

## بررسی خواص ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده با نانو لوله کربنی

حسن زیاری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حسین فراهانی (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

احمد گلی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E- mail: farahani@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۱۰

### چکیده:

قیر در دماهای بالا یک سیال نیوتنی است، اما در دماهای پایین، یک سیال ویسکوالاستیک است که ناحیه ویسکوالاستیک خطی آن، مقاومت قیر نسبت به بار ترفاییکی را نشان می دهد. در این تحقیق از نانو لوله کربن به عنوان یکی از اصلاح کننده های خواص ویسکوالاستیک قیر استفاده شده است. بر روی نمونه های خالص و اصلاح شده با نانو لوله های کربنی، آزمایشهای اولیه قیرها (مانند: نقطه نرمی، درجه نفوذ و...)، آزمایش پرتو ایکس<sup>۱</sup> (XRD) و همچنین آزمونهای رئولوژیکی با بکارگیری دستگاه رئومتر برشی دینامیکی<sup>۲</sup> (DSR) انجام شد. استفاده از نانو لوله کربن به عنوان افزودنی باعث افزایش نقطه نرمی، کاهش درجه نفوذ، کاهش حساسیت رطوبتی و همچنین بهبود مشخصات عملکردی قیر نسبت به قیر پایه شده است. در پایان، با تحلیل منحنیهای مرجع مدول الاستیک، مدول مختلط، مدول اتلاف و زاویه تاخیر فاز، مشاهده می شود که ویژگیهای ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده، بهبود یافته است.

واژه های کلیدی: قیر، ویسکوالاستیک، نانو لوله کربن، مدول مختلط، رئولوژی، مدول اتلاف

## ۱. مقدمه

امروزه به دلیل تنوع خودروه‌های سنگین و افزایش بارهای ترافیکی میزان رشد خرابی‌های آسفالتی روبه گسترش است. برای دستیابی به روسازیهای با عمر طولانی‌تر و به منظور اصلاح مشخصات قیر و آسفالت، از پلیمرهای مختلف به عنوان اصلاح‌کننده استفاده می‌شود [Reddy et.al. 2012].

برای اصلاح قیر از پلیمرهای مختلفی استفاده شده است، از جمله پلیمرهایی که بیشتر از سایر پلیمرها در اصلاح مشخصات قیر و آسفالت استفاده شده است می‌توان به استایرن-بوتادین-استایرن (SBS)، اتیلن وینیل استات (EVA) و لاستیکهای بازیافتی اشاره کرد [kumar et.al. 2011]. اگرچه میزان مصرف قیر در آسفالت بسیار کم است، اما این ماده نقش مهمی در رفتار و عملکرد آسفالت و روسازی راه‌ها دارد، ولی قیر به دلیل دارا بودن خواص ویژه رئولوژیکی در شرایط مختلف بارگذاری و تحت شرایط دمایی مختلف، دارای عملکرد یکسان نیست [Khodaii et. al. 2007 and Sengoz et. al. 2009]. استفاده از نانو فناوری و نانو مواد به عنوان یک فناوری جدید در حال گسترش است، از این فناوری در تولید و اصلاح مواد مختلف استفاده می‌شود. به دلیل خواص ویژه نانو مواد از این مواد می‌توان به عنوان اصلاح‌کننده و بهبود دهنده عملکرد مواد مختلف استفاده کرد. [Radziszewski et. al. 2003]. استفاده از این مواد به عنوان اصلاح‌کننده‌های قیر و آسفالت از پیشرفتهای جدیدی است که در صنعت راهسازی در حال گسترش است.

اخیرا مطالعات فراوانی، رابطه بین خواص رئولوژیکی قیر و عملکرد میدانی آنها را تایید کرده‌اند که این مطلب خود بیانگر اهمیت درک رفتار رئولوژیکی قیر است. دکتر دبیر و همکاران در تحقیقی به این نتیجه رسیدند که اصلاح قیر با نانو رسها سبب بهبود خواص رئولوژیکی می‌شود [Zhanping and et. al. 2010 and Dabir et. al. 2011 and Ghile 2006]. همچنین دکتر جمال

خطاب و همکارانش [Khattak et. al. 2012] در سال ۲۰۱۲ به بررسی اثر نانو فیبرکربن<sup>۳</sup> (CNF) بر خصوصیات قیر پرداخته و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این مواد می‌تواند باعث بهبود رفتار قیر شود. ولی دکتر حسین و همکاران [Hussain et. al. 2006] در سال ۲۰۰۶ مطرح کردند که بزرگ‌ترین چالش استفاده از نانو فیبرهای کربن و برخی دیگر از نانو مواد، نحوه پراکندگی این مواد در محیط ماده دیگر است و پیشنهاد کردند که بهتر است نانو مواد در یک محلول اولیه (مانند بنزین) پخش شده و سپس با مواد دیگر ترکیب شود. ولی با توجه به اینکه ایده ترکیب این مواد با قیر در آن زمان مطرح نشده بود، راهکاری برای ترکیب با قیر ارایه نشده بود. در تحقیقی که زیاری و همکاران [Ziari et. al. 2012] در سال ۲۰۱۲ بر روی انواع همزنهای مختلف (مکانیکی، برش بالا و مافوق صوت) با استفاده از تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۴</sup> (SEM) انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که برای ترکیب قیر و نانو لوله کربن<sup>۵</sup> (CNTs) استفاده از همزن مافوق صوت می‌تواند این مواد را در مقیاس نانو به طور یکنواخت در قیر پراکنده کند و سپس به تحقیقات خود بر روی قیر اصلاح شده با نانولوله کربن ادامه دادند که در این مقاله به بررسی رئولوژیکی خواص ویسکو الاستیک قیر اصلاح شده با نانو لوله کربن پرداخته می‌شود.

## ۲. مواد و تجهیزات

قیر مورد استفاده در این پژوهش با درجه عملکردی PG58-16 (AC 60-70) پالایشگاه اصفهان است. مشخصات قیر و نانولوله کربن به ترتیب در جداول شماره ۱ و ۲ ارایه شده است.

برای ترکیب نانو لوله کربن و قیر، ابتدا قیر تا دمای ۱۲۰ °C درجه گرم شده و با استفاده از دو نوع همزن برش بالا و همزن مافوق صوت عمل ترکیب این دو ماده صورت گرفت. در مورد

## بررسی خواص ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده با نانو لوله کربنی

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده

|                |                                  |   |          |
|----------------|----------------------------------|---|----------|
| کشش پذیری (cm) | نقطه نرمی ( $^{\circ}\text{C}$ ) | درجه نفوذ در $25^{\circ}\text{C}$ (0.1mm) | قیر خالص |
| (ASTM-D113)    | (ASTM-D36)                       | (ASTM-D5)                                 |          |
| > 100          | 51                               | 68  | 60/70    |

جدول ۲. مشخصات نانولوله کربن استفاده شده

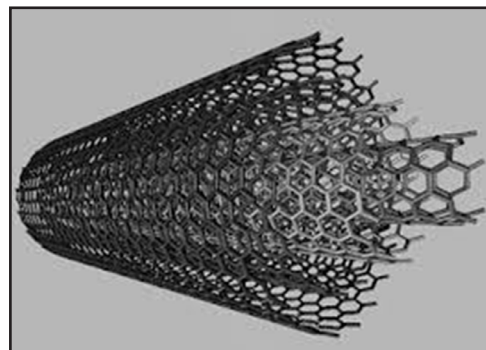
|                        |                        |              |           |                  |
|------------------------|------------------------|--------------|-----------|------------------|
| چگالی                  | سطح ویژه               | درصد ناخالصی | درجه خلوص | طول ذرات         |
| 2.1 gr/cm <sup>2</sup> | 200 m <sup>2</sup> /gr | < 1.5 %      | > 95%     | 30 $\mu\text{m}$ |

همچنین پس از تعیین مناسب ترین همزن یعنی همزن مافوق صوت برای ترکیب نانولوله کربن و قیر، نمونه‌های مختلف با استفاده از آن همزن و با درصدهای مختلف نانولوله کربن ۰/۳ و ۰/۶ و ۰/۹ و ۱/۲ و ۱/۵ تهیه و آزمایشهای اولیه قیر برای بررسی اثر این ماده بر روی قیر بر روی نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌های تهیه شده با استفاده از درصدهای مختلف نانو لوله کربن با استفاده از دستگاه رثومتر برش دینامیکی مورد آزمایش قرار گرفتند.

### ۳. آزمایشهای انجام شده

پس از انجام آزمایش های میکروسکوپ الکترون روبشی و تعیین حالت بهینه ترکیب قیر و نانولوله کربن، این مواد با درصدهای مختلف وزنی قیر به میزان ۱.۵ ، ۱.۲ ، ۰.۹ ، ۰.۶ ، ۰.۳ و با استفاده از همزن مافوق صوت با قیر ترکیب شده و آزمایش درجه نفوذ بر اساس استاندارد ASTM-D5 بر روی نمونه‌ها انجام شد. این آزمایش بر روی قیرهای پایه و اصلاح شده در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد صورت گرفته است همچنین آزمایش نقطه نرمی در کنار آزمایش درجه نفوذ از مهم ترین آزمایشهایی هستند که جهت مشخص کردن خواص فیزیکی قیرها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شرایط اختلاط نیز برای همزن برش بالا که بیشترین کاربرد در اختلاط قیر و پلیمرها را دارد، در زمانهای ۱۰ و ۱۵ و با سرعت اختلاط ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ rpm استفاده شد. برای اختلاط نانو لوله کربن و قیر با استفاده از همزن مافوق صوت نیز، این مواد در زمانهای ۱۰ و ۱۵ و با انرژی ۶۰ و ۶۵ وات با یکدیگر مخلوط شدند. برای مقایسه بهتر نمونه ها، زمان اختلاط و درصد نانو لوله کربن (حدود ۰/۳ درصد وزنی قیر) برای هر دو همزن یکسان در نظر گرفته شد. پس از ترکیب نانولوله کربن (شکل ۱) با همزنهای مختلف و در شرایط گوناگون، نمونه‌های تهیه شده برای بررسی شرایط ترکیب این دو ماده از میکروسکوپ الکترون روبشی استفاده شد تا چگونگی پراکندگی نانو لوله کربن در مقیاس نانو، مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱. ساختار نانو لوله کربن چند جداره [www.nano.ir]

نانولوله کربن به قیر، درجه نفوذ قیر کاهش پیدا کرده است (شکل ۲)، که این مطلب بیان کننده این موضوع است که اضافه کردن نانولوله کربن به قیر باعث بهبود درجه نفوذ خواهد شد.

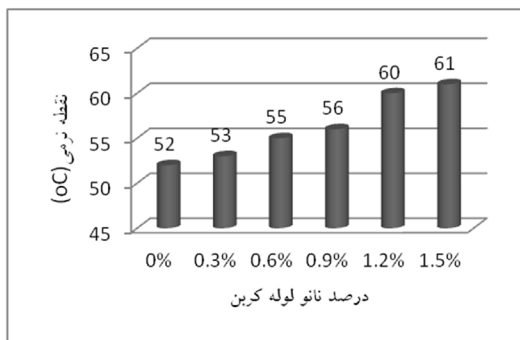
همچنین نتایج آزمایش نقطه نرمی نشان می‌دهد (شکل ۳) که اضافه کردن نانولوله کربن به قیر باعث افزایش نقطه نرمی قیر شده است و در تایید آزمایش درجه نفوذ می‌توان گفت که باعث بهبود مشخصات اولیه قیر شده است.

حساسیت حرارتی قیرها به روشهای مختلفی محاسبه می‌شوند، که یکی از این روشها، محاسبه حساسیت حرارتی قیر به روش شاخص درجه نفوذ (PI) است. مقدار PI بیشتر دلالت بر مقدار کمتر حساسیت حرارتی قیر است و با توجه به اینکه قیر مورد استفاده در راهسازی در شرایط مختلف دمایی (شب و روز و فصلهای مختلف سال) قرار می‌گیرد، بهتر است نسبت به این تغییرات دمایی حساسیت کمتری داشته باشد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با اضافه شدن نانولوله‌های کربنی به قیر، شاخص درجه نفوذ قیر از اعداد منفی  $-0.62$  افزایش پیدا کرده به عدد  $+1.175$  رسیده است که بیان کننده حساسیت حرارتی کمتر قیر و عملکرد بهتر قیر در شرایط مختلف دمایی خواهد بود.

۴-۲ آزمایش اشعه ایکس (XRD) گرفته شده از نانو لوله

کربنی

چهار پیک در طیف XRD نانو لوله کربنی چند جداره قابل



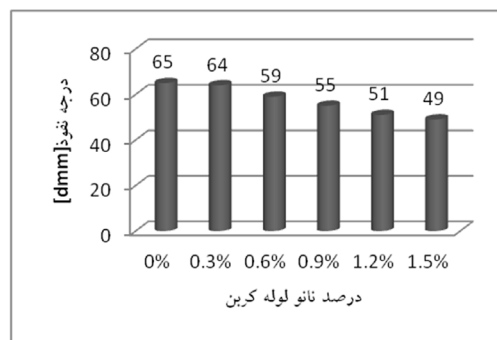
شکل ۳. نتایج آزمایش نقطه نرمی برای قیر پایه و قیر اصلاح شده با درصد های مختلف نانو لوله کربن

آزمایش درجه نفوذ بر اساس استاندارد ASTM-D36 بر روی نمونه‌ها انجام شد. در ادامه برای بررسی حساسیت حرارتی قیر مورد آزمایش از روش شاخص درجه نفوذ<sup>۶</sup> (PI) استفاده شده است. مقدار PI بیشتر دلالت بر مقدار کمتر حساسیت حرارتی قیر دارد و با توجه به اینکه قیر مورد استفاده در راهسازی در شرایط مختلف دمایی (شب و روز و فصلهای مختلف سال) قرار می‌گیرد، بهتر است نسبت به این تغییرات دمایی حساسیت کمتری داشته باشد. سپس آزمایش تفرق اشعه ایکس که یکی از رایج ترین روشهای موجود برای تعیین ساختار نانو کامپوزیت‌های پلیمری است، انجام شد. با مشاهده موقعیت، شکل و شدت انعکاس پرتو ایکس توسط نانوکامپوزیت، می‌توان نانوساختارهای اکسفولیت شده<sup>۷</sup> و ایترکلایت شده<sup>۸</sup> را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. در پایان، برای بررسی عملکرد قیر اصلاح شده، از آزمایش رئومتر برش دینامیکی استفاده شد. این آزمایش در هر دو حالت کرنش ثابت و تنش ثابت می‌تواند صورت گیرد، اما استاندارد شارپ بر روی کنترل کرنش بیشتر تأکید دارد، بنابراین ما نیز در این حالت با دستگاه کار کرده ایم. آزمایش در فرکانس ثابت  $10 \text{ rad/s}$  و کرنش حدود  $12\%$  انجام شده است.

۴. تحلیل نتایج

۴-۱ آزمایشهای اولیه قیر

نتایج آزمایش درجه نفوذ نشان می‌دهد که با افزایش میزان



شکل ۲. نتایج آزمایش درجه نفوذ برای قیر پایه و قیر اصلاح شده با درصد های مختلف نانو لوله کربن

## بررسی خواص ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده با نانو لوله کربنی

مختلط ( $G^*$ ) و اختلاف فاز ( $\delta$ ) هستند.  $G^*$  شامل مجموع دو رفتار ویسکوز و الاستیک است.  $G^*$  مقیاسی از پایداری قیر در برابر تغییر شکل است (مدول سختی) و  $\delta$  نشانه ای از مقادیر نسبی تغییر شکل قابل برگشت و غیرقابل برگشت است. مدول مختلط، از دو جزء مدول اتلاف<sup>۹</sup> و مدول ذخیره سازی<sup>۱۰</sup> تشکیل شده است که اولی معیاری از رفتار ویسکوز و دومی معیاری از رفتار الاستیک است. هر دوی این مدولها با افزایش دما کاهش می یابند، زیرا ویسکوزیته با افزایش دما کاهش یافته و از طرفی خاصیت الاستیکی قیر نیز به سمت تخریب می رود. بنابراین با افزایش دما مدول مختلط برای قیرها به شدت کاهش می یابد و تغییرات به وجود آمده در قیر در این دماها دائمی است.

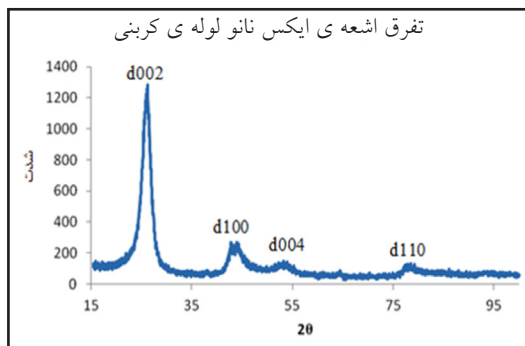
مدل ماکسول قادر به تعیین مقدار  $G^*$  (مدول ذخیره سازی) و  $G''$  (مدول اتلاف) و متعاقباً  $G^*$  و  $\delta$  است. این مدل،  $N$  فرآیند relaxation را مورد توجه قرار می دهد. معمولاً  $N$  برابر ۲۴ انتخاب می شود.  $\lambda_i$  زمان استراحت و  $G_i$  نیروی relaxation است. روابط ماکسول به صورت زیر است:

روابط ماکسول:

$$G' = G_e + \sum_{i=1}^N G_i \frac{(w\lambda_i)^2}{1 + (w\lambda_i)^2} \quad (1)$$

$$G'' = \sum_{i=1}^N G_i \frac{w\lambda_i}{1 + (w\lambda_i)^2} \quad (2)$$

و سپس  $\delta$  و  $G^*$  به کمک روابط زیر به دست می آید:



شکل ۵. تفرق اشعه ی ایکس نانو لوله کربن چند جداره

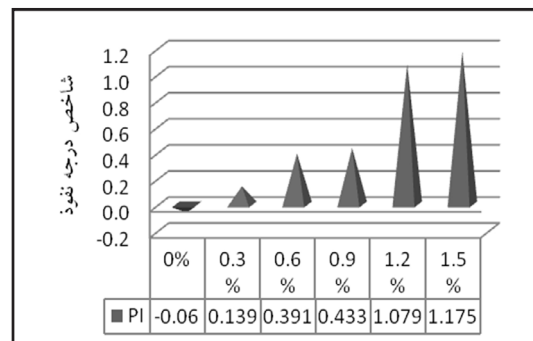
مشاهده است. این چهار پیک که در زوایای  $20^\circ$  برابر،  $26.1^\circ$ ،  $42.8^\circ$ ،  $54^\circ$ ،  $77.9^\circ$  وجود دارد، ساختار شش گوشه ی گرافیتی MWNT (110)، (004)، (100)، (002) را نشان می دهد. فاصله بین لایه ها طبق رابطه برگ<sup>۱۱</sup> برابر  $d_{002} = 0.35\text{nm}$  است.

### ۳-۴ بررسی رئولوژیکی

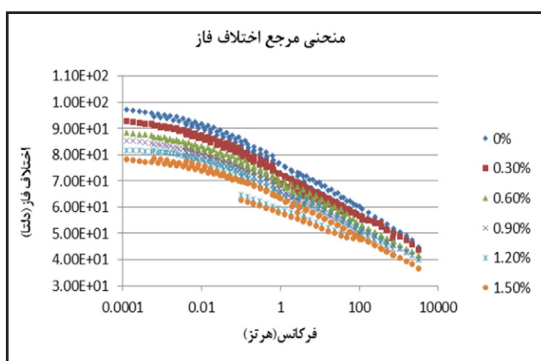
در سالهای اخیر بعد از شناخت کامل آزمایشهای شارپ، پژوهشگران به ارایه روشهای تجربی و نوینی برای بررسی رئولوژی قیرها پرداخته اند. به عنوان مثال آزمایش محدوده فرکانس<sup>۱۱</sup> که در این آزمایش مدول مختلط<sup>۱۲</sup>، مدول الاستیک<sup>۱۳</sup> و مدول اتلاف<sup>۱۴</sup> برحسب فرکانس رسم می شوند. فرکانسهای مختلف معیاری از بار ترافیکی جاده ای است.

با افزایش بار ترافیک (کاهش فرکانس)، مدول مختلط یا مقاومت جسم کاهش می یابد. بنابراین دانشمندان متوجه شدند که پارامترهای رئولوژیکی با دما و فرکانس و همچنین گشتاور یا کرنش ارتباط دارد، بنابراین دسته وسیعی از خواص رئولوژیکی با در نظر گرفتن اثر همزمان این پارامترها بر روی قیرهای خالص و اصلاح شده صورت گرفت.

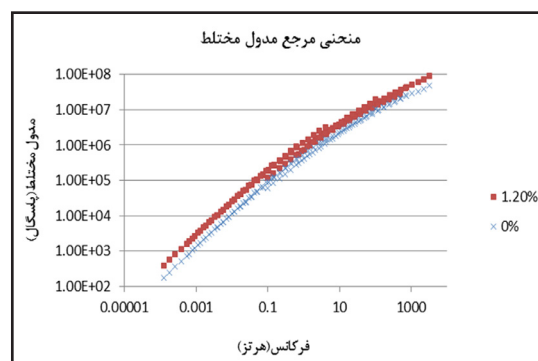
همان طور که می دانیم رفتار قیر در دمای میانی و بالا مجموعی از رفتار ویسکوز و الاستیک است. برای تعیین رفتار ویسکوالاستیک قیر لازم است تا پارامترهایی تعیین شوند که اثرات دما و زمان بارگذاری را همزمان در نظر بگیریم. این پارامترها همان مدول



شکل ۴. میزان شاخص درجه نفوذ برای قیر پایه و قیر اصلاح شده با درصد های مختلف نانو لوله کربنی



شکل ۷. منحنی مرجع اختلاف فاز برای قیر پایه و قیر حاوی درصدهای مختلف نانولوله کربن



شکل ۶. منحنی مرجع مدول مختلط برای قیر پایه و قیر حاوی ۱،۲٪ نانولوله کربن

طور که قبلاً نیز بیان شد این اختلاف فاز است که تفاوت میان قیرهای الاستیک و ویسکوز را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد نانولوله منحنی اختلاف فاز به شدت بهبود می‌یابد. اختلاف فاز برای قیر پایه در دماهای حدود  $65^{\circ}\text{C}$  به  $90^{\circ}$  درجه بسیار نزدیک می‌شود. این به این معناست که قیرهای پایه در دماهای بالا و بارگذاری دراز مدت، رفتاری ویسکوز نشان می‌دهند. در مورد قیرهای اصلاح شده، مقدار اختلاف فاز به طور محسوسی بهبود یافته است. همان طور که در شکل ۷ به وضوح دیده می‌شود که نمونه‌های حاوی ۱/۲٪ دارای تأخیر فاز کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها (غیر از نمونه ۱/۵٪ که اختلاف بسیار نامحسوس است) در فرکانس‌های پایین هستند، بنابراین ترکیب درصد ۱/۲٪ به عنوان ترکیب بهینه انتخاب می‌شود.

افزایش مدول ذخیره سازی ( $G'$ ) و مدول اتلاف ( $G''$ ) می‌تواند باعث افزایش مدول مختلط شوند و میزان تأثیر بر روی مدول مختلط برای هر دو یکی است. بنابراین بالا بودن مدول مختلط به معنای الاستیک بودن قیر نیست. در قیرهای خالص با کاهش فرکانس هر دوی مدولهای اتلاف و ذخیره سازی کاهش می‌یابند. اما نکته جالب توجه این است که در قیرهای پایه، شدت کاهش مدول ذخیره سازی بیش از شدت کاهش مدول اتلاف است. در قیرهای اصلاح شده قضیه بر عکس است، یعنی شدت کاهش مدول اتلاف بیش از مدول ذخیره سازی است.

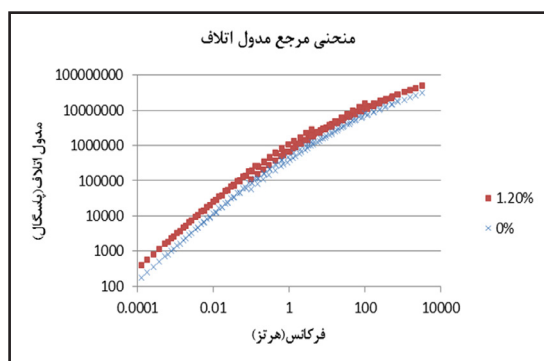
$$\tan \delta = G'' / G' \quad (3)$$

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (4)$$

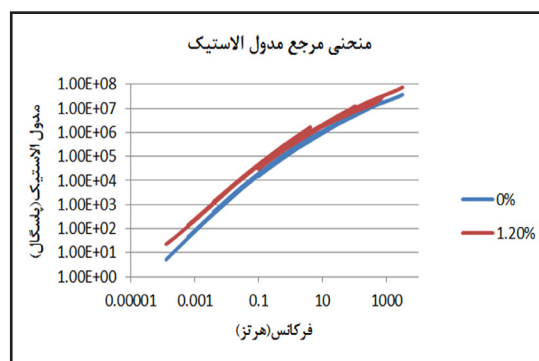
دسته‌ای از منحنی‌های رئولوژیکی وجود دارند که رفتار قیرها را در دمای ثابت و در محدوده وسیعی از فرکانس ( $\text{rad/s} / 1000$ ) - $0/100$  شبیه سازی می‌کنند. این منحنی‌ها در شکلها در ادامه ارائه شده‌اند. این منحنی‌ها که با نام منحنی مرجع<sup>۱۵</sup> یا مادر شناخته می‌شوند، در اینجا منحنی‌های مرجع مدول مختلط، الاستیک، اتلاف و منحنی تأخیر فاز در محدوده فرکانس وسیعی رسم شده‌اند. در شکل ۶ تغییرات مدول مختلط برای قیر اصلاح شده و قیر پایه آورده شده است.

در دماهای بالا، قیر رفتار کاملاً ویسکوز و در دماهای پائین رفتار الاستیک دارد. دو قیر ممکن است دارای  $G^*$  ثابتی باشند، اما یکی بیشتر ویسکوز و دیگری بیشتر الاستیک باشد، به این علت لازم است تا  $\delta$  هم در کنار  $G^*$  تعیین شود.  $G^*$  بیانگر نسبت تنش برشی کل بر کرنش برشی کل وارده بر قیر است و  $\delta$  اختلاف فاز بین تنش برشی و کرنش حاصله است.

قیر مطلوب قیری است که در تمامی محدوده دمایی سرویس، عملکرد یکسانی داشته باشد، یعنی با افزایش دما استحکام خود را حفظ کند و به عبارتی نمودار  $G^*$  و همچنین  $\delta$  برای قیر ایده‌آل بر حسب دما به صورت مسطح و یکنواخت باشد. اختلاف فاز، بیش از مدول مختلط، به ساختار شیمیایی وابسته است. همان



شکل ۹. منحنی مرجع مدول اتلاف برای قیر پایه و قیر حاوی ۱،۲٪ نانولوله کربن



شکل ۸. منحنی مرجع مدول ذخیره برای قیر پایه و قیر حاوی ۱،۲٪ نانولوله کربن

7-intercalated

8-exfoliated

۹-  $\theta$  زاویه بازتاب اشعه‌ی ایکس از صفحات کریستالی مواد می‌باشد و برای راحتی در محاسبات از  $2\theta$  استفاده می‌شود.

10-Bragg

11-Frequency sweep

12-Complex modules

13-Elastic modules

14-Loss modules

15-Master Curve

## ۷. مراجع

- زیاری، حسن (۱۳۸۰) "راهنمای کاربردی آزمایشگاه قیر و آسفالت"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- Anjan Kumar, S. and Veeraragavan, A. (2011) "Dynamic mechanical characterization of asphalt concrete mixes with modified asphalt binders". Materials Science and Engineering, Vol. 528:21, pp. 6445-6454

- Ghile, D. B. (2006) "Effects of nano clay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures", M.Sc. thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق از نانولوله کربن به عنوان اصلاح کننده خواص ویسکوالاستیک قیر استفاده شده است. پس از انجام آزمایشهای اولیه مشاهده شد که این افزودنی باعث بهبود چشمگیر مشخصات اولیه قیرها شد. از جمله این مشخصات می‌توان به افزایش نقطه نرمی، کاهش درجه نفوذ و بهبود شاخص نفوذپذیری اشاره کرد. همچنین پس از تحلیل منحنی‌های مرجع معلوم شد که با افزایش مقدار CNT، مدول مختلط ( $G^*$ ) و مدول الاستیک ( $G'$ ) افزایش می‌یابد. مدول الاستیک نمونه‌های حاوی ۱،۲٪ و ۱،۵٪ در فرکانس پایین، افزایش بیشتری را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد، اما این تفاوت در منحنی مدول مختلط مشاهده نمی‌شود. بنابراین، این عامل بیان می‌کند که در فرکانس‌های پایین، مدول الاستیک قیر اصلاح شده افزایش و مدول اتلاف ( $G''$ ) آن کاهش یافته است و به عبارت دیگر رفتار قیر از ویسکوز به الاستیک میل می‌کند.

## ۶. پی‌نوشتها

1-X-Ray Diffraction

2-Dynamic Shear Rheometer

3-Carbon Nano Fiber

4-Scanning Electronic Microscope

5-Carbon Nano Tube

6-Penetration Index

300–307

- Zhanping, Y. (2011) “Nanoclay-modified asphalt materials: preparation and characterization”, J of Construction & Building Materials, No. 25, pp.1072-1078.

- Ziari, H., Rahim-of, K., Fazilati, M., Goli A. and Farahani, H. (2012) “Evaluation of different conditions on the mixing bitumen and carbon nano-tubes”, International Journal of Civil & Environmental Engineering, Vol. 12 (6), pp. 53-59.

- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M. and Gorga, R. (2006) “Review article: polymer–matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application” J. Compos Mater, Vol.40 (17), pp. 1511–75.

- Khattak, M. J., Khattab A., Rizvi H. and Zhang, P.(2012) “The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology”, Construction and Building Materials, Vol. 30, pp.257–264.

- Khodaii, A. and Mehrara, A. (2009) “Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test”, Construction and Building Materials, Vol. 23, pp.2586–2592.

- Kommidi Santosh Reddy, S. Umakanthan, J. and Krishnan, M. (2012) “Constant strain rate experiments and constitutive modeling for a class of bitumen”. Mechanics of Time- Dependent Materials Vol.16:3, pp. 251-274

- Radziszewski, P., Ziolkowski, R. and Cygas, D. (2003) “Technological aging influence on viscosity of selected bitumen”, Journal of Civil Engendering and Management. Vol. IX. No I, pp.20-24.

- Sengoz, B. and Isikyakar, G. (2007) “Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen”. Construction Building Materials, Vol. 22, pp.1897–905.

-www.nano.ir

- Sadeghpour Galooyak, S. and Dabir, B. (2010) “Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite Composites”, Construction and Building Materials vol. 24, pp.