نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal(CPJ)
www.cpjournals.com

Investigation of the effect of different nanoparticles on the properties of factory cold mix asphalt produced with emulsion bitumen

Hadi Azizi[۱]*,Hasan divandari [۲]

۱- Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran
Email: Hadi.azizi@yahoo.com

۲- Department of Civil Engineering, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran*
Email: h.divandari@gmail.com

ABSTRACT

Recently, with the advent of nanotechnology and the manufacture of nanoparticles, a huge change has taken place in the functional demands of materials. The role of the pavement surface layer, which is made of asphalt mixtures, in the performance of pavements is inevitable. The use of nanotechnology in the construction of transportation infrastructure is roughly equivalent to the human effort to send humans to the moon in the ۱۹۶۰s. In ۲۰۰۵, the idea of building asphalt for highways that could repair themselves seemed far-fetched to many. Therefore, the asphalt industry still needs a transformation so that people can see the possibilities of nanotechnology and understand its benefits. Due to the compositional nature of the asphalt mix, the potential for improvement in the mechanical properties of asphalt using nanotechnology is very important. Modification of nanomaterials began with engineering changes in the molecular structure of asphalt with the aim of influencing the properties of these materials. Nanoscale modifiers can react with bitumen to change the chemical and molecular structure of the bitumen, which can lead to better asphalt performance. In recent years, the use of nanoparticles in changing the behavioral and chemical properties of asphalt has been considered by researchers and researchers have conducted numerous experiments to study these properties in order to improve the properties of asphalt mixtures made with nanoparticles, but this science still needs To more extensive research in order to achieve more comprehensive and accurate results. This paper reviews the studies on the effect of different nanoparticles on the production of cold asphalt in factories produced with emulsion bitumen.

Keywords*: Nanotechnology, Catalytic reaction, Asphalt industry, Molecular structure*

All rights reserved to Civil & Project Journal.

نشریه عمران و پروژه (Civil & Project Journal(CPJ)) ISSN:۲۶۷۶-۵۱۱X www.cpjournals.com
سال دوم، دوره ۲، شماره ۱۲، اسفند ۱۳۹۹،شماره پیاپی ۲۲،صفحه ۴۰ تا صفحه ۵۷

بررسی اثر نانو ذرات مختلف بر خصوصیات آسفالت سرد کارخانه‌ای تولید شده با قیر امولسیون

هادی عزیزی[۱*]، حسن دیواندری [۲]

[*]۱- گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران
Hadi.azizi@yahoo.com
۲ گروه مهندسی عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر ، ایران
h.divandari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۱۲/۰۹

چکیده

اخیرا با ظهور فناوری نانو و ساخت نانوذرات تحولی عظیم درخواص عملکردی مصالح ایجاد شده است. نقش لایه رویه روسازی ها که از جنس مخلوطهای آسفالتی می باشد در عملکرد روسازی ها غیر قابل اجتناب می باشد. استفاده از فناوری نانو در ساخت زیربناهای مربوط به حمل و نقل، تقریباً معادل با تلاش بشر برای فرستادن انسان به ماه در سال ۱۹۶۰ است.در سال ۲۰۰۵ ایده ساخت آسفالتی برای بزرگراه‌ها که بتوانند خودشان را تعمیر کنند برای بسیاری دور از ذهن به نظر می‌رسید. بنابراین هم اکنون نیز صنعت آسفالت به یک تحول نیاز دارد تا مردم بتوانند امکانات فناوری نانو را دیده و مزایای آن را درک کنند. با توجه به ماهیت ترکیبی مخلوط آسفالت، پتانسیل بهبود در خصوصیات مکانیکی آسفالت با استفاده از فناوری نانو بسیار مهم است. اصلاح نانو مواد با تغییرات مهندسی در ساختار مولکولی آسفالت با هدف تاثیر بر خصوصیات این مواد آغاز شد. اصلاح کننده های مقیاس نانو می توانند با قیر واکنش دهند و موجب تغییر شیمیایی و ساختار مولکولی قیر شوند که این واکنش کاتالیستی می تواند موجب عملکرد بهتر آسفالت شود. در سال های اخیر نیز استفاده از نانوذرات در تغییر خصوصیات رفتاری و شیمیایی آسفالت مورد توجه محققان قرار گرفته است و پژوهشگران با آزمایشات متعدد در بررسی این خصوصیات به منظور بهبود خواص مخلوط آسفالتی ساخته شده با نانو ذرات می باشند اما همچنان این علم نیاز به پژوهش های گسترده تری به منظور دستیابی به نتایج جامع تر و دقیق تری دارد. این مقاله به بررسی مطالعات صورت گرفته بر روی اثر نانو ذرات مختلف در تولید آسفالت سرد کارخانه ای تولید شده با قیر امولسیون می پردازد.

کلمات کلیدی: فناوری نانو، واکنش کاتالیستی، صنعت آسفالت، ساختار مولکولی

۱- مقدمه

استفاده از فناوری نانو از سال ۱۹۹۰ در علوم مختلف مانند محیط زیست، انرژی، بیوتکنولوژی و غیره افزایش یافته است(یو و همکاران ،[۱] ۲۰۰۹ ؛ کوپلند و همکاران،[۲] ۲۰۱۱ ؛ شفیعی و همکاران ،[۳] ۲۰۱۱ ؛ ترونس ستا و همکاران ،[۴] ۲۰۲۰). امروزه نیز استفاده از فناوری نانو به یک مزیت بزرگ در بین محققین، مهندسین و عموم مردم تبدیل شده است (زو و همکاران ،[۵] ۲۰۰۴ ؛ سوبولف و همکاران ،[۶] ۲۰۰۶ ؛ شو و همکاران ،[۷] ۲۰۰۷ ؛ سالرنو و همکاران ،[۸] ۲۰۰۸ ؛ تگارت،[۹] ۲۰۰۹). به طور کلی هدف از استفاده فناوری نانو، ساخت اشیاء از طریق درک و کنترل بر روی اجزای تشکیل دهنده ی ساختار همه ی اشیاء فیزیکی (یعنی اتم، مولکول و نانو ساختارها) می‌باشد که این تکنولوژی تاثیر زیادی بر روی زندگی در طی چند دهه آینده خواهد داشت. از این رو فناوری نانو به سرعت در حال ظهور به عنوان انقلاب صنعتی در قرن ۲۱ می باشد(زو و همکاران ، ۲۰۰۴ ؛ گلن،[۱۰] ۲۰۰۶ ؛ ممالیس ،[۱۱] ۲۰۰۷) و به احتمال زیاد فناوری نانو روش طراحی و ساخت اشیا را تقریبا تغییر خواهد داد (شفیعی و همکاران ، ۲۰۱۱ ؛ ترونس ستا و همکاران ،۲۰۲۰). نانوذرات ترکیباتی در مقیاس نانو (nm ۱۰۰-۱) می‌باشند که دارای خواص ویژه‌ای از جمله سطح ویژه بالا و گروه های عاملی مناسب جهت اتصال با سایر ترکیبات هستند (شو و همکاران ، ۲۰۰۷ ؛ سالرنو و همکاران، ۲۰۰۸). تا کنون نیز به منظور تهیه و استفاده از این ذرات تلاش‌های بسیار زیادی صورت گرفته است. اولین بار نانوکامپوزیت پلی آمید رس با کیفیت بسیار خوبی در مرکز تحقیقات تویوتا تهیه شد، پس از آن نانوکامپوزیت پایه پلیمر در دانشگاه و صنعت مورد استفاده قرار گرفت (یو وهمکاران، ۲۰۱۱). در آسفالت نیز این ذرات به شکل‌های مختلفی مانند مایع، شبه جامد و یا جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد. آسفالت که مخلوط پیچیده‌ای با رنگ مشکی و یا تیره می‌باشد و شامل آسفالت سرد و گرم است، از هیدروکربن‌هایی با وزن مولکولی متفاوت و مشتقات غیر فلزی تشکیل شده است (پلاتی و همکاران،[۱۲] ۲۰۱۹ ؛ ژنگ و همکاران ،[۱۳] ۲۰۲۰ ؛ آرتلی و همکاران ،[۱۴] ۲۰۲۰). مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای با امولسیون قیری یا آسفالت سرد پیش ساخته، مخلوطی از مصالح سنگی گرم نشده و امولسیون قیری می‌باشد که در کارخانه آسفالت تولید می‌گردد. آسفالت سرد پیش ساخته را می توان بلافاصله پس از تولید، در سطح راه پخش یا آن را برای مدتی در کارگاه انبار نمود. به واسطه این ویژگی، مخلوط آسفالتی سرد کارخانه ای را می توان در مسافت های طولانی حمل و پخش نمود. این مخلوط ها ممکن است برای اساس قیر، آستر، رویه، تراز نمودن، تعریض و لایه های روکش استفاده شوند و به ویژه برای ارتقای درجه و تقویت روسازی های با ضخامت کم به کار می روند (سانتاوچی و هایاشیدا، [۱۵] ۱۹۸۳). از مزایای مهم مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای با امولسیون قیری نسبت به مخلوط های آسفالت گرم می‌توان به مقرون به صرفه بودن، میزان تولید بالای این مخلوط‌ها، غیر آلاینده بودن، ایمنی در نواحی با خطر آتش سوزی زیاد مثل جنگل ها و مراتع اشاره نمود (رهنمودهای بازیافت سرد در محل ، ۱۹۹۱). به‌منظور تهیه مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای می توان از کارخانه های تولید آسفالت به روش مرحله ای یا پیوسته استفاده نمود (توربجون و همکاران،[۱۶] ۲۰۲۰). ملزومات کارخانه آسفالت سرد به کیفیت و نوع مخلوط آسفالت که قرار است تولید شود، وابسته است که به طور معمول کارخانه آسفالت سرد شامل مخلوط کن، مخزن ذخیره، وسیله اندازه گیری، لوله های ارتباطی و تجهیزات پاشش امولسیون قیری ، لوله های تغذیه آب، کنترلهایی برای تنظیم و ثبت اجزای مختلف، دستگاه تنظیم و توزین مصالح سنگی مختلف، سیستم تسمه نقاله، مخازن مصالح سنگی، سرندهای لرزنده و مخازن ذخیره مخلوط آسفالت است (فلیس جولیانی و همکاران ، ۲۰۰۴ ؛ توربجون و همکاران ، ۲۰۲۰). به‌طور معمول آسفالت، ماده چسبنده آلی است که جهت ضد آب سازی، مقاوم‌سازی

[۱] Yu et al
[۲] Copeland et al
[۳] ; Shafii et al
[۴] Terrones-Saeta et al
[۵] Zhu et al
[۶] Sobolev et al
[۷] Shoo et al
[۸] Salerno et al
[۹] Tegart
[۱۰] Glenn
[۱۱] Mamalis
[۱۲] Plati et al
[۱۳] Zheng et al
[۱۴] Artley et al
[۱۵] Santaucci and Hayashida
[۱۶] Torbjörn et al

نسبت به رطوبت و مشتقات فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصلاح آسفالت پایه نیازمند ارتقای کیفیت مواد آن می‌باشد که این افزایش کیفیت شامل بهبود چسبندگی، میزان حساسیت به دما، ویژگی‌های اصطکاک، مقاومت در برابر اکسیداسیون و فرسودگی، میزان دوام و پایداری آن است (کوتریل و دریبل،[۱۷] ۲۰۱۵؛شانبرا و همکاران،[۱۸] ۲۰۱۸؛دی کامپوز و همکاران،[۱۹] ۲۰۱۹؛ رودریگز-فرناندز و دیگران ،[۲۰] ۲۰۲۰ ؛ لانگوان و همکاران ، ۲۰۲۰). امروزه نانو ذرات به تدریج زمینه ورود فناوری نانو به منظور بهبود خصوصیات آسفالت را فراهم کرده است. در آگوست سال ۲۰۰۶ یک کارگاه آموزشی با هدف استفاده از فناوری نانو برای ارتقای آسفالت در بنیاد ملی علوم آمریکا (NSF) برگزار شد که علوم نانو مواد اسفالت در این کارگاه معرفی گردید (لانگوان و همکاران،[۲۱] ۲۰۲۰). نتایج این کارگاه نشان داد که علوم و فناوری نانو می‌تواند منجر به ارتقای فناوری آسفالت گردد. استفاده از ذرات نانو شامل رزین، لاستیک، پلیمرها، سولفور، کمپلکس فلزی، فیبرها و افزودنی‌های نانو پلیمر مختلفی به منظور بهبود خصوصیات آسفالت گرم مورد استفاده قرار می‌گیرد (دی کامپوز و همکاران، ۲۰۱۹؛ رودریگز-فرناندز و دیگران ،۲۰۲۰) اما مطالعات بسیار محدودی در زمینه استفاده از این فناوری در در تولید آسفالت سرد کارخانه-ای تولید شده با قیر امولسیون انجام شده است. در این مقاله مروری، اثر ذرات نانو مختلف در تولید آسفالت سرد کارخانه‌ای تولید شده با قیر امولسیون مورد بررسی قرار گرفت.

۲-فناوری نانو

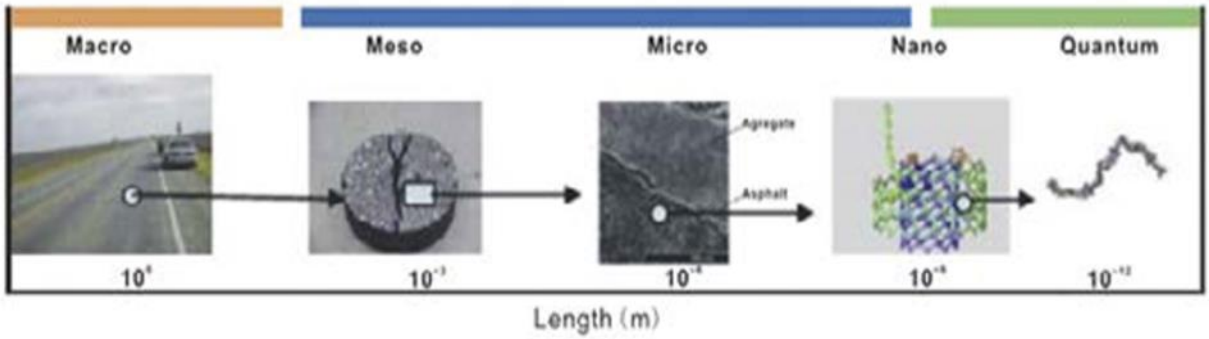
فناوری نانو در علوم و مهندسی برای طراحی و ساخت مواد در مقیاس نانو، ترکیب، شناسایی و کاربرد مواد و دستگاه هایی که کوچکترین سازمان عملکردی آنها حداقل در یکی از ابعاد در مقیاس نانو که یک میلیاردم از متر است، کاربرد دارد (یو و همکاران ، ۲۰۰۹ کوپلند و همکاران ، ۲۰۱۱ ؛ شفیعی و همکاران ، ۲۰۱۱). به طور کلی، ذرات نانو دارای ساختار کروی، ورقه ای، میله ای و یا خوشه ای می باشند. تعداد اتم های موجود در یک خوشه تا حد زیادی به منظور افزایش قطر افزایش پیدا می کند. در مجموع در یک خوشه به قطر ۱ نانومتر ۱۳ اتم وجود دارد و در یک خوشه به قطر ۱۰۰ نانومتر می تواند بیش از ۱۰۷ اتم قرار گیرد. خوشه ها ممکن است یک ساختار متقارن داشته باشند و یا اینکه ممکن است شکل نامنظم ویا غیر مشخصی داشته باشند (چن،[۲۲] ۲۰۰۶).

فناوری نانو اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط یک مهندس ژاپنی به نام نوریو تانیگوچینوریو تانیگوچیمعرفی گردید (تانیگوچی،[۲۳] ۱۹۷۴). وی دقت ساخت قطعات در محدوده ی ۱ تا ۱۰۰ نانومتر را توصیف نمود. این فناوری در اصل یک تکنولوژی جدید می باشد که فراتر از کنترل مواد و مهندسی در مقیاس میکرومتر است. سپس در سال ۱۹۸۱، درکسلر به یک رویکرد جدید از ریز ذرات اشاره نمود که بیشتر مربوط به معنا و برنامه های کاربردی امروز است (درکسلر،[۲۴] ۱۹۸۱). در این بین محققین زیادی برای دستکاری اتم به اتم، مولکول به مولکول و یا هر بلوک ساختاری نسبتا ساده دیگر و سازماندهی آن‌ها برای رسیدن به ساختار قابل اجراء از ابزار گسترده و پیچیده ای استفاده نمودند که چنین رویکردی به طراحی فوق العاده زیبا با نام مونتاژ مولکولی ختم شد (زو و همکاران ، ۲۰۰۴ ؛ سالرنو و همکاران ، ۲۰۰۸ ؛ استین،[۲۵] ۲۰۰۸ ؛ سانچز و سوبولف ،[۲۶] ۲۰۱۰ ، اسلام و میازاکی ،[۲۷] ۲۰۱۰ ، پاچکو و جلالی ،[۲۸] ۲۰۱۱). به طور کلی در مهندسی روسازی و عملیات ساخت مخلوط های آسفالتی، از میکرو ذرات یا اصلاح کننده‌ها با روش خشک یا مرطوب که یک روش معمول به منظور بهبود کارایی روسازی‌ها است، استفاده می کنند (میازاکی و اسلام ، ۲۰۰۷ ؛ بیسترزجوسکاو همکاران ،[۲۹] ۲۰۰۹ ؛ یو و همکاران ، ۲۰۱۱). با

[۱۷] Cottrill and Derrible
[۱۸] Shanbara et al
[۱۹] De Campos et al
[۲۰] Rodríguez-Fernández et al
[۲۱] langovan et al
[۲۲] Chen
[۲۳] Taniguchi
[۲۴] Drexler
[۲۵] Steyn
[۲۶] Sanchez and Sobolev
[۲۷] Islam and Miyazaki
[۲۸] Pacheco and Jalali
[۲۹] Bystrzejewska

این حال، در سال های اخیر مهندسین و محققین تلاش های بسیار زیادی به منظور کشف عملکرد و خواص مخلوط های آسفالتی با استفاده از نانو مواد انجام داده اند. شکل ۱ سیر تکاملی کاهش مقیاس طولی آسفالت را از مقیاس ماکرو به مقیاس مزو، میکرو، نانو و کوانتوم را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود میکروساختار تعیین کننده خواص ماکرو می باشد (میازاکی و اسلام ، ۲۰۰۷ ؛ بیسترزجوسکاو همکاران ، ۲۰۰۹؛ سانچز و سوبولف ، ۲۰۱۰).

به طور کلی پژوهشگران از ابزارهای تکنیکی مناسب جهت تهیه نانو مواد یکنواخت و برای ایجاد پراکندگی یکنواخت آن‌ها در ماتریکس آسفالت، استفاده می‌کنند. متاسفانه، نانو مواد به راحتی می‌تواند با هم تجمع کند که این امر موجب تفکیک نقطه‌ای می‌شود. این نتایج در میکروساختارهای ناهموار کامپوزیت، منجر به انحراف میدان نیرو شده و در نهایت جنبه‌های مثبت نانو مواد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، که گاهی منجر به اثرات مشخصه منفی می‌شود. نبود پراکندگی یکنواخت در نانو مواد افزوده شده برای دوره‌های طولانی (پایداری ضعیف)، منجر به تغییر تدریجی میکرو ساختار کامپوزیت چه در زمان حمل و نقل و ذخیره‌ســـازی و چه در زمان استفاده در راه، خواهد شد (ترونس ستا و همکاران، ۲۰۲۰).



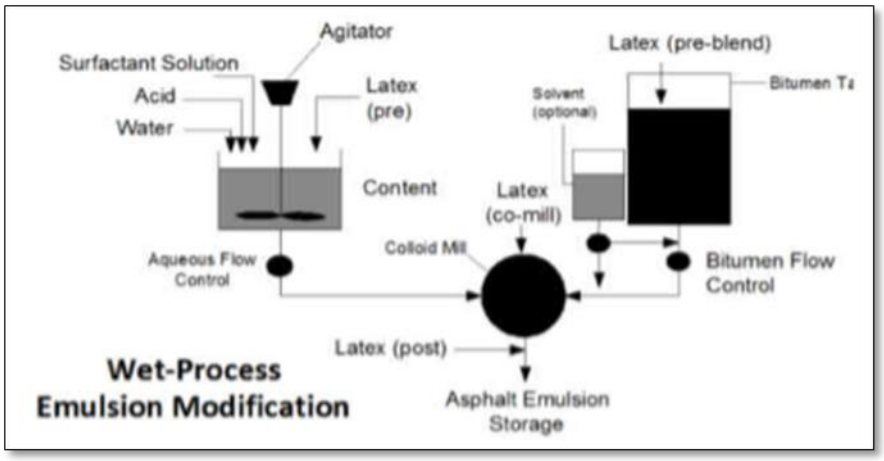
شکل۱: سیر تکاملی ابعاد مختلف آسفالت (ترونس ستا و همکاران، ۲۰۲۰)

۳- نانو ذرات مورد استفاده در بهبود عملکرد آسفالت

در تحقیقات اخیر پژوهشگران، از ذرات نانو به طور وسیعی، به منظور بهبود عملکرد روسازی، بخصوص در اصلاح مخلوط آسفالتی در روسازی انعطاف پذیر استفاده کرده اند. عمده تحقیقات به روز در مهندسی روسازی، در زمینه بهبود عملکرد قیر و مخلوط های آسفالتی، بیشتر مرتبط با اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی با انواع مختلف نانو ذرات از قبیل نانو رس، نانو آهک هیدراته و نانو ذارت کربن است (یو و همکاران ، ۲۰۰۹ ؛ آدری،[۳۰] ۲۰۱۱ ؛ عبدالزهر ،[۳۱] ۲۰۱۵). مطالعات انجام شده نشان دادند که امولسیون قیر را می توان با مخلوط کردن اتصال دهنده آسفالت با آب حاوی ماده امولسیون با استفاده از آسیاب کلوئیدی یا سایر دستگاه های پراکندگی تولید کرد (توم،[۳۲] ۲۰۰۸) که روش های تولید ممکن است روی خصوصیات امولسیون نهایی تأثیر بگذارد. گاهی اوقات در طی مراحل ساخت آسفالت سرد، نانو پلیمرهایی به قیر امولسیون اضافه می‌گردد تا امولسیون قیر اصلاح شده با نانو پلیمر را تولید کنند که دارای خواص بهتری در مقایسه با

[۳۰] Audrey
[۳۱] Abdelzaher
[۳۲] Thom

امولسیون قیر معمولی می‌باشد. در شکل ۲ فرایند اصلاح قیر امولسیونی در کارخانه با نانوپلیمر مشاهده می گردد (شفیعی و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل۲: فرآیند اصلاح امولسیون قیر با نانوپلیمر در کارخانه (شفیعی و همکاران، ۲۰۱۱)

تا کنون ذرات نانو همچون پلی اتیلن (PE)، اتیلن ونیل استات (EVA)، لاستیک و کوپلیمر بلاک استایرن بونا دی ان استایرن (SBS) شناسایی شده اند. کوپلیمر بلاک استایرن بونا دی ان استایرن متخلخل و سبک است و قابلیت ارتجاعی و الاستیک در اثر حرارت رزین را دارد که این موضوع موجب کاربرد بسیار زیاد این نوع ذرات نانو شده است. برخی از رزین ها نیز مانند PE نسبتا ارزان هستند و از پلاستیک‌های بازیافتی حاصل می‌شوند و به طور مستقیم با آسفالت پایه مخلوط می‌شود. اما یکی از عمده‌ترین نقاط ضعف اصلاح‌کننده‌های پلیمری این است که از نظر ترمودینامیکی با آسفالت سازگاری ندارد که این موضوع به دلیل وجود اختلاف اساسی در چگالی، قطبی‌بودن، وزن مولکولی و انحلال‌پذیری میان پلیمر و آسفالت می‌باشد (توربجورن، ۲۰۰۲). ناسازگاری می‌تواند به لایه لایه شدن کامپوزیت در حین ذخیره ســـازی حرارتی منجر شود. این مشکل به سهولت ظاهر نمی شود ولی هنگامی که در ساخت به کار می رود، ماده را تحت تأثیر قرار می دهد که این مشکل در آسفالت سرد برطرف شده است. تاکنون مطالعاتی بر روی استفاده از نانولایه‌ها بر روی آسفالت پایه و آسفالت بهبود یافته با لاستیک استایرن بوتا دی ان نیز انجام شده است. همچنین نانوساختارهای سیلیکا، تیتانیا و کربنات کلسیم نیز با ترکیب با لاستیک استایرن بوتا دی ان بر روی آسفالت پایه مورد آزمایش قرار گرفت (فیلیس جولیانی و سیلویا راستلی ، ۲۰۰۴ ؛ دیدیه ، ۲۰۱۱ ؛ ژان پینگ ، ۲۰۱۳). همچنین در مطالعات دیگری، تاثیر نانو مواد معدنی و نانو موادی مانند Fe_3O_4 و ZnO بر روی اصلاح آسفالت پایه و همچنین آسفالت به همراه لاستیک استایرن بوتا دی ان بهبود خصوصیات آسفالت استفاده گردید. همچنین در این زمینه تاثیر خاک رس کائولین بر روی خصوصیات آسفالت اصلاح شده لاستیک استایرن بوتا دی ان و کوپلیمر سه قطعه‌ای و خطی از استایرن اتیلن بوتادین استایرن نیز گزارش شده است (یو و همکاران ، ۲۰۰۹ ؛ رسپریو و همکاران،[۳۳] ۲۰۰۸). نتایج این مطالعات نشان داده است که مقاومت در برابر فرسودگی، ویژگی-های رئولوژیکی و دمایی آسفالت اصلاح شده با ذرات نانو افزایش پیدا کرده است. لذا با افزودن این مواد نانو ذرات به آسفالت، طول عمر سرویس دهی راه آسفالته طولانی‌تر می‌شود. در مطالعه‌ای دیگری نیز تاثیر نانو رس‌ها بر روی ویژگی‌های رئولوژیکی لاستیک استایرن بوتا دی ان اصلاح شده و آسفالت پایه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در مطالعه ای به بررسی تاثیر نانورس و

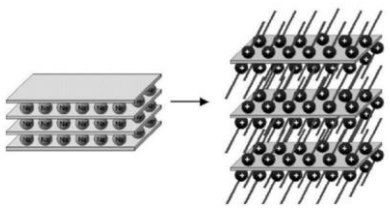
[۳۳] Resperio et al

میکروفیبر کربنی بر روی آسفالت پرداختند که نتایج نشان داد که این مواد موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی آسفالت در برابر آب می‌گردد (شنبارا و رودوک، ۲۰۱۸).

همچنین در یک مطالعه دیگر تاثیر پلیمرها و کامپوزیت پلیمر به منظور بهبود خصوصیات آسفالت مورد استفاده قرار گرفت که نتایج حاکی از بهبود خصوصیات آسفالت بود. و در چند مطالعه دیگر تاثیر قیر- پلیمر و نانو به صورت ترکیبی و همچنین رس بنتونیت و رس آلی بر روی آسفالت مورد استفاده گرفت و به تجزیه و تحلیل تأثیر بهبوددهنده هـــا بر ویژگی‌های رئولوژیکی آسفالت اصلاح شده پرداختند (لانگوان و همکاران، ۲۰۲۰). گروه پولاکوو نیز تاثیر نانو مواد لایه‌ای را بر روی آســـفالت اصلاح شده با تأثیر نانومواد لایه را مطالعه نمودند و به بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک و رئولوژیکی پرداختند. به‌طور کلی به علت آنکه روش‌های تهیه، ساخت نانومواد آلی در مقیاس نانو با استفاده از تکنیک‌های مرسوم، دشوار است. بنابراین، بهبوددهنده های پلیمری متداول، مانند نانو افزودنی های اصلاح آســـفالت، به سهولت در دسترس نمی‌باشند. اما، نانومواد اکسید فلزی می توانند با روشی مناسب تهیه شوند (ترونس ستا و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، احتمال استفاده از آن‌ها به عنوان افزودنی‌های آسفالت پایه بیشتر می باشد و روشی امیدبخش جهت بهبود آسفالت به حساب می آید. اگرچه قیمت زیاد و ویژگیهای نانومواد اکســـید فلزی، جذابیت استفاده از آن ها را جهت بهبود خصوصیات آسفالت هم در زمینه تحقیق و هم در زمینه کاربرد آن‌ها، محدود می‌نماید. اما از لحاظ تئوری بسیاری از مواد اکســـید فلز معدنی می‌توانند به صورت مواد نانومقیاس تهیه گردند (سانچز و سوبولف ، ۲۰۱۰ ، اسلام و میازاکی ، ۲۰۱۰ ، پاچکو و جلالی ، ۲۰۱۱). در نهایت می‌توان از این نانومواد برای تشکیل نانوکامپوزیت‌هایی با آسفالت پایه، استفاده نمود. اما کلید موفقیت در به انجام چنین تحقیقاتی، یافتن سورفکتانتی می‌باشد که با نانو افزودنی‌ها و با آســـفالت پایه سازگاری داشته باشد. مطابق تحقیقات انجام شده پرکابردترین ذرات نانو که نقش بهبود دهنده را دارند، ذرات نانو رسی لایه لایه، مونت‌موریلونیت و مونت موریلونیت آلی می‌باشد.

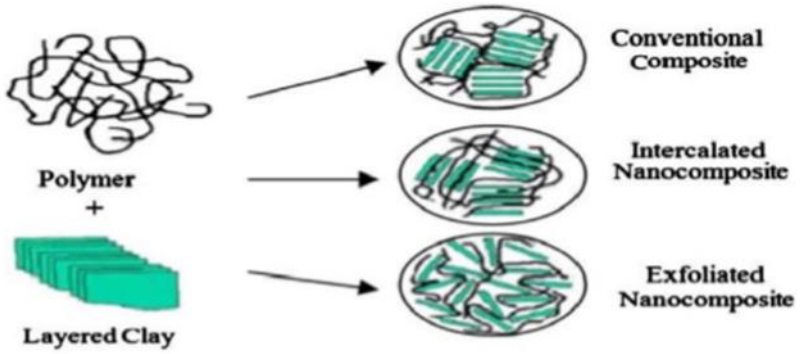
۱-۳- نانو رس

نانورس، خاک رسی است که به‌منظور ساخت خاک رس سازگاری با مونومرها و پلیمرهای کلی می‌تواند استفاده شود. جدایی صفحه‌های خاک رس از هم یکی دیگر از نتایج نانورس با یک سطح بزرگ فعال است. این نانو کامپوزیت ترکیبی از یک یا چند پلیمر با سیلیکات لایه ای است. خلوص خاک رس می‌تواند خواص نانوکامپوزیت نهایی را تحت تأثیر قرار دهد. خاک رس بیشتر از آلومینا- سیلیکات تشکیل شده است، که از یک ساختار لایه لایه تشکیل شده است و شامل چهار وجهی سیلیکا و آلومینا هشت وجهی است که در روش‌های متفاوت پیوند مختلفی دارد. همانطور که گفته شد یکی از پرکابردترین ذرات نانو که نقش بهبود دهنده را دارند، مونت‌موریلونیت است. پداری یک ساختار لایه لایه با دو چهار وجهی سلیس و یک هشت وجهی الومینا است. ضخامت لایه‌های مونت مریلونیت ۱ نانومتر است که دارای یک سطح بزرگ فعال است که بسته به نوع مواد مخلوط شده می‌تواند بین قیر آن مواد واکنش ایجاد کند. معمولا مونت مریلونیت به دلیل سازگاری با محیط زیست، دسترسی آسان، تجزیه و تحلیل بالای ساختار و شیمی آن، مورد استفاده قرار می‌گیرد (غیل، ۲۰۰۶ ؛ جهرمی و خدایی ، ۲۰۰۹ ؛ یاراحمدی و همکاران ، ۲۰۱۰) در شکل ۳ فرایند اصلاح سطح نانو رس نشان داده شده است که انتخاب مناسب خاک رس اصلاح‌شده به منظور اطمینان از نفوذ موثر پلیمر به فاصله بین لایه‌های خاک رس و ورقه ورقه شدن ضروری می‌باشد (یاراحمدی و همکاران، ۲۰۱۰).



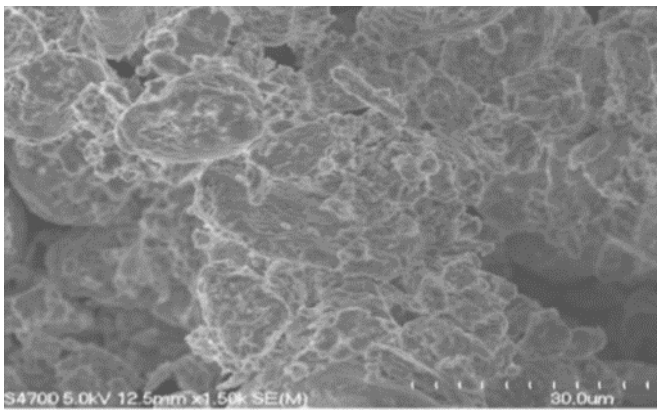
شکل۳: اصلاح سطح نانو رس (یاراحمدی و همکاران، ۲۰۱۰)

در شکل ۴ نانو کامپوزیت جداشده و ورقه ورقه شده را نشان می‌دهد. جزء آلی قرار گرفته میان لایه‌های خاک رس فاصله‌ی میان لایه ها را افزایش داده است، اما هنوز لایه‌ها یک ارتباط فضایی خوب با یکدیگر دارا است. در یک ساختار ورقه‌ای، لایه‌هایی از خاک رس بطور کامل از هم جدا شده و لایه های تکی در سراسر ماتریس (ساختار) آلی توزیع می‌شوند . به‌منظور رسیدن به پراکندگی خوب، نیروهای مکانیکی به تنهایی کافی نمی‌باشد . بلکه یک نیروی محرکه ترمودینامیکی به‌منظور جدا کردن لایه‌ها به ورقه‌های سیلیکات اولیه نیاز است. این نیروی محرکه ترمودینامیکی که با قرار دادن یک پوشش خاص معروف به سورفاکتانت در هر یک از لایه های فردی بوجود می‌آید (چانگ و همکاران، ۲۰۱۱). مولکول‌های سورفاکتانت فاصله‌ی بین لایه را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، آن‌ها می‌توانند سازگاری با پلیمر را بهبود دهند و می‌توانند اتصال نانو رس را افزایش دهند زیرا آن‌ها می توانند با پلیمر مخلوط شوند (غیل ، ۲۰۰۶ ؛ میازاکی و اسلام ، ۲۰۰۷ ؛ جهرمی و خدایی ، ۲۰۰۹).



شکل۴: نانوکامپوزیت جدا شده و ورقه ورقه شده (جهرمی و خدایی، ۲۰۰۹)

مطالعات بسیاری بر روی عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو رس صورت گرفته است، زیرا آن از ذرات سازگار و با خلوص بالای مونت مریلونیت تشکیل گردیده است. بسیاری از محققین از نانو رس در محدوده ۳ تا ۶ درصد وزنی استفاده کردند (استین، ۲۰۰۸؛ اسلام و میازاکی ، ۲۰۱۰؛ یاراحمدی و همکاران ، ۲۰۱۰ ؛ پاچکو و جلالی ، ۲۰۱۱). در شکل ۵ تصویر اسکن میکروسکوپ الکترونیکی از مونت مریلونیت نشان داده است (یائو و همکاران،[۳۴] ۲۰۱۳).



شکل۵: تصویر اسکن میکروسکوپ الکترونی از مونت مریلونیت (یائو و همکاران ، ۲۰۱۳).

[۳۴] Yao et al, ۲۰۱۳

در مطالعه‌ای درصدهای مختلفی از مونت مریلونیت و مونت مریلونیت ارگانوفیلیک در قیر و مخلوط آسفالت مورد استفاده قرار گرفت (یو و همکاران، ۲۰۰۷). نتایج این پژوهش نشان داد که نقطه ی نرمی و گرانروی قیراصلاح شده در دمای بالا افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، مخلوط آسفالتی اصلاح شده، مدول مختلط بالاتر و زاویه ی تغییر فاز کمتری از خود نشان دادند. همچنین نتایج نشان داد که قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با مونت مریلونیت و مونت مریلونیت ارگانوفیلیک خواص ویسکوالاستیک را افزایش می‌دهد و مقاومت آن در برابر شیار شدگی در درجه حرارت بالا افزایش می‌یابد. همچنین اثر مونت مریلونیت ارگانوفیلیک در حرارت اکسیداتیو و پیرشدگی قیر در این مطالعه بررسی شد. نتایج نشان داد که قیر و آسفالت اصلاح شده مقاومت بالاتری در مقابل شیار شدگی و استحکام بسیار خوبی دارند. همچنین در مطالعه دیگری تاثیر قیر اصلاح شده با نانورس توسط این محققین بررسی شد که نتایج این مطالعه نیز نشان داد که نانو رس می‌تواند مدول برش پیچشی ، ویسکوزیته و مقاومت ترک خوردگی در دماهای پایین را بهبود بخشد (یو و همکاران، ۲۰۱۱). در سال ۲۰۱۳ در مطالعه‌ای تصاویر مورفولوژیک قیر اصلاح شده با نانو رس مورد بررسی قرار گرفت (زارع و همکاران ، ۲۰۱۰) که نتایج این مطالعه نیز مطالعات قبلی را تایید کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که نانورس اثر بالقوه به عنوان ضد اکسیداسیونی نیز دارد و زمانی که قیر اصلاح شده در معرض نور و گرما قرار گیرد قادر است واکنش اکسیداسیون را کاهش دهد.

در تحقیقات دیگر اثر استارین، بوتادین، رزین و مونت موریلونیت به منظور اصلاح ویژگی‌ها و خواص قیر مطالعه شد. در مطالعه ای ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ نشان دادند که با افزودن رزین و مونت مریلونیت می‌توان نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر اصلاح شده را افزایش داده و به دنبال آن نفوذ در درجه حالت بالا کاهش پیدا می‌کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹). در مطالعه دیگری گالویاک و همکاران در سال ۲۰۱۰ نشان دادند که استایرن، بوتادین، استایرن مونتموریلونیت ارگانوفیلیک موجب بهبود مخلوط آسفالتی می‌گردد (گالویاک و همکاران،[۳۵] ۲۰۱۰). در همین سال در مطالعه دیگری اثر بنتونیت خاک رس و بنتونیت اصلاح شده ارگانیکی به‌منظور بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی بررسی شد که نتایج نشان داد که مخلوط آسفالت اصلاح شده دارای مقاومت بالاتری در مقابل شیارشدگی می‌باشد. در مطالعه دیگری نیز اثر نانو رس بر روی خصوصیات مخلوط آسفالت انجام شد که نتایج این مطالعه نیز نشان داد که نانو رس می‌تواند موجب افزایش سختی و مقاومت مخلوط آسفالت گردد (جهرمی و همکاران، ۲۰۱۰). در این زمینه مطالعه‌ای دیگر توسط گیل نیز نشان داد که نانو رس موجب بهبود استحکام کششی غیر مستقیم، خزش و مقاومت خستگی آسفالت می‌گردد (گیل، ۲۰۰۶) که این نتایج توسط مطالعه دیگری توسط جهرمی و همکاران تایید گردید. همچنین این محققین بیان کردند که نانو رس می‌تواند موجب افزایش استحکام، مدول انعطاف پذیری و مقاومت کششی و عملکرد تحت خزش دینامیکی آسفالت شود. اما آن‌ها بیان کردند که نانو رس تاثیر مفیدی بر رفتار خستگی در دمای پایین ندارد.

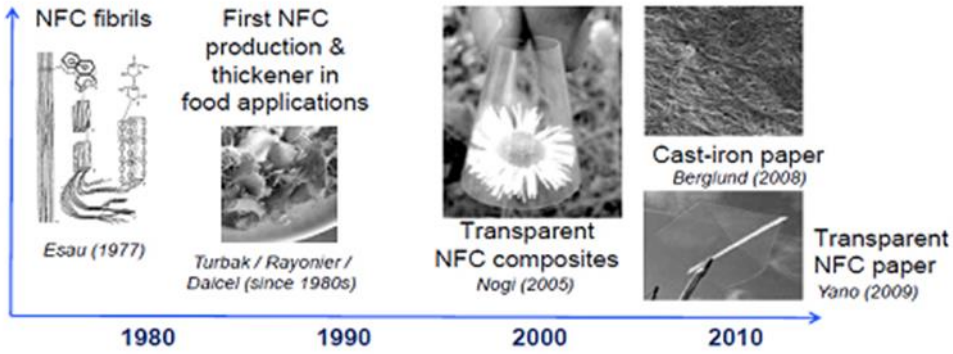
۲-۳- الیاف نانو سلولز

الیاف سلولزی با داشتن عرضی در محدوده نانومتر، ذراتی براساس بر طبیعت با ویژگی‌های مفید و منحصر به فرد می‌باشند. نانوسلولزهای جدید که از الیاف سلولزی نانوساختار با یک بعد نسبتاً وسیع (نسبت طول به عرض) و با خواص معین تهیه می‌شوند، کاربردهای بسیار وسیعی پیدا کرده‌اند. ترکیبات الیاف نانوساختار در فشار بالا، دمای بالا و شتاب بالا مجزا شده و منجر به ایجاد یک سطح وسیع می‌شوند و بنابراین بر هم‌کنش‌های قوی با گونه‌های اطراف مانند آب، مواد پلیمری، مواد آلی، نانوذرات و سلول‌های زنده ایجاد می‌کنند (کلم و همکاران،[۳۶] ۲۰۱۱) نانوسلولز، متشکل از فیبرهای سلولز با ابعاد نانو است، که نوعاً دارای ابعاد عرضی ۲۰-۵ نانومتر و ابعاد طولی در محدوده گسترده‌ای از ده‌ها نانومتر تا چند میکرون است (سعادتمند و همکاران، ۲۰۱۲). نانوسلولز دارای ظاهری بسیار چسبناک

[۳۵] Galooyak et al
[۳۶] Klemm et al

بوده و نواری ژل مانند و شفاف هستند. در شکل ۶ ساختار شفاف ژل نانو سلولز مشاهده می‌گردد. همچنین در شکل ۷ تاریخچه تولید و ساخت انواع نانوسلولز مشاهده می‌گردد (ایچون و همکاران ،[۳۷] ۲۰۱۰).

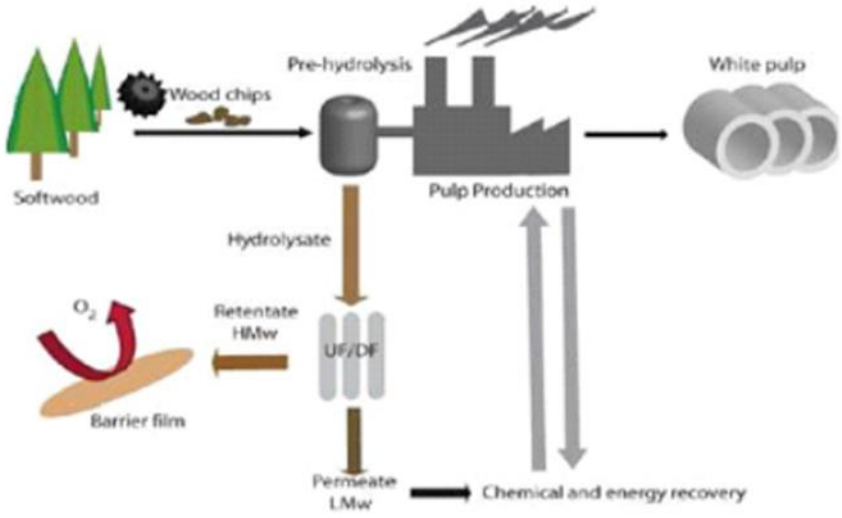
شکل۶: ساختار شفاف ژل نانوسلولز (ایچون و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل۷: تاریخچه تولید و ساخت انواع نانوسلولز (ایچون و همکاران، ۲۰۱۰).

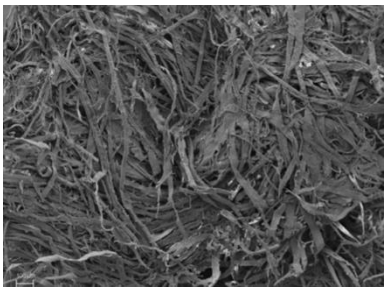
به‌طور کلی فیبرهای نانوسلولزی از پیش‌ماده‌های چوبی با استفاده از یک ماده همگن کننده در فشار بالا تهیه می‌شود. این فرآیند منجر به ورقه ورقه شدن دیواره‌های سلولی الیاف‌های گیاهی شده و فیبریل‌های سلولزی نانوساختار به‌صورت مجزا به‌دست می‌آیند. حالت بلوری نانوسلولز توسط هیدرولیز اسیدی فیبرهای سلولزی طبیعی با استفاده از محلول‌های غلیظ نمک معدنی و اسید سولفوریک و اسید هیدروکلریک به‌دست می‌آید. حالت آمورف سلولز طبیعی نیز از محصول هیدرولیز شده، پس از زمان‌بندی دقیق و جداسازی از بخش‌های بلوری و مراحل شستشو قابل استحصال است (پاکو و همکاران،[۳۸] ۲۰۰۷). خلاصه‌ای از روش تهیه نانوسلولز در شکل ۸ نشان داده شده است (سعادتمند و همکاران، ۲۰۱۰).

[۳۷] Eichhon et al
[۳۸] Paako et al



شکل ۸: خلاصه‌ای از روش تهیه نانو سلولز (سعادتمند و همکاران، ۲۰۱۲)

نانوسلولز به‌عنوان یکی از نانومواد جدید با قابلیت‌های بالا همچون پایداری مناسب، عامل‌دار شدن شیمیایی و کنترل بر هم‌کنش‌های سطحی، سطح بالا و ... بسیار قابل توجه است و کاربردهای متعدد و قابل دسترسی پیدا کرده است. از جمله یکی از کاربردهای این نانو ذرات در بهبود خصوصیات قیر و آسفالت می‌باشد. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده نانو الیاف‌ها در بهبود خواص قیر مانند پایداری حرارتی، درجه اشتعال، نقطه نرمی و محافظت در برابر رطوبت و بخار آب و همچنین با تغییر ساختار، قیر به عنوان یک ترمو پلاستیک با افزودن نانو الیاف های سلولزی اصلاح می‌شود (خطاک و همکاران،[۳۹] ۲۰۱۵ ؛ ترونس ستا و همکاران، ۲۰۲۰). خاتاک در سال ۲۰۱۵ از الیاف نانو به منظور بهبود عمکرد آسفالت تحقیقی را انجام دادند که نتایج این تحقیق حاکی از تاثیر مثبت این نانوذرات بر روی آسفالت بود. ترونس و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ تاثیر الیاف نانوسلولزی را بر روی آسفالت سرد با امولسیون قیری بررسی کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که این مواد نانو می‌توانند مقاومت کششی آسفالت را افزایش دهند و با ترکیب این مواد با آسفالت می‌توان یک مخلوط پایدار و اقتصادی برای راه‌ها تولید نمود. در شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از الیاف نانو سلولز مشاهده می‌گردد (ترونس ستا و همکاران، ۲۰۲۰).

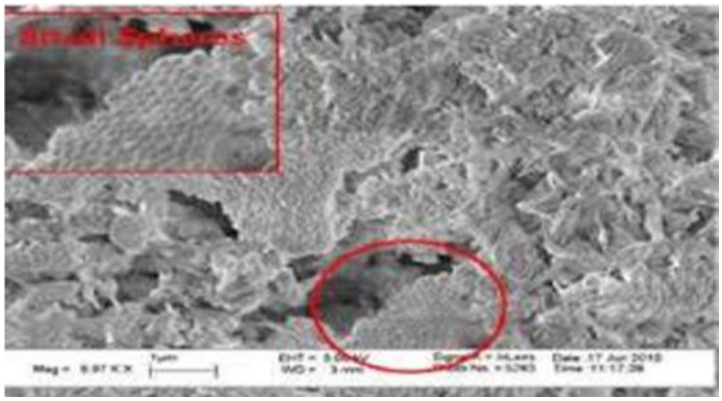


شکل ۹: تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از الیاف نانو سلولز (ترونس ستا و همکاران، ۲۰۲۰).

[۳۹] Khattak et al

۳-۳- نانو آهک هیدراته

تا به حال مطالعات زیادی بر روی تاثیر آهک هیدراته بر روی آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با قیر امولسیونی انجام شده است (ترافدر و همکاران ،[۴۰] ۲۰۰۶ ؛ کراس و همکاران،[۴۱] ۲۰۰۸ ؛ نیازی و جلیلی ، ۲۰۰۹) اما مطالعات محدودی بر روی تاثیر نانو ذرات آهک هیدراته آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با قیر امولسیونی صورت گرفته است. در شکل ۱۰ تصویر الکترونیکی نانو ذرات آهک هیدراته با اندازه‌ی متوسط ذرات ۶۶۰ نانومتر، که در آزمایشگاه مصالح ساختمانی در لس آنجلس با استفاده از دستگاه سایش تولید می‌شود، آورده شده است (آراگائو و همکاران،[۴۲] ۲۰۱۰). مطابق مطالعات انجام شده زمانی که نانو ذرات آهک هیدراته به مخلوط اضافه می‌گردد موجب تقویت پیوند میان قیر و سایر رابطها می‌گردد. آهک به‌منظور جلوگیری از تشکیل محلول آب و صابون که موجب ترویج جدا شدگی سنگدانه‌ها می‌گردد و با مولکول‌های بسیار قطبی واکنش می‌دهد. زمانی‌که این مولکول‌ها با آهک واکنش می‌دهند، تولید نمک نامحلول می‌کنند که قادر به جذب آب نمی‌باشد (آراگائو و همکاران ، ۲۰۱۰ ؛ اوزن ، ۲۰۱۱).



شکل ۱۰: تصویر میکروسکوپ الکترونیکی آهک هیدراته با ذرات نانو (آراگائو و همکاران، ۲۰۱۰)

نتایج مطالعات انجام شده نشان داده است که آهک هیدراته می‌تواند نقش ماده چسباننده در مخلوط آسفالتی با قیر امولسیون را ایفا نماید. همچنین این مواد موجب مقاومت آسفالت سرد در برابر رطوبت و افزایش مقاومت آن در برابر فرسایش می‌شود. در نهایت نتایج این مطالعه نشان داد که محصولات هیدراتاسیون قادر هستند میزان سختی و انسجام آسفالت سرد را افزایش دهند (دو،[۴۳] ۲۰۱۵). همچنین آهک هیدراته در مخلوط آسفالتی می‌تواند عمق شیارشدگی که به خاطر سفت شدن های متعدد همراه با آسیب‌های رطوبتی را کاهش دهد که این کار از طریق بهبود کل پیوندهای قیر و کاهش اکسیداسیون در دراز مدت انجام می‌شود. توانایی آهک هیدراته به‌منظور ساخت یک مخلوط آسفالتی سفت تر، سخت تر و مقاوم‌تر در مقابل شیارشدگی بازتابی از عملکرد برتر آن ناشی از اثرات فعال و مفید پرکننده های معدنی می‌باشد (آراگائو و همکاران ، ۲۰۱۰ ؛ اوزن ، ۲۰۱۱). در مطالعه‌ای که بر روی تاثیر آهک هیدراته در اندازه ذرات نانو انجام شد، نتایج نشان داد که این ماده موجب اقزایش مقاومت کششی غیر مستقیم و ضریب استحکام کششی آسفالت می‌گردد (چانگ و همکاران، ۲۰۱۱).

[۴۰] Tarefder et al
[۴۱] Cross et al
[۴۲] Aragao et al
[۴۳] Du

۴-۳- نانوسیلیس

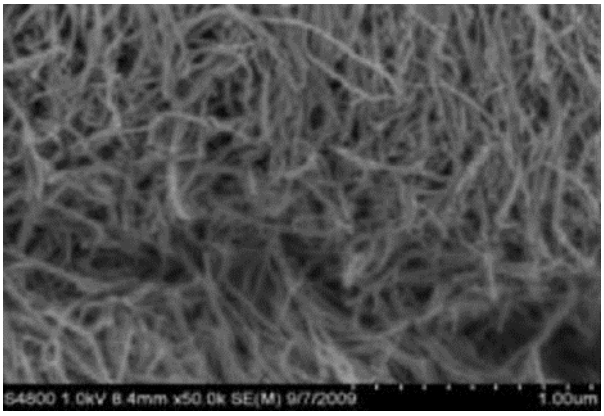
به‌طور معمول نانو سیلیس دارای ساختار بی‌شکل (آمورف) و توخالی (مزوپوروس) است. در برخی موارد ساختار کریستالین نانو سیلیس قابل حصول است که معمولا تشخیص آن از تست های اشعه ایکس غیر ممکن است. نانو ذرات سیلیس بنا بر انرژی آزاد گیبس به شدت تمایل به آگلومره شدن (به هم چسبیدن) دارند. بهترین شکل ذرات برای نانو ذرات سیلیس جهت تعلیق کروی است. این شکل کروی توسط سنتز در محیط آمونیاک قابل دسترسی‌است. استفاده از نانوسلیس به دلیل افزایش استحکام مکانیکی رزین‌های کامپوزیتی مورد توجه قرار گرفته است. اندازه ذرات نانو سیلیس بر استحکام و صافی سطح تأثیر می‌گذارد و در بیشتر مطالعات از دامنه ۵ تا ۲۰۰ نانومتر استفاده می شود. از طرفی مقدار شفافی سطح نیز ارتباط مستقیم با اندازه ذرات دارد. اندازه ذرات بیش از ۱۰۰ نانومتر باعث پراکندگی نور مرئی و کاهش شفافیت می‌شود. همچنین سطح ویژه ی بالای ذرات نانو سبب ایجاد انرژی سطحی بالا و تعلیق موثر نانو ذرات سیلیس در محلول‌های آبی و غیر آبی می‌گردد. لازم به ذکر است که ذرات نانو سیلیس در ماهیت شیمیایی خود امکان انحلال در حلال های آبی و بسیاری از حلال های مرسوم غیر آبی را ندارند و این ویژگی تعلیق پایدار ذرات نانو سیلیس مصارفی زیادی داشته باشد. یکی از موارد مصرف نانوسیلیس در بهبود عملکرد آسفالت است که در این زمینه گراوند در سال ۱۳۹۳ به بررسی تاثیر نانوسیلیس بر روی خواص مخلوط آسفالت سرد با امولسیون قیری پرداخت. در این پژوهش مطابق استانداردهای ASTM-D۱۵۵۹ و AASHTO-T۲۴۵و با استفاده از روش مارشال نمونه‌ها ساخته شده است. برای تعیین وزن مخصوص حقیقی نمونه‌ها از استانداردهای ASTM-D۲۰۴۱ و AASHTO-T۱۶۶ و برای تعیین حداکثر وزن مخصوص تئوری از استانداردهایASTM-D۲۷۲۶ و AASHTO-T۲۰۹ استفاده شده تا فضای خالی نمونه‌ها محاسبه گردد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که استفاده از نانوسیلیس به تنهایی تأثیر چندانی در افزایش مقاومت مارشال نمونه‌ها ندارد اما با ترکیب ۱ درصد نانوسیلیس با ۲ درصد سیمان خواص مقاومتی آسفالت سرد بازیافتی با امولسیون قیر به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد.

همچنین در تحقیق دیگری توسط عبدالظاهر در سال ۲۰۱۵ تاثیر نانوسیلیس بر روی خصوصیات مکانیکی آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با امولسیون قیری بررسی شد. در این پژوهش نمونه مارشال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از نانوسیلیس می‌تواند در ۷ درصد در حدود ۱۴۰ درصد پایداری آسفالت سرد را افزایش دهد. همچنین نتایج نشان داد که افزودن لاتکس به نانو سیلیس بهینه باعث افزایش پایداری آسفالت سرد تا ۱۷۹ درصد می‌گردد. بنابراین نتایج این پژوهش فناوری نانو را بسیار مفید ارزیابی نمود.

۵-۳- نانو ذرات کربن

به طور کلی، نانو لوله های کربنی شامل بسیاری از ساختارهای مولکولی با انواع مختلف در طول، ضخامت و تعداد لایه ها است و آن‌ها را می‌توان با توجه به ساختار در چند طبقه شامل نانولوله‌های تک جداره، نانولوله‌های چند جداره و نانولوله‌های دو جداره تقسیم بندی کرد. مطالعات انجام شده نشان دادند که نانولوله‌های چند جداره در مقایسه با سایر نانولوله‌های در دسترس‌تر و ارزان‌تر هستند و به دلیل ساختار منفرد مولکول‌ها نیز به صورت کارآمدتری مورد استفاده قرار می‌گیرند (امیرخانیان و همکاران، ۲۰۱۱ ؛ عبدالزهر ، ۲۰۱۵).در شکل ۱۱ نانو ذرات کربن در قیر اصلاح شده نشان داده شده است (امیرخانیان و همکاران، ۲۰۱۱). این ماده به صورت پودر سیاه و لوله شکل است که در کاربردهای فناوری نانو، می‌تواند به عنوان نانو لوله‌های کربنی که از صفحه های گرافتی که لوله شده اند تا به شکل یک ساختار لوله مانند مورد استفاده استفاده قرار گیرند. نتایج مطالعات انجام شده نشان دادند که استفاده از این ذرات نانو موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی در دمای عملکردی بالا و افزایش دمای شکست، ویسکوزیته و مدول الاستیسیته می‌گردد. همچنین مطالعاتی بر روی تاثیر این ماده بر روی قیر انجام شده است که نتایج نشان دادند که این ماده موجب افزایش مقاومت قیر در برابر شیارشدگی می-گردد (امیرخانیان و همکاران، ۲۰۱۱ ؛ عبدالزهر ، ۲۰۱۵). در سال ۲۰۱۵ مطالعه‌ای بر روی تاثیر نانولوله‌های کربنی بر روی بهبود

خصوصیات آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با امولسیون قیری انجام شد که نتایج این مطالعه نشان دادند که نانولوله‌های کربنی تاثیر مثبتی بر روی پایداری مکانیکی آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با امولسیون قیری دارند و در این مطالعه درصد بهینه به‌منظور افزایش عملکرد آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با امولسیون قیری تعیین گردید (عبدالزهر، ۲۰۱۵). نتایج این مطالعه نشان داد که ۵ درصد نانو کربن می‌توان موجب افزایش پایداری آسفالت تا ۱۵۰ درصد گردد و از طرفی افزودن لاتکس به نانوکربن موجب افزایش پایداری آسفالت تا ۱۷۹ درصد می‌شود. بنابراین در این پژوهش توصیه شد از مواد نانو به‌عنوان مواد افزودنی در آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با قیر امولسیونی استفاده گردد تا عملکرد مخلوط آسفالت در محل افزایش یابد.



شکل ۱۱: تصویر الکترونیکی نانولوله¬های کربنی در ۱ میکرومتر (امیرخانیان و همکاران، ۲۰۱۱)

۴-نتیجه‌گیری

امروزه تمایل محققین به اصلاح آسفالت با استفاده از ذرات نانو بسیار جلب شده است و مطالعات در زمینه کاربرد فناوری نانو در آسفالت رو به افزایش است تا بتوانند نقش مثبت را در بهتر نمودن ویژگی‌های آسفالت، ایفا نمایند. مروری بر مطالعات صورت گرفته نشان داد که همان طور که خیلی از پژوهشگران به نانومواد به کار رفته در اصلاح آسفالت توجه می‌کنند، فناوری نانـو نیز به پیشرفت‌های بزرگتری در اصلاح آسفالت کمک خواهند نمود. مطالعات انجام شده بیان کردند که تغییر و تبدیل نانومواد بر

آسـفالت پایه یا آسفالت اصلاح شده، مرحله ای از واکنش شیمیایی اســت. روش ها برای بیان یک دوز معقول از نانوذرات به درون آسفالت برای دست یابی به پراکندگی نانومقیاس و ارتقای سازگاری همه فازها و ویژگی های جامع مواد آسفالت اصلاح شده، نقطه تمرکز کارهای تحقیقاتی در این زمینه خواهــد بود. به طور هم زمان بررسی های بیشتر بر سازوکار آسفالت اصلاح شــده با نانومواد و میکرو ساختارهای آن در تعلیم شیوه های مهندسی، مورد توجه خواهد بود.در آینده‌ای نه چندان دور انتظار می‌رود که فناوری نانو بتواند سطح عملکرد آسفالت را در زمینه‌هایی مانند انرژی، نور، ایمنی و هوشمندی با جهش چشم‌گیری مواجه نماید. حتی شاید مراحل اولیه و گام‌های اول پیشرفت دنیا فناوری نانو، بتواند طبیعت و ماهیت آسفالت را متحول کند و یا حتی روش ساخت را تغییر دهد. طوری‌که ساخت جاده نیز، به نحو سازگارتری با محیط زیست کاربران ساخته شود. تاکنون مطالعات محدودی در زمینه بررسی اثر نانو ذرات مختلف در تولید آسفالت سرد کارخانه‌ای تولید شده با قیر امولسیون انجام شده است که امید است در آینده شاهد مطالعات بیشتری در این زمینه باشیم. بدون شک با در دست داشتن مصالح توانمندی مانند مواد نانو همچون نانوسیلیس، نانو کربن، نانو رس، نانو آهک هیدراته و ... می‌توان در بهبود خصوصیات آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با قیر امولسیون تحولات عظیمی ایجاد نمود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از راهنمایی های علمی دکتر مهدی فرامرزی کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

Amirkhanian, A.N., Xiao, F. and Amirkhanian, S.N. ۲۰۱۱. Characterization of Unaged Asphalt Binder Modified with Carbon Nano Particles International Journal of Pavement Research and Technology. ۴(۵): ۲۸۱۲۸۶.

Artley, K.; van Santen, R.; Kirchherr, J. Policies for transitioning towards a circular economy: Expectations from the European Union (EU). Resour. Conserv. Recycl. ۲۰۲۰, ۱۵۵, ۱۰۴۶۳۴

Audrey Copeland. (۲۰۱۱). "Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice",Federal Highway Administration ۶۳۰۰ Georgetown Pike McLean, VA ۲۲۱۰۱

Bystrzejewska-Piotrowska, G., Golimowski, J. and Urban, P.L. ۲۰۰۹. Nanoparticles: Their potential toxicity. waste and environmental management. Waste Management. ۲۹(۹): ۲۵۸۷-۲۵۹۵.

Cheng, J., Shen, J. and Xiao, F. ۲۰۱۱. Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Nanosized Hydrated Lime. Journal of Materials in Civil Engineering. ۱(۱): ۲۶۵.

Construction and Building Materials. ۲۴(۴): ۵۳۸–۵۴۴.

Cottrill, C.D.; Derrible, S. Leveraging big data for the development of transport sustainability indicators. J. Urban Technol. ۲۰۱۵, ۲۲, ۴۵–۶۴.

De Campos, R.S.; Simon, A.T.; De Campos Martins, F. Assessing the impacts of road freight transport on sustainability: A case study in the sugar-energy sector. J. Clean. Prod. ۲۰۱۹, ۲۲۰, ۹۹۵–۱۰۰۴.

Didier Lesueu. (۲۰۱۱). "Polymer Modified Bitumen Emulsions", Materials R&D Manager, Rue de l´Industrie, ۳۱, ۱۴۰۰ Nivelles – Belgium

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.

Eichhon, "Current Internatinal Research into Cellulose Nanofibers and Nanocomposites", Journal Material Science", Vol.۴۵, pp.۱-۳۳, (۲۰۱۰).

Felice Giuliani, Silvia Rastelli. (۲۰۰۴). "An Analytical Approach to Evaluate the Performance of Cold Recycled Asphalt Mixtures", Dipartimento Di IngegneriaCivile, Dell'ambiente, Del

Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E. and Moeini, A. ۲۰۱۰. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. Construction and Building Materials. ۲۴(۳): ۳۰۰-۳۰۷. Jahromi, S.G., Andalibizade, B. and Vossough, S. ۲۰۱۰. Engineering Properties of Nanoclay Modified Asphalt Concrete Mixtures. The Arabian Journal for Science and Engineering. ۳۵(Number ۱B): ۸۹-۱۰۳.

Ghile, D. ۲۰۰۶. Effects of nanoclay modification on theology of bitumen and on performance of asphalt mixtures Thesis M.Eng. Delf University of Technology.

Glenn, J. C. ۲۰۰۶. Nanotechnology: Future military environmental health considerations. Technological Forecasting and Social Change. ۷۳(۲): ۱۲۸–۱۳۷.

Ground, Ehsan. ۲۰۱۴. The effect of using nano-silica and lime on the properties of cold recycled asphalt mixture with bitumen emulsion. Master Thesis. Technical College. Civil and Non-Profit Higher Education Institute .Persian .

Islam, N. and Miyazaki, K. ۲۰۱۰. An empirical analysis of nanotechnology research domains. Technovation ۳۰(۴): ۲۲۹-۲۳۷.

J.-Y. Yu, P.-L. Cong, and S.-P. Wu, "Laboratory Investigation on the Properties of Asphalt Modified with Epoxy Resin," Journal of Applied Polymer Science, vol. ۱۱۳, pp. ۳۵۵۷–۳۵۶۳, ۲۰۰۹.

Jahromi, S. G. and Khodait, A. ۲۰۰۹. Effects of nanoclay on theological properties of bitumen binder. Construction and Building Materials. ۲۳(۸): ۲۸۹۴–۲۹۰۴.

Khattak, M. J., Khattab, A., & Rizvi, H. R. (۲۰۱۱). Mechanistic characteristics of asphalt binder and asphalt matrix modified with nano-fibers. In *Geo-Frontiers ۲۰۱۱: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. ۴۸۱۲-۴۸۲۲).

Klemm, D., Krame, F., Moritz, S., Lindstrom, T., Ankerfors, M., Gray, D., Dorris, A. " A New Family OF Nature-Based Materials " Angewandte Chemie, Vol.۵۰, pp.۵۴۳۸-۵۴۶۶, (۲۰۱۱).

langovan, M.; Guna, V.; Prajwal, B.; Jiang, Q.; Reddy, N. Extraction and characterisation of natural cellulose fibers from Kigelia africana. Carbohydr. Polym. ۲۰۲۰, ۲۳۶, ۱۱۵۹۹۶.

M. A. Shafii, M. Y. A. Rahman, and J. Ahmad. (۲۰۱۱). "Polymer Modified Asphalt Emulsion". International Journal of Civil & Environmental Engineering. ۱۱(۶): ۴۳–۴۹.

Mamalis, A. G. ۲۰۰۷. Recent advances in nanotechnology. Journal of Materials Processing Technology. ۱۸۱(۱-۳): ۵۲–۵۸.

Miyazaki, K. and Islam, N. ۲۰۰۷. Nanotechnology systems of innovation - An analysis of industry and academia research activities. Technovation ۲۷(۱۱): ۶۶۱-۶۷۵.

N. Thom. (۲۰۰۸). "Principles of Pavement Engineering". London: Thomas Telford.

Oluwasola, E. A., Hainin, M.R, Aziz, M.M.A., Yaacob, H. and Warid, M. N. M. ۲۰۱۴. Potentials of steel slag and copper mine tailings as construction materials. Materials Research Innovations. ۱۸(S۶): ۵۶-۲۵۰. Zhang, B., Xi, M., Zhang, D., Zhang, H. and Zhang, B. ۲۰۰۹ The effect of styrene-butadiene rubber/montmorillonite modification on the characteristics and properties of asphalt Construction and Building Materials. ۲۳(۱۰): ۳۱۱۲-۳۱۱۷.

Özen, H. ۲۰۱۱. Rutting evaluation of hydrated line and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. Construction and Building Materials. ۲۵(۲): ۷۵۶–۷۶۵.

Paako, M., Ankerfors, M., Kosonen, H., Nykanen, A., Ahola, S., Osterberg, M., Ruokolainen, J., Laine, J., Larsson, P.T., Ikkala, O., Lindstrom, T. "Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing

and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels", Biomacromolecules, Vol.۸, pp.۱۹۳۴-۱۹۴۱, (۲۰۰۷).

Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. ۲۰۱۱. Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. Construction and Building Materials. ۲۵(۲): ۳۸۲-۵۹۰.

Plati, C. Sustain ability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: Ali terature review. Constr. Build. Mater. ۲۰۱۹, ۲۱۱, ۵۳۹–۵۵۵. [CrossRef]

Resperio. (۲۰۰۸). "IntegraBase & Nanotechnology: Modifying Asphalt on a Molecular Level". www.resperion.com.

Rodríguez-Fernández, I.; Lizasoain-Arteaga, E.; Lastra-González, P.; Castro-Fresno, D. Mechanical, environmental and economic feasibility of highly sustainable porous asphalt mixtures. Constr.Build.Mater. ۲۰۲۰, ۲۵۱, ۱۱۸۹۸۲

Saadatmand, S., Edlund, U., Albertsson, A. C., Danielsson, S., Dahlman, O. "Prehydrolysis in Softwood Pulping Produces a Valuable Biorefinery Fraction for Material Utilization", Environmental Science & Technology, Vol. ۴۶, pp.۸۳۸۹-۸۳۹۶, (۲۰۱۲).

Sahoo, S. K., Parveen, S. and Panda, J. J. ۲۰۰۷. The present and future of nanotechnology in human health care. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine. ۳(۱): ۲۰–۳۱

Salerno, M., Landoni, P. and Verganti, R. ۲۰۰۸. Designing foresight studies for Nanoscience and Nanotechnology (NST) future developments. Technological Forecasting and Social Change. ۷۵(۸): ۱۲۰۲-۱۲۲۳.

Sanchez, F. and Sobolev, K. ۲۰۱۰. Nanotechnology in concrete - A review. Construction and Building Materials. ۲۴(۱۱): ۲۰۶۰-۲۰۷۱.

Shanbara ,H.K.;Ruddock,F.;Atherton,W.A laboratory study of high performance cold mix asphalt mixtures reinforced with natural and synthetic fibres. Constr. Build. Mater. ۲۰۱۸, ۱۷۲, ۱۶۶–۱۷۵.

Sobolev, K., Flores, I., Hermosillo, R. and Torres-Martínez, L.M. ۲۰۰۶.Nanomaterials and Nanotechnology for High-Performance Cement Composites ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives. November ۷.۹۱-۱۱۸.

Steyn, W. J. V. ۲۰۰۸. Research and Application of Nanotechnology in Transportation. ۲۷th Southern African Transport Conference. ۳۴۵-۳۵۳.

Taniguchi, N.۱۹۷۴. On the basic concept of nanotechnology. Proceedings of the International Conference on Production Engineering. Tokyo. ۱۸-۲۳.

Tegart, G. ۲۰۰۹. Energy and nanotechnologies: Priority areas for Australia's future. Technological Forecasting and Social Change. ۷۶(۹): ۱۲۴۰-۱۲۴۶.

Territorio E Architettura Università Degli Studi di Parma, Italia.

Terrones-Saeta, J. M., Suárez-Macías, J., Iglesias-Godino, F. J., & Corpas-Iglesias, F. A. (۲۰۲۰). Development of Porous Asphalt with Bitumen Emulsion, Electric arc Furnace Slag and Cellulose Fibers for Medium Traffic Roads. *Minerals*, ۱۰(۱۰), ۸۷۲.

Torbjörn Jacobson. (۲۰۰۲) "Cold Recycling Of Asphalt Pavement - Mix In Plant", Swedish National Road and Transport Research Institute SE-۵۸۱ ۹۵ Linköping Sweden

Xiao, F., Amirkhanian, A N. and Amirkhanian, S.N. ۲۰۱۱. Influence of Carbon Nanoparticles on the Rheological Characteristics of Short-Term Aged Asphalt Binders. Journal of Materials in Civil Engineering. ۲۳(۴): ۴۲۳–۴۳۱.

Yao, H., You, Z., Li, L., Goh, S. W., Lee, CH, Yap, Y. K. and Shi, X. ۲۰۱۳. Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy. Construction and Building Materials. ۳۸(۰): ۳۲۷-۳۳۷.

Yarahmadi, N., Jakubowicz, L and Hjertberg, T. ۲۰۱۰. Development of poly(vinylchloride)/montmorillonite nanocomposites using chelating agents. Polymer Degradation and Stability. ۹۳(۲): ۱۳۲–۱۳۷.

You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S.W. ۲۰۱۱. Nanoclay. modified asphalt materials: Preparation and characterization. Construction and Building Materials. ۲۵(۲): ۱۰۷۲۱۰۷۸.

Yu, J., Zeng, X., Wu, S., Wang, L. and Lin, G. ۲۰۰۷. Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts. Materials Science and Engineering: A. ۴۴۷(۱–۲): ۲۳۳-۲۳۸. [۲۵] Aragão, F.T.S., Lee, L., Kim, Y.R and Karki, P. ۲۰۱۰. Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behavior of asphalt mixtures and asphaltic pavements.

Yusoff, N. I M., Mounier, D., Marc-Stéphane, G., Hainin, MR, Airey, G. D. and Di Benedetto, H. ۲۰۱۳. Modelling the rheological properties of bituminous binders using the ۲s۲pid model. Construction and Building Materials. ۳۸: ۳۹۵-۴۰۶

Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A. and Ebrahimi-Nejad, S. ۲۰۱۰. Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles. Construction and Building Materials. ۲۴(۷): ۱۲۳۹–۱۲۴۴.

Zhanping You "Nanomaterials in Asphalt Pavements. (۲۰۱۳). "Technological University, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Houghton, Michigan, ۴۹۹۳۱-۱۲۹۵, USA, DOI:۱۰.۶۱۳۵/Ijprt. Org.Tw/۲۰۱۳.۶(۳). Iv, ISSN ۱۹۹۷-۱۴۰۰ Int. J. Pavement Res. Technol. ۶(۳)

Zheng, X.; Easa, S.M.; Ji, T.; Jiang, Z. Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. J. Clean. Prod. ۲۰۲۰, ۲۶۴, ۱۲۱۴۶۶.

Zhu, W., Bartos, P. and Porro, A. ۲۰۰۴. Application of nanotechnology in construction. Materials and Structures. ۳۷(۹): ۶۴۹-۶۵۸.