بررسی تاثیر نانو لوله کربنی بر خصوصیات رئولوژیکی قیر

مقاله علمی – پژوهشی

رضوان باباگلی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران
سعید حامدی، دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Rezvan_Babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵
صفحه ۳۲۸-۳۱۳

چکیده

در سال‌های اخیر، مواد نانومتری مختلف در بسیاری از زمینه‌های علمی و مهندسی استفاده شده‌اند. به دلیل اندازه کوچک و سطح بزرگ آنها، نانومواده‌ها باعث بهبود ویژگی‌های زیرساختی نسبت به نسخه‌های بزرگتر و میکرویی خود می‌شوند. نانومواده‌ها ویژگی‌های بی‌نظیری دارند که آنها را به عنوان مواد افزودنی در مخلوط‌های آسفالت مناسب می‌کند. این مطالعه اهمیت نانومواده‌ها را با تأکید بر استفاده از نانو لوله‌های کربن به عنوان ماده اصلاح‌کننده آسفالت توصیف می‌کند. روش‌های مختلفی برای سنتز نانو لوله های کربن مانند تخلیه قوسی، تابش لیزر و رسوب‌گذاری بخار شیمیایی توضیح داده شده و انواع مختلفی از تکنیک‌های استفاده شده برای پخش نانو لوله های کربن در قیر شرح داده شده است. نتایج تست‌های معمولی مانند درجه نفوذ، نقطه نرمی، انعطاف پذیری و لزومیت به منظور تعیین عملکرد مکانیکی ماده اصلاح‌شده با نانو لوله‌های کربن در این کار نیز خلاصه شده است. تأثیر اصلاح‌های نانو لوله‌های کربن بر ویژگی‌های رئولوژیکی قیر نیز توصیف شده است. یک بررسی سیستماتیک از مطالعات تجربی در مورد اصلاح قیر با استفاده از نانو لوله‌های کربن انجام شده است. افزودن نانو لوله‌های کربن سختی قیر را بهبود می‌بخشد و این باعث افزایش مقاومت آن در برابر سایش می‌شود. پارامترها/متغیرهای مختلفی مانند نوع قیر، تکنیک مخلوط‌کردن، نوع مخلوط‌کن، ویژگی‌های نانو لوله‌های کربن و زمان مخلوط‌کردن نقش‌های کلیدی در اصلاح قیر با نانو لوله‌های کربن ایفا می‌کنند و به طور چشمگیری عملکرد قیر نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: نانو لوله کربنی، نانو ماده، عملکرد قیر، نقطه نرمی، انعطاف پذیری

۱-مقدمه

مخلوط آسفالت گرم (HMA[1]) ماده معمولاً مورد استفاده جهت ساخت روسازی جاده در سراسر دنیا است. این ماده در هر دو نوع روسازی‌های انعطاف‌پذیر و مختلط به کار می‌رود و تقریباً ۹۰٪ از جاده‌های جهان با HMA پوشیده شده‌اند. به دلیل افزایش حجم ترافیک، بار محور و تغییرات آب و هوایی، روسازی جاده قبل از رسیدن به عمر خدماتی طراحی‌شده‌ی خود تخریب می‌شوند. این امر باعث شده تا پژوهشگران به سمت اصلاح HMA بروند به جای استفاده از مخلوط‌های HMA معمولی. در سال‌های اخیر، انواع مختلفی از پلیمرها، مواد اصلاح‌کننده مبتنی بر مواد شیمیایی و پرکننده‌ها برای بهبود عملکرد روسازی آسفالتی استفاده شده‌اند. پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و غیره، پیش‌تر در پوشش‌های آسفالتی استفاده شده‌اند. اگرچه این پلیمرها بهبود قابل‌توجهی در ویژگی‌های رئولوژیک، فیزیکی و مکانیکی آسفالت آورده‌اند، اکنون پژوهشگران به سمت اصلاحات در سطح نانومتری متمایل شده‌اند. دلیل آن بر مبنای این حقیقت است که تعاملات اتمی و مولکولی می‌توانند تأثیر زیادی بر ویژگی‌های ماکروسکوپی مواد داشته باشند. نانومواده‌ها (با اندازه '۱۰-۹ متر') وقتی به عنوان مواد اصلاح‌کننده اضافه می‌شوند، توانمندی بهبود ویژگی‌های مختلف ماده را دارند (Ismael et al, 2021).

انواع مختلف مواد نانومتری مانند نانو لوله‌های کربن (CNTs[2])، نانو سیلیس، نانو TiO2، نانو خاک رس، نانو کربنات کلسیم (Nano CaCO3) و نانو ZnO، نانو ذرات سیاه کربن و ورق‌های نانوی گرافن در قیر برای بهبود عملکرد

آن استفاده می‌شوند و مشاهده شده است که استفاده از مواد نانومتری ویژگی‌های رئولوژیکی قیر را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (Ezzat et al, 2023). CNTs می‌تواند یک شبکه خوب از نانوکامپوزیت‌ها تولید کند و 'اثر پیوند پل' آن می‌تواند به طور موثر از توسعه میکرو-ترک‌ها در زیر تأثیر بارگذاری وسایل نقلیه سنگین و تأثیرات محیطی نامساعد جلوگیری کند. به دلیل این دلایل، پژوهشگران نانو لوله های کربن را به سایر مواد نانومتری برای اصلاح قیر ترجیح می‌دهند. بنابراین، بررسی دقیق مطالعات پژوهشی انجام‌شده بر روی استفاده از CNTs در آسفالت می‌تواند یک سکوی مشترک برای مطالعات آتی فراهم آورد.

۲- نانو لوله کربنی

۲-۱- معرفی نانو لوله کربنی

CNTsیکی از اصلی‌ترین مواد تقویت‌کننده در مقیاس نانو می‌باشند. ترکیب شگفت‌انگیز نسبت بالای سطح مخصوص به اندازه، اندازه کوچک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی استثنایی، آن‌ها را برای اصلاح آسفالت بسیار مناسب کرده است. این موارد از لحاظ اساسی آلوتروپ کربن هستند و یک ورقه یک اتمی از گرافن هستند که به شکل یک استوانه توخالی پیوسته با قطر تا ۱ نانومتر پیچیده شده‌اند(Ashish et al, 2019).

۲-۲- انواع نانو لوله کربنی

نانو لوله‌های کربن به طور کلی به سه نوع مختلف تقسیم می‌شوند؛ تک‌دیواره) [۳](SWCNT، دو دیواره [٤] (DWCNT) و چنددیواره [٥] (MWCNT)که به صورت طرحی در شکل‌های زیر ارائه شده‌اند. SWNTs می‌توانند از نظر نانوعلم به وضوح برمبنای ماده‌ی مادری خود، یعنی گرافن، شناخته شوند. این نوع دارای یک لایه یا دیواره می‌باشد، در حالی که نانو لوله‌های چنددیواره شامل آرایه‌هایی از نانوتیوب‌ها هستند، یکی درون یکی دیگر قرار دارد مانند حلقه‌های تنه یک درخت. آنها از یک لوله خارجی و یک لوله داخلی (یک نانوتیوب دو دیواره) تا به اندازه‌ی ۱۰۰ لوله (دیواره) یا حتی بیشتر متغیر هستند. هر لوله با فاصله‌ی خاصی از دو لوله مجاور خود توسط نیروی بین‌ذره‌ای نگه داشته می‌شود. نانو لوله های دو دیواره شامل لوله‌هایی با دو لایه دقیق هستند. آنها به عنوان یک پل هندسی بین MWCNTs و SWCNTs عمل می‌کنند. در مدلDoll، ورقه‌های گرافن در استوانه‌های هم‌مرکز ترتیب داده شده‌اند، در حالی که در مدلParchment ، یک ورقه گرافن دور خود پیچیده شده و شبیه یک روزنامه‌ی پیچیده است. قطرCNT می تواند از ۱تا ٤ نانومتربرا یSWCNT و ٥تا ٥٠ نانومتر در مورد MWNT متغیرباشد. طول CNT می‌تواند به چندین میکرومتربرسد. ترکی به طول طولانی و قطر کوچک می‌تواند منجربه نسبت‌های نزدیک به ۱:۱۰۰۰۰۰ با مقادیر مدول یانگ در محدوده ۱۸تا ٦٨GPa و کرنش‌های شکست ۰,۱۲ nm/nm شود (Pirmohammadi et al, 2020).

از نتایج مشخص است که MWCNTs دارای مدول یانگ و استحکام کششی بالاتری نسبت به SWCNTs هستند. استحکام کششی آنها می‌تواند تا ۱۵۰ GPa باشد که می‌تواند در بهبود کلی استحکام کششی آسفالت کمک کند اما هنوز نیاز به بررسی بیشتری دارد. از طرف دیگر، چگالی MWCNTs بسیار بیشتر از بیتومن است، که ممکن است منجر به جدایش فاز شود که در جدول ۲ آمده است. بنابراین، نیاز به بررسی پایداری ذخیره‌سازی مخلوط‌های اصلاح‌شده با CNTs وجود دارد. علاوه بر این، تأثیر نسبی انواع مختلف CNTs بر ویژگی‌های بیتومن و مخلوط‌ها هنوز توسط هیچ پژوهشگری بررسی نشده است.

۳- تولید CNTs

روش‌های متعددی برای تولید CNTs در مقیاس بزرگ توسعه یافته‌اند؛ برخی از معروف‌ترین آن‌ها به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

-تخلیه قوس

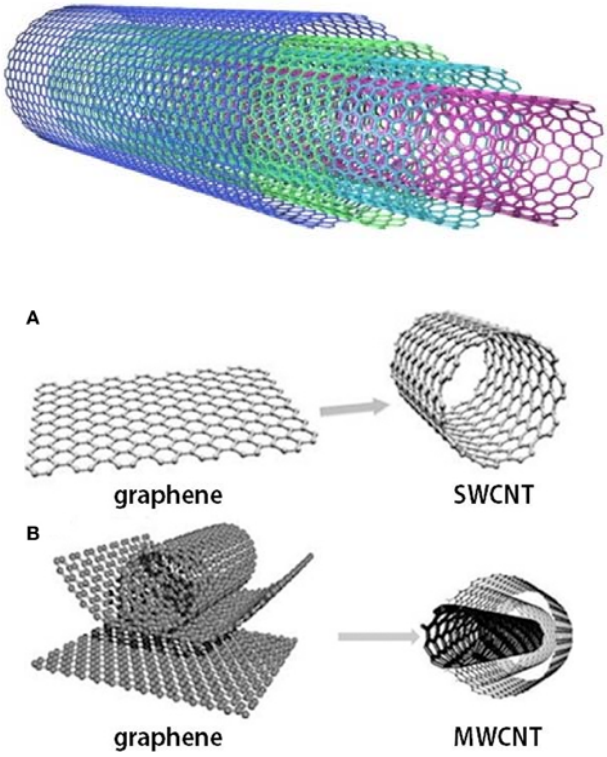
-تجزیه لیزری

- نشست شیمیایی بخار

۳-۱- روش تخلیه قوس

در روش تخلیه قوس، CNTs با استفاده از یک ولتاژ قوس جریان مستقیم بین دو الکترود گرافیتی که در گاز نجیبی مانند هلیم غمر شده‌اند، سنتز می‌شوند. فولرن‌ها به صورت دودک داخل اتاق انباشته می‌شوند و وقتی از میله‌های گرافیتی خالص استفاده می‌شود، MWCNTs روی کاتد انباشته می‌شود SWCNTs . به صورت دودک تولید می‌شوند وقتی یک آند گرافیتی دارای یک کاتالیزور فلزی با یک کاتد گرافیتی خالص استفاده می‌شود. معمولاً، روش تخلیه قوس برای سنتز CNTs انتخاب می‌شود؛ یک قوس بین دو میله گرافیتی ایجاد می‌شود که در فاصله‌ای چند میلی‌متری نگه داشته می‌شوند. در این فرآیند، تبخیر کربن حاضر روی الکترود منفی رخ می‌دهد. نمودار طرحی از فرآیند تخلیه قوس در شکل ۲ نشان داده شده است.

SWCNTs همچنین می‌توانند با همین تکنیک تولید شوند. تریسی و گیبسون (۱۹۹۶) از این روش برای تولید CNTs در مقیاس بزرگ استفاده کردند. ایشیگامی، کامینگز، زتل و چن (۲۰۰۰) یک روش قوسی ساده‌شده با هزینه پایین گزارش کردند که می‌تواند برای تولید مداوم MWCNTs در نیتروژن مایع استفاده شود. نیتروژن مایع به طور اساسی یک محیط بدون اکسیژن برای واکنش فراهم می‌کند. برای به دست آوردنSWCNTs، نیاز است که الکترودها در ناخالصی‌های کاتالیزور فلزی دوپ شوند.



شکل ۱. أنواع نانولوله کربنی

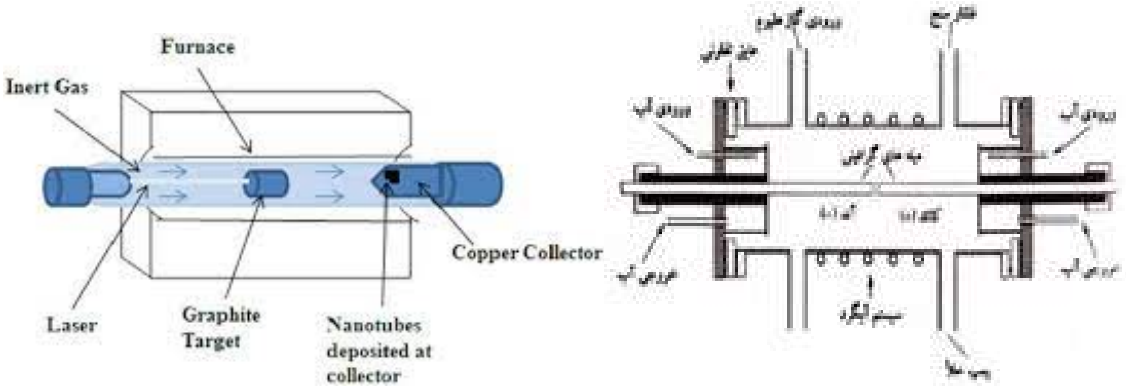
۳-۱-۲-روش تجزیه با لیزر

کارکنان این روش را اولین بار در دانشگاه ریو در سال ۱۹۹۵ کشف کردند. برای اولین بار در سال ۱۹۹۶ از یک لیزر دوباره‌پالس برای سنتز CNTs استفاده شد و عملکردی با بیش از ۷۰٪ خلوص وزنی به دست آمد. تکنیک تجزیه با لیزر از یک پرتو لیزر شدت بالا برای تبخیر گرافیت استفاده می‌کند و نانو لوله‌های با کیفیت و خلوص بالا تولید می‌کند؛ تنها پیامد آن هزینه بالای سنتز است. نمونه‌ها با تبخیر لیزری از میله‌های گرافیت با یک ترکیب کاتالیزور ۵۰:۵۰ از کبالت و نیکل در ۱۲۰۰ سانتی‌گراد در آرگون جریانی آماده می‌شوند، که توسط

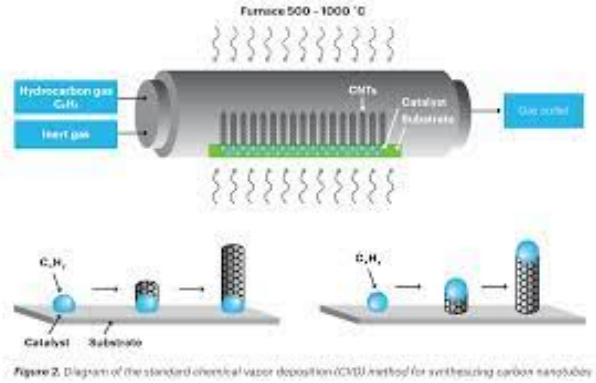
درمان حرارتی در یک خلاء در ۱۰۰۰ سانتی‌گراد برای حذف C60پیگیری می‌شود. به طور کلی، از تجزیه لیزری دو مرحله‌ای برای تولید CNTs استفاده می‌شود. پالس اولیه تبخیر لیزر توسط پالس دوم برای تبخیر سریع هدف دنبال می‌شود. این کمک می‌کند تا مقدار کربنی که به صورت دودک انباشته می‌شود، به حداقل برسد. رشد لوله‌ها روی اتم‌های کاتالیزور رخ می‌دهد و آنها ادامه دارند تا زمانی که تجمع اتم‌های کاتالیزور در انتهای لوله رخ دهد. لوله‌های تولید شده با این تکنیک به شکل مت رشته‌ای با قطر ۱۰ – ۲۰ نانومتر و تا ۱۰۰ میکرون یا بیشتر در طول وجود دارند. تغییر در دما و ترکیب کاتالیزور می‌تواند CNTs با قطرها و طول‌های متوسط مختلفی ارائه دهد. شکل ۲ تولید CNTs از طریق این روش را نشان می‌دهد.

۳-۳- روش رسوب شیمیایی بخار

رسوب بخار شیمیایی کربن در سال‌های ۱۹۵۲ و ۱۹۵۹ گزارش شده بود، اما CNTs برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ از طریق این روش تولید شدند. در سال ۱۹۹۶، CVD به عنوان یک روش متداول برای سنتز CNTs به مقیاس بزرگ شد. این روش امکان کنترل جهت رشد روی یک زیراساس را فراهم می‌کند و مقادیر زیادی از CNTs را تولید می‌کند. به طور معمول، CNTs توسط روش ترسیب بخاری شیمیایی حرارتی (TCVD)تولید می‌شوند. در این روش، تجزیه یک گاز حاوی کربن در دمای بالا در حضور کاتالیزور فلزی رخ می‌دهد. در فرآیندCVD، هیدروکربن‌ها به عنوان منابع کربنی مانند متان، کربن منواکسید و استیلن استفاده می‌شوند. جریان هیدروکربن‌ها از طریق لوله کوارتز در یک دیگر در دمای بالایی حدود ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. دمای بالا باعث تجزیه هیدروکربن‌ها به هیدروژن و کربن می‌شود که در نهایت منجر به تولید مولکول‌های کربن بسیار خالص می‌شود. این مولکول‌ها به سمت زیرلایه‌ها پخش می‌شوند که گرم شده و با کاتالیزور پوشیده شده‌اند (معمولاً فلز انتقالی ردیف اول مانند نیکل، آهن یا کبالت) و در آنجا به آن متصل می‌شوند. نوع CNTs تولید شده توسط ماهیت زیرلایه تعریف می‌شود. به تازگی DWCNTs و MWCNTs هم از طریق این روش تولید می‌شوند. نمودار تشریحی CVD در شکل ۳ نشان داده شده است. ورودی توان پایین، محدوده دمای پایین‌تر و خلوص بالا از اصلی‌ترین مزایای فرآیند CVD هستند. این روش می‌تواند برای تولید هر دو نوع MWNTs و SWNTs استفاده شود که بستگی به دما دارد. برای تولید SWNTs، دمای نسبتاً بالاتری نسبت به تولید MWNTs مورد نیاز است، که هزینه‌های آنها را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.



شکل ۲. تولید نانو لوله کربن به روش‌های تخلیه قوس و روش تجزیه با لیزر



شکل ۳. تولید نانو لوله کربن به روش رسوب شیمیایی بخار

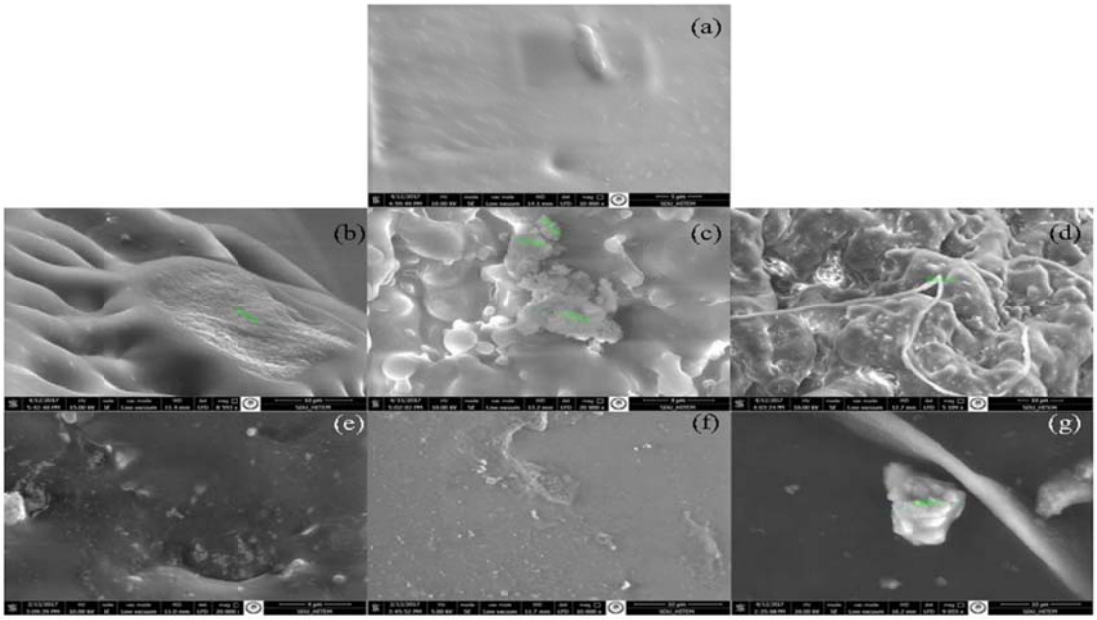
٤- ویژگی‌های CNTs استفاده شده در روسازی

نسبت بالای منظر (نسبت طول به قطر) و مساحت سطح بالا باعث می‌شود CNTs با یکدیگر به شکل توده‌هایی به‌هم‌پیوسته شوند و توزیع آنها در قیر سخت است. از جدول فوق می‌توان دید که حداقل ۹۰٪ CNTs خالص برای تغییر آسفالت استفاده می‌شوند، بنابراین مقادیر خلوص کمتر ممکن است بر کارایی CNTs تأثیر گذارد.

۵- پراکندگی CNTs در قیر

عمدتاً باور شده است که CNTs هنگام مخلوط کردن با قیر توده‌هایی را تشکیل می‌دهند. همانطور که بالاتر ذکر شده، CNTsبه دلیل مساحت سطحی بسیار زیاد با یکدیگر درهم می‌پیچند، و این امر توزیع آنها را بسیار سخت می‌کند. ویسکوزیته بالای قیر می‌تواند مانع دیگری در توزیع مناسب CNTsدر قیر باشد. مخلوط نادرست CNTs منجر به نتایج ناراضی‌کننده و نادرست می‌شود. بنابراین، انتخاب روش مخلوط کردن مناسب فاز بسیار حیاتی برای پراکندگی CNTs در آسفالت است. دو روش که معمولاً برای مخلوط کردن CNTsدر قیر استفاده می‌شوند، فرآیند مخلوط کردن خشک و مرطوب است. فناوری پراستفاده‌تر برای تولید مخلوط‌های نانو متد مخلوط کردن خشک است به دلیل سادگی آن. در این روش، نانومواد به طور مستقیم به قیر اضافه شده و ترکیب می‌شود تا مخلوط مناسبی بدون تشکیل توده‌ها حاصل شود. از طرف دیگر، در روش مخلوط کردن مرطوب، ابتدا یک راه حل از نانومواد آماده می‌شود و سپس مخلوط کردن انجام می‌شود. برای این منظور، ابتدا نانومواد در یک حلال با کمک انواع مختلف مخلوط کننده‌ها (التراسونیک، مخلوط‌کن‌های مغناطیسی و غیره) حل می‌شوند. این راه حل سپس با استفاده از مخلوط کننده با چسب آسفالتی تحت دمای مناسب ترکیب می‌شود تا حلال کاملاً تبخیر شود. اثبات شده است که حلال می‌تواند به عنوان پلی بین نانومواد و چسب آسفالتی عمل کند. در نتیجه، نانومواد می‌توانند توزیع همگن در آسفالت را انجام دهند. انواع مختلفی از مخلوط کننده‌ها برای هدف ترکیب در بازار موجود هستند، مانند مخلوط کننده مکانیکی، مخلوط کننده برش بالا با سرعت‌های مخلوط کردن متفاوت و مخلوط کننده‌های التراسونیک.

تکنیک مخلوط کردن مرطوب برای پراکندگی یکنواخت CNTsنسبت به تکنیک مخلوط کردن خشک، مؤثرتر است. زیرا، تلاش‌های بزرگی برای جدا کردن توده‌های CNTs و پراکندگی یکنواخت آنها در چسب انتخاب شده در موارد مخلوط کردن خشک لازم است. اما، مشکل مرتبط با تکنیک مخلوط کردن مرطوب، انتخاب مناسب حلال مخلوط کردن است. زیرا حلال انتخاب شده باید پس از مخلوط کردن همگن CNTs در ماده چسب کاملاً تبخیر شود .[۷] FTIR می‌تواند به عنوان یک آزمون آزمایشگاهی تاییدی برای اطمینان از تبخیر مناسب حلال مخلوط کردن پس از مخلوط کردن همگن CNTs در بیتومن استفاده شود. علاوه بر این، پیاده‌سازی زمینی مخلوط کردن مرطوب بسیار مشکل است و همچنین نسبت به تکنیک مخلوط کردن خشک، هزینه‌بر است.



شکل ٤. نتایج آزمایش SEM برای نمونه‌های مختلف قیر حاوی نانولوله کربنی

۵-۱- انواع مخلوط‌کن

مخلوط‌کن‌های متنوعی در بازار موجود است که می‌توان برای پراکندگی CNTs در چسب آسفالتی استفاده کرد. پژوهشگران از انواع مختلف تجهیزات و تکنیک‌های مخلوط کردن برای آماده‌سازی نمونه‌های قیر تغییر یافته با CNTs استفاده کرده‌اند. برخی از مخلوط‌کن‌های متداول برای پراکنش نانوذرات در قیر در زیر بررسی شده‌اند.

۵-۱-۱- مخلوط‌کن مکانیکی

مخلوط‌کن مکانیکی برای مخلوط کردن مواد پودری خشک و همچنین حل کردن یک ماده جامد در یک ماده مایع برای تشکیل یک محلول استفاده می‌شود. مخلوط‌کن مکانیکی می‌تواند برای پراکنش نانومواد مانند CNTs در قیر استفاده شود، اما نمی‌تواند توده‌های CNTs را شکسته و از هم جدا کند، بنابراین پراکنش همگن نخواهد بود. حسن در مقاله‌اش به این نتیجه رسید که مخلوط‌کن مکانیکی نمی‌تواند CNTs را از یکدیگر جدا کند، که این به این معناست که در برخی قسمت‌های نمونه ترکیب نانومواد وجود دارد. با توجه به این مشکل، مخلوط‌کن مکانیکی برای ترکیب خشک پیشنهاد نمی‌شود.

۵-۱-۲-مخلوط‌کن برش بالا

مخلوط‌کن برش بالا بیشترین کاربرد را برای مخلوط کردن نانومواد و پلیمرها در بیتومن دارد. نرخ چرخش نوک مخلوط‌کن می‌تواند بر اساس نوع افزودنی برای تغییر بیتومن تعیین شود. این مخلوط‌کن در مخلوط کردن آسفالت و افزودنی‌ها استفاده می‌شود، به دلیل ساختار ویژه نوک آن. در واقع، طراحی ویژه نوک مخلوط‌کن باعث می‌شود مخلوط وارد شده و به سرعت از فاصله میان دو صفحه بسیار نزدیک حرکت کرده و از فضای میان شکاف‌های داخلی در لایه بیرونی خارج می‌شود، همانطور که در شکل نشان داده شده است. این روند باعث می‌شود مخلوط آسفالت و پلیمر همگن‌تر شود و به شدت توصیه می‌شود.

۵-۱-۳- مخلوط‌کن فراصوتی

موج‌های مکانیکی با فرکانس‌های نوسان بیشتر از ۲۰ کیلوهرتز به عنوان موج‌های فراصوتی شناخته می‌شوند. یک نقطه که با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و پهنای نوسان ۱۰ میکرومتر نوسان می‌کند، شتابی دارد که ۲۵۰۰۰ برابر بیشتر از جاذبه است. مخلوط‌کن فراصوتی با ایجاد موج‌های فراصوتی و کاویتاسیون، مقدار زیادی انرژی تولید می‌کند که می‌تواند مخلوط را ترکیب کند و همچنین نانو ذرات را از یکدیگر جدا کند و در نهایت یک مخلوط کاملاً همگن ایجاد کند. از تحقیقات قبلی معلوم است که CNTs نمی‌توانند با یک همزن مکانیکی به طور همگن پراکنده شوند، در حالی که مخلوط‌کن برش بالا و مخلوط‌کن فراصوتی نتیجه بهتر و همگن‌تری دارند. امروزه بسیاری از پژوهشگران از مخلوط‌کن

برش بالا برای پراکنش CNTs در قیر استفاده می‌کنند و این توانایی انتقال به مقیاس صنعتی را دارد.

پژوهشگران مختلف از شرایط مخلوط‌کردن متفاوتی استفاده کرده‌اند و قاعده عمومی‌ای برای انتخاب شرایط مخلوط‌کردن وجود ندارد. با این حال، حداقل فرکانس مخلوط‌کردن ۱۵۵۰ دور در دقیقه از جدول فوق مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، زمان و فرکانس مخلوط‌کردن عوامل تعیین‌کننده برای پراکنش مؤثر CNTs در بیتومن نیستند. این هم به دمای مخلوط‌کردن، ابزارهای مخلوط‌کردن و درجه بیتومن بستگی دارد. بنابراین، یک شکاف تحقیق در ادبیات موجود در مورد بهینه‌سازی زمان و فرکانس مخلوط‌کردن برای پراکنش یکنواخت CNTs یافت شد.

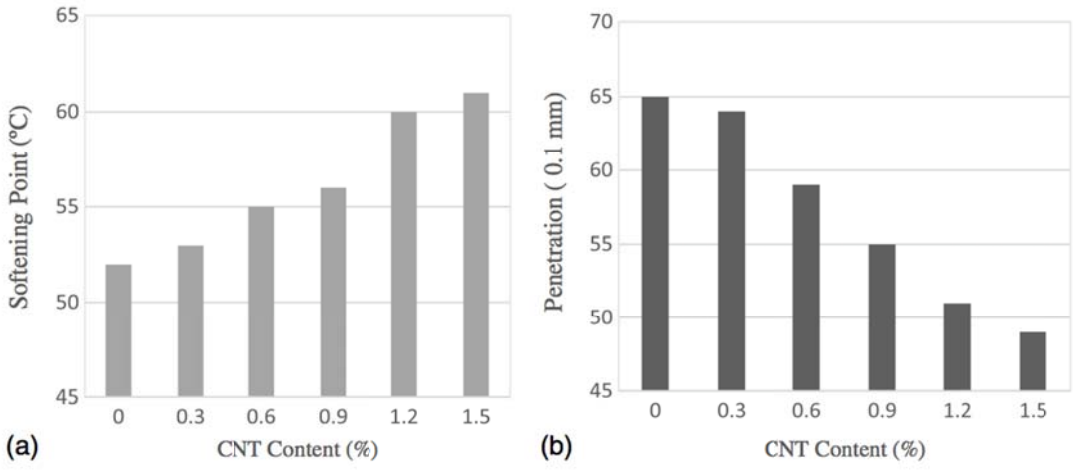
٦- بررسی تاثیر نانو لوله کربنی بر خصوصیات قیر

٦-١-ویژگی های فیزیکی

برای بررسی شرایط مخلوط‌کردن و تعیین بهترین روش برای ادغام CNT در مواد قیر، مخلوط‌هایی از قیر و CNT با استفاده از ترکیب‌های مختلف سرعت و زمان مخلوط کردن تهیه شدند. هر دو سرعت و زمان مخلوط کردن سه سطح عامل را داشتند، به ترتیب ۲۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۵۰۰۰ دور در دقیقه برای سرعت‌های مخلوط کردن و ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه برای زمان مخلوط کردن. هم محتوای CNT و دمای مخلوط‌کردن برای تمام ترکیب‌های سرعت و زمان ثابت بودند، به ترتیب ۱٫۰٪ به وزن و ۱۲۰درجه سانتی‌متر به عنوان یک کنترل، یک نمونه مواد چسبنده آسفالت پایه بدون محتوای CNT تحت فرآیند مخلوط کردن در ۵۰۰۰ دور در دقیقه برای ۳۰ دقیقه قرار گرفت. بنابراین، ده مواد قیر تغییر یافته با CNT برای آزمایش آماده شدند.

به دلیل محدودیت‌های زمانی، فقط نفوذ، نقطه نرم شدن و پلاستیسیته برای نمونه‌های تولید شده توسط ترکیب‌های مختلف مخلوط مورد سنجش قرار گرفتند. نفوذ، نقطه نرم شدن و پلاستیسیته همه طبق JTG/E۲۰-۲۰۱۱ "روش‌های استاندارد تست قیر و مخلوط‌های آسفالتی برای مهندسی بزرگراه" انجام شد. نه تکرار برای نفوذ، دو برای نقطه نرم شدن و سه برای پلاستیسیته آزمایش شدند.

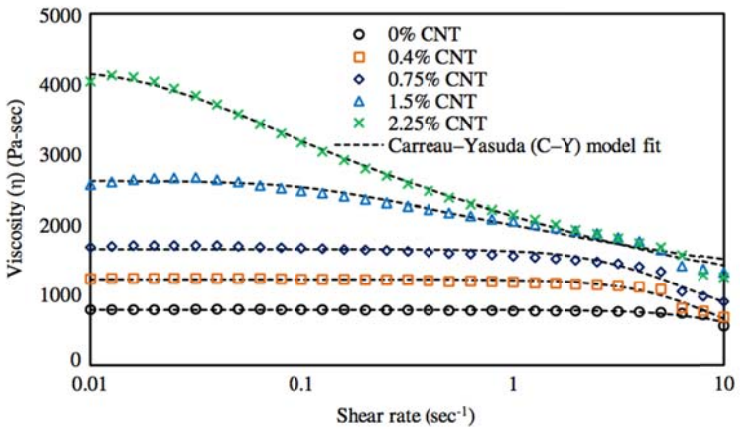
اصلاح قیر با CNT در واقع به بهبود عملکرد کاهش نفوذ و افزایش نقطه نرمی در دمای بالا در مواد قیر کمک می‌کند. هرچه ماده قیر زبرتر باشد، توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی بهتری دارد. با این حال، اثر سفت کننده تغییر با CNT می تواند انعطاف پذیری در دمای پایین قیر را کاهش دهد (Abdelrahman et al., ۲۰۱٤). افزودنCNT باعث افزایش نقطه نرم شدن قیر شد. همچنین در افزایش CNT ازسطح پایین ۰٫۳ درصد به سطح بالا ۱٫۵ درصد باعث افزایش در نقطه نرم شدن، تقریباً از ۵۳تا ٦١ درجه سانتیگراد شد. نتایج آزمون‌های فیزیکی و رئولوژیکی نشان می‌دهد که افزودن CNT به بایندر می‌تواند نقطه نرم‌شدگی، پارامتر PI و مدول پیچیده را افزایش دهد و درجه نفوذ، زاویه فاز و پارامترهای VTS و TS را کاهش دهد. (Shiraishi et al. 2011; Dos Santos et al. ۲۰۰۹) بهبود پایداری ذخیره‌سازی مصالح تغییر یافته با SBS یکی از مزایای اصلی استفاده از CNT است. نتایج آزمون‌های پایداری ذخیره‌سازی نشان داده‌اند که افزودن CNT باعث افزایش SI و Rd شده و در عین حال موجب کاهش Rs و مقادیر SPD می‌شود. (Wang et al.۲۰۰۹).



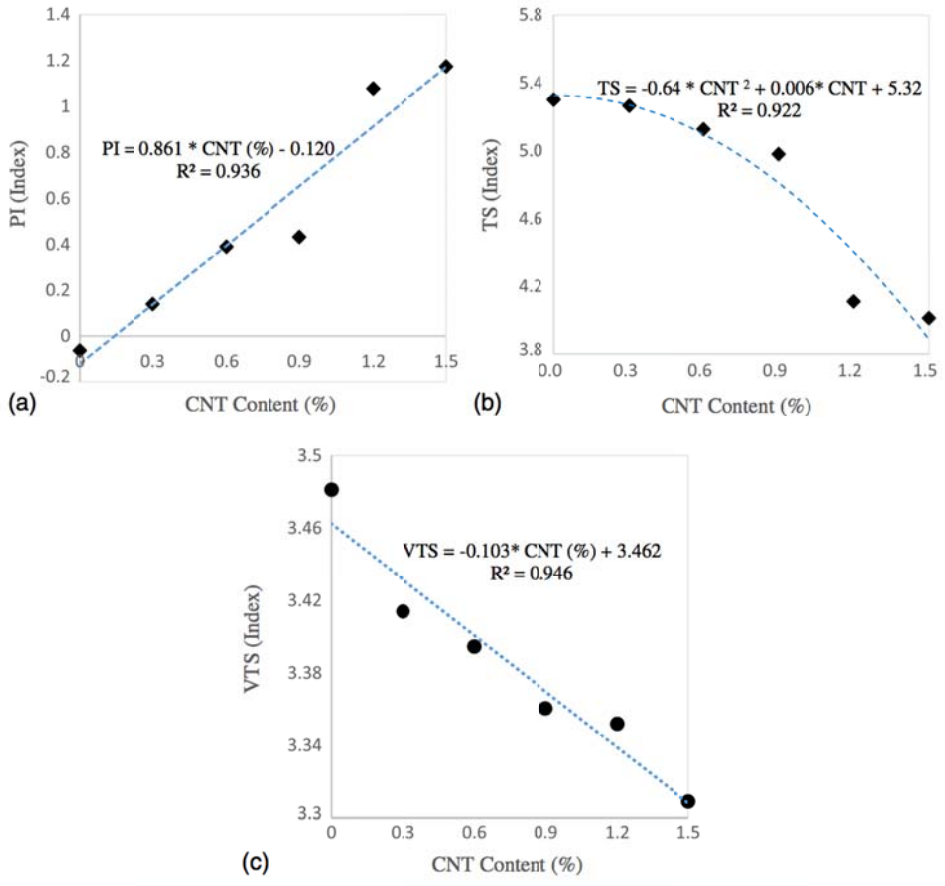
شکل ۵. نتایج آزمایشات فیزیکی قیر

۶-۲-ویسکوزیته

مقدار بیشتر ویسکوزیته باعث می‌شود روانی قیر دشوار شود. معمولاً ویسکوزیته قیر در ۱۳۵ oC یا ۱۶۵ oC تعیین می‌شود، زیرا این دو دما دماهای تراکم و اختلاط برای مخلوط‌های آسفالتی را تعریف می‌کند. تغییر ویسکوزیته نسبت به قیر پایه در تحقیقات مختلف نشان داده شده است. به طور کلی با افزودن CNTها، ویسکوزیته افزایش می‌یابد. تأثیر نسبی CNTها بر میزان افزایش ویسکوزیته بستگی به نوع قیر پایه دارد اگر تمام شرایط مخلوط کردن ثابت نگه داشته شوند. به عنوان مثال، با افزودن ۱٪ CNT به بیتومن خالص ۷۰/۶۰، فرامرزی یک مقدار ویسکوزیته بیشتری نسبت به گالویاک گزارش کرد. این تفاوت احتمالاً به دلیل شرایط مخلوط بود. گالویاک از همزن سونوگرافی به مدت ۱۵ دقیقه استفاده کرد در حالی که فرامرزی با استفاده از مخلوطکن برش بالا با فرکانس ثابت ۲۵۰۰ دور در دقیقه، در ۱۶۰ سانتی گراد و به مدت ۲۵ دقیقه CNTها را مخلوط کرد. در کل، این گرایش‌ها با مشاهدات انجام شده در نتیجه مقادیر نفوذ و نقطه نرم‌شدن مطابقت داشتند.Faramarzi M (۲۰۱۵). همانطور که درصد CNT افزایش می‌یابد، ویسکوزیته آسفالت اصلاح شده با CNT نیز افزایش می یابد. غلظت‌ها ی بالاتر CNT باعث افزایش ویسکوزیته قابل توجهی می شود که احتمالاًبه تشکیل شبکهCNT نسبت داده می‌شود که حرکت مولکول‌های قیر را مهار می‌کند. همچنین، همانطور که انتظار می‌رفت، داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دما، ویسکوزیته قیر کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش ویسکوزیته نشان می‌دهد که عملکرد رئولوژیکی در دمای بالا و مقاومت دربرابر پیری قیر با اصلاح CNTافزایش می‌یابد، در حالی که کارایی قیر ممکن است با اصلاح CNT کمی کاهش یابد. (Abdelrahman et al., ۲۰۱۴) نتایج نشان‌دهنده رابطه خوبی بین مقدار [۸] PI و [۹] VTS در بایندر تغییر یافته با CNT است .(R2= ۰.۸۰۸) علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که رابطه عالی بین مقادیر TS10 و PI (R2= ۰.۹۸۷)برای قیرهای اصلاح شده با CNT وجود دارد. با این حال، نتایج نشان‌دهنده رابطه منصفانه‌ای بین مقادیر TSو PI با ضریب همبستگی R2= ۰.۷۸۸ است. رابطه معناداری بین درصد CNT و مقادیرPI، TS، و VTS برای قیرهای اصلاح شده با CNT وجود دارد، با ضریب همبستگی به ترتیب ۰,۹۳۶، ۰,۹۲۲ و ۰,۹۴۶ .(Shiraishi et al. 2011; Dos Santos et al. 2009) هر چه مقدار VTSبزرگترباشد، قیر نسبت به تغییرات ویسکوزیته با دما حساس‌تر است. (mohammed abdel raouf 2009)



شکل ۶. نتایج ویسکوزیته قیر



شکل ۷. نتایج آزمایش حساسیت حرارتی قیر

٦-٣-شیار شدگی

G*/sin δ که معمولاًبه عنوان معیاری از توانایی قیر در مقاومت در برابر شیار شدن در نظر گرفته می‌شود، قیر با اصلاح ۱٪ CNT توسط جرم پایه قیر دارای مقاومت شیاردار بالاتری نسبت به قیر اصلاح شده با ۲٪ CNT است. این نتیجه غیرمنتظره ممکن است به دلیل تنوع در یک یا هر دو آزمایش DSR[11] و رو ش پیری کوتاه مدت باشد. با این حال، به طور کلی، قیر اصلاح شده با CNT مقادیر G*/sin δ بالاتری نسبت به قیر پایه اصلاح نشده نشان می‌دهند که مربوط به بهبود مقاومت شیاردار است. (Glover et al., 2005; King, Anderson, Hanson, & Blankenship, 2012; Mensching, Rowe, Daniel,& Bennert, 2015). نتایج آزمون شیار جای چرخ برای عمق شیار شدگی در درصدهای مختلف CNT نشان می‌دهد که با افزودن CNT، مقاومت در برابر شیار شدگی افزایش یافته است. مقدار شیارشدگی نسبت به قیر پایه تا ۲۵٪ و ۳۷٪ با افزودن ۱٪ و ۳٪ CNT به ترتیب در ٤٠ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. شیارشدگی کاهش یافته است زیرا افزودن CNT به چسب سختی آن را افزایش داده است. افزودن CNT عملکرد دمای بالا مخلوطهای آسفالتی را با بهبود واکنش الاستیک قیر بهبود داده است. علاوه بر این، افزودن CNT به چسب به دلیل سطح خاص بالا می‌تواند ذرات قیر را تقویت کند و قدرت ذرات قیر را افزایش دهد. عامل فوق می‌تواند ویسکوزیته و چسبندگی قیر را افزایش دهد و حساسیت آن به تغییرات شکل دائمی را کاهش دهد. (Chelovian, A.; Shafabakhsh, G 2017)

۶-۴-عملکرد در دمای پایین

موادی که عملکرد قیر در دماهای بالا را بهبود می‌بخشند ممکن است عملکرد دمای پایین را تهدید کنند، یعنی احتمال خستگی و ترک خوردگی حرارتی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین آزمون‌ها در این زمینه، رئومتر قوس خمش است. پارامترهای اندازه‌گیری شده در این آزمون، سفتی و مقدار m هستند. بسیاری از پژوهشگران عملکرد دمای پایین بیتومن‌های تغییر یافته با نانو را بررسی کرده‌اند. آمین و گونگ به این نتیجه رسیدند که افزایش محتوای CNT منجر به افزایش سفتی و کاهش مقدار m می‌شود، همانطور که در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مشاهده می‌شود. اما شو با این موضوع مخالفت کرد و گزارش داد که مقدار m با افزایش مقدار CNTها اندکی افزایش می‌یابد. آنها همچنین گزارش دادند که سفتی نیز برای دوز CNTها بیش از ۱٪ افزایش یافت(MF, Ahmad ul Haq N, Nasir MA (۲۰۱۹). ویژگی‌های عملکرد دمای پایین قیر در BBR[۱۲] در دما ی -۱۲درجه سانتی گراد با تعیین سفتی و مقادیر m تعیین شد. سفتی کمتر و m-value بالاتر نشان دهنده یک چسب انعطاف پذیرتر در دماهای پایین است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن CNT باعث افزایش سفتی می‌شود در حالی که بر مقادیر m تأثیر نمی گذارد یا آن را کاهش نمی‌دهد، اصلاح CNT عملکرد قیر را در دمای پایین افزایش نمی‌دهد. نتایج مشابهی را می‌توان در تحقیقات بر روی قیر اصلاح شده با نانورس یافت. (Abu Al-Rub et al., 2012; Tyson et al., 2011)

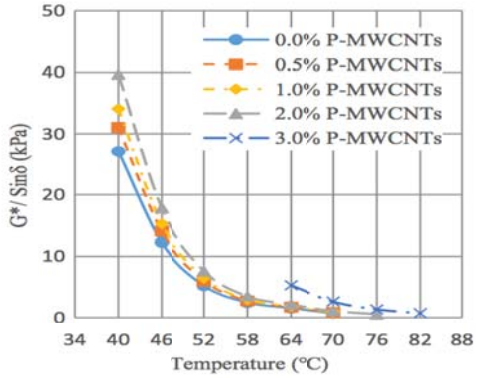
۶-۵-خصوصیات پیر شدگی

نتایج تحقیقات نشان داد که افزودنCNTها به قیر مقاومت آن در برابر پیری کوتاه مدت را افزایش می‌دهد. پژوهشگران مختلف از PAV برای بررسی تأثیر پیری بلند مدت بر قیر تغییر یافته باCNT ها استفاده کرده‌اند و بیان کرده‌اند که CNTها تأثیر پیری را کاهش می‌دهند.. (Santagata E, Baglieri O (2012). اکسیداسیون قیر یک فرآیند غیر قابل اجتناب است که نتیجه تبخیر مولکول‌های با وزن مولکولی سبک‌تر از قیر می‌شود، که منجر به سفت‌شدن و شکننده‌شدن و در نهایت، تخریب روسازی در محیط طبیعی می‌شود (Ashish و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، یک چسب با درجه اکسیداسیون پایین‌تر برای عملکرد بهتر در محیط طبیعی مطلوب است. در این مطالعه، نقاط نرم‌شدن قیر اصلاح‌شده با CNT قبل و بعد از پیری در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده‌اند تا پتانسیل مقاومت در برابر پیری ارزیابی شود. افزایش نقطه نرم‌شدن (ISP) محاسبه شده‌است تا تجزیه و تحلیل کیفی از پتانسیل مقاومت در برابر پیری انجام شود. ISP نمایانگر افزایش در مقدار نقطه نرم‌شدن قیر به عنوان نتیجه پیری است. قیر با مقدار ISP بالاتر، درجه بیشتری از حساسیت به پیری را نمایان می‌سازد، و بالعکس. مشاهده می‌شود که افزودن CNT منجر به کاهش مقدار ISP می‌شود. به عنوان مثال، مقدار ISP برای چسب کنترل ۴٫۴ درجه سانتی‌گراد است، که با افزودن ۱٫۵ درصد CNT به ۳٫۲ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که با بهبود در پارامترهای عملکرد رئولوژیکی مختلف، افزودن CNT می‌تواند به بهبود پتانسیل مقاومت در برابر پیری چسب کنترل نیز کمک کند. (Yu و همکاران، ۲۰۰۹؛ Jahromi و همکاران، ۲۰۱۰؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۵b؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۶).

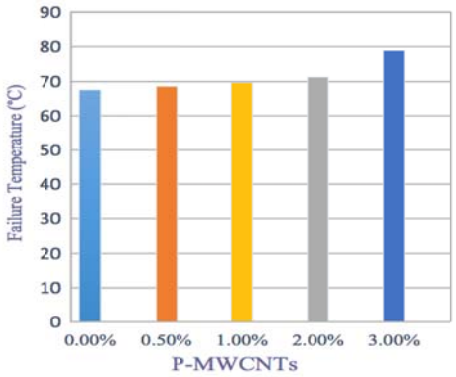
۶-۶- شیار شدگی

$G^*/\sin\delta$ که معمولاًبه عنوان معیاری از توانایی قیر در مقاومت دربرابر شیار شدن در نظر گرفته می‌شود، قیر با اصلاح ۱٪ CNT توسط وزن پایه قیر دارای مقاومت شیاردار بالاتری نسبت به قیر اصلاح شده با ۲٪ CNT است. این نتیجه غیرمنتظره ممکن است به دلیل تنوع در یک یا هر دو آزمایش DSR و روش پیری کوتاه باشد. با این حال، به طور کلی، قیر اصلاح شده با CNT مقادیر $G^*/\sin\delta$بالاتری نسبت به قیر پایه اصلاح نشده نشان می دهند که مربوط به بهبود مقاومت شیاردار است. (Glover et al., 2005; King, Anderson, Hanson, & Blankenship, 2012; Mensching, Rowe, Daniel,& Bennert, 2015)

نتایج آزمون شیار جای چرخ برای عمق شیار شدگی در درصدهای مختلف CNT نشان می دهد که با افزودن CNT، مقاومت در برابر شیار شدگی افزایش یافته است. مقدار شیارشدگی نسبت به چسب پایه تا ۲۵٪ و ۳۷٪ با افزودن ۱٪ و ۳٪ CNT به ترتیب در ۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. شیارشدگی کاهش یافته است زیرا افزودن CNT به چسب سختی آن را افزایش داده است. افزودن CNT عملکرد دمای بالا مخلوط‌های آسفالتی را با بهبود واکنش الاستیک قیر بهبود داده است. علاوه بر این، افزودن CNT به چسب به دلیل سطح خاص بالا می‌تواند ذرات قیر را تقویت کند و قدرت ذرات قیر را افزایش دهد. عامل فوق می‌تواند ویسکوزیته و چسبندگی قیر را افزایش دهد و حساسیت آن به تغییرات شکل دائمی را کاهش دهد. (Chelovian, A.; Shafabakhsh, G 2017)

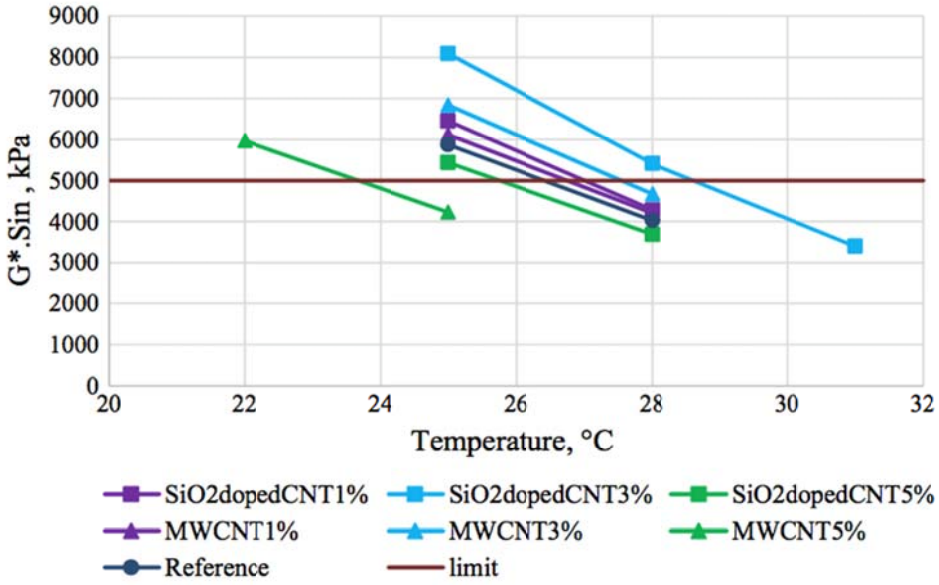


(c) G*/ sinδ versus Temperature for Unaged Unmodified (Control) and P-MWCNTs Modified Asphalts.



(d) Failure Temperature for Unaged Unmodified (Control), and P-MWCNTs Modified Asphalts.

شکل ۹. شیارشدگی قیر



شکل ۱۰. نتایج خستگی قیر

۶-۷-خستگی قیر

بهبود قابل‌توجه در طول عمر خستگی با افزایش درصد CNT به قیر کنترل مشهود است. به عنوان مثال، برای محتوای CNT = ۰.٤٪، میانگین تعداد چرخه‌های بار تا نقطه شکست در سطح تنش ۱٪ مشاهده می‌شود که برابر با ۲۸،۷٦٦ است که با افزایش درصد CNT به ۰،۷۵٪ به ۳٦،۲۵۱ افزایش یافت. افزایش مشابهی در عمر خستگی برای سایر درصدهای CNT نیز مشهود است (Santagata et al. 2015a, b). چنین بهبودی در عمر خستگی با افزودن CNT ممکن است نتیجه انتقال بار موثر از فاز ماتریس قیر به فاز CNT باشد، که نشان‌دهنده تعامل بهبودیافته بین آنها است. اگرچه افزودن CNT بیش از ۱،۵٪ نتیجه‌ی کاهش جزئی در مقدار سختی به دلیل توده بندی CNT در درصدهای بالاتر بود، بهبود قابل‌توجهی در عمر خستگی می‌توان دید که درصدهای CNT افزایش یافته از ۱،۵٪ به ۲،۲۵٪. چنین بهبودی در عمر خستگی نشان می‌دهد که افزودن CNT عملکرد در دمای میانه را مختل نخواهد کرد؛ بلکه، تأثیر متقابلی از نظر عمر خستگی

خواهد داشت. بهبود مشابهی در عمر خستگی با افزودن CNT گزارش شده‌است. محققیان زیادی تأثیر افزودن CNT بر ویژگی‌های خستگی و شکست مخلوط آسفالتی را بررسی کردند. درصد CNT تا ۱٫۵٪ نسبت به وزن قیر نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجه در ویژگی‌های خستگی و شکست بود. عمر خستگی بهبودیافته مخلوط آسفالتی با ۱٪ افزودنی CNT به مخلوط آسفالتی را نمایش دادند. به طور مشابه، درصد CNT تا ۱٪ نشان‌دهنده ویژگی‌های بهبودیافته خستگی و مخلوط آسفالتی بود (Arabani and Faramarzi et al, 2015)

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مروری، نقش نانوتکنولوژی در حوزه مهندسی روسازی را بررسی کردیم. از بررسی ادبیات می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- اثر CNT ها بر قیر به شدت وابسته به ویژگی‌های قیر پایه و نوع CNT های استفاده شده است.
- مشکل‌ترین مرحله در مورد تغییر قیر باCNTها، پخش یکنواختCNTها است. پخش یکنواختCNTها به روش مخلوط‌کردن (خشک یا تر)، نوع مخلوط‌کن مورد استفاده و شرایط مخلوط‌کردن وابسته است، که شامل زمان مخلوط‌کردن، دمای مخلوط‌کردن و فرکانس مخلوط‌کردن می‌شود.
- کار زیادی در زمینه مخلوط‌کردن خشکCNTها در قیر انجام شده و بسیار کم در مورد مخلوط‌کردن تر. در مخلوط‌کردن تر، CNTها ابتدا در یک حلال حل می‌شوند و سپس به قیر اضافه می‌شوند و سپس مخلوط می‌شوند. مشکل مخلوط‌کردن تر با بخار شدن حلال استفاده شده است. اگر بخار نشود، ممکن است ویژگی‌های قیر پایه را تغییر دهد. استفاده از استاتون، تولوئن، کروزن و متانول برای این مقدار معمول است. بنابراین، بیشتر کار برای شناسایی این حلال‌ها برای پخشCNT ها لازم است. از طرفی مشاهده می‌شود که از طریق مخلوط‌کردن تر، پخشCNTها در قیر یکنواخت‌تر نسبت به تکنیک مخلوط‌کردن خشک است.
- به جای انتخاب روش تصادفی برای مخلوط‌کردنCNTها (تر یا خشک)، باید آزمایش‌هایی انجام داد و روشی که بهترین نتایج را از نظر پخش و بهبود ویژگی‌ها ارائه می‌دهد، انتخاب شود.
- افزودنCNTها به قیر مقاومت و ویژگی‌های الاستیکی آن را افزایش می‌دهد، که به شکل کاهش نفوذ، افزایش نقطه نرم‌شدن و افزایش مقدار*G نمایش داده می‌شود. قیری سفت‌تر مقاومت بیشتری در برابر چین و چپان نشدن دارد.
- تأثیرCNTها بر ترکیب شیمیایی و ساختار مولکولی هنوز به طور کامل بررسی نشده است.
- افزودن نانو لوله‌های کربنی به مواد چسبنده باعث افزایش سفتی آن می‌شود؛ این همچنین به ترک‌خوردگی خستگی کمک می‌کند.
- در این زمینه، تحقیق دقیقی در مورد مواد قیر اصلاح شده و همچنین مخلوط‌های آسفالتی لازم است.

۸- پی‌نوشت‌ها

1- Hot Mix Asphalt
2- Carbon Nano Tube
3- Single-Walled Carbon Nanotubes
4- Double-Walled Carbon Nanotubes
5- Multi-Walled Carbon Nanotubes
6- Chemical Vapor Deposition
7- Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
8- Penetration Index
9- Viscosity Temperature Susceptibility
10- Temperature Susceptibility
11- Dynamic Shear Rheometer
12- Bending Beam Rheometer

۹- مراجع

-Abdelrahman, M. (2006). ontrolling performance of crumb rubber modified binders through addition of polymer modifiers. Transp . Res. Rec. J. *Transp. Res. Board*, 1962, 64–70.

-Adedeji, A., Grunfelder, T., Bates, F., Macosko, C., Stroup-Gardiner, M,.and Newcomb, D. (1996). Asphalt modified by SBS triblock copolymer: Structures and properties. *Polym. Eng. Sci.,* 36(12), 1707–1723.

-Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M., and Aliha, M. (2016). Investigation of fatigue and fracture properties of asphalt mixtures modified with carbon nanotubes. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct*., 33, 7, 896-906.

-Amirkhanian, A. N., Xiao, F., and Amirkhanian, S. N. (2010). Evaluation of high temperature rheological characteristics of asphalt binder with carbon nano particles. J. Test. *Eval.*, 39(4), 1–9.

-Amirkhanian, A. N., Xiao, F., and Amirkhanian, S. N. (2011). Characterization of unaged asphalt binder modified with carbon nano particles. *Int. J. Pavement Res. Technol.,* 4(5), 281–286.

-ASTM. (2005). Standard specification for Type IV polymer-modified asphalt cement for use in pavement construction. ASTM D5892, *West Conshohocken,* PA.

-ASTM. (2013). Standard test method for penetration of bituminous materials. ASTM D5, *West Conshohocken,* PA.

-ASTM. (2014). Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus). ASTM D36, *West Conshohocken,* PA.

-ASTM. (2015). Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. ASTM D4402, *West Conshohocken*, PA.

-Ashish, Prabin Kumar, and Dharamveer Singh (2019). Effect of Carbon Nano Tube on performance of asphalt binder under creep-recovery and sustained loading conditions. *Construction and Building Materials 215,* 523-543.

-Bokobza, L. (2007). Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review. *Polymer*, 48(17), 4907–4920.

-Dos Santos, Z., Caroni, A., Pereira, M., Da Silva, D., and Fonseca, J. (2009). Determination of deacetylation degree of chitosan: A comparison between conduct metric titration and CHN elemental analysis. *Carbohydr. Res.,* 344(18), 2591–2595.

-Ezzat, Estabraq N., Israa F. Al-Saadi, and Abbas F. Jasim. (2023). Effect of Multiple-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) on Asphalt Binder Rheological Properties and Performance. *Advances in Civil Engineering.*

-Fang, C., Yu, R., Liu, S., and Li, Y. (2013). Nanomaterials applied in asphalt modification, A review. J. Mater. Sci. Technol., 29(7), 589–594.

-Fromm, H., and Phang, W. (1971). Temperature-susceptibility control in asphalt-cement specifications. Symp. on viscosity grading of asphalts, Highway Research Board, Washington, DC .30–45.

-Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon.\ Nature, 354(6348), 56-58.

-Ivanov, E., et al. (2011). Effects of processing conditions on rheological, thermal, and electrical properties of multiwall carbon nanotube/epoxy resin composites. J. Polym. Sci. Part B. Polym. *Phys*., 49(6), 431–442.

-Ismael, Mohammed Q., Mohammed, Y. Fattah, and Abbas F. Jasim. (2021). Improving the rutting resistance of asphalt pavement modified with the carbon nanotubes additive. *Ain Shams Engineering Journal 12*, No. 4, 3619-3627.

-Khattak, M. J., Khattab, A., Rizvi, H. R., and Zhang, P. (2012). The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology. *Constr. Build. Mater.,* 30, 257–264.

nanotubes. *Int. J. Pavement Eng.,* 16(1), 80–90.

-Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., Chiappinelli, G., and Aimonetto, I. B. (2015c). Effect of sonication on high temperature properties of bituminous binders reinforced with nano-additives. *Constr. Build. Mater.,* 75, 395–403.

-Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., and Dalmazzo, D. (2012). Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. *Procedia-Social Behav. Sci.,* 53, 546–555.

-Shi, X., Goh, S. W., Akin, M., Stevens, S., and You, Z. (2012). Exploring the interactions of chloride deicer solutions with nanomodified and micromodified asphalt mixtures using artificial neural networks. *J. Mater. Civ. Eng.,* 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000452, 805–815.

-Shiraishi, T., Sasaki, M., and Goto, M. (2011). Non-catalytic liquefaction of bitumen with hydrothermal/solvothermal process. *J. Supercrit. Fluids,* 60, 127–136.

-Soenen, H., Lu, X., and Redelius, P. (2009). The morphology of SBS modified bitumen in binders and in asphalt mix. Advanced testing and characterization of bituminous materials, *Taylor and Francis, London.*

-Lamb, L. D., and Huffman, D. R. (1993). Fullerene production. *J. Phys. Chem. Solids,* 54(12), 1635–1643.

-Lu, X., and Isacsson, U. (1997). Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Constr. Build. Mater.*, 11(1), 23–32.

-Lu, X., Soenen, H., and Redelius, P. (2010). SBS modified bitumen, does their morphology and storage stability influence asphalt mix performance? Proc., 11th ISAP Int. Conf. on Asphalt Pavements, Nagoya, *Japan*, 1–6.

-Masson, J., Collins, P., Robertson, G., Woods, J., and Margeson, J. (2003). Thermodynamics, phase diagrams, and stability of bitumen-polymer blends. *Energy Fuels,* 17(3), 714–724.

-Perez-Lepe, A., Martínez-Boza, F., and Gallegos, C. (2007). High temperature stability of different polymer-modified bitumens: A rheological evaluation. *J. Appl. Polym. Sci.,* 103(2), 1166–1174.

-Sanchez, F., and Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete—A review. *Constr. Build. Mater.*, 24(11), 2060–2071.

-Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., and Chiappinelli, G. (2015a). Fatigue and healing properties of nano-reinforced bituminous binders. *Int. J. Fatigue,* 80, 30–39.

-Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., and Chiappinelli, G. (2015b). Fatigue properties of bituminous binders reinforced with carbon

Evaluation of the Influence of Carbon Nanotube on Rheological Behavior of Asphalt Binder

Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

Saeid Hamedi, B.Sc., Student, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

E-mail: rezvan_babagoli@yahoo.com

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

In recent years, various nanometer materials have been used in many scientific and engineering fields. Because of their small size and large surface area, Nanomaterials provide improved structural properties over their larger, micro-sized counterparts. Nanomaterials have unique properties that make them suitable as additives in asphalt mixtures. This study describes the importance of Nanomaterials with an emphasis on the use of carbon nanotubes as an asphalt modifier. Different methods for the synthesis of carbon nanotubes such as arc discharge, laser irradiation and chemical vapor deposition (CVD) are described and different types of techniques used to disperse carbon nanotubes in bitumen are described. The results of typical tests such as penetration degree, softening point, flexibility and necessity in order to determine the mechanical performance of the material modified with carbon nanotubes are also summarized in this work. The effect of carbon nanotube modifications on bitumen rheological properties is also described. A systematic review of experimental studies on bitumen modification using carbon nanotubes has been carried out. The addition of carbon nanotubes improves the hardness of bitumen, which increases its wear resistance. Various parameters/variables such as bitumen type, mixing technique, mixer type, carbon nanotube properties and mixing time play key roles in the modification of bitumen with carbon nanotubes and significantly affect the performance of the final bitumen.

Keywords: Carbon Nanotube, Nanomaterial, Bitumen Performance, Softening Point, Flexibility