

## ۶- فیبرهای کربنی

در چند دهه اخیر استفاده از نانو فیبرکربن (CNF)<sup>۳</sup> به دلیل سطح ویژه زیاد، مقاومت کششی زیاد و چسبندگی بین سطحی مطلوب، به عنوان پرکننده کامپوزیت ها توجه محققان را جلب کرده است (Ozkan and et al., ۲۰۱۲). قطر آنها اغلب بین ۵ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است و طول آن ها به ۵ تا ۱۰۰ میکرومتر می رسد (Izadi and et al., ۲۰۱۲). مخلوط آسفالت حاوی فیبر با مخلوط اولیه مقایسه شده است که نشان می دهد مقدار اتصال دهنده بهینه، مانند افزودن یک دانه بندی خوب به مقدار جزئی افزایش می یابد. مقدار قیر بستگی به جذب و مساحت سطح فیبرها دارد و نه تنها انواع مختلف فیبر بلکه غلظت فیبرهای مختلف نیز تاثیر می گذارد (Mills, ۱۹۸۲).

اضافه کردن فیبر به مخلوط انعطاف پذیر مقاومت آن در برابر ترک خوردگی بهبود می بخشد (Jiang, ۲۰۰۹). نانو فیبر های کربن با آسفالت مخلوط می شوند و خواص خستگی و ویسکو الاستیک با نانو فیبرکربن اصلاح کننده اتصال دهنده های آسفالت مورد بررسی قرار گرفته اند. مقاومت شیار شدگی آسفالت اصلاح شده و همچنین عمر خستگی مخلوط آسفالت اصلاح شده با نانوفیبرهای کربن افزایش می یابد (Khattak and et al., ۲۰۱۱ & Khattak and et al., ۲۰۱۲). اصلاح اتصال دهنده آسفالت با پلیمر نانو ذرات اصلاح شده و نانو ذرات اصلاح نشده انجام شده است و تصاویر میکروسکوپی از اتصال دهنده های آسفالت بررسی شده است. استفاده از نانو ذرات اصلاح شده مدول برشی پیچیده از اتصال دهنده های آسفالت را افزایش می دهد اما اضافه کردن پلیمر نانو ذرات اصلاح شده پارامتر را کاهش می دهد (Yao and et al., ۲۰۱۲) در تحقیق انجام شده پلی سیلوکسان که مونیتور بلونیت و میکرو فیبرهای کربن را اصلاح کرده است برای اصلاح کردن اتصال دهنده های آسفالت و مخلوط ها مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه بین مخلوط آسفالت اولیه و مخلوط آسفالت اصلاح شده، مقاومت کششی، مقاومت شکستگی، بهبود می یابد و حساسیت رطوبتی و خطر ترک خوردگی کاهش می یابد (Xianming, ۲۰۱۲).

در مطالعاتی به منظور افزایش ظرفیت خودترمیمی مخلوط آسفالتی از طریق افزایش دما، فرایند گرمایش ماکروویو استفاده شد. به منظور افزایش بازدهی گرمایش توسط ماکروویو، مقادیر مختلف فیبر کربن و الیاف آهن به مخلوط آسفالتی اضافه شد. طبق نتایج آزمایش تعیین نوع و درصد الیاف بهینه، مشخص گردید که نمونه های حاوی فیبر کربن بازدهی بهتری نسبت به نمونه های حاوی الیاف آهن دارند. همچنین، درصد بهینه فیبر کربن برابر ۰/۲ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی به دست آمده است. علاوه بر این، به منظور بررسی فرایند خودترمیمی در مخلوط آسفالتی، نمونه های ساخته شده تحت آزمایش تعیین عمر خستگی، آزمایش دوام کانتابرو و آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم قرار گرفتند. نتایج آزمایش ها نشان داد که اعمال گرمایش سبب افزایش میزان ترمیم عمر خستگی و مقاومت کششی می گردد و نمونه های تخریب شده می توانند بخشی از خصوصیات از دست رفته خود را بازیابند. همچنین با افزایش دمای گرمایش، میزان ترمیم افزایش می یابد. علاوه بر

<sup>۳</sup> Carbon nanofiber

این، مشخص گردید که گرمایش نایستی خیلی دیر اعمال گردد. نتایج آزمایش دوام کانتابرو نشان می دهد که چنانچه در بین دوران ها گرمایش اعمال گردد، به دلیل افزایش چسبندگی میان قیر و سنگدانه، شاهد کاهش جدایی سنگدانه خواهیم بود (Hsami and et al., ۲۰۱۶).

همچنین قابلیت خودترمیمی القایی ترک در مخلوط آسفالتی اصلاح شده با کربن فعال (AC) را از طریق گرمایش از طریق امواج ماکروویو را مورد بررسی قرار داده است. این پژوهش میتواند نتیجه گرفت که کربن فعال عملکرد مخلوط آسفالتی در مقاومت در برابر رشد ترک در دمای میانی را بهبود داده است. علاوه بر این نتایج این پژوهش نشان داد که کربن فعال به عنوان افزودنی قیر و ماده ای با قابلیت گرمایش القایی توانست به صورت چشم گیری گرمایش القایی و نیز شاخص خودترمیمی القایی مخلوط آسفالتی ساخته شده با انواع مختلف سنگدانه را بهبود بخشد (Khattak and et al., ۲۰۱۸).

## ۷- نتیجه گیری

با مرور نتایج محققان در زمینه نانو ذرات می توان دریافت که فناوری نانو پتانسیل بالایی در بهبود عملکرد روسازی و سخت و ساز مخلوط آسفالت در آینده می باشد. و در خصوص تاثیر افزودنی نانورس و اکسید آهن و فیبرهای کربن به قیر به عنوان یک ماده ترموپلاستیک سبب بهبود خواص رئولوژی شامل درجه عملکرد، ضد عریان شدگی چسبندگی و پیوستگی و مقاومت در برابر خستگی مخلوط آسفالت می شود و سبب می شود مخلوط پس از سیکل های تغییرات دما مقاومت بالاتری در برابر رطوبت داشته باشد.

۱- نانو رس می تواند مدول برشی و پیچشی، ویسکوزیته و مقاومت ترک خوردگی در دماهای پایین و رفتار ارتجاعی در مخلوط آسفالت را بهبود بخشد. و باعث پایداری و افزایش مقاومت در برابر پیرشدگی بیشتر است.

۲- نانورس در مقایسه با دیگر افزودنی های متداول چون نانواکسید آهن و نانو فیبرهای کربن، تاثیر محسوس تری بر مشخصات رفتاری دارد. به طوری که با درصد بسیار کمی نانورس، ویسکوزیته و غلظت نانوکامپوزیت قیر - نانورس به شدت افزایش می یابد.

۳- نانواکسید آهن می تواند مقاومت مخلوط های آسفالت را در برابر شیارشدگی و تغییر شکل های ماندگار بهبود بخشد.

۴- نانو فیبرهای کربن می تواند باعث افزایش چسبندگی میان قیر و سنگدانه در مخلوط آسفالت گردد.

با توجه به دسترسی آسانتر در آینده نانورس و اکسید آهن و فیبرهای کربن می تواند به عنوان اصلاح کننده ای مناسب برای مخلوط آسفالتی مطرح گردد.

## مراجع

Abdullah, M., Hainin, M., Yusoff, N., Zamhari, K., & Hassan, N. (۲۰۱۶). Laboratory evaluation on the characteristics and pollutant emissions of nanoclay and chemical warm mix asphalt modified binders. *Construction and Building Materials*, ۱۱۳, ۴۸۸-۴۹۷. (Persian)

Beale, Julian Mills., You, Zhanping. (۲۰۱۱). *Nanoclay-Modified Asphalt Binder Systems*, *Nanotechnology in Civil Infrastructure*, pp. ۲۵۷-۲۷۰, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Drexler, K. E. (۱۹۸۱). Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. ۵۲, ۷۵-۷۸

Ghaffarpour, S., Andalibizade, B., Vossoug, S. (۲۰۱۰). Engineering Properties of nanocly modified asphalt concrete mixtures, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume ۳۵, Number ۱B. (Persian)

Ghile, D, B. (۲۰۰۶). Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures, Delft, The Netherlands: Delft University of Technology.

Hsami, S., Hsami, A., Ghalipour Goodarzi, M. (۲۰۱۶). Investigation of the effect of microwave heating on self- healing of asphalt mixtures containing conductive fibers *Transportation Infrastructure Engineering*, Second Year, No. ۴. (Persian)

Izadi, N., Rashidi, A., Borghei, M., Karimzadeh, R., and Tofigh, A. (۲۰۱۲). Synthesis of carbon nanofibres over nanoporous Ni-MgO catalyst: influence of the bimetallic Ni-(Cu, Co, Mo) MgO catalysts. *Journal of Experimental Nanoscience*, ۷(۲): ۱۶۰-۱۷۳. (Persian)

Jahromi, S.G., Andalibizade, B., S. Vossough, (۲۰۱۰). Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, ۳۵(۱B) ۸۹-۱۰۳. (Persian)

Jiang, Yi. And Rebecca S. McDaniel. (۲۰۰۹). Application of Cracking and Seating and Use of nanofibers to Control Reflection Cracking. *Transportation Research Record* no. ۱۹۹۳: ۱۵۰-۱۵۹.

Kafashzadeh, S. (۲۰۱۴) "Evaluation of grooving behavior in coarse-grained mastic asphalt mixtures modified with nano-iron oxide", M.Sc. Thesis, Semnan University. (Persian)

Karimi, M., Jahanbakhsh, H., Jahangiri, B., and Moghadas Nejad, F. (۲۰۱۸). Induced heating-healing characterization of activated carbon modified asphalt concrete under microwave radiation. *Construction and Building Materials* ۱۷۸ ۲۵۴-۲۷۱. (Persian)

Khattak, M.J., Khattak, A., and Rizvi, H, R. (۲۰۱۱). *Mechanistic Characteristics of Asphalt Binder and Asphalt Matrix Modified with Nano-Fibers*. Dallas, TX: ASCE. (Persian)



- Khattak, M.J., Khattak, A., and Rizvi, H, R. Pangea Zhang, (۲۰۱۲). The impact of carbon nano- fiber modification on asphalt binder rheology. *Construction and Building Materials*, ۳۰(۰): ۲۵۷-۲۶۴. (Persian)
- Larsen-Basse, J., Chong, K.P. (۲۰۰۵). Nano-materials in construction and rehabilitation, Contributions and perspectives of the US National Science Foundation. In: Proc. ۲nd Int. Symp. On Nanotechnology in Construction, Bilbao, Spain, and pp. (۱۷-۱۹).
- Li, R., Xiao, F., Amir Khanian, S., You, Z., & Huang, J. (۲۰۱۷). Developments of nano materials and technologies on asphalt materials –a review. *Construction and Building Materials*, ۱۴۳, ۶۳۳-۶۴۸.
- Mills, D.R. and Keller Jr., T. (۱۹۸۲). The Effectiveness of Synthetic fiber Reinforced Asphalt Concrete. ۴۶- ۵۸.
- Ozkan, T., Chen, Q., and Chasiotis, I. (۲۰۱۲). Interfacial strength and fracture energy of individual carbon nanofibers in epoxy matrix as a function of surface conditions. *Composites Science and Technology*, ۷۲(۹): ۹۶۵-۹۷۵.
- Rezvan, M., Izadi, A. (۲۰۱۵). Investigation of the effect of iron and aluminum monoxides on reducing the moisture sensitivity of hot asphalt mixture" *Transportation Infrastructure Engineering, First Year, No. ۴*. (Persian)
- Shafabakhsh, Gh. Tanzadeh, And Ali Akbari, M. (۲۰۱۵) "Effect of iron oxide nanoparticles ( $Fe_2O_3$ ) on the performance properties of bitumen and the rutting parameter of hot modified asphalt samples". ۷th Iranian Bitumen and Asphalt Conference. (Persian)
- Simchi, A. (۲۰۰۸). Introduction to Nanoparticles, Sharif University Press, ۲۸۰ pages. (Persian)
- Taherkhani, H . Shafiji matak. M. And Amini, H. (۲۰۱۳) "Investigation of the effect of adding modified nanoclay to bitumen on the resistance to grooving phenomenon using DSR experiment". ۷th National Congress of Civil Engineering, Zahedan. (Persian)
- Taniguchi, N. (۱۹۷۴). On the basic concept of nanotechnology. *Proceedings of the International Conference on Production Engineering*. Tokyo. ۱۸-۲۳.
- Van de Ven, M.F.C., Molenaar, A.A.A., Besamusca, J., Noordergraaf, J., (۲۰۰۹). *Nanotechnology for binders of asphalt mixtures*, Taylor & Francis Group, London, ISBN ۹۷۸-۰-۴۱۵-۵۵۸۵۴-۹.
- Van de Ven, M.F.C., Molenaar, A.A.A., Besamusca, J., Noordergraaf, J. (۲۰۰۸). Nanotechnology for binders of asphalt fixtures, In: Proc. Road for Life, Copenhagen, Denmark, and pp. ۸۴۲-۸۵۳.

Xianming, S., Shu W. G., Michelle A.; Seth S. and Zhanping Y. (۲۰۱۲). Exploring the Interactions of Chloride Deicer solutions with Nano modified and Micro modified Asphalt Mixtures Using Artificial Neural Networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ۲۴(۷): ۸۰۵-۸۱۵.

Yao, H., et al. (۲۰۱۲). Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer modified nanoclay. *Construction and Building Materials*, ۳۵(۰): ۱۵۹-۱۷۰.

You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S.W. (۲۰۱۱). Anoclaymodified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*. ۲۵(۲): ۱۰۷۲-۱۰۷۸.