

## بررسی تأثیر اضافه کردن پودر لاستیک بر مشخصات ویسکوالاستیک

### غیرخطی قیر

#### مقاله پژوهشی

پوریا حاجی کریمی\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
محمد راهی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
سحر منبعی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
فریدون مقدس نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [phajikarimi@aut.ac.ir](mailto:phajikarimi@aut.ac.ir)

دریافت: ۹۸/۱۱/۰۵ - پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۰

صفحه ۲۲۰-۲۰۹

#### چکیده

تغییر رفتار رئولوژیکی و مکانیکی قیر خالص یکی از مهمترین انتظارات مصرف کنندگان افزودنی‌های مختلف است. پودر لاستیک یکی از شناخته شده ترین و مطلوب ترین افزودنی‌های مورد استفاده جهت افزایش مقاومت قیر در برابر شیارافتادگی، خستگی و ترک‌های حرارتی دمای پایین است. تغییرات رفتاری ناشی از اضافه کردن افزودنی‌های مختلف معمولاً در محدوده رفتار ویسکوالاستیک خطی صورت می‌پذیرد. این در حالی است که بررسی رفتار غیرخطی در دماهای بالاتر، تنش‌های بیشتر و نرخ‌های بارگذاری زیادتر از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این پژوهش آزمایش خزش - بازگشت‌پذیری با استفاده از دستگاه رثومتر برش دینامیکی در راستای ارزیابی خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک با سه درصد وزنی متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در محدوده ویسکوالاستیک غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی بر اساس نظریات ساده مرتبط با رفتار ویسکوالاستیک خطی و غیرخطی و نیز مدل ویسکوالاستیک غیرخطی کسری تعمیم یافته تجزیه و تحلیل شده و نشان داده‌اند که اضافه کردن پودر لاستیک به قیر خالص موجب افزایش رفتار غیرخطی آن می‌شود. این افزایش رفتار غیرخطی توأم با کاهش پتانسیل بازگشت‌پذیری قیر در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد بوده که به معنای افزایش مقاومت آن در برابر شیارافتادگی است. افزایش درصد پودر لاستیک مصرفی منجر به افزایش این روند گردیده است.

واژه‌های کلیدی: پودر لاستیک، ویسکوالاستیک غیرخطی، خزش، بازگشت‌پذیری، رثومتر برش دینامیکی

#### ۱- مقدمه

بارگذاری وابسته است (Bahia et al., 2001). قیر مشابه هر نوع ماده ویسکوالاستیک دیگر می‌تواند رفتار خطی یا غیرخطی داشته باشد. در مصالح ویسکوالاستیک خطی، در یک زمان و دمای مشخص تغییرات کرنش با تغییرات تنش تناسب خطی دارد. اما در خصوص مصالح ویسکوالاستیک غیرخطی نسبت مستقیمی بین تغییرات تنش اعمال شده و کرنش متناظر قابل تعریف نیست (Ottosen and

مخلوط آسفالتی جامدی سه‌فازی متشکل از قیر، سنگدانه‌ها و فضای خالی است. تغییر ویژگی‌های رئولوژیکی و مکانیکی قیر از طریق اضافه کردن افزودنی‌ها و یا تغییر فرآیند هوادهی می‌تواند مشخصات مخلوط آسفالتی را از لحاظ مقاومت در برابر خستگی، شیارافتادگی و یا ترک‌های حرارتی دمای پایین تغییر دهد (Aflaki and Hajikarimi, 2012). قیر ماده‌ای ویسکوالاستیک است که رفتار آن به زمان، دما و نرخ

معادلات شیبی، مسعد و همکاران روشی جهت تحلیل رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی قیرهای پیرنشده و پیرشده در دماها و سطوح تنش مختلف ارائه کردند (Masad et al., 2008). با استفاده از آزمایش‌های جاروب فرکانسی و دمایی، آندروود و کیم رفتار خطی و غیرخطی قیر و ماستیک آسفالتی را مطالعه نموده و بر اساس نتایج آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که مهمترین منشأ رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی ماستیک آسفالتی ویژگی‌های غیرخطی قیر می‌باشد (Underwood and Kim, 2015). صادق و همکاران روش غیرخطی پلاستو - ویسکوالاستیک را به منظور تعیین مجموع کرنش غیرقابل بازگشت و بررسی پاسخ غیرخطی قیرهای اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده به کار بردند. به این منظور، ایشان آزمایش سیکلیک کرنش کنترل و خزش - بازگشت‌پذیری با تنش‌های چندگانه (MSCR) را به کار بستند و روش غیرخطی پلاستو - ویسکوالاستیک را با روش ویسکوالاستیک مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که تفاوت قابل توجهی بین این دو روش وجود ندارد (Sadeq et al., 2016). در این پژوهش، تأثیر اصلاح قیر با استفاده از پودر لاستیک بر ویژگی‌های ویسکوالاستیک غیرخطی قیر مورد بررسی قرار گرفته است. پودر لاستیک از خرد کردن تایرهای فرسوده تولید می‌شود. خواص فیزیکی - مکانیکی ذرات خرد شده لاستیک با توجه به این که این ذرات از چه نوع محصول لاستیکی تولید شده‌اند متفاوت خواهد بود. لذا نمی‌توان خواص مشخص و یکتایی برای این محصول ذکر نمود. به عبارت دیگر ترکیب شیمیایی و خواص پودر لاستیک به منبع تهیه آن وابستگی مستقیم دارد. تولید پودر لاستیک به دو روش قابل انجام است: (۱) آسیاب کردن در دمای محیط و (۲) آسیاب کردن در دمای پایین که نسبت به روش اول ذرات ریزتری تولید کرده ولی هزینه‌های اجرای آن بالاتر است. بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته، در افق ۱۴۰۴، ۱/۴ میلیون تن لاستیک فرسوده در کشور خواهیم داشت و با توجه به مصرف سالانه ۲/۵ میلیون تن قیر در کشور، در صورت ورود پودر لاستیک به چرخه

(Ristinmaa, 2005). به طور کلی معمولاً قیر در سطوح تنش پایین به صورت خطی عمل کرده و در صورت افزایش سطح تنش اعمال شده رفتاری غیرخطی از خود نشان می‌دهد (Delgadillo et al., 2012). روش پروتکل سوپریو امروزه به طور گسترده به منظور تعیین مشخصات قیرهای خالص و اصلاح‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. کرنش‌ها و تنش‌های بسیار کم و همچنین زمان‌های کوتاه آزمایش‌های مختلف در پروتکل سوپریو به این منظور در نظر گرفته شده‌اند که ویژگی‌های رئولوژیکی قیر در محدوده ویسکوالاستیک خطی اندازه‌گیری و ارزیابی شوند (Bahia et al., 2001). دو دلیل اصلی برای این موضوع قابل بیان است: (۱) تغییر شکل لایه‌های روسازی در طرح روکش آسفالتی می‌بایست کنترل شود و (۲) تحلیل و تفسیر نتایج آزمایشگاهی در محدوده ویسکوالاستیک خطی به مراتب ساده‌تر است (Bahia et al., 1998). در صورتی که دو قیر در محدوده ویسکوالاستیک خطی رفتار مشابهی داشته باشند، نمی‌توان به سادگی ادعا نمود که این دو قیر در شرایط ویسکوالاستیک غیرخطی نیز رفتاری مشابه دارند. بنابراین بررسی رفتار قیرها و به ویژه قیرهای اصلاح‌شده در محدوده ویسکوالاستیک غیرخطی از اهمیت زیادی برخوردار است. تحقیقات متعددی به ارزیابی ویژگی‌های خطی و غیرخطی قیرها و یافتن روش‌های ساده‌تر و با روایی و پایایی بالاتر جهت به دست آوردن این ویژگی‌ها اختصاص یافته‌اند. شیبی روش مناسبی را جهت کمی‌سازی ویژگی‌های غیرخطی یک ماده ویسکوالاستیک و استفاده از این ویژگی‌ها جهت به دست آوردن مقاومت ماده و رفتار شکست آن توسعه داد (Schapery, 1969, Schapery, 2000). پولاکو و همکاران همبستگی رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی قیرهای اصلاح‌شده را با ساختار پلیمرهایی که به عنوان افزودنی مورد استفاده قرار گرفته بودند بررسی کردند. ایشان تأکید کردند که ویژگی‌های غیرخطی قابل اعتمادترین پارامترها جهت توصیف رفتار رئولوژیکی و مکانیکی قیرهای اصلاح‌شده هستند (Polacco, 2006). با استفاده از

داده شده و سپس برنامه آزمایشگاهی تشریح گردیده است. در ادامه نتایج آزمایشگاهی و مباحث پیرامون آن در خصوص تأثیر اضافه کردن پودر لاستیک بر ویژگی‌های ویسکوالاستیک غیرخطی قیر عنوان گردیده است. در انتها نیز نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه شده است.

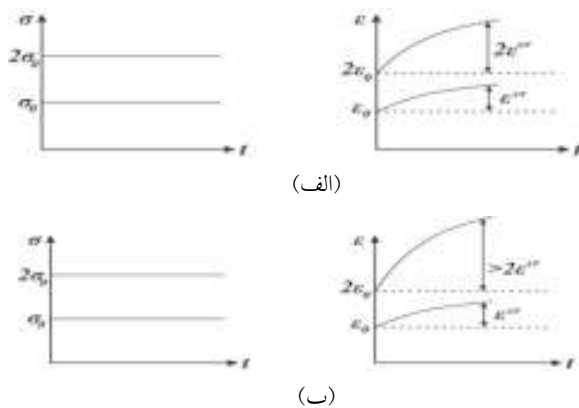
## ۲- رفتار ویسکوالاستیک خطی و غیرخطی قیر

در شرایط ویسکوالاستیک خطی معادلات حاکم نشان‌دهنده این واقعیت است که تغییرات مقادیر کرنش متناسب با تغییرات مقادیر تنش است. برای مثال با دو برابر شدن مقدار تنش، مقادیر متناظر کرنش نیز در حالت نرم‌شوندگی خزشی خود دو برابر خواهد شد. شکل ۱- الف فرضیات رفتار ویسکوالاستیک خطی را در قالب مثال مطرح شده نشان داده است. در حالتی که چنین تناسبی میان تغییرات مقادیر کرنش و تنش وجود نداشته باشد، رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی بوده و روش توصیف و مدل‌سازی چنین رفتاری در چارچوب معادلات و روابط ویسکوالاستیک خطی نمی‌گنجد. شکل ۱- ب رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی را نشان داده است.

## ۳- برنامه آزمایشگاهی

مصالح مورد استفاده، نحوه آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و روش آزمایش خزش - بازگشت‌پذیری تشریح گردیده است.

مصرف (با فرض استفاده از پودر لاستیک به میزان ۱۵٪ وزنی قیر خالص) محدودیتی در خصوص استفاده از پودر لاستیک جهت اصلاح ویژگی‌های رئولوژیکی و مکانیکی قیر وجود نخواهد داشت. در ایالات متحده آمریکا سالانه ۱۱٪ از تایرهای فرسوده روکش شده و به چرخه مصرف باز می‌گردند، ۸٪ به عنوان تایر دست دوم فروخته می‌شوند، ۱۵٪ به کاربردهای دیگر اختصاص می‌یابد و مابقی تایرهای فرسوده به شکل‌های قانونی و یا غیرقانونی دپو می‌شود. اضافه کردن پودر لاستیک به قیر خالص موجب طول عمر خستگی بیشتر، کاهش احتمال وقوع شیارافتادگی، حساسیت کمتر به دماهای پایین و مقاومت بیشتر در مقابل آسیب‌های ناشی از حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (Hajikarimi et al., 2015, Palit et al., 2004, Kok et al., 2013, Wang et al., 2012). در این پژوهش پودر لاستیک در سه درصد متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ (نسبت به وزن قیر) به قیر خالص اضافه شده و سپس با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیکی (DSR) آزمایش ساده خزش - بازگشت‌پذیری به منظور اندازه‌گیری کرنش تحت سطوح تنش مختلف ۰/۱، ۱، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوپاسکال انجام شده تا از این طریق تأثیر افزایش سطح تنش بر رفتار ویسکوالاستیک قیر مورد بررسی قرار گرفته و نحوه تغییرات غیرخطی آن مشخص شود. در این مقاله ابتدا توضیح مختصری در خصوص رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی قیر



شکل ۱. رفتار ویسکوالاستیک (الف) خطی و (ب) غیرخطی در آزمایش خزش

### ۳-۱- مصالح مورد استفاده و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش از قیر خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ استفاده شده است. این قیر خالص که توسط کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد تأمین شده بر اساس پروتکل سوپریو دارای رده‌بندی عملکردی PG58-22 است. جدول ۱ مشخصات متعارف قیر خالص شامل چگالی، درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت کشسانی و درجه اشتعال را نشان می‌دهد. پودر لاستیک استفاده شده در این تحقیق از شرکت لاستیک ایساتیس یزد، یکی از تأمین‌کننده‌های پودر لاستیک در ایران تهیه شده است. با توجه به مرور تحقیقات پیشین، پودر لاستیک عبوری از الک نمره ۵۰ (کوچکتر از ۳۰۰ میکرومتر) در سه درصد وزنی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ (بر اساس وزن قیر خالص) به منظور اصلاح رفتار قیر پایه با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ مورد استفاده قرار گرفته است. امتزاج پودر لاستیک با قیر توسط همزن دور تند (۵۵۰۰ دور در دقیقه) در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۹۰ دقیقه صورت پذیرفته است. نمونه‌های ساخته شده با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی پودر لاستیک به ترتیب با نام‌های CR10، CR15 و CR20 نامگذاری شده‌اند.

### ۳-۲- روش آزمایش خزش - بازگشت پذیری

به منظور به دست آوردن ویژگی‌های غیرخطی قیر خالص و قیر اصلاح‌شده، آزمایش خزش - بازگشت‌پذیری در سطوح تنش متفاوت به وسیله دستگاه رئومتر برش دینامیکی (DSR) انجام شده است. در این آزمایش بخش بارگذاری (خزش) بار چرخ و وسیله نقلیه و بخش باربرداری (بازگشت-پذیری) زمان استراحت بین عبور دو ماشین را شبیه‌سازی می‌نماید. شکل ۲ نحوه بارگذاری و باربرداری و کرنش حاصل در این آزمایش را نشان می‌دهد. دمای در نظر گرفته شده جهت انجام کلیه آزمایش‌ها ۴۰ درجه سانتیگراد بوده و پنج سطح تنش متفاوت شامل ۰/۱، ۱، ۱۰، ۲۰ و ۳۰

کیلوپاسکال به نمونه قیر خالص و کلیه نمونه‌های قیر اصلاح‌شده ساخته شده با این نمونه قیر خالص اعمال گردیده است. در این پژوهش دو رژیم متفاوت خزش - بازگشت‌پذیری در نظر گرفته شده و روی کلیه نمونه‌ها اعمال گردیده است:

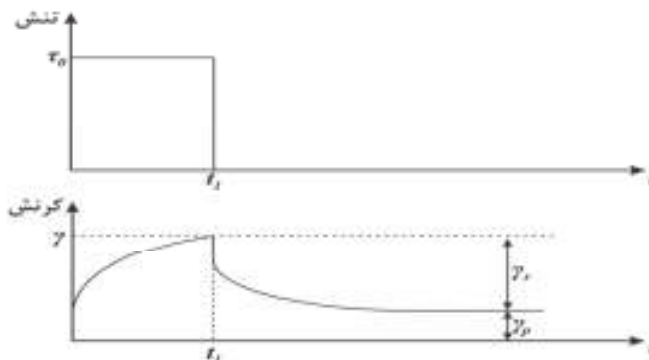
۱-۱ ثانیه بارگذاری و ۹۹۹ ثانیه باربرداری

۲-۱۰ ثانیه بارگذاری و ۹۹۹ ثانیه باربرداری

مدت زمان طولانی بازگشت به نمونه‌ها این امکان را می‌دهد که بازگشت کامل را تجربه کرده و مقدار کرنش پسماند با دقت بهتری اندازه‌گیری شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش تأثیر دما روی ویژگی‌های غیرخطی قیر مورد بررسی قرار نگرفته است و نتایج آتی نشان‌دهنده این است که انتخاب دمای ۴۰ درجه سانتیگراد موجب آشکار شدن ویژگی‌های غیرخطی قیر گردیده است.

### ۴- نتایج آزمایشگاهی و بحث

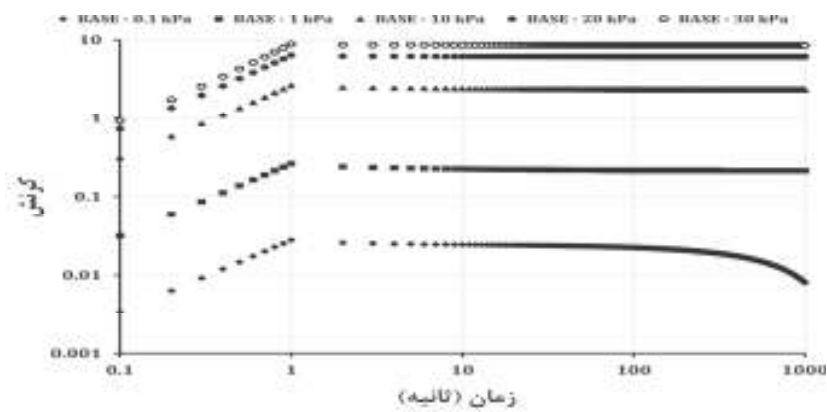
شکل‌های ۳ و ۴ نتایج آزمایش خزش - بازگشت‌پذیری را برای مدت زمان بارگذاری ۱ ثانیه برای نمونه قیر خالص و قیر اصلاح‌شده با درصدهای وزنی مختلف پودر لاستیک نشان می‌دهد. با افزایش سطح تنش، کرنش اندازه‌گیری شده بیشتر شده و این افزایش کرنش در نمونه‌های مختلف از روند مشخصی پیروی نمی‌کند. به طور مثال برای نمونه CR20 (نمونه اصلاح‌شده با ۲۰٪ پودر لاستیک) در سطح تنش ۰/۱ کیلوپاسکال به دلیل ویژگی‌های بازگشت‌پذیری الاستیک پودر لاستیک روند معکوسی اتفاق افتاده است. نمودارهای مربوط به مدت زمان بارگذاری ۱۰۰ ثانیه جهت جلوگیری از تکرار آورده نشده است زیرا نتایج آن مشابه شکل ۳ می‌باشد.



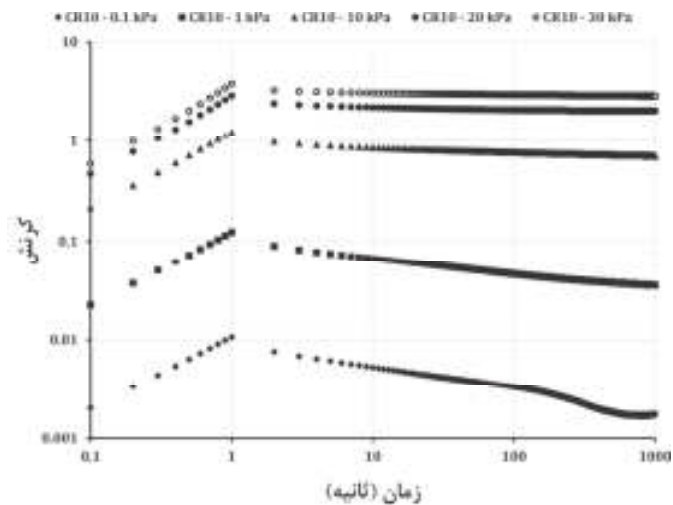
شکل ۲. بارگذاری و باربرداری و کرنش حاصل (شماتیک) در آزمایش خزش - بازگشت‌پذیری

جدول ۱. مشخصات متعارف قیر خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰

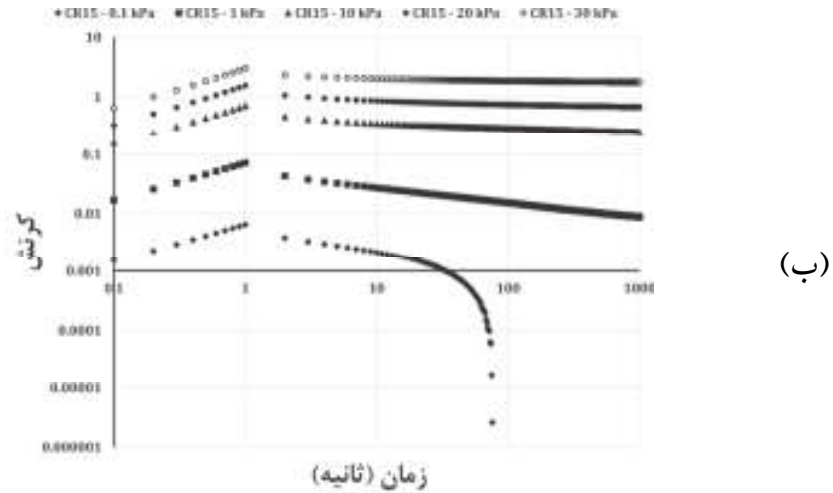
ویژگی	مقدار	استاندارد انجام آزمایش
چگالی (در ۲۵ درجه سانتیگراد)	۱/۰۳	ASTM D7
درجه نفوذ (بر حسب ۰/۱ میلی‌متر) در ۲۵ درجه سانتیگراد	۸۹	ASTM D5
نقطه نرمی (بر حسب درجه سانتیگراد)	۴۹	ASTM D36
خاصیت کشسانی (در ۲۵ درجه سانتیگراد)	> ۱۰۰	ASTM D113
درجه اشتعال (بر حسب درجه سانتیگراد)	> ۲۵۰	ASTM D92



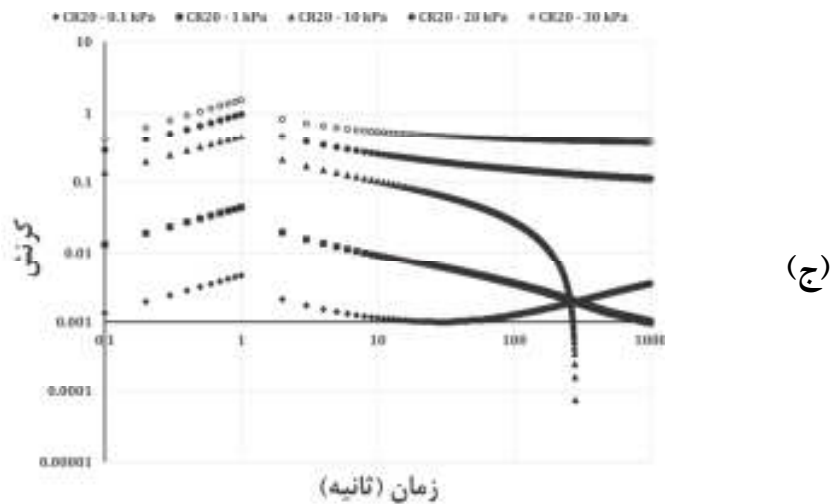
شکل ۳. نمودار تغییرات کرنش بر حسب زمان نمونه قیر خالص BASE در سطوح تنش متفاوت برای مدت زمان بارگذاری یک ثانیه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. نمودار تغییرات کرنش بر حسب زمان نمونه قیر اصلاح شده با (الف) ۱۰٪، (ب) ۱۵٪ و (ج) ۲۰٪ پودر لاستیک در سطوح تنش متفاوت

مهمترین ویژگی در تعریف رفتار ویسکوالاستیک خطی این است که با تغییر سطح تنش نسبت تنش اعمال شده به کرنش اندازه‌گیری شده ثابت باقی می‌ماند. به منظور بررسی تأثیر

اضافه کردن پودر لاستیک بر رفتار ویسکوالاستیک قیر خالص، مفهوم ساده‌ای از طریق شاخص زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

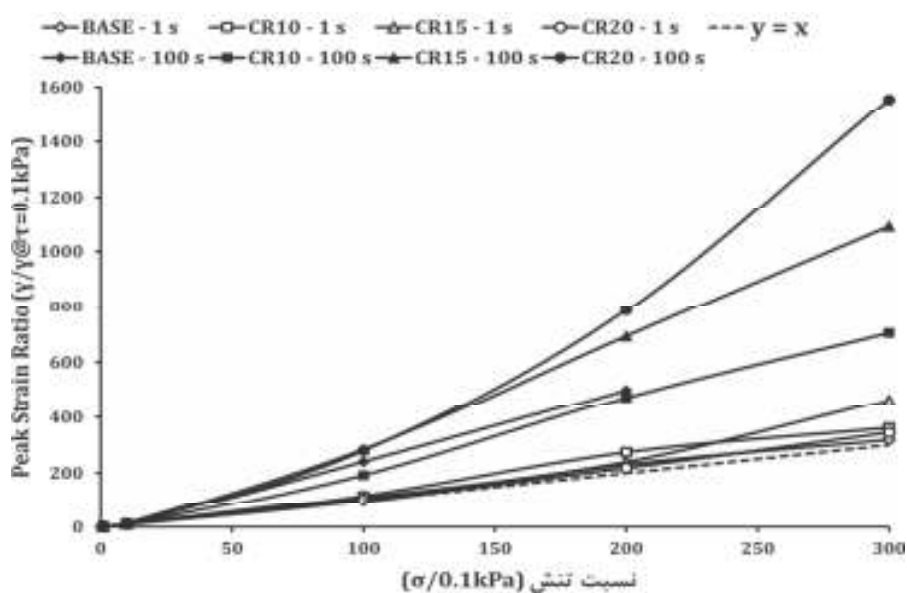
$$Peak\ Strain\ Ratio = \frac{\gamma(\sigma)}{\gamma(\sigma = 0.1kPa)} \quad (1)$$

می‌شود. بر اساس رابطه (۱) مشخص است که در حالت رفتار ویسکوالاستیک خطی ایده‌آل در صورت ترسیم نسبت کرنش حداکثر بر حسب تغییرات تنش یک خط ( $y = x$ ) حاصل خواهد شد. شکل ۵ نمودار نسبت کرنش حداکثر را

که در آن نسبت کرنش حداکثر محاسبه شده و تغییرات آن بر حسب تغییرات تنش ترسیم می‌گردد. در این رابطه  $\gamma(\sigma)$  کرنش در سطح تنش دلخواه بوده که به نسبت مقدار کرنش در پایین‌ترین سطح تنش (۱/۰ کیلوپاسکال) سنجیده

(X) فاصله گرفته است به شکلی که بیشترین مقدار کرنش حداکثر برای نمونه CR20 در نسبت تنش ۳۰۰ (مربوط به سطح تنش ۳۰ کیلوپاسکال) و برای مدت زمان بارگذاری ۱۰۰ ثانیه رخ داده است. در حالی که نمونه قیر خالص قابلیت تحمل سطح تنش ۳۰ کیلوپاسکال را نداشته ولی نمونه‌های اصلاح شده با پودر لاستیک این سطح تنش را تحمل کرده و مقدار نسبت کرنش حداکثر برای CR10 (کمترین مقدار پودر لاستیک اضافه شده به قیر خالص) کمتر از مقادیر مربوط به قیر خالص است.

بر حسب تغییرات تنش برای قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک نشان داده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود اضافه کردن پودر لاستیک به قیر موجب غیرخطی شدن رفتار ویسکوالاستیک قیر می‌شود. این امر با واگرایی رفتار قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک نسبت به خط (  $y = x$  ) به وضوح مشخص است. با افزایش مدت زمان بارگذاری، سطح تنش اعمال شده و درصد پودر لاستیک اضافه شده به قیر، نسبت کرنش حداکثر رفتار غیرخطی بیشتری از خود نشان داده و به میزان بیشتری از خط (  $y =$



شکل ۵. نمودار نسبت کرنش حداکثر بر حسب نسبت تنش برای قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک

(Hajikarimi et al., 2013, Fini et al., 2017) به

صورت زیر قابل نوشتن است:

$$\gamma(t) = \sum_{i=1}^n A_i t^{\beta_i}$$

و کرنش‌های متناظر با هر یک از سطوح تنش اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. به منظور در نظر گرفتن تأثیر سطح تنش بر مقدار کرنش، ضریب نرمال شده تنش به رابطه (۲) اضافه شده و رابطه ۳ حاصل گردیده است.

با لحاظ کردن تعریف نرمی خزشی به صورت  $D(t) =$

$\gamma(t)/\sigma_0$  رابطه کرنش در مدل ویسکوالاستیک کسری

(۲)

که در آن  $t$  زمان بوده و مقادیر  $A_i$  و  $\beta_i$  ثابت‌های مدل هستند. رابطه (۲) می‌تواند برای هر یک از سطوح تنش به صورت مستقل مورد استفاده قرار گرفته و مقادیر  $A_i$  و  $\beta_i$  متفاوتی را نتیجه دهد. در این پژوهش همان‌طور که پیشتر بیان گردید پنج سطح تنش متفاوت مورد استفاده قرار گرفته

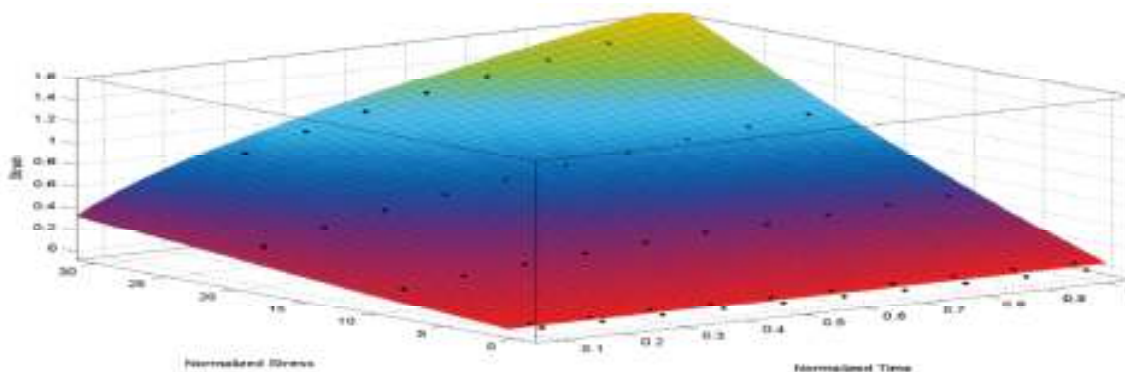
برازش داده شده بر اطلاعات کرنش قیر خالص را به عنوان نمونه نشان داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمودار سه‌جانبه شامل پارامترهای زمان نرمال شده، تنش نرمال شده و کرنش است که با در دست داشتن نتایج آزمایشگاهی مربوط به ۵ سطح تنش به صورت یک رویه برازش داده شده است. جدول ۲ و جدول ۳ کلیه پارامترهای مربوط به رابطه (۴) را برای قیر خالص و کلیه قیرهای اصلاح‌شده با پودر لاستیک به ترتیب برای زمان بارگذاری یک ثانیه و ۱۰۰ ثانیه نشان داده است. این پارامترها همان‌طور که پیش‌تر عنوان گردید با استفاده از جعبه ابزار CF TOOL نرم‌افزار متلب محاسبه شده است. همان‌طور که در این جداول قابل مشاهده است مقادیر ضریب رگرسیون  $R^2$  قابل قبول بوده و نشان‌دهنده دقت قابل قبول برازش داده‌های آزمایشگاهی است. بر اساس رابطه (۴) می‌توان تفسیر نمود که مقادیر بزرگتر  $m$  نشان دهنده غلبه بیشتر رفتار غیرخطی ویسکوالاستیک برای نمونه قیر مورد نظر است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود بیشترین مقدار  $m$  در آزمایشی که نمونه‌ها یک ثانیه تحت بارگذاری خزشی قرار گرفته‌اند مربوط به نمونه CR15 (قیر خالص حاوی ۱۵٪ وزنی پودر لاستیک) است و همچنین بیشترین مقدار  $m$  در آزمایشی که نمونه‌ها تحت ۱۰۰ ثانیه بارگذاری خزشی قرار گرفته‌اند مربوط به نمونه CR20 (قیر خالص حاوی ۲۰٪ پودر لاستیک) است که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم افزودن پودر لاستیک بر افزایش رفتار غیر خطی است.

$$\gamma(t) = \sum_{i=1}^n A_i t^{\beta_i} \sigma^{m_i} \quad (3)$$

که در آن  $t$  زمان نرمال شده است که با رابطه  $t = t/(t = 1)$  (S) تعریف شده و  $\sigma$  نیز تنش نرمال شده است که با رابطه  $\sigma = \sigma/(\sigma = 1 \text{ kPa})$  تعریف می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه (۳)، بدیهی است که برای رفتار ویسکوالاستیک خطی ایده‌آل، توان تنش نرمال شده،  $m$ ، برابر یک بوده و مقدار کرنش در سطوح تنش متفاوت از حاصلضرب کرنش در یک سطح تنش مشخص (مقدار ۱ کیلوپاسکال در این تحقیق) در مقادیر سطوح تنش موردنظر قابل محاسبه است. با به کارگیری یک عبارت دو جمله‌ای بر اساس رابطه (۳) به صورتی که در رابطه (۴) نشان داده شده است، به راحتی می‌توان مقادیر پارامتر  $m$  را به عنوان شاخص رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی تعیین نمود.

$$\gamma(t) = A_1 t^{\beta_1} \sigma + A_2 t^{\beta_2} \sigma^m \quad (4)$$

در این رابطه، به منظور مدل‌سازی بخش خطی رفتار ویسکوالاستیک قیر توان تنش در جمله اول برابر یک در نظر گرفته شده و آثار مربوط به رفتار غیرخطی در توان  $m$  جمله دوم در نظر گرفته شده است. به منظور تعیین پارامتر  $m$ ، جعبه ابزار CF TOOL نرم‌افزار متلب برای برازش تابع (۴) بر منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۴ مورد استفاده قرار گرفته است. این جعبه ابزار بر اساس اصل رگرسیون غیرخطی چندگانه استوار است. شکل ۶ نمودار سه بعدی



شکل ۶. نمودار سه‌بعدی برازش داده‌های کرنش بر داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نمونه قیر خالص



جدول ۲. پارامترهای مدل ویسکوالاستیک غیرخطی کسری تعمیم یافته دوجمله‌ای برای قیر خالص و قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک در آزمایش خزش با زمان بارگذاری ۱ ثانیه

کد نمونه	$A_1$	$A_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	m	R-Square
BASE	0.2788	0.0265	1.0780	0.3440	0.9137	0.9952
CR10	0.0307	0.1374	1.718	0.7075	0.9084	0.9937
CR15	0.0604	0.0002	0.7935	0.5191	2.5350	0.9984
CR20	0.0414	0.0006	0.5254	0.6456	1.8060	0.9999

جدول ۳. پارامترهای مدل ویسکوالاستیک غیرخطی کسری تعمیم یافته دوجمله‌ای برای قیر خالص و قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک در آزمایش خزش با زمان بارگذاری ۱۰۰ ثانیه

کد نمونه	$A_1$	$A_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	m	R-Square
BASE	1.631e-06	0.2176	3.609	1.118	0.8703	0.9955
CR10	3.345e-08	0.0860	3.342	1.049	1.106	0.9979
CR15	0.0541	0.0117	0.5976	1.211	1.177	0.9989
CR20	1.183e-10	0.0039	4.491	1.016	1.574	0.9996

## ۵- نتیجه گیری

است. سطح تنش بالاتر و زمان طولانی‌تر اعمال بار خزشی منجر به افزایش خواص غیرخطی می‌گردد.

۳- اضافه کردن پودر لاستیک رفتار غیرخطی را تشدید می‌کند.

۴- با استفاده از دو جمله در مدل ویسکوالاستیک کسری غیرخطی تعمیم یافته، پیش‌بینی رفتار خزشی قیرهای خالص و قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک با دقت قابل قبول قابل انجام خواهد بود.

۵- اضافه کردن پودر لاستیک منجر به افزایش بازگشت پذیری قیر خالص می‌شود. این بدان معناست که کلیه نمونه‌های قیر اصلاح شده در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد کمترین استعداد را برای ایجاد تغییر شکل دائمی دارند.

## ۶- مراجع

-Aboutalebi Esfahani, M. and Rahimi, A. (2017), "The Effects of Crumb Rubber and Sasobit on Resistance Parameters of Hot Mix Asphalt", Journal of Transportation Infrastructure Engineering, Vol. 3, No. 2, pp.19-40.

-Aflaki, S., Hajikarimi, P., Fini, E. H. and Zada, B., (2014), "Comparing effects of

در این پژوهش، با انجام آزمایش رئومتر برش دینامیکی در حالت خزش - بازگشت پذیری در سطوح تنش متفاوت (۰/۱، ۱، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوپاسکال) ویژگی‌های ویسکوالاستیک غیرخطی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک (با درصد‌های وزنی ۱۰، ۱۵ و ۲۰) مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نسبت کرنش بیشینه در هر سطح تنش به بیشینه کرنش در سطح تنش ۰/۱ کیلوپاسکال (کمترین سطح تنش)، رفتار ویسکوالاستیک قیرهای اصلاح شده و قیر خالص با یکدیگر مقایسه شده و در نهایت مدل ویسکوالاستیک کسری غیرخطی تعمیم یافته وابسته به تنش برای قیرهای اصلاح شده در این تحقیق معرفی گردیده است. این مدل هر دو بخش خزش و بازگشت را پوشش می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش و مدل‌سازی انجام شده، نتایج زیر قابل ارائه می‌باشد:

۱- اصلاح قیر با استفاده از پودر لاستیک به طرز قابل توجهی رفتار رئولوژیکی قیر را به ویژه در سطوح تنش بالا تغییر می‌دهد.

۲- تأثیر اصلاح قیر بر رفتار مکانیکی و رئولوژیکی آن مستقیماً به زمان اعمال بار خزشی و سطح تنش اعمال شده وابسته

- Ottosen, N. S. and Ristinmaa, M., (2005), "The Mechanics of Constitutive Modeling", Elsevier.
- Palit, S. K., Reddy, K. S. and Pandey, B. B., (2004), "Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp.45-53.
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D. and Zanzotto, L., (2006), "Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts", *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Vol. 11, 230–245.
- Sadeq, M., Masad, E., Al-Khalid, H., Sirin, O. and Mehrez, L., (2016), "Linear and nonlinear viscoelastic and viscoplastic analysis of asphalt binders with warm mix asphalt additives", *International Journal of Pavement Engineering*, pp.1–8.
- Schapery, R. A., (1969), "On the characterization of nonlinear viscoelastic materials", *Polymer Engineering Science*, Vol. 9, pp.295–310.
- Schapery, R. A., (2000), "Nonlinear viscoelastic solids", *International Journal of Solids Structures*, Vol. 37, pp.359–366.
- Underwood, B. S. and Kim, Y. R., (2015), "Nonlinear viscoelastic analysis of asphalt cement and asphalt mastics", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.16, pp.510-529.
- Wang, H., You, Z., Mills-Beale, J. and Hao, P., (2012), "Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber", *Construction and Building Materials*, Vol. 26, No. 1, pp.583-590.
- biobinder with other asphalt modifiers on low-temperature characteristics of asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, pp.429–439.
- Bahia, H. U., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A. and Anderson, R. M. (2001), "Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design", *Transportation Research Board - National Research Council*, Washington, D. C.
- Bahia, H. U., Hislop, W. P., Zhai, H. and Rangel, A., (1998), "Classification of asphalt binders into simple and complex binders", *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 67, pp.1-41.
- Delgadillo, R., Bahia, H. U. and Lakes, R., (2012), "A nonlinear constitutive relationship for asphalt binders", *Materials and Structures*, Vol. 45, pp.457–473.
- Hajikarimi, P., Rahi, M. and Moghadas Nejad, F., (2015), "Comparing different rutting specification parameters using high temperature characteristics of rubber-modified asphalt binders", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16, No. 4, pp.751-766.
- Kök Baha, V., Yilmaz, M. and Geçkil, A. (2013), "Evaluation of Low-Temperature and Elastic Properties of Crumb Rubber and SBS-Modified Bitumen and Mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp.257-265.
- Masad, E., Huang, C. W., Airey, G. and Muliana, A., (2008), "Nonlinear viscoelastic analysis of unaged and aged asphalt binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp.2170–2179.

# Investigation on the Effect of Crumb Rubber Modification on Non-linear Viscoelastic Characteristics of Asphalt Binder

*Pouria Hajikarimi, Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*

*Mohammad Rahi, M.Sc., Grad., Department of Polymer Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*

*Sahar Maniei, M. Sc., Grad., Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Fereidoon Moghadas Nejad, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: pouria.hajikarimi@gmail.com*

Received: February 2020-Accepted: July 2020

## **ABSTRACT**

One of the most important expectations of asphalt binder additives consumers is a reasonable change in rheological and mechanical behavior of original asphalt binder. Crumb rubber is a well-known modifier commonly used to enhance rutting resistance, fatigue behavior and thermal cracking at low temperatures of neat asphalt binder. Generally, rheological and mechanical changes of neat asphalt binder in presence of different types of additives are investigated within linear viscoelastic range. However, evaluating non-linear behavior of neat and modified asphalt binders at higher temperatures, higher stress levels and higher loading rates is important as well. In this study, implementing dynamic shear rheometer (DSR), the creep – recovery test was performed to evaluate rheological behavior within non-linear viscoelastic range of asphalt binders modified with three different dosages of crumb rubber including 10, 15 and 20%. The experimental results were analyzed based on simple theoretical related to non-linear viscoelastic behavior as well as generalized non-linear fractional viscoelastic model. The analysis showed that adding crumb rubber to neat asphalt binder causes an increasing non-linear behavior which means improvement of rutting resistance at 40 degree of centigrade. Also, increasing the dosage of crumb rubber amplifies this trend.

**Keywords:** Crumb Rubber, Non-Linear Viscoelastic, Creep, Recovery, Dynamic Shear Rheometer