

## ارزیابی پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده با نانو تیتانیوم دی اکسید

### مقاله علمی - پژوهشی

حامین چوبدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
امین فرج الهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
علیرضا عاملی<sup>\*</sup>، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
<sup>\*</sup>پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۳ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

صفحه ۵۷۴-۵۶۱

### چکیده

جهت بررسی تأثیر درصد نانو ذرات، زمان ذخیره سازی و دمای ذخیره سازی بر پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده توسط نانو ذرات، آزمایش های ذخیره سازی، آزمایش های نقطه نرمی و آزمایش های رژیومتر برشی دینامیکی<sup>۱</sup> (DSR) جهت ارزیابی ویژگی های دو نوع قیر اصلاح شده با نانوتیتانیوم دی اکسید (TiO<sub>2</sub>) به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که نقطه نرمی، دمای شکست، ویسکوزیته برشی دینامیکی و  $G^*/\sin(\delta)$  قیرها با درصد نانو ذره افزایش می یابد. پایداری ذخیره سازی قیرها با درصد نانو ذرات کاهش یافت. تأثیر زمان ذخیره سازی بر پایداری ذخیره سازی قیرها زمانی که زمان نگهداری بیش از ۸ ساعت بود قابل توجه بود. علاوه بر این، پایداری ذخیره سازی قیرها در دماهای پایین بهتر از دمای بالا بود. کاهش اندازه نانو ذرات به دلیل تجمع نانو ذرات نمی تواند به طور مؤثری پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده نانو ذره را افزایش دهد.

واژه های کلیدی: نانو مواد، شیارشدگی، قیر، پایداری ذخیره سازی، دمای ذخیره سازی

### ۱-مقدمه

شده SBS اضافه می شود. تحقیق مثبتی و همکاران نشان می دهد که مخلوط آسفالتی با استفاده از قیر اصلاح شده توسط نانو SiO<sub>2</sub> و SBS عملکرد بهتری نسبت به مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح نشده دارد (Pamplona et al, 2012). TiO<sub>2</sub> دارای ساختار کریستالی ویژه ای است که می تواند بخشی از آلودگی خودرو را جذب یا تجزیه کاتالیزوری کند. بنابراین می توان آن را در راه سازی به کار برد و نقش مهمی در ارتقای حفاظت از محیط زیست ایفا کرد. با توجه به افزایش آگاهی نسبت به حفاظت از محیط زیست، توجه روزافزون به جاده های دوستدار محیط زیست معطوف شده است (Ven et al, 2008). با افزایش مداوم تعداد مالکیت خودرو، آگروز خودروها یکی از منابع اصلی آلودگی است. مطالعه استفاده از TiO<sub>2</sub> در ساخت روسازی به تدریج به یک موضوع داغ تبدیل شده است. محققان در ژاپن، چین، ایتالیا و فرانسه تجزیه فتوکاتالیستی TiO<sub>2</sub> را در ساخت جاده ها امتحان کردند

نانومواد با افزایش نیاز عملکرد روسازی در مخلوط های آسفالتی کاربرد دارند. یک بعد نانومواد معمولاً کمتر از ۱۰۰ نانومتر است که نسبت سطح به حجم بیشتری نسبت به مواد معمولی دارد، به طوری که نانومواد دارای برخی خواص ویژه برای بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی هستند. نانومواد مورد استفاده در ساخت آسفالت شامل نانورس، نانو SiO<sub>2</sub> و نانوتیتانیوم دی اکسید (TiO<sub>2</sub>) است (Amirkhanian et al, 2011). نانورس به دلیل کامپوزیت خاص خود سازگاری خوبی با آسفالت دارد. افزودن نانورس به آسفالت برای بهبود مقاومت کوتاه مدت و بلندمدت پیری قیر اصلاح شده مفید است. در عین حال، به خواص فیزیکی، مکانیکی و رئولوژیکی قیر اصلاح شده کمک می کند. علاوه بر این، نانورس می تواند مقاومت شیارشدگی قیر اصلاح شده استایرن-بوتادین-استایرن (SBS)<sup>۲</sup> را بهبود بخشد (Goh et al, 2011). Nano-SiO<sub>2</sub> نیز به منظور بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی به یک قیر اصلاح

خواص رئولوژیکی تأثیر داشته باشد (Ouyang et al, 2006). از آنجایی که نانو TiO2 دارای مساحت سطح بزرگ و انرژی آزاد سطح بالایی است، پدیده تجمع آسان است. تعمیق درک عوامل پایداری ذخیره سازی بر روی خواص قیر برای انجام اقدامات مربوطه برای بهبود پایداری ذخیره سازی مفید است، بنابراین مطالعه پایداری ذخیره سازی آسفالت اصلاح شده نانوتیتانیوم ضروری است. این مطالعه، آزمایش ذخیره سازی را مورد بررسی قرار داد، بنابراین آزمون نقطه نرمی و آزمون رثومتر برشی دینامیکی (DSR) جهت بررسی پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده با نانو TiO2 با در نظر گرفتن تغییر درصد نانوذرات، زمان ذخیره سازی و دمای ذخیره سازی مورد ارزیابی قرار داد.

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- قیر

در این تحقیق از قیر پایه استفاده شد که توسط شرکت نفت پاسارگاد تولید شد. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی قیر پایه در جدول ۱ نشان داده شده است.

### ۲-۲- افزودنی TiO2

دو نوع نانو TiO2 برای این تحقیق انتخاب شدند: یکی با اندازه ذرات متوسط ۵۰ نانومتر TiO2-50 و دیگری با اندازه ذرات متوسط ۱۰۰ نامگذاری شد. نانومتر TiO2-100 نامگذاری شد. مشخصات دو نوع نانو TiO2 در جدول ۲ نشان داده شده است.

(Golestani et al, 2012). Nano-TiO2 هم در تجزیه فوتوکاتالیستی و هم در مقیاس آن دارای مزایایی است، به طوری که نانو TiO2 توجه را به خود جلب کرد. علاوه بر این، نانو TiO2 دارای محافظ خوبی در برابر اشعه ماوراء بنفش (UV) است که می تواند به عنوان جاذب UV برای کاهش پیری آسفالت UV استفاده شود (Tanzade et al, 2014; Shafabakhsh et al, 2013). Li و Xiao عملکرد مخلوط استفاده شده از نانو TiO2 را به عنوان یک اصلاح کننده در قیر اصلاح شده SBS ارزیابی کردند. تحقیقات نشان داد که مخلوطی که از قیر اصلاح شده نانو TiO2 و کامپوزیت SBS استفاده می کند، پایداری در دمای بالا، پایداری آب و مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین تر نسبت به مخلوط با استفاده از قیر اصلاح نشده داشت (Xiao et al, 2007). حسن و همکاران مقاومت در برابر پیری UV قیر اصلاح شده نانو TiO2 را مورد مطالعه قرار داد. قیر اصلاح شده نانو TiO2 نسبت به قیر معمولی دارای ضریب تلفات کمتر، افزایش نقطه پایان کمتر و نرخ اتلاف شکل پذیری کمتری نسبت به قیر معمولی است که نشان می دهد نانو TiO2 مقاومت در برابر پیری UV را بهبود می بخشد (Hasan et al, 2011).

این مطالعات عمدتاً بر روی اثرات نانوذرات بر عملکرد قیرهای اصلاح شده تمرکز دارند. با این حال، هنوز تحقیقات کافی در مورد اثرات نانوذرات بر روی پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده مخلوط آسفالت وجود ندارد. هنگامی که یک اصلاح کننده به قیر اضافه می شود، تغییر در پایداری ذخیره سازی قیر باید تغییر کند (Hasan et al, 2011). علاوه بر این، پایداری ذخیره سازی می تواند بر پارامترهای فیزیکی قیر، مانند چگالی، نقطه پایان، ویسکوزیته و

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی قیر

نتایج	استاندارد	خصوصیات
۴۴	ASTM D36	نقطه نرمی
>150	ASTM D113	شکل پذیری
۱۰۳	ASTM D5	درجه نفوذ
۳۱		اشباع ها
۴۰		آروماتیک
۲۲	ASTM D4124	رزین
۷		اسفالتین

جدول ۲. مشخصات nano-TiO<sub>2</sub>

TiO <sub>2</sub> -100	TiO <sub>2</sub> -50	مشخصه
Anatase	Anatase	نوع کریستال
۱۰۰	۵۰	اندازه
۹۹.۵	۹۹.۸	درصد خلوص
سفید	سفید	رنگ

### ۲-۳- آماده سازی نمونه‌های قیر اصلاح شده

قیرهای اصلاح شده از بخش‌های بالا و پایین همان لوله برای آزمایش‌های نقطه‌ای بیشتر و آزمایش‌های رئومتر برشی دینامیکی (DSR) استفاده شد. برای بررسی اثرات زمان ذخیره سازی بر پایداری ذخیره سازی، دو نوع قیر اصلاح شده با درصد نانوذرات ۲/۵۰ درصد برای آزمایش ذخیره سازی لوله داغ در زمان ذخیره سازی ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ استفاده شد، و ۱۲۰ ساعت و در دمای نگهداری ۱۶۳ درجه سانتیگراد. برای بررسی اثرات زمان ذخیره سازی بر پایداری انبار، دو نوع قیر اصلاح شده با درصد نانوذرات ۲،۵۰ درصد برای آزمایش نگهداری لوله داغ در زمان نگهداری ۴۸ ساعت و در دمای ذخیره سازی ۱۲۰ درجه سانتی گراد، ۱۶۳ و ۱۷۵ درجه سانتی گراد استفاده شد.

قیر پایه در یک ظرف کوچک تا دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا زمانی که به طور کامل مدیون شود، و دما ثابت نگه داشته شد. مقدار معینی از نانوذرات به آرامی اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه در قیر مخلوط شد. سپس مخلوط کردن در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد با ۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه ادامه یافت و ترکیب اساساً همگن شد. پس از اتمام، قیرهای اصلاح شده همگن برای آزمایش بیشتر تا دمای اتاق خنک شدند. دو سری از قیرهای اصلاح شده با دو نوع نانو TiO<sub>2</sub> تهیه شد. محتوای نانوذرات مورد استفاده در آزمایش‌ها ۰،۵۰، ۱،۰۰، ۱،۵۰، ۲،۰۰ درصد و ۲،۵۰ درصد وزنی مخلوط‌های مربوطه بود. قیر پایه نیز به عنوان مرجع مورد آزمایش قرار گرفت.

### ۳-روش آزمایشگاهی

#### ۳-۱- آزمایش ظرف ذخیره سازی گرم

به منظور بررسی تأثیر محتوای نانوذرات بر پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده آسفالت، دو نوع قیر اصلاح شده با درصد نانوذرات ۰،۵۰، ۱،۰۰، ۱،۵۰، ۲،۰۰ درصد و ۲،۵۰ درصد در این تحقیق استفاده شد. مطالعه برای تست ذخیره سازی لوله داغ طبق روش مرسوم (Niu et al, 2006; fu et al, 2007). قیرهای اصلاح شده در یک کوره با دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد ذوب شدند و سپس در یک لوله فویل آلومینیومی (قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۴۰ میلی‌متر) ریخته شدند. لوله‌های حاوی قیرهای اصلاح شده مهر و موم شده و به صورت عمودی در اجاق با دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شدند. لوله‌های از اجاق خارج شده و در فریزر در دمای -۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت سرد شدند تا قیرهای اصلاح شده کاملاً جامد شوند. قیرهای سرد شده به صورت عرضی به سه قسمت مساوی بریده شدند.

#### ۳-۲- آزمایش نقطه نرمی

قیرهای اصلاح شده از قسمت‌های بالا و پایین همان لوله برای آزمایش نقطه نرمی مطابق با روش تست استاندارد ASTM D36 استفاده شد. برای ارزیابی پایداری ذخیره‌سازی در دمای بالا قیرهای اصلاح شده آسفالت، تفاوت نقاط اتصال بین بخش‌های بالایی و پایینی قیرها محاسبه شد.

#### ۳-۳- رئومتر برش دینامیکی

دقت آزمایش نقطه پایانی نسبتاً پایین است، که ارزیابی پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده آسفالت، به ویژه با محتوای نانو ذرات کم، دشوار است. با این حال، تست DSR از دقت بالایی برخوردار است و معمولاً برای تعیین خصوصیات رئولوژیکی بنیادی قیر استفاده می‌شود. قیر به دلیل ترکیبات مختلف، خصوصیات رئولوژیکی متفاوتی دارد، بنابراین از آزمون DSR می‌توان برای بررسی پایداری ذخیره سازی قیر استفاده کرد. آزمون DSR بر روی قیرها از

از فاکتور شیارشدگی  $G^*/\sin(\delta)$  برای مشخص کردن مقاومت در دمای بالا در برابر تغییر شکل دائمی قیر استفاده می‌کند. پارامترهای ویسکوالاستیک اصلی به دست آمده از DSR، بزرگی مدول برشی پیچیده ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) و  $|G^*|/\sin(\delta)$  محاسبه شد. دمای شکست و ویسکوزیته دینامیکی برشی  $(|n^*|)$  در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد با توجه به مشخصات طراحی مخلوط Superpave تعیین شد.

قسمت بالا و پایین همان لوله با استفاده از یک رئومتر، که در شکل ۲ نشان داده شده است، انجام شد. در دمای ۵۸ درجه سانتیگراد قطر نمونه‌های آزمایشی ۲۵ میلی متر و ضخامت ۱۰۰۰ میلی متر بود. روش آزمایش از استاندارد AASHTO TP 5 پیروی کرد.

خواص ویسکوالاستیک قیر با اندازه‌گیری مدول برشی پیچیده و زاویه فاز ارزیابی شد. مشخصات Superpave



شکل ۱. دستگاه رئومتر برش دینامیکی

#### ۴- بحث

##### ۴-۱- نتایج آزمایشات فیزیکی قیر

##### ۴-۱-۱- تأثیرات درصد نانوذرات

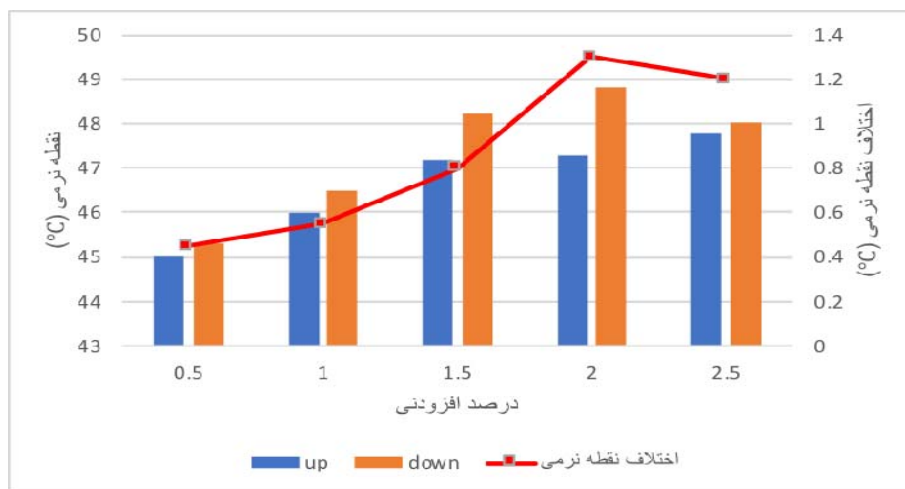
برای بررسی تأثیر درصد نانوذرات بر پایداری ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح‌شده نانوذرات، نمونه‌های قیر با محتوای نانوذرات ۰،۵۰، ۱،۰۰، ۱،۵۰، ۲،۰۰ درصد و ۲،۵۰ درصد از آزمون‌های ذخیره‌سازی لوله داغ جهت بررسی مقادیر نقطه نرمی، دمای شکست، ویسکوزیته دینامیکی - برشی، و  $|G^*|/\sin(\delta)$  استفاده شد.

##### الف- تأثیر درصد نانوذرات بر نقطه نرمی

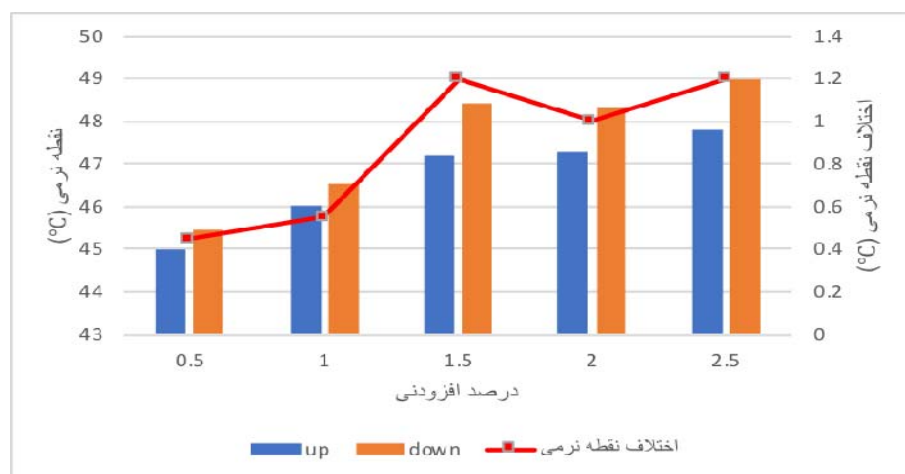
نتایج آزمایش نقطه پایانی با استفاده از دو نوع قیر اصلاح شده با درصد‌های نانوذرات متفاوت به صورت شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد با افزایش درصد نانو ذرات، مقادیر نقطه نرمی قیرهای اصلاح شده توسط TiO2-50 و

TiO2-100 به تدریج افزایش یافت. با مقایسه تفاوت بین دو قیر اصلاح شده، می‌توان دریافت که نقطه نرمی قیر اصلاح شده TiO2-50 نسبتاً بزرگ بود.

تفاوت نقطه نرمی قیرهای اصلاح شده با نانو TiO2 بین بخش‌های بالا و پایین در لوله‌های فویل آلومینیومی پس از آزمایش ذخیره‌سازی لوله داغ مورد توجه قرار گرفت. برای ارزیابی پایداری ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح‌شده، اختلاف نقطه نرمی تحت شرایط درصد نانوذرات متفاوت محاسبه شد و نتایج در شکل ۲ ارائه شده است. قیر اصلاح شده TiO2-50 به تدریج افزایش یافت و در درصد نانوذرات ۲،۰۰ درصد به اوج خود رسید. به طور مشابه، اختلاف نقطه نرمی قیر اصلاح‌شده TiO2-100 در درصد نانوذرات ۱،۵۰ درصد به اوج خود رسید و با گذشت زمان کمی کاهش یافت.



(الف)



(ب)

شکل ۲. تاثیرات درصد نانوذرات بر نقطه نرمی. الف) TiO2-50 ب) TiO2-100

ب- تاثیرات درصد نانوذرات بر ویسکوزیته برشی دینامیکی اثرات درصد نانوذرات بر ویسکوزیته برشی دینامیکی به صورت شکل ۳ نشان داده شده است. ویسکوزیته برشی دینامیکی دو نوع قیر اصلاح شده به طور متناظر با افزایش درصد نانوذرات افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد درصد نانوذره بر ویسکوزیته برشی قیر اصلاح شده توسط TiO2-50 و TiO2-100 اثر می‌گذارد. معادله کریگر-دوگرته توصیفی از رابطه بین کسر حجمی ذرات و ویسکوزیته نسبی در یک سیستم تک پراکنده ارائه می‌دهد (Luckhum, 1999; Zou et al, 2015).

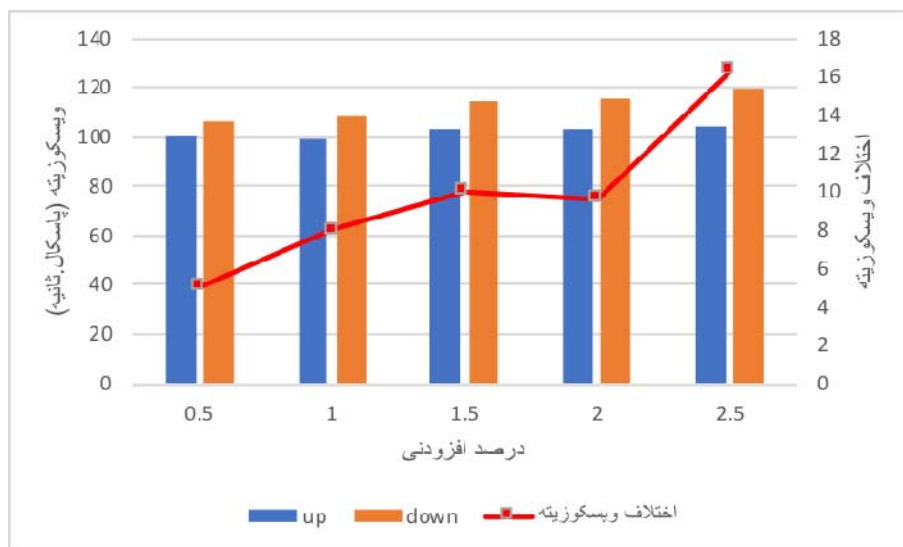
$$\eta_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-[\eta]\phi_{\max}}$$

(۱)

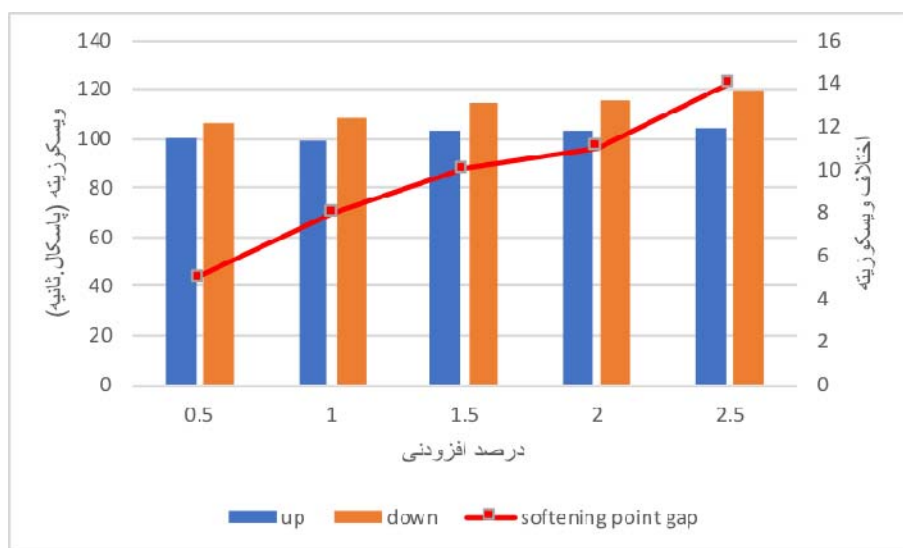
در نظر گرفته شد که پراکندگی نانوذرات با افزایش درصد نانوذرات کاهش می‌یابد و تجمع بیشتر می‌شود که منجر به کاهش پایداری ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح شده می‌شود. تست نقطه نرمی یک آزمایش رایج برای پایداری ذخیره‌سازی قیر اصلاح شده است. هنگامی که تفاوت نقاط نرمی بین بخش بالایی و پایینی نمونه تحت درمان به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد کمتر از ۲،۵ درجه سانتی‌گراد بود، نمونه در نظر گرفته شد که پایداری خوبی در دمای بالا دارد. بر اساس این اصل، دو نوع قیر اصلاح شده با نانو TiO2 پایداری خوبی در ذخیره سازی در دمای بالا داشتند.

باشد، ویسکوزیته نسبی بیشتر است، به همین ترتیب، محتوای نانوذرات بالاتر، ویسکوزیته برشی دینامیکی بیشتر است.

که در آن  $\eta r$  ویسکوزیته نسبی،  $[\eta]$  ویسکوزیته ذاتی،  $\phi$  کسر حجمی و  $\phi_{max}$  حداکثر کسر حجمی لاتکس است. با توجه به (۱)، می‌توان دریافت که هر چه کسر حجمی بزرگتر



(الف)



(ب)

شکل ۳. تاثیرات درصد نانوذرات بر ویسکوزیته. الف) TiO2-50 ب) TiO2-100

درصد نانوذرات متفاوت به صورت شکل ۳ نشان داده شده است. برای قیرهای اصلاح شده توسط TiO2-50 و TiO2-100، اختلاف ویسکوزیته برشی دینامیکی با افزایش درصد نانوذرات افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که تفاوت ویسکوزیته برشی بین بخش بالایی و پایینی در لوله فویل آلومینیومی با درصد نانوذرات افزایش می‌یابد. با افزایش درصد نانوذرات،

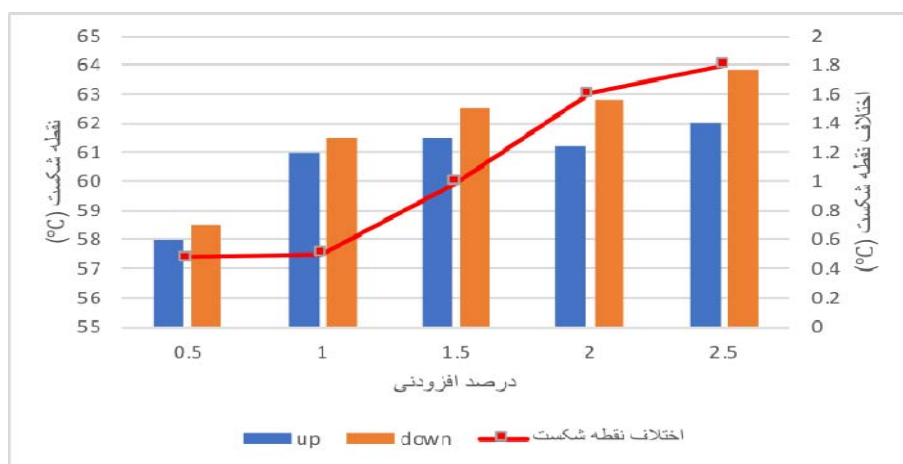
که در آن  $\eta r$  ویسکوزیته نسبی،  $[\eta]$  ویسکوزیته ذاتی،  $\phi$  کسر حجمی و  $\phi_{max}$  حداکثر کسر حجمی لاتکس است. با توجه به معادله (۱)، می‌توان دریافت که هر چه کسر حجمی بزرگتر باشد، ویسکوزیته نسبی بیشتر است، به همین ترتیب، محتوای نانوذرات بالاتر، ویسکوزیته برشی دینامیکی بیشتر است. اختلاف‌های ویسکوزیته دینامیکی برشی تحت شرایط

با افزایش درصد نانوذرات، دمای شکست قیر که توسط TiO<sub>2</sub>-50 و TiO<sub>2</sub>-100 اصلاح شده است، یک رشد جزئی ادامه دارد. هنگامی که درصد نانوذرات از ۰.۵٪ به ۲.۵٪ افزایش یافت، دمای شکست قیر اصلاح شده TiO<sub>2</sub>-50 از ۵۸.۳۵ درجه سانتی‌گراد به ۶۲.۲۱ درجه سانتی‌گراد و قیر اصلاح شده TiO<sub>2</sub>-100 از ۵۸.۳۱ به ۶۲/۰۹ افزایش یافت. اختلاف دمایی شکست تحت شرایط درصد نانوذرات متفاوت نیز محاسبه شد و نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. قیر قبل از درصد نانوذرات ۱،۰۰ درصد به آرامی افزایش یافت و سپس افزایش بیشتری را نشان داد. به طور کلی، بایندر آسفالت اصلاح شده TiO<sub>2</sub>-50 و بایندر آسفالت اصلاح شده TiO<sub>2</sub>-100 تنظیم تغییر دمای خرابی نسبت به محتوای نانوذرات مشابهی داشتند.

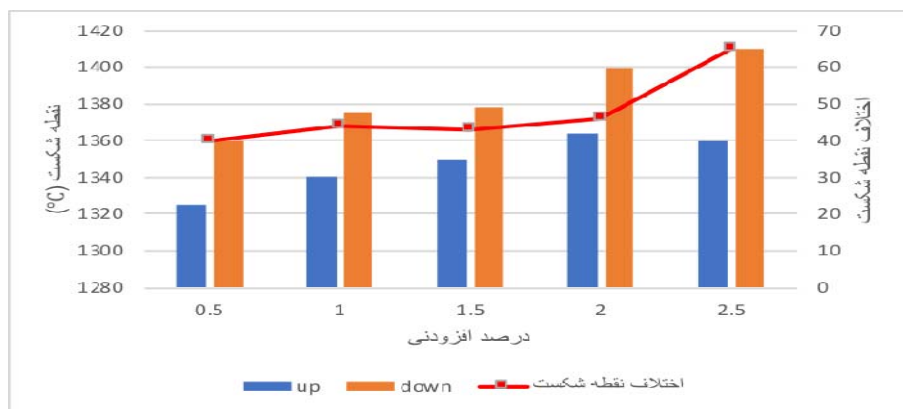
تراکم نانوذرات به دلیل اثر انرژی سطحی زیاد افزایش یافت. علاوه بر این، برهم کنش بین نانوذرات آگلومره شده و مولکول‌های آسفالتین توسط نیروهای واندروالس، سیستم پراکنده قیرهای اصلاح شده را از حالت پایدار به حالت فراپایدار منتقل می‌کند که این ویژگی باعث کاهش پایداری ذخیره‌سازی می‌شود.

### ج-تأثیرات نانوذرات بر دمای شکست

گرچه آزمایش نقطه نرمی یک روش آزمایش رایج است، اما دقت آزمایش بالا نیست، به ویژه برای قیرهای اصلاح شده با مقدار کمی نانوذرات. برای بررسی پایداری ذخیره سازی لازم بود از روش آزمون با دقت بالا استفاده شود، بنابراین از آزمون DSR در این مطالعه استفاده شد. اثرات درصد نانوذرات بر روی دمای شکست به صورت شکل ۴ نشان داده شده است.



(الف)



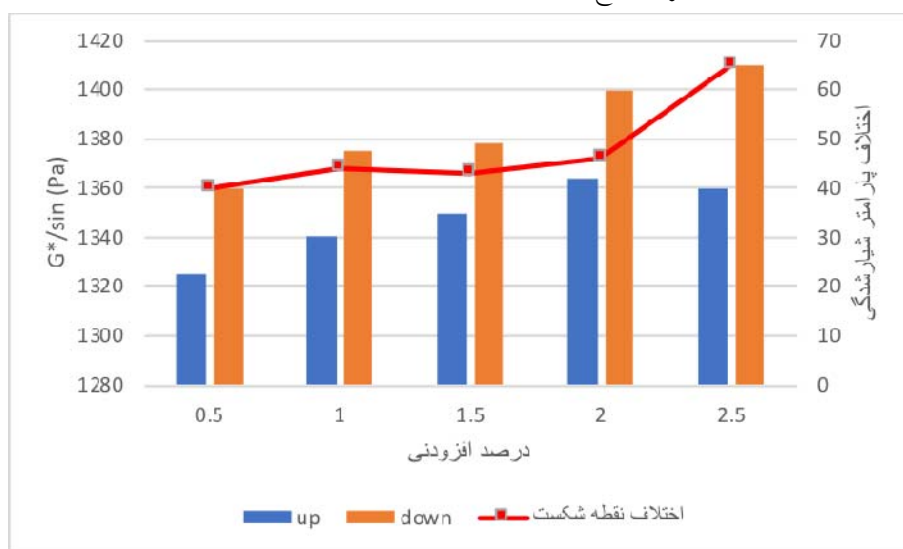
(ب)

شکل ۴. تأثیرات درصد نانوذرات بر نقطه شکست. الف) TiO<sub>2</sub>-50 ب) TiO<sub>2</sub>-100

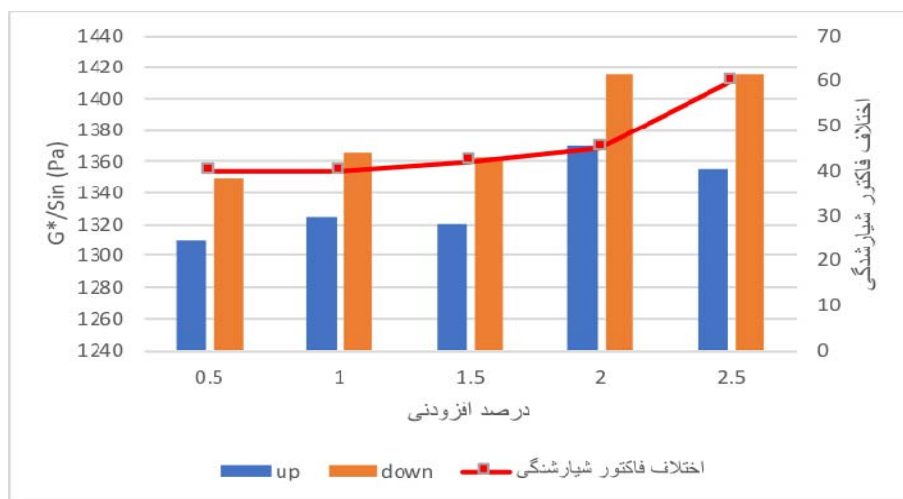
۴-۱-۲- تاثیرات درصد نانوذرات بر فاکتور شیارشدگی

TiO<sub>2</sub>-100 روند افزایشی آهسته‌ای را در محدوده درصد آزمایش ۰.۵۰٪ تا ۲.۵۰٪ نشان داد. نتایج نشان داد که درصد نانوذره بر روی  $G^*/\sin(\delta)$  تاثیر دارد. به طور کلی، اختلاف نقطه نرمی، اختلاف دمای شکست، اختلاف ویسکوزیته برشی دینامیکی و اختلاف  $|G' / \sin(\delta)|$  با درصد نانوذره افزایش یافت. برای قیر اصلاح‌شده توسط TiO<sub>2</sub>-50 و TiO<sub>2</sub>-100، پایداری ذخیره‌سازی قیر اصلاح‌شده با افزایش درصد نانوذرات کاهش یافت که می‌تواند عمدتاً به دلیل تجمع نانوذرات با افزایش درصد نانوذرات باشد.

اثرات محتوای نانوذرات بر روی  $G^*/\sin(\delta)$  به صورت شکل ۵ نشان داده شده است. برای دو نوع قیر اصلاح شده،  $G^*/\sin(\delta)$  به آرامی با افزایش درصد نانوذرات افزایش یافت. اختلاف‌های  $G^*/\sin(\delta)$  تحت شرایط درصد نانوذرات مختلف محاسبه شده و در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به منحنی اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  قیر اصلاح شده TiO<sub>2</sub>-50،  $G$  اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  زمانی که مقدار TiO<sub>2</sub>-50 کمتر از ۲.۰۰٪ بود، به آرامی افزایش یافت، در حالی که اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  به میزان قابل توجهی در مقدار ۲.۵۰٪ افزایش یافت. در مقابل، اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  قیر اصلاح شده



(الف)



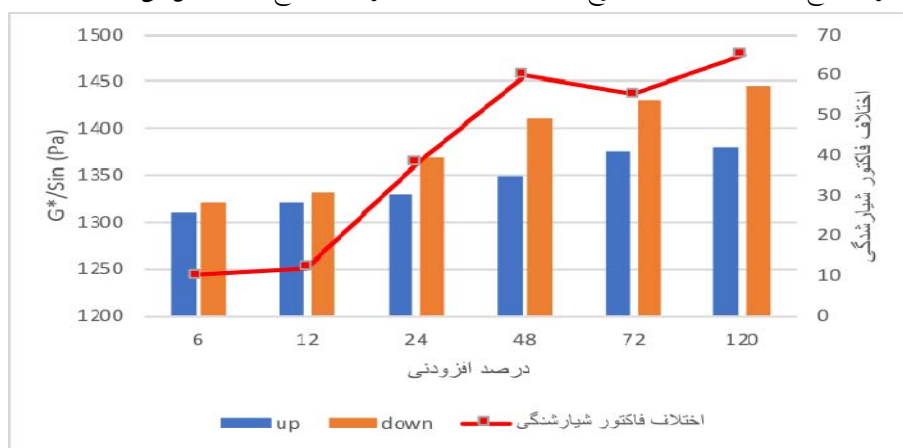
(ب)

شکل ۵. تاثیر نانو ذره بر فاکتور شیارشدگی

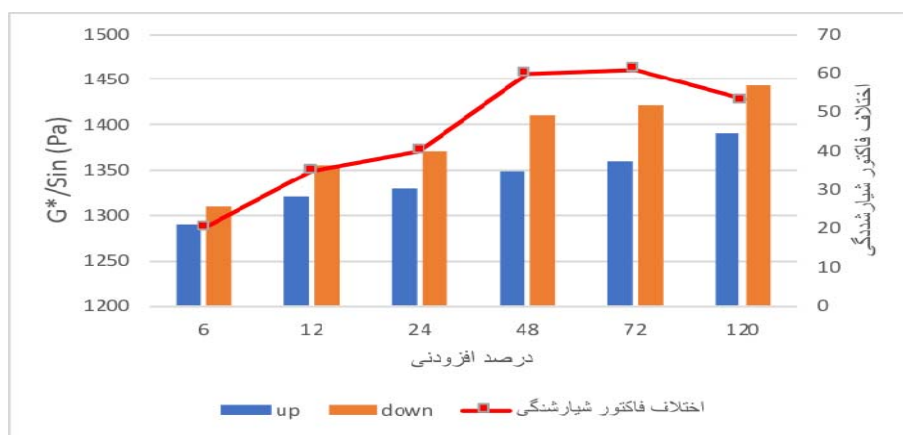
۴-۱-۳- تأثیرات زمان ذخیره

در مورد پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده نانوذرات، دو نوع نمونه قیر اصلاح شده با درصد نانوذرات ۲،۵۰ درصد در لوله داغ در زمان ذخیره سازی ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲، آزمایش می شود. و در دمای نگهداری ۱۶۳ درجه سانتیگراد برای بررسی مقادیر  $G^*/\sin(\delta)$  استفاده شد. شکل ۶ اثرات زمان ذخیره سازی در  $G^*/\sin(\delta)$  را نشان می دهد. برای هر دو قیر اصلاح شده TiO2-50 و قیر اصلاح شده TiO2-100، مقادیر برای تجزیه و تحلیل اثرات زمان ذخیره سازی بر پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده نانوذرات، اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  تحت شرایط مختلف زمان ذخیره سازی محاسبه شد و در شکل ۶ ارائه شده است. برای قیر اصلاح شده TiO2-50، قیر، اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  روند افزایشی با زمان ذخیره سازی قبل از ۴۸ ساعت و کمی تغییر کرده است. برای قیر اصلاح شده TiO2-100، تنوع  $G^*$

اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  مانند TiO2-50 بود. نتایج نشان داده شده است که زمان ذخیره سازی بر پایداری ذخیره سازی تأثیر داشت نانوذرات قیرهای را اصلاح کردند و ضربه خوردند قابل توجه زمانی که زمان ذخیره سازی بیش از ۴۸ ساعت بود. علاوه بر این، می توان دریافت که اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  TiO2-50 در ۷۲ ساعت و TiO2-100 در ۱۲۰ ساعت اندکی کاهش یافت، به طوری که در نظر گرفته شد که هر دو بخش بالایی و پایینی نمونه های قیر به شدت پیر شده اند، که باعث ایجاد اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  می شود. زمان ذخیره سازی بیش از ۴۸ ساعت بود. نانوذرات برای کاهش انرژی سطحی بر اساس اصل کمترین انرژی به سمت تجمع تمایل دارند. با افزایش زمان ذخیره سازی، نانوذرات آگلومره شده مجدداً پراکنده می شوند یا تجمع را تشدید می کنند که در نتیجه پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده کاهش می یابد.



(الف)



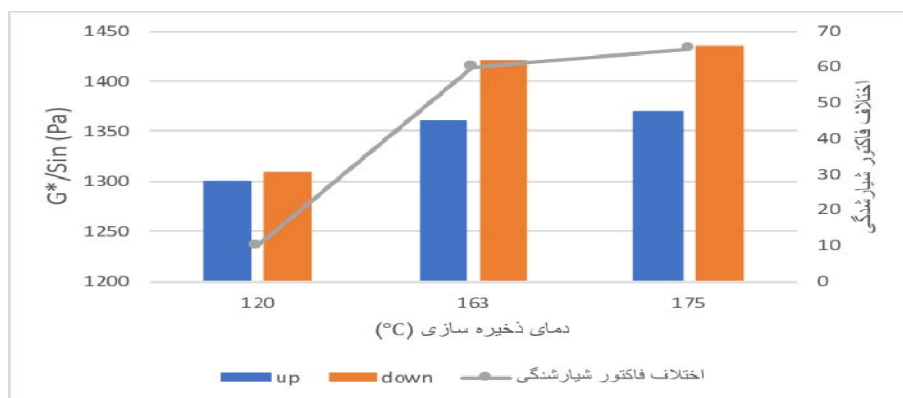
(ب)

شکل ۶. تأثیرات زمان پایداری

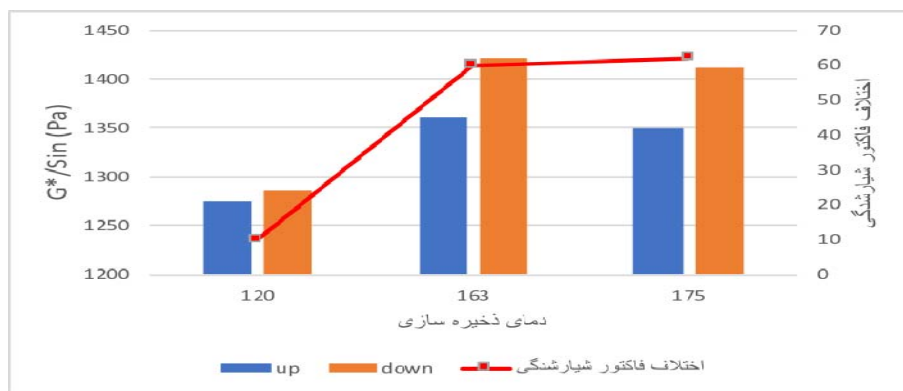
## ۴-۲-تاثیرات دمای ذخیره سازی

در حالت پایین کوچکتر بود. دمای ذخیره سازی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  در ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد بزرگتر بود، و اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  زمانی که دمای ذخیره‌سازی به ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد رسید کمی افزایش یافت. می‌توان دریافت که دمای ذخیره‌سازی بر پایداری ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح‌شده نانوذرات تأثیر دارد. پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده نانوذرات در دماهای پایین بهتر از دماهای بالا بود. یک قیر اصلاح شده نانوذرات یک سیستم پراکنده است. حرکت حرارتی مولکولی در سیستم پراکنده قیرهای اصلاح شده با افزایش دما افزایش یافت. نانوذرات آگلومره شده و ترکیب میسل آسفالتین سنگین در دمای ذخیره‌سازی بالا روند نزولی را دارد که در نتیجه اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  افزایش می‌یابد. در نتیجه، پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده نانوذرات با دمای ذخیره سازی کاهش یافت.

برای مطالعه اثرات زمان ذخیره سازی بر روی پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده با نانوذرات، دو نوع نمونه قیر اصلاح شده با درصد نانوذرات ۲,۵۰ درصد در هر زمان آزمایش ذخیره سازی لوله داغ در زمان ذخیره سازی می‌شود. ۴۸ ساعت و در دمای ذخیره سازی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد و ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد برای بررسی مقادیر  $G^*/\sin(\delta)$  استفاده شد. شکل ۷ اثرات دمای ذخیره سازی را بر روی  $G^*/\sin(\delta)$  نشان می‌دهد. برای هر دو قیر اصلاح شده TiO<sub>2</sub>-50 و قیر اصلاح شده TiO<sub>2</sub>-100، اختلاف‌های  $G^*/\sin(\delta)$  با دمای ذخیره‌سازی افزایش یافت. اختلاف‌های  $G^*/\sin(\delta)$  در دماهای ذخیره‌سازی متفاوت برای تجزیه و تحلیل اثرات دمای ذخیره‌سازی بر پایداری انبار محاسبه شد و محاسبه به صورت منحنی‌های اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  در شکل ۷ ارائه شده است. از شکل ۷ مشاهده می‌شود که دو نوع قیر اصلاح شده دارای تغییرات  $G^*/\sin(\delta)$  مشابه با دمای ذخیره سازی هستند: اختلاف  $G^*/\sin(\delta)$  بین بخش بالا و پایین



(الف)



(ب)

شکل ۷. تاثیر دمای ذخیره سازی

## ۵- نتیجه گیری

از ۴۸ ساعت بود، قابل توجه بود. لازم است اقداماتی برای بهبود پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده نانوذرات در زمانی که زمان ذخیره سازی بیش از ۴۸ ساعت بود، انجام شود. -پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده نانوذرات در دماهای پایین بهتر از در دماهای بالا بود. -کاهش اندازه نانوذرات به دلیل تجمع نانوذرات نمی تواند به طور مؤثری پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده نانوذره را افزایش دهد.

این مطالعه از آزمون ذخیره سازی لوله داغ آلومینیومی، آزمون نقطه نرمی و آزمون DSR برای بررسی پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده نانوتیتانیم با تغییر درصد نانوذرات، زمان ذخیره سازی و دمای ذخیره سازی استفاده کرد. بر اساس نتایج و آنالیز واریانس می توان نتایج زیر را به دست آورد: -پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده نانوذرات با درصد نانوذرات کاهش یافت. -زمان ذخیره سازی بر پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده نانوذرات تأثیر داشت و تأثیر زمانی که زمان ذخیره سازی بیش

## ۶- پی نوشت ها

- 1- Dynamic Shear Rheometer
- 2- Styrene Butadiene Styrene
- 3- Ultra Violet

## ۷- مراجع

-Luckham. P. F. and M. A. Ukeje. (1999). Effect of particle size distribution on the rheology of dispersed systems. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 220, No. 2, 347-356.

-Niu. Y., Z. Zhu, J. Xiao, Z. Liu, and B. Liang (2016). Evaluation of storage stability of styrene-butadiene-styrene block copolymer-modified asphalt via electrochemical analysis. *Construction and Building Materials*, Vol. 107, 38-43.

-Ouyang. C., S. Wang, Y. Zhang, and Y. Zhang (2006). Rheological properties and storage stability of SEBS/kaolinite clay compound modified asphalts. *European Polymer Journal*, Vol. 42, No. 2, 446-457.

-Pamplona. T. F., B. De C. Amoni, A. E. V. De Alencar et al., (2012). Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: Effect on rheological properties. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, Vol. 23, No. 4, 639-647.

-Tabachnick. B. G. and L. S. Fidell, Using Multivariate Statistics, Allyn & Bacon, 5th edition, 2006. P. Xiao and X. Li. (2007). Research on the performance and mechanism of nanometer ZnO/SBS modified asphalt. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, Vol. 24, No. 6, 12-16.

-Amirkhanian .A. N., F. Xiao, and S. N. Amirkhanian (2011). Characterization of unaged asphalt binder modified with carbon nano particles. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 4, No. 5, 281-286.

-Fu. H., L. Xie, D. Dou, L. Li, M. Yu, and S. Yao. (2007). Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, 1528-1533.

-Goh. S. W., M. Akin, Z. You. and X. Shi. (2011). Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano- modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 1, 195-200.

-Golestani. B., F. Moghadas Nejad, and S. Sadeghpour Galooyak (2012). Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts. *Construction and Building Materials*, Vol. 35, 197-203.

-Hassan. M. M., L. N. Mohammad, S. B. Cooper, and H. Dylla (2011). Evaluation of nano-titanium dioxide additive on asphalt binder aging properties. *Transportation Research Record*, No. 2207, 11-15.

-Yang. J. and S. Tighe (2013). A review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 96, 1269–1276.

-Zou. X., A. Sha, W. Jiang, and X. Huang. (2015). Modification mechanism of high modulus asphalt binders and mixtures performance evaluation. *Construction and Building Materials*, Vol. 90, 53–58.

-Tanzadeh. J., F. Vahedi, T. K. Pezhouhan, and R. Tanzadeh (2013). Lab- oratory study on the effect of nano Tio<sub>2</sub> on rutting performance of asphalt pavements. *Advanced Materials Research*, Vol. 622, 990–994.

-Ven. M. V. De, A. Molenaar, J. Besamusca, and J. Noorder- graaf (2008). Nanotechnology for binders of asphalt mixtures. *In Proceedings of the 4th Eurasphalt and Eurobitume Congress*, Copenhagen, Denmark.

# Evaluation of the Effect of Recycled Fibers on Physical and Rheological Properties of Asphalt Binder

*Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*E-mail: amelii@gmail.com*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

In order to investigate the effect of the percentage of nanoparticles, storage time and storage temperature on the storage stability of bitumen modified by nanoparticles, storage tests, softening point tests and dynamic shear rheometer 1 (DSR) tests were used to evaluate the characteristics of two types of bitumen modified with nanotitanium dioxide (TiO<sub>2</sub>). The results showed that the softening point, fracture temperature, dynamic shear viscosity and  $|G^*|/\sin(\delta)$  of bitumen's increase with the percentage of nanoparticles. The storage stability of bitumens decreased with the percentage of nanoparticles. The effect of storage time on the storage stability of bitumen's was significant when the storage time was more than 48 hours. In addition, the storage stability of bitumen's at low temperatures was better than at high temperatures. The reduction of nanoparticle size due to nanoparticle aggregation could not effectively increase the storage stability of nanoparticle-modified bitumen.

**Keywords:** Nanomaterials, Cracking, Bitumen, Storage Stability, Storage Temperature