

## ارزیابی رفتار شیارشدگی قیر حاوی افزودنی زایکوترم

سید سعید فاطمی<sup>۱</sup>، جعفر بلوری بزاز<sup>۲</sup>، سید علی ضیائی<sup>۳</sup>، بهرام حق پناه<sup>۴</sup>، محبوبه صارمی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲ و ۳- عضو هیئت علمی گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۴ و ۵- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، مدیر کنترل کیفیت و مدیر آزمایشگاه شرکت قیر شرق

bolouri@um.ac.ir

### خلاصه

خرابی شیارشدگی به عنوان یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر، چالش اصلی مدیران شهری می‌باشد. اگرچه عوامل متعددی مانند شرایط بارگذاری و محیطی بر وقوع آن تاثیرگذار می‌باشند، اما خصوصیات قیر مصرفی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی اثر چشمگیری در میزان شدت این خرابی دارد. طی سالیان اخیر، به جهت بهبود خواص شیارشدگی قیر، اصلاح رفتار رئولوژی آن مد نظر قرار گرفته است. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که الزام افزودن هر نوع ماده‌ای به قیر به دلیل عدم سازگاری بین قیر و ماده‌ی ترکیب شده، نمی‌تواند موجب تاثیر مثبت بر خصوصیات عملکردی قیر شود. امروزه زایکوترم یک افزودنی رایج جهت کنترل حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی شناخته می‌شود اما بررسی‌های انجام شده در خصوص رفتار شیارشدگی ترکیب قیر و زایکوترم، بسیار محدود است. در این تحقیق، قیر خالص ۶۰/۷۰ با زایکوترم در چهار میزان مختلف ترکیب گردید. آزمایش‌های رئومتر برش دینامیکی (DSR) و بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR) برای ارزیابی زایکوترم بر رفتار شیارشدگی قیر خالص در دماهای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به کار برده شد. نتایج نشان می‌دهد که زایکوترم در میزان درصدهای کم، باعث بهبود رفتار شیارشدگی و افزایش پارامتر درصد بازگشت قیر می‌شود اما با افزایش زایکوترم در قیر حساسیت شیارشدگی ترکیب حاصل افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** شیارشدگی، زایکوترم، رئومتر برش دینامیکی، بازگشت خزشی در چند سطح تنش.

### ۱. مقدمه

امروزه ساخت راه‌های جدید به منظور پاسخ به نیاز روزافزون در خصوص ایجاد زیرساخت‌های مورد نیاز حمل‌ونقل، برای تمام کشورها امری اجتناب ناپذیر است. همچنین بهسازی راه‌های موجود سهم عمده‌ای از بودجه‌ی کشورها را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. از میان دو گونه‌ی اصلی ساخت روسازی راه (آسفالتی و بتنی)، مخلوط آسفالتی به جهت سهولت ساخت، ترمیم‌پذیری سریع و هزینه‌های ساخت پایین‌تر، از مقبولیت بیش‌تری برخوردار است [۲]. مخلوط آسفالتی داغ دارای دو جزء اصلی قیر و سنگ‌دانه‌های دانه‌بندی شده می‌باشند که سهم قیر مورد استفاده تنها حدود ۵ درصد وزنی مخلوط حاصل می‌باشد. با وجود ناچیز بودن سهم قیر در مخلوط آسفالتی، این ماده نقش به‌سزایی در عملکرد مخلوط نهایی دارد [۳]. نقش اصلی قیر، ایجاد چسبندگی میان سنگ‌دانه‌های موجود می‌باشد. خصوصیات فیزیکی قیر به گونه‌ای است که با افزایش دمای آن، به حالت مایع تبدیل شده و می‌تواند با سنگ‌دانه‌ها ترکیب گردد و یک لایه‌ی نازک قیری بر روی آن ایجاد نماید که نقش اصلی چسبندگی میان اجزاء اصلی مخلوط آسفالتی را دارد. همچنین در دماهای معمول، این ماده خاصیت چسبندگی خود را حفظ می‌کند و خواص آن از حالت ویسکوز در دمای بالا به سمت الاستیک در دمای پایین متغیر می‌باشد و در دماهای معمول سطح روسازی، به صورت یک ماده‌ی ویسکوالاستیک عمل می‌کند [۴]. در طول عمر یک روسازی آسفالتی عوامل محیطی از قبیل دما، آب‌وهوا و همچنین عوامل بارگذاری مانند بارگذاری محوری، عملکرد آن را تحت تاثیر قرار داده و می‌تواند باعث بروز خرابی‌هایی همچون ترک‌های خستگی، ایجاد شیار بر روی آسفالت بر اثر افزایش بارمحوری و عریان‌شدگی سنگ‌دانه‌ها در اثر تاثیر رطوبت بر لایه‌ی قیر اندود سنگ‌دانه‌ها شود [۴]. از میان خرابی‌های بیان شده، خرابی شیارشدگی جزء مهم‌ترین خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر محسوب می‌شود. این نوع خرابی به علت تجمع تغییر شکل‌های دائمی در لایه‌های روسازی بر اثر بارگذاری ترافیکی ایجاد می‌گردد. شایان

ذکر است که خرابی شیارشدگی یک خرابی زودرس در طول عمر روسازی محسوب می‌شود که علاوه بر تاثیرگذار بودن آن بر شکل‌گیری سایر خرابی‌ها، بر ایمنی استفاده‌کنندگان از راه تاثیر منفی چشم‌گیری دارد [۵].

با افزایش کیفیت مصالح مورد استفاده در ساخت مخلوط آسفالتی می‌توان احتمال ایجاد این خرابی را کاهش داد که موجب افزایش طول عمر روسازی آسفالتی جاده‌ها شده و تاثیر مستقیمی بر اقتصاد کشور دارد [۱]. همچنین استفاده از مخلوط آسفالتی سفت‌تر اگرچه موجب کاهش خرابی شیارشدگی به‌خصوص با افزایش بار محوری و قرارگیری در دمای هوای گرم می‌شود، اما شکنندگی مخلوط آسفالتی در هوای سرد را در پی خواهد داشت [۷و۶]. لذا تغییر خصوصیات قیر در جهت افزایش خاصیت الاستیک آن و افزایش دوام روسازی در برابر شیارشدگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۷].

طی تحقیقات صورت گرفته مشخص گردید که افزودن مواد پلیمری به قیر موجب تغییر در رفتار ویسکوالاستیک قیر می‌شود که بعضا در جهت افزایش خواص الاستیک قیر در دماهای بالا می‌باشد. طی تحقیقاتی که در سال ۲۰۱۶ بر روی رفتار قیر اصلاح شده با پلی اتیلن ترفتالات (PET) انجام شد، مشخص گردید که این ماده‌ی پلیمری تاثیر مثبتی بر روی پارامتر شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ ) قیر ۶۰/۷۰ دارد [۸]. در سال ۲۰۱۴ نیز به وسیله آزمایش تنش خزشی و بازیابی چندگانه، اثر افزودن EVA بر قیر پایه ۵۰/۷۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که قیر اصلاح شده با EVA می‌تواند پس از هر دوره‌ی بارگذاری، مقدار کرنش بیش‌تری را بازیابی نماید [۹]. کارایی افزودن نانوذرات SBS بر تغییر شکل‌های دائمی قیر در سال ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بیان‌کننده‌ی این موضوع بود که ترکیب ۴ و ۵ درصد SBS به قیر، بزرگ‌ترین مقدار درصد بازگشت را در آزمایش (MSCR) دارند که نشان‌دهنده‌ی مقاومت بهتر ترکیب ایجادشده در برابر شیارشدگی می‌شود [۱۰].

زایکوترم ماده‌ای نانو مقیاس می‌باشد که عمدتاً توسط شرکت زایدکس هندوستان و ایوانیک آلمان تولید می‌گردد. این ماده به صورت مایع و برپایه‌ی پلی آمین‌های اسیدی می‌باشد. طی سالیان اخیر این ماده در جهت کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین زایکوترم تاثیر به‌سزایی بر کاهش دمای اختلاط مخلوط آسفالتی داغ با حفظ کارایی مورد نیاز را دارد که موجب کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای به میزان ۳۰ الی ۴۰ درصد در فرآیند تولید مخلوط آسفالتی داغ می‌شود [۱۱]. اما مطالعات صورت گرفته بر روی رفتار شیارشدگی این ماده بسیار محدود می‌باشد. هدف از تحقیق پیش‌رو، بررسی رفتار شیارشدگی قیر پایه‌ی ۶۰/۷۰ با توجه به تغییرات میزان افزودن زایکوترم به قیر و تغییر سطوح دمایی بالا می‌باشد.

## ۲. روش تحقیق

این تحقیق، خصوصیات شیارشدگی قیر ۶۰/۷۰ که با زایکوترم در چهار سطح مختلف (۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪) ترکیب شده است در دماهای بالا مورد بررسی قرار می‌دهد. در ابتدا طبق یک الگوی مشخص، زایکوترم با قیر ترکیب می‌شود و سپس خصوصیات فیزیکی هر ترکیب (درجه نفوذ و نقطه نرمی) تعیین می‌گردد. سپس به کمک دستگاه رئومتر برش دینامیکی، زاویه‌فازی و مدول برشی هر نمونه در هر یک از دماهای تعیین شده محاسبه می‌گردد، با داشتن این دو پارامتر اصلی می‌توان پارامتر شیارشدگی نمونه‌های آزمایشگاهی را تعیین و حساسیت به شیارشدگی را مقایسه کرد. در مرحله‌ی بعد به کمک آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش، پارامترهای درصد بازگشت و انطباق خزشی غیرقابل بازگشت تعیین می‌شوند. این دو پارامتر از پیشرفت‌های اخیر در تعیین مشخصات قیر می‌باشد که دقت بالایی در تخمین عملکرد شیارشدگی قیر دارد.

## ۳. مشخصات مواد و نحوه اختلاط

در این پژوهش از قیر خالص ۶۰/۷۰، تهیه شده از شرکت پالایش قیر شرق به عنوان یکی از تامین‌کنندگان اصلی قیر استان خراسان، استفاده شده است. مشخصات فیزیکی این قیر در جدول ۱ ذکر شده است. ماده‌ی افزودنی به قیر نیز زایکوترم می‌باشد که از تولیدات شرکت زایدکس هندوستان بوده و مشخصات آن بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط این شرکت در جدول ۲ ارائه شده است.

به منظور ترکیب زایکوترم با قیر، ابتدا قیر تا دمای ۱۶۵ درجه‌سانتی‌گراد حرارت داده شده تا کاملاً به حالت مایع تبدیل گردد، سپس قیر مایع در قوطی‌هایی که قابل قرارگیری در زیر همزن با دور مشخص می‌باشند تخلیه شده و در مرحله بعد زایکوترم به صورت وزنی و در چهار سطح ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ با قیر به مدت ۳۰ دقیقه و سرعت اختلاط ۲۰۰۰ دور در دقیقه ترکیب می‌گردد. پس از پایان مدت زمان اختلاط، جهت جلوگیری از به‌وجود آمدن حباب در قیر، سرعت همزن با نرخ ثابت کاهش پیدا کرد.

#### جدول ۱- مشخصات قیر مصرفی

مشخصات	واحد	نتایج آزمایش	روش آزمایش
درجه نفوذ	0.1 mm	۶۱	ASTM D5
نقطه نرمی	°C	۵۰	ASTM D36
وزن مخصوص	gr/cm <sup>3</sup>	۱/۰۱	ASTM D3289
نقطه اشتعال	°C	۳۳۰	ASTM D92
کشش پذیری	cm	۱۲۰	ASTM D113

#### جدول ۲- مشخصات فیزیکی زایکوترم

حالت فیزیکی	مایع
رنگ	زرد کم رنگ
بو	بدون بو
وزن مخصوص	۰/۹۷ گرم بر سانتی متر مکعب
نقطه اشتعال	غیر قابل اشتعال
حلالیت در آب	قابل حل در آب

## ۴. آزمایش‌ها

### ۴-۱. تعیین خصوصیات فیزیکی قیر

جهت انجام آزمایش درجه نفوذ، مطابق استاندارد ASTM D5 عمل شده است. در این آزمایش ابتدا قیر را در ظرف مخصوص ریخته و به مدت ۹۰ دقیقه در حمام آب با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد قرار داده شد. سپس مقدار نفوذ سوزن استاندارد در قیر با بار ۱۰۰ گرم در مدت ۵ ثانیه بر حسب دهم میلی متر ثبت شد [۱۲].

نقطه نرمی بر اساس استاندارد ASTM D36 تعیین گردید. در این روش ابتدا حلقه برنجی مخصوص را با قیر مذاب پر کرده و پس از سرد شدن، حلقه بر روی دستگاه در داخل بشر حاوی آب با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد قرار می‌گیرد. سپس ساچمه‌ای دقیقاً در مرکز حلقه روی سطح قیر قرار داده می‌شود و عملیات گرم کردن ظرف با سرعت ۵ درجه در دقیقه آغاز می‌شود. درجه حرارتی که به واسطه آن ساچمه از حلقه عبور کرده و به سطح پایین برخورد نماید به عنوان نقطه نرمی ثبت می‌شود [۱۳].

### ۴-۲. آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

جهت اندازه‌گیری مدول مرکب برشی ( $G^*$ ) و زاویه اختلاف فاز ( $\delta$ ) که دو پارامتر اصلی در توصیف رفتار ویسکوالاستیک قیر می‌باشند، از آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR) مطابق استاندارد AASHTO T315 استفاده شد [۱۴]. این آزمایش بر روی نمونه‌های پیرنشده انجام پذیرفت. دماهای مورد بررسی ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی گراد تعیین و برای هر نمونه در هر دما پارامتر شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ ) اندازه‌گیری گردید.

### ۴-۳. آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش

آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR) جهت بررسی حساسیت نمونه‌های قیر به پدیده‌ی شیارشدگی بر روی نمونه‌ها انجام شده است. این آزمایش بر روی نمونه‌هایی با قطر ۲۵ میلی متر و با ۱ میلی متر فاصله بین دو صفحه توسط دستگاه DSR انجام شد [۱۵].

آزمایش MSCR دو مرحله‌ای می‌باشد، در مرحله‌ی اول ۱۰ سیکل بارگذاری (۱ ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت) در سطح تنش ۰/۱ کیلوپاسکال اعمال می‌شود و سپس ۱۰ سیکل بارگذاری (۱ ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت) در سطح تنش ۳/۲ کیلوپاسکال لحاظ می‌شود. در نهایت با میانگین‌گیری ۱۰ سیکل در هر سطح تنش و هر دما، پارامترهای درصد بازگشت (R) و مدول غیرقابل بازگشت ( $J_{nr}$ ) با استفاده از فرمول‌هایی که در ادامه ارائه شده است، تعیین شد. که  $\epsilon_u$  برابر با کرنش غیرقابل بازگشت،  $\epsilon_p$  کرنش ماکزیمم و  $\sigma$  سطح تنش می‌باشد [۱۵].

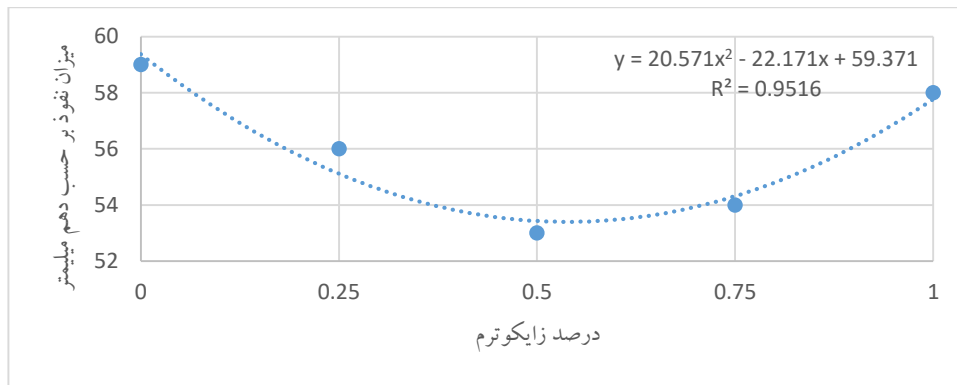
$$R = \frac{\epsilon_p - \epsilon_u}{\epsilon_p} \times 100 \quad (1)$$

$$J_{nr} = \frac{\epsilon_u}{\sigma} \quad (2)$$

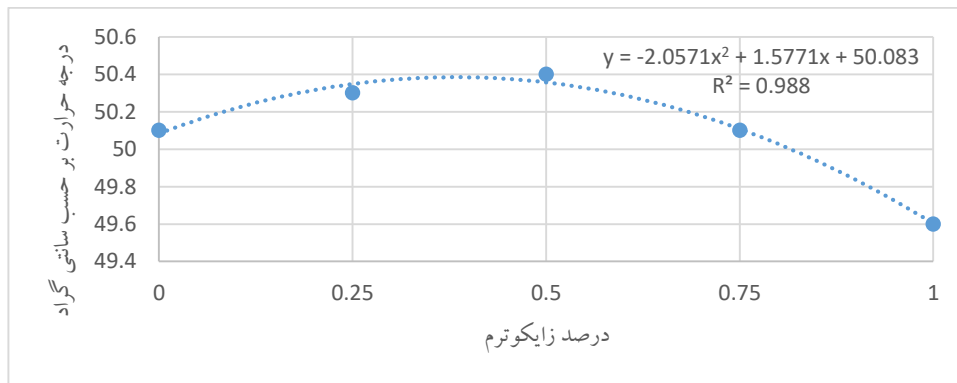
## ۵. بحث و تحلیل نتایج

### ۵-۱. نتایج خصوصیات فیزیکی قیر

جهت بررسی تغییرات فیزیکی ایجاد شده در قیر به علت افزودن مقادیر مختلف زایکوترم، آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی بر روی نمونه‌های قیر انجام پذیرفت و نتایج آن مطابق شکل ۱ و شکل ۲ می‌باشد. بر اساس یافته‌ها مشخص گردید که افزودن زایکوترم به قیر تا میزان ۰/۵ درصد وزنی قیر، موجب کاهش درجه نفوذ می‌شود. اما با زیاد شدن مقدار زایکوترم در قیر، روند کاهشی درجه نفوذ متوقف شده و مجدداً مقادیر به قیر پایه نزدیک می‌شود. نقطه نرمی قیر نیز با افزودن زایکوترم به بیش‌ترین مقدار در حدود ۵۰/۴ درجه سانتی‌گراد رسیده و سپس روند کاهشی را طی می‌کند. میزان تغییرات نقطه نرمی با توجه به مقادیر مختلف زایکوترم محسوس نیست که نشان از تاثیر اندک زایکوترم بر نقطه نرمی قیر دارد.



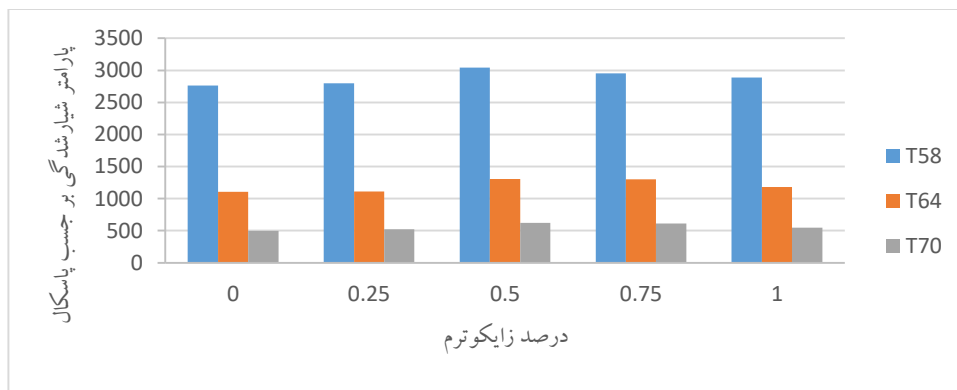
شکل ۱- تغییرات درجه نفوذ قیر بر حسب میزان زایکوترم



شکل ۲- تغییرات نقطه نرمی قیر بر حسب میزان زایکوترم

## ۵-۲. نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی

رفتار شیارشدگی نمونه‌های قیر که تحت فرکانس  $10 \text{ rad/s}$  در سه سطح دمایی ۵۴، ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، مورد بررسی قرار گرفته‌است و در شکل ۳ نمایش داده شده‌است. مطابق نتایج ارائه شده، افزایش دما رفتار شیارشدگی تمام نمونه‌ها را به شدت تحت تاثیر قرار داده‌است و شاهد افت شدید مقدار پارامتر شیارشدگی می‌باشیم. اما در هر سه دمای مورد آزمایش، نمونه‌های حاوی زایکوترم پارامتر شیارشدگی بیش‌تری نسبت به نمونه‌ی شاهد دارند که نشان از بهبود رفتار شیارشدگی می‌باشد. امروزه حد بالای دمای عملکردی قیر بر مبنای معیار برابری پارامتر شیارشدگی با ۱۰۰۰ پاسکال، تعیین می‌شود و در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های حاوی زایکوترم فاصله‌ی قابل قبولی از این مرز دارند. در نتیجه حد بالای دمای عملکردی برای قیرهای حاوی زایکوترم نسبت به قیر خالص داشته‌است. همچنین اگرچه در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تمام نمونه‌ها پایین‌تر از مرز یادشده قرار دارند، اما بازهم نمونه‌های حاوی زایکوترم پارامتر شیارشدگی بالاتری نسبت به نمونه قیر خالص دارند.



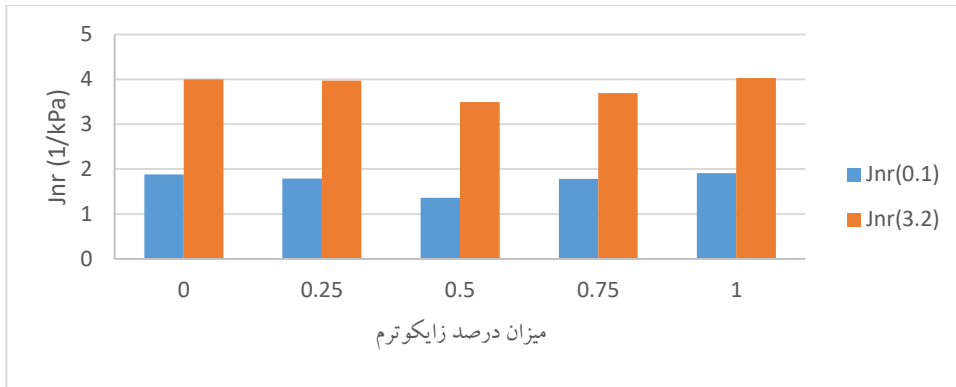
شکل ۳- روند تغییرات پارامتر شیارشدگی بر اساس شرایط دمایی

## ۵-۳. نتایج آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح

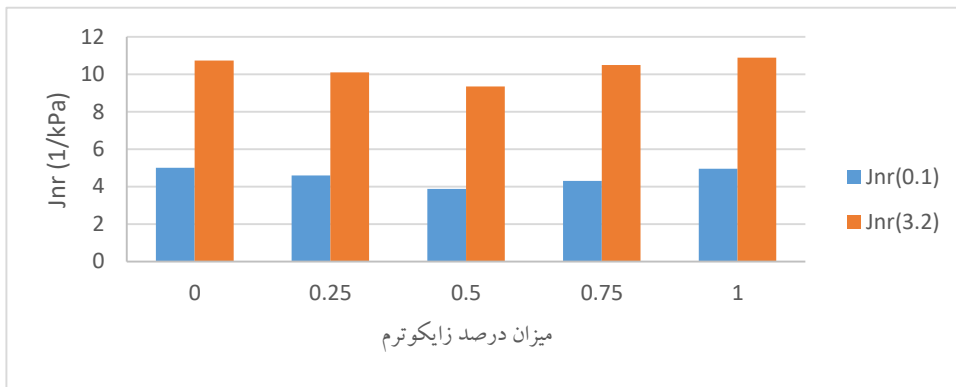
باتوجه به اینکه آزمایش DSR در سطوح پایین تنش و کرنش انجام می‌شود اثر شبکه‌ی پلیمری به‌خوبی بررسی نمی‌شود، لذا به منظور بررسی دقیق‌تر اثر شیارشدگی، آزمایش MSCR در سطح تنش و کرنش بالاتر انجام پذیرفت. این آزمایش چگونگی به تعویق افتادن شیارشدگی را بر اساس میزان خاصیت الاستیک و برگشت پذیری قیر بیان می‌نماید.

ارتباط میان پارامتر مدول غیرقابل بازگشت ( $J_{nr}$ ) نمونه‌های قیری و مقدار زایکوترم افزوده شده، در سه دمای مختلف در شکل‌های ۴ الی ۶، نمایش داده شده‌است. میانگین  $J_{nr}$  در ۱۰ سیکل و سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال به عنوان  $J_{nr}$  ۱۰۰ و  $J_{nr}$  ۳۲۰۰ معرفی شده‌اند. با مقایسه‌ی نتایج می‌توان فهمید که دما تاثیر به‌سزایی در افزایش مدول غیرقابل بازگشت نمونه‌ها دارد. همچنین، افزودن زایکوترم در هر سه دما و دو سطح تنش، موجب کاهش مقدار  $J_{nr}$  نسبت به نمونه‌ی قیر خالص شده‌است که نشان از مقاومت نمونه‌های حاوی زایکوترم در مقابل شیارشدگی است. با افزودن زایکوترم در ابتدا مقدار  $J_{nr}$  شروع به کاهش کرده تا به حداقل خود در ۰/۵ درصد برسد و سپس با افزودن زایکوترم این روند کاهش متوقف و اثرات منفی ازدیاد زایکوترم در قیر آشکار می‌شود. در این حالت میزان کرنش غیرقابل بازگشت در قیر افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی کاهش مقاومت قیر در برابر بارهای وارده‌است.

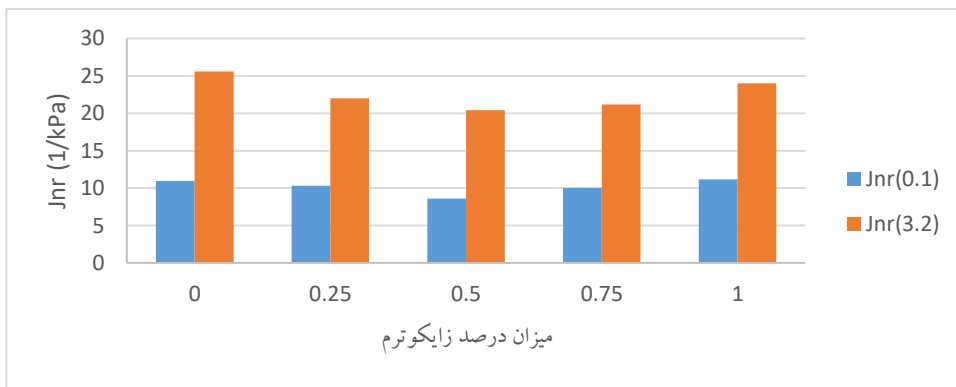
شکل‌های ۷ الی ۹، درصد بازگشت (R) را برای قیرهای حاوی مقادیر مختلف زایکوترم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد بازگشت نیز به‌شدت تحت تاثیر دما قرار دارد و کاهش آن به منزله‌ی کاهش پتانسیل برگشت پذیری قیر و افزایش حساسیت نسبت به شیارشدگی است. علت این موضوع حساسیت ذاتی قیر به دمای بالا می‌باشد که خصوصیات چسبندگی و مقاومت آن نسبت به بارهای وارده کاهش می‌یابد. علاوه بر دما شدت تنش نیز بر میزان بازگشت موثر است و با افزایش شدت تنش از ۱۰۰ پاسکال به ۳۲۰۰ پاسکال، مقدار R کاهش می‌یابد. در میان تمام نمونه‌ها، افزودن زایکوترم به قیر در مقادیر کم، مقدار درصد بازگشت را افزایش داده و با افزایش مقدار زایکوترم حساسیت آن نسبت به شیارشدگی افزایش می‌یابد.



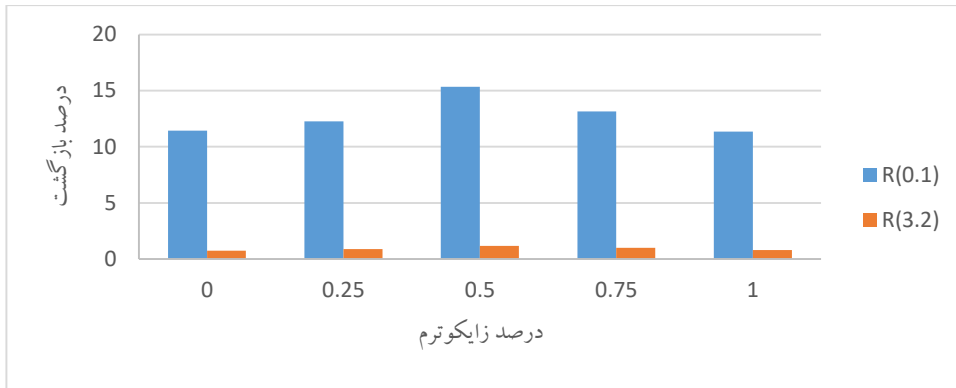
شکل ۴- مقدار مدول غیرقابل بازگشت در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد



شکل ۵- مقدار مدول غیرقابل بازگشت در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد



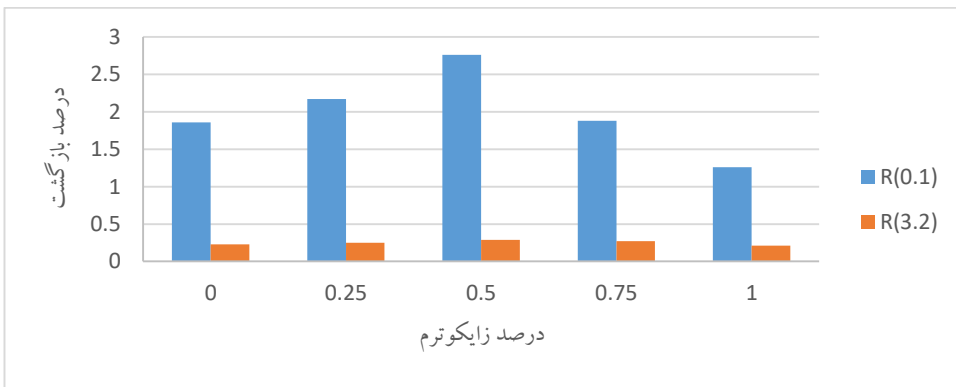
شکل ۶- مقدار مدول غیرقابل بازگشت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۷- درصد بازگشت در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد



شکل ۸- درصد بازگشت در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد



شکل ۹- درصد بازگشت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه علاوه بر تعیین خصوصیات فیزیکی قیر، مشخصات شیارشدگی نمونه‌های اصلاح شده با زایکوترم به وسیله‌ی آزمایش DSR و MSCR مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که با افزودن زایکوترم به قیر تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی، روند کاهش در مقادیر درجه نفوذ و روند افزایشی در مقادیر درجه نرمی رخ می‌دهد و پس از آن با افزایش زایکوترم در قیر این روند معکوس می‌گردد. همچنین در آزمایش DSR، پارامتر شیارشدگی در نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد زایکوترم بیش‌ترین مقدار و بهترین عملکرد در برابر پدیده‌ی شیارشدگی را دارا می‌باشد. نتایج آزمایش MSCR نیز تصدیق‌کننده‌ی نتایج آزمایش DSR بوده و در نمونه‌های دارای ۰/۵ درصد زایکوترم، مطلوب‌ترین عملکرد از حیث درصد بازگشت و مدول غیرقابل بازگشت در کلیه‌ی سطوح تنش و دما پدیدار می‌گردد.



## ۷. مراجع

1. Herold, Martin, Dar Roberts, Val Noronha, and Omar Smadi. "Imaging spectrometry and asphalt road surveys." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 16, no. 2 (2008): 153-166.
2. Petrova, Tatiana, Eduard Chistyakov, and Yuriy Makarov. "Methods of road surface durability improvement." *Transportation research procedia* 36 (2018): 586-590.
3. Lu, Xiaohu, and Per Redelius. "Effect of bitumen wax on asphalt mixture performance." *Construction and building materials* 21, no. 11 (2007): 1961-1970.
4. Tschegg, E. K., M. Jamek, and R. Lugmayr. "Fatigue crack growth in asphalt and asphalt-interfaces." *Engineering Fracture Mechanics* 78, no. 6 (2011): 1044-1054.
5. Ameri, Mahmoud, Danial Mirzaiyan, and Amir Amini. "Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders." *Journal of Materials in Civil Engineering* 30, no. 11 (2018): 04018292.
6. Xu, Tao, and Xiaoming Huang. "Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement." *Construction and Building Materials* 28, no. 1 (2012): 525-530.
7. Saltan, Mehmet, Serdal Terzi, and Sebnem Karahancer. "Performance analysis of nano modified bitumen and hot mix asphalt." *Construction and Building Materials* 173 (2018): 228-237.
8. Alzuhairi, Mohammed A. Hussein, Ahmed MH Al-Ghaban, and Shams N. Almutalabi. "Chemical recycling of Polyethylene Terephthalate (PET) as additive for asphalt." *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences* 28, no. 2 (2016): 675-679.
9. Remišová, Eva, and Michal Holý. "Changes of properties of bitumen binders by additives application." In *IOP conference series: Materials science and engineering*, vol. 245, no. 3, p. 032003. IOP Publishing, 2017.
10. Hao, Gengren, Yuhong Wang, Kecheng Zhao, and Weidong Huang. "Property changes of SBS modified asphalt binders during short-term aging and implications on quality management." *Construction and Building Materials* 244 (2020): 118323
11. Ayazi, Mohamad Javad, Ali Moniri, and Peyman Barghabany. "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives." *Petroleum Science and Technology* 35, no. 9 (2017): 890-895.
12. Aksoy, Atakan, Kurtuluş Şamlioglu, Süreyya Tayfur, and Halit Özen. "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures." *Construction and building materials* 19, no. 1 (2005): 11-18.
13. Memon, Abdul Muhaimin, Muslich Hartadi Sutanto, Madzlan Napiah, Muhammad Imran Khan, and Waqas Rafiq. "Modeling and optimization of mixing conditions for petroleum sludge modified bitumen using response surface methodology." *Construction and Building Materials* 264 (2020): 120701.
14. Liu, Juanyu, and Peng Li. "Experimental study on gilsonite-modified asphalt." In *Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future*, pp. 222-228. 2008
15. Wasage, T. L. J., Jiri Stastna, and Ludo Zanzotto. "Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test." *International Journal of Pavement Engineering* 12, no. 6 (2011): 561-568.