

## بررسی رفتار خستگی قیر اصلاح شده با نانورس و نانواهک هیدراته با استفاده از آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)

امیر کاوسی<sup>۱\*</sup> و پیمان برقبانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup>دانش آموخته کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

kavussia@modares.ac.ir

**چکیده:** نانو مواد در سال‌های اخیر برای بهبود خواص رئولوژیکی قیر و اصلاح مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، هدف بررسی تاثیر نانورس، آهک هیدراته و نانواهک هیدراته بر عملکرد خستگی قیر بوده است. نانواهک هیدراته با روشی کم هزینه و با استفاده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای با میانگین اندازه ذرات ۲۸۱ نانومتر تولید شده است. برای بررسی عملکرد خستگی قیر، از آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) استفاده شد. نانورس با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد و آهک و نانواهک هیدراته با مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی قیر استفاده شدند. نتایج نشان دادند که افزودن ۶ درصد نانورس به قیر منجر به افزایش ۳۸ درصدی عمر خستگی نمونه‌ها شده است. بر اساس آزمایشات انجام شده در این تحقیق، عمر خستگی نمونه حاوی ۱۰ درصد نانواهک هیدراته ۱.۵ برابر عمر خستگی نمونه حاوی ۱۰ درصد آهک هیدراته بود.

**کلمات کلیدی:** قیر اصلاح شده، نانورس، نانو آهک هیدراته، عمر خستگی، آزمایش LAS.

## Investigating Fatigue Properties of Nanoclay and Nano-Hydrated Lime Modified Bitumen Using Linear Amplitude Sweep (LAS) Test

A. Kavussi and P. Barghabani

**Abstract:** Nanomaterials have been used for enhancing rheological properties of bitumen and mechanical properties of asphalt mixes. In this study, the effects of nano-clay, nano-hydrated lime and hydrated lime has been investigated on fatigue behavior of bitumen. Nano hydrated lime was produced using a planetary ball mill with average particle size of 281nm. Linear Amplitude Sweep (LAS) test has been performed to evaluate fatigue properties of samples. Nano-clay was used by 2%, 4% and 6% weight of bitumen. Hydrated lime and nano-hydrated lime were used at 5%, 10% and 20% of weight of bitumen. Results showed that nanoclay at 6% (by weight of bitumen), increased fatigue life of the binder at 40% level. Specimen contained 10% nano-hydrated lime had a fatigue life 49% higher than that contained 10% hydrated lime.

**Keywords:** Modified Bitumen, Nanoclay, Nano-Hydrated Lime, Fatigue Life, LAS Test.

**۱ - مقدمه**

استاندارد AASHTO TP 101-12-UL برابر ۱۰ هرتز و به صورت ثابت در تمامی کرنش‌ها می‌باشد. در تحقیق حاضر، تأثیر سه افزودنی آهک هیدراته، نانواهک هیدراته و نانورس بر رفتار خستگی قیر با آزمایش LAS بررسی شده است.

**۲ - مواد و مصالح مورد استفاده**

قیر استفاده شده در این تحقیق از نوع قیر با درجه‌بندی عملکردی PG 58-22 بوده که از پالایشگاه اصفهان تهیه شده است.

نانورس مورد استفاده از نوع مونتموریلونیت با نام تجاری Cloisite 30B مورد استفاده قرار گرفته است. نانواهک هیدراته با استفاده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای تهیه شده است. پس از ۶ ساعت آسیاب با سرعت ۲۲۰ دور در دقیقه، میانگین اندازه ذرات به ۲۸۱ نانومتر رسید. آسیاب سیاره‌ای مورد استفاده در شکل ۱ مشخص شده است [۷].



شکل ۱: آسیاب گلوله‌ای ماهواره‌ای مورد استفاده

**۲-۱- اختلاط قیر و افزودنی‌ها**

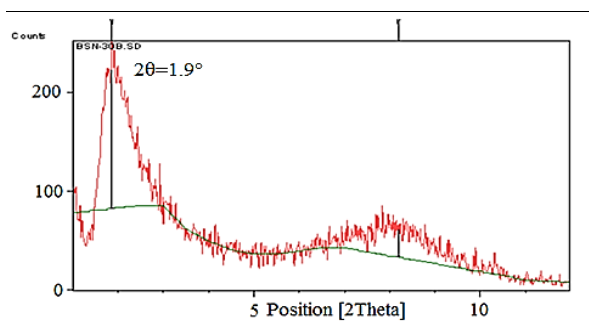
هر سه نوع افزودنی (نانواهک هیدراته، نانورس، آهک هیدراته) با استفاده از همزن دور بالا<sup>۴</sup> با قیر مخلوط شدند. برای اختلاط نانورس با قیر، سرعت دوران ۵۲۰۰ rpm، دمای اختلاط ۱۵۵<sup>۰</sup>C و زمان اختلاط ۳۰ دقیقه انتخاب شد. بر اساس مروری بر مراجع، برای اختلاط آهک هیدراته با قیر سرعت دوران ۳۵۰۰ rpm، دمای اختلاط ۱۶۰<sup>۰</sup>C و

ترک‌های خستگی از جمله مهم‌ترین خرابی‌های روسازی هستند که سالیانه هزینه‌های زیادی برای ترمیم این ترک‌ها صرف می‌شود. محققان همواره برای تقویت روسازی در برابر ترک‌های خستگی از افزودنی‌های مختلف استفاده کرده‌اند. در اکثر تحقیقات انجام گرفته، عمر خستگی مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالی که عمر خستگی مخلوط آسفالتی متأثر از عوامل زیادی مانند: درصد فضای خالی، دانه‌بندی، نوع سنگدانه‌ها، پوشش سنگدانه‌ها و درصد قیر می‌باشد. تا پیش از سال ۲۰۰۱ برای بررسی مقاومت قیر در برابر ترک‌های خستگی از محدودیت  $G^* \cdot \sin \delta < 5000 \text{ kPa}$  در آزمایش DSR<sup>۱</sup> استفاده می‌شد. از معایب این روش، محدود بودن تعداد سیکل‌های بارگذاری و باقی ماندن قیر در محدوده آسیب ندیده بود؛ به گونه‌ای که پیش‌بینی رفتار قیر در تعداد سیکل‌های بالا با دقت مناسبی همراه نبود [۱]. بهیا و همکاران [۲] در پروژه NCHRP 9-10 آزمایش جاروب زمان<sup>۲</sup> را به جای آزمایش قبلی مطرح کردند. در این پروژه، کمبود همبستگی بین نتایج آزمایش خستگی قیر و آسفالت تشخیص داده شد و برای رفع آن، آزمایش جاروب زمان با حالات کرنش ثابت و تنش ثابت طرح گردید. تعداد سیکل‌ها در آزمایش جاروب زمان به گونه‌ای است که رفتار قیر در خارج از ناحیه ویسکوالاستیک خطی نیز مشخص می‌شود.

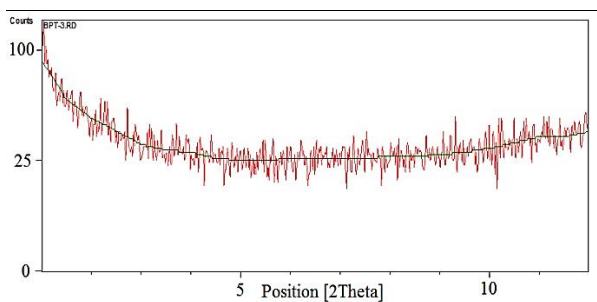
اندرسون و همکارانش [۳] به این نتیجه رسیدند که در مدول‌های کمتر از ۵ مگاپاسکال، کناره‌های نمونه به حالت ناپایدار در می‌آید. مارتونو و همکاران [۴] با تغییر هندسه صفحات موازی آزمایش به شکل سیلندری، به این نتیجه رسید که تغییر دادن هندسه آزمایش تأثیری بر نتایج ندارد. طولانی بودن زمان آزمایش از جمله نکاتی بود که محققان به آن اشاره کردند [۵]. جانسون، هینتز و همکاران روش جدیدی برای بررسی رفتار خستگی قیر ارائه کردند [۱، ۶]. این روش که جاروب دامنه خطی (LAS<sup>۳</sup>) نام دارد، در مدت زمان کوتاه‌تری نسبت به آزمایش جاروب زمان انجام شده و حالت تسریع یافته‌ای از این آزمایش است. این آزمایش در مدت زمان ۳۱۰ ثانیه در طی ۳۱۰۰ سیکل بارگذاری انجام می‌شود. کرنش از مقدار ۰ تا ۰.۳٪ به صورت پله‌ای افزایش می‌یابد. مقدار فرکانس این آزمایش مطابق با

بررسی رفتار خستگی قیر اصلاح شده با ...

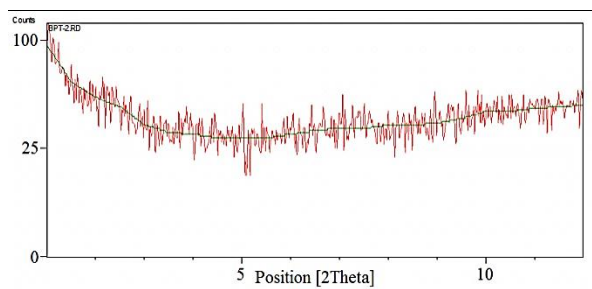
پیرشدگی بلند مدت (PAV<sup>۸</sup>) برای آزمایش آماده می‌شوند. در این مطالعه از پیرشدگی کوتاه مدت استفاده شد و نمونه‌ها در دمای ۲۳<sup>۰c</sup> مورد آزمایش قرار گرفتند. بارگذاری با اعمال کرنش متغیر انجام می‌شود. مطابق شکل ۶، مقدار کرنش از ۰.۱٪ آغاز و هر ۱۰ ثانیه افزایش می‌یابد. مقادیر بعدی کرنش از ۱٪ تا ۳۰٪ به صورت گام‌های یک درصدی افزایش می‌یابد. هر گام شامل ۱۰۰ سیکل بارگذاری سینوسی در مدت ۱۰ ثانیه است. کل زمان آزمایش ۳۱۰ ثانیه می‌باشد.



شکل ۲: نتیجه پراش اشعه ایکس بر روی نانورس



شکل ۳: نتیجه پراش پرتو ایکس برای نمونه قیری دارای ۲ درصد نانورس



شکل ۴: نتیجه پراش پرتو ایکس برای نمونه قیری دارای ۶ درصد نانورس

عمر خستگی نمونه‌ها بر اساس مفهوم انرژی و رابطی خرابی تجمعی و به دست آوردن پارامترهای مختلف و

زمان اختلاط ۲۰ دقیقه انتخاب شدند. زمان اختلاط نانواهک هیدراته با قیر ۴۰ دقیقه انتخاب شد [۸، ۹].

برای بررسی چگونگی توزیع نانورس در قیر، آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD<sup>۵</sup>) بر روی نانورس و نمونه‌های قیری حاوی نانورس انجام شد. استفاده از این تکنیک یک روش تقریبی برای بررسی کیفیت توزیع نانورس در قیر است. روش‌های دقیق‌تر و پرهزینه‌تری مانند استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM<sup>۶</sup>) وجود دارد که می‌تواند به عنوان مکمل روش XRD به کار رود. به علت طولانی بودن زمان آزمایش TEM و هزینه‌بر بودن این تست، از روش XRD به دلیل سادگی و کم هزینه بودن استفاده شد.

اگر صفحات نانورس به خوبی در زمینه پلیمری (قیر) پراکنده شوند، به تدریج پیک تفرق موجود در آنالیز XRD نانورس (شکل ۲) از بین رفته و اگر صفحات نانورس کاملاً ورقه ورقه و پراکنده شوند، تحلیل XRD هیچ نقطه اوجی نشان نخواهد داد [۱۰]. به عبارتی با از بین رفتن نقاط اوج نمودار، ترازوی صفحات از بین رفته و صفحات نانورس درون زمینه قیر پخش شده و ساختار حاکم پراکنشی خواهد بود. در این شرایط، تک لایه‌های نانورس شانس بیشتری برای نفوذ به فاز آسفالتین قیر دارند. شکل ۲ نتایج تحلیل پراش اشعه ایکس بر روی نمونه‌های حاوی ۲ و ۶ درصد نانورس را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نقطه پیکی در نمودار وجود ندارد و هر دو منحنی گویای ساختار پراکنشی هستند. وجود پیک در منحنی می‌تواند بیانگر ساختار لایه‌ای باشد و موقعیت پیک، کاهش یا افزایش فاصله بین لایه‌ها را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشخص است، پیک موجود در زاویه ۱.۸ درجه در XRD نمونه نانورس (شکل ۲) در اشکال ۳ و ۴ از بین رفته است. این امر نشان‌دهنده تشکیل ساختار پراکنشی نانورس در قیر است.

### ۳ - آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)

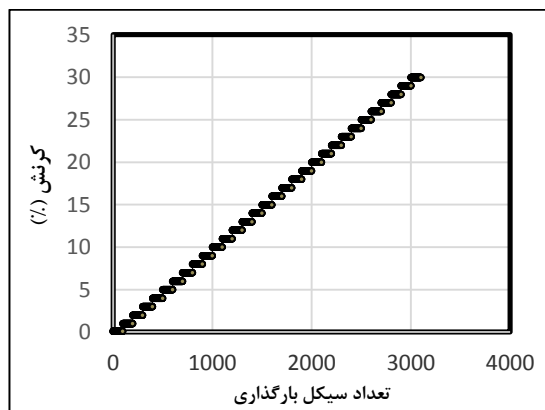
برای انجام این آزمایش، از رئومتر برش دینامیکی مدل Anton Paar MCR 501 (شکل ۵) استفاده شد. بر اساس استاندارد AASHTO TP 101-12-UL نمونه‌های با قطر ۸ میلی‌متر در این آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌ها پس از پیرشدگی کوتاه مدت (RTFO<sup>۷</sup>) و یا

$$\log G'(\omega) = m \log(\omega) + b \quad (10)$$

تعداد سیکل‌های منجر به شدت خرابی‌های متناظر در هر سطح کرنشی قابل محاسبه است. بنابراین تغییرات در میزان ترافیک عبوری از سطح روسازی را می‌توان با تغییر سطح کرنش موجود در رابطه ۴ اعمال کرد [۶].



شکل ۵: رئومتر برش دینامیکی مورد استفاده



شکل ۶: نحوه‌ی بارگذاری در آزمایش LAS

#### ۴ - نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)

نتایج حاصل از آزمایش LAS را می‌توان از چند بُعد مورد بررسی قرار داد. رسم نمودار تنش-کرنش ماده یکی از ابتدایی‌ترین بررسی‌های ممکن است. در این قسمت، نمودار تنش-کرنش نمونه‌های شاهد و اصلاح شده با افزودنی‌های مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در نمودار تنش کرنش، آسیب زمانی رخ می‌دهد که با افزایش کرنش، سطح تنش نمونه رو به کاهش رود. وقوع شکست نمونه به این معنی است که با افزایش سطح کرنش، تنش نمونه رو به کاهش بگذارد [۱].

جای‌گذاری در مدل  $N_f = A(\gamma_{max})^{-B}$  به دست می‌آید. خرابی تجمعی  $D(t)$  از رابطه ۱ به دست آمده است:

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (1)$$

که در آن:

$$C = \frac{G^* \text{Sin} \delta(t)}{G^* \text{Sin} \delta_{initial}} \quad (2)$$

مقدار  $G^* \text{Sin} \delta$  در سیکل ۲۰ ام بارگذاری آزمایش LAS به عنوان  $G^* \text{Sin} \delta_{initial}$  در نظر گرفته می‌شود. جانسون پارامتر  $G^* \text{Sin} \delta$  را به عنوان تمامیت ماده<sup>۹</sup> پیشنهاد کرد [۱]. نمودار میزان C برای هر آزمایش در برابر خرابی ایجاد شده  $D(t)$  رسم شد و مدل ریاضی به صورت رابطه ۳ به دست آمد:

$$C = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (3)$$

$C_0$ : مقدار اولیه C که برابر یک است.

پارامتر A که در رابطه ۴ استفاده می‌شود، از رابطه ۵ به

دست می‌آید:

$$N_f = A(\gamma_{max})^{-B} \quad (4)$$

$$A = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi C_1 C_2)^\alpha} \quad (5)$$

که در این رابطه،

$$k = 1 + (1 - C_2)\alpha \quad (6)$$

f: فرکانس بارگذاری بر حسب Hz

$D_f$ : خرابی تجمعی در لحظه شکست که معادل با خرابی تجمعی در لحظه‌ای است که  $G^* \text{Sin} \delta$  به ۳۵ درصد مقدار اولیه‌اش می‌رسد.

$$D_f = (0.35) \left( \frac{C_0}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (7)$$

$$B = 2\alpha \quad (8)$$

پیش از محاسبه میزان خرابی، باید پارامتر  $\alpha$  برای هر نمونه تعیین شود. روی هر نمونه پیش از انجام آزمایش LAS، آزمایش جاروب فرکانس با فرکانس‌های ۰.۱ تا ۳۰ هرتز در سطح کرنش ۰.۱ درصد انجام می‌شود. با تبدیل مدول مختلط به مدول ذخیره و فرکانس به فرکانس زاویه-ای و رسم نمودار لگاریتمی این مقادیر، شیب این نمودار (m) محاسبه شده و به دنبال آن پارامتر  $\alpha$  که برابر است با  $(1/m)$  به دست می‌آید. روابط مورد استفاده برای محاسبه پارامتر  $\alpha$  عبارتند از:

$$G'(\omega) = G^*(\omega) \times \text{Cos} \delta(\omega) \quad (9)$$

$G'(\omega)$ : مدول ذخیره

$\omega$ : فرکانس زاویه‌ای

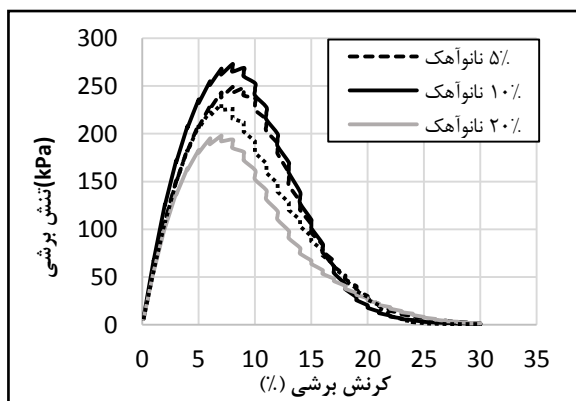
بررسی رفتار خستگی قیر اصلاح شده با ...

نتایج عمر خستگی نمونه‌های مختلف در سطح کرنش ۲.۵٪ در شکل ۱۰ آمده است. قیر اصلاح شده با ۶ درصد نانورس، عمر خستگی بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها دارد. رفتار خستگی قیر اصلاح شده با ۲ درصد نانورس روندی مشابه قیر پایه دارد. افزایش عمر خستگی قیر اصلاح شده با ۶ درصد نانورس را می‌توان در ایجاد شبکه‌ای دوبعدی دانست. این شبکه دوبعدی از صفحات نانورس با ضخامت نانومتری و مولکول‌های قیر تشکیل می‌شود. صفحات نانورس با قرار گرفتن میان مولکول‌های پلیمری قیر، باعث تقویت شبکه قیر شده و تا اندازه‌ای مقاومت قیر در برابر گسترش ترک‌های خستگی را افزایش می‌دهند.

قیر اصلاح شده با ۲۰ درصد نانواهک هیدراته دارای کمترین میزان عمر خستگی در میان نمونه‌های اصلاح شده با نانواهک هیدراته است.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشخص است، نمونه‌های اصلاح شده با ۱۰ و ۲۰ درصد نانواهک هیدراته دارای عمر خستگی کمتری نسبت به قیر پایه هستند. عمر خستگی قیر اصلاح شده با ۵ درصد نانواهک هیدراته نزدیک به قیر پایه است. این امر نشان دهنده تأثیر اندک این میزان نانواهک بر رفتار خستگی قیر است. اما با افزایش میزان نانواهک، عمر خستگی قیر کاهش می‌یابد.

نمونه اصلاح شده با ۱۰ درصد آهک هیدراته دارای کمترین عمر خستگی در بین نمونه‌ها است. همان طور که ملاحظه می‌شود، قیر اصلاح شده با ۱۰ درصد نانواهک هیدراته، عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه اصلاح شده با ۱۰ درصد آهک هیدراته دارد.

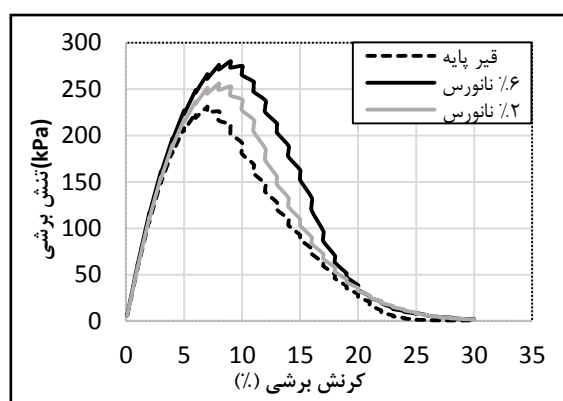


شکل ۸: نمودار تنش-کرنش قیر اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانواهک در دمای ۲۲<sup>o</sup>c

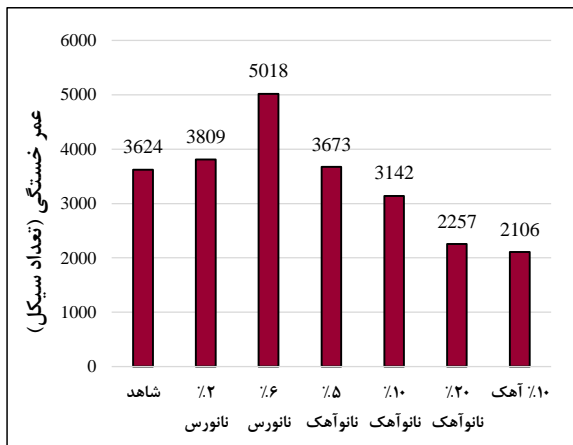
نمودار تنش کرنش نمونه‌های دارای نانورس در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه دارای ۲ درصد نانورس دارای تنش حداکثر ۲۴۹ کیلو پاسکال و کرنش شکست ۸ درصد است. تنش حداکثر نمونه دارای ۶ درصد نانورس ۲۷۳ کیلو پاسکال و کرنش شکست آن ۹ درصد می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان نانورس در قیر، تنش و کرنش شکست قیر به دلیل افزایش مقاومت قیر در برابر ریزترک‌ها افزایش می‌یابد.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که نمونه دارای ۵ درصد نانواهک در کرنش ۸ درصد دچار شکست می‌شود. تنش متناظر با این کرنش ۲۴۳ کیلو پاسکال است. نمونه اصلاح شده با ۱۰ درصد نانواهک در سطح تنش ۲۶۳ کیلو پاسکال و کرنش ۸ درصد دچار شکست می‌شود. قیر اصلاح شده با ۲۰ درصد نانواهک در کرنش ۷ درصد و تنش ۱۹۲ کیلو پاسکال دچار شکست می‌شود. نمونه‌های اصلاح شده با ۵ و ۱۰ درصد نانواهک هیدراته، تنش و کرنش‌های بیشتری را نسبت به نمونه شاهد تحمل می‌کنند. می‌توان علت افزایش تنش شکست نمونه‌های دارای ۵ و ۱۰ درصد نانواهک را در سخت‌شدگی نمونه‌ها دانست.

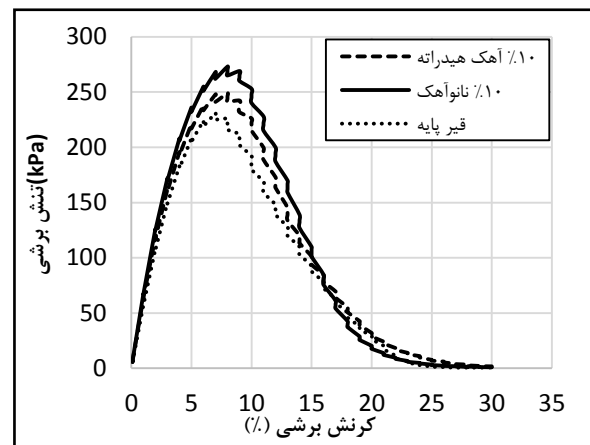
نمونه اصلاح شده با ۱۰ درصد آهک هیدراته مطابق شکل ۹، حداکثر تنش ۲۴۱ کیلو پاسکال و کرنش ۸ درصد را تحمل می‌کند. بیشتر بودن سطح مخصوص نانواهک هیدراته نسبت به آهک هیدراته باعث افزایش تحمل قیر در برابر بارگذاری شده و تنش حداکثر نمونه را افزایش می‌دهد.



شکل ۷: نمودار تنش-کرنش قیر اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانورس در دمای ۲۲<sup>o</sup>c



شکل ۱۰: عمر خستگی نمونه‌های اصلاح شده



شکل ۹: نمودار تنش-کرنش قیر اصلاح شده با ۱۰ درصد آهک و نانو آهک هیدراته در دمای  $22^{\circ}\text{C}$

امر را در قرارگیری صفحات نانومتری نانورس در بین مولکول‌های قیر دانست که این ساختار مقاومت قیر را در برابر ترک‌های ناشی از بارگذاری چرخه‌ای (Cyclic) افزایش داده و تا حدی تشکیل و انتشار ترک‌ها را به تعویق می‌اندازد. اما نانوآهک هیدراته با دارا بودن ساختاری بلوری تنها باعث سخت شدن قیر شده و به اندازه نانورس در عملکرد خستگی قیر تأثیر گذار نبوده است.

## ۶ - پی‌نوشت‌ها

1. Dynamic Shear Rheometer
2. Time Sweep
3. Linear Amplitude Sweep
4. High Shear Mixer
5. X-Ray Diffraction
6. Transmission Electron Microscopy
7. Rolling Thin Film Oven
8. Pressure Aging Vessel
9. Material Integrity

## مراجع

- [1] Johnson CM. "Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using An Accelerated Test Method", Phd dissertation, Wisconsin-Madison, 2010.
- [2] Bahia HU, Hunson DI, Zeng M, Zhai H, Khatri MA, Anderson RM. "Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design", NCHRP, Report No.459, 2001.
- [3] Anderson DA, Le Hir YM, Marasteanu MO, Planche J-P, Martin D, Gauthier G. "Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders". Transportation Research Record.17661: pp. 48-56. 2001
- [4] Martono W, Bahia H, D'Angelo J. "Effect of Testing Geometry on Measuring Fatigue of Asphalt Binders and Mastics". Journal of

## ۵ - نتیجه‌گیری

۱- بر اساس نمودارهای تنش-کرنش حاصل از آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)، این نتیجه حاصل شد که نمونه دارای ۶ درصد نانورس دارای بیشترین تنش حداکثر و بیشترین کرنش شکست در میان نمونه‌ها بود. علت این امر تقویت شبکه قیر به وسیله نانورس در برابر تنش‌های اعمالی تشخیص داده شد.

۲- نمونه اصلاح شده با ۲۰ درصد نانوآهک هیدراته نسبت به نمونه شاهد، روند خرابی سریع‌تری را تجربه کرده است. دلیل این امر شاید تأثیر منفی افزایش میزان نانوآهک در قیر باشد که روند کاهش  $G^*\sin\delta$  را سریع‌تر کرده و باعث می‌شود خرابی زودتر اتفاق بیفتد.

۳- عمر خستگی قیر اصلاح شده با ۲ درصد نانورس نزدیک به قیر پایه بوده است. اما قیر اصلاح شده با ۶ درصد نانورس در سطوح کرنش مختلف، عمر خستگی بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها دارد. صفحات نانورس با قرار گرفتن میان مولکول‌های قیر، باعث تقویت شبکه قیر شده و تا اندازه‌ای مقاومت قیر را در برابر گسترش ترک‌های خستگی افزایش می‌دهد.

۴- نانوآهک هیدراته در مقایسه با آهک هیدراته تأثیر منفی کمتری بر رفتار خستگی قیر گذاشته است. عمر خستگی نمونه اصلاح شده با ۱۰ درصد نانوآهک هیدراته تقریباً ۱.۵ برابر عمر خستگی نمونه دارای ۱۰ درصد آهک هیدراته بود.

۵- نانورس در مقایسه با نانوآهک هیدراته عملکرد بهتری از لحاظ عمر خستگی از خود نشان داد. شاید بتوان علت این

- [8] Diab A, You ZP, Wang HN. "Using Modified Creep and Recovery Tests to Evaluate the Foam-Based Warm Mix Asphalt Contained Nano Hydrated Lime". Advanced Materials Research. No.646, pp.90-966, **2013**.
- [9] Kabir S. "Effect of Hydrated Lime on the Laboratory Performance of Superpave Mixtures", Master of Science Thesis, Louisiana State University, **2008**.
- [10] Samyn F, Bourbigot S, Jama C, Bellayer S, Nazare S, Hull R, et al. "Characterisation of the dispersion in polymer flame retarded nanocomposites". European Polymer Journal, No. 446, pp. 1631-1641. **2008**
- Materials in Civil Engineering. No.199, pp.746-752, **2007**.
- [5] Zhou F, Mogawer W, Li H, Andriescu A, Copeland A. "Evaluation of Fatigue Tests for Characterizing Asphalt Binders". Journal of Materials in Civil Engineering .No.255, pp. 610-6177. **2013**.
- [6] Hintz C, Velasquez R, Johnson C, Bahia H, editors. "Modification and validation of the linear amplitude sweep test for binder fatigue specification", Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, DC, **2011**.
- [7] کاووسی، امیر و برقیانی، پیمان " نقش نانورس و نانواهک هیدراته در حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی " فصلنامه مهندسی حمل و نقل، زمستان ۱۳۹۳.