

ارزیابی مقاومت شیارشدگی و خستگی قیرلاستیکی ترکیب شده

با قیر بازیابی شده

مقاله پژوهشی

شاهین شعبانی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
رضا افرا، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران- راه و ترابری، واحد تهران شمال، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
مجید قاسمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
داوود میرزایی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران- راه و ترابری، واحد تهران شمال، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
عقیل قدیم، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، بخش قیر و آسفالت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shabani@pnu.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۱/۱۷ - پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۸

صفحه ۲۹-۱۷

چکیده

استفاده از پودر لاستیک مستعمل به عنوان افزودنی قیر یکی از موضوعات مورد توجه پژوهشگران در دو دهه اخیر بوده است. استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان یک راهکار حفظ محیط زیست و در عین حال بهبود قابل توجه در عملکرد قیر و مطرح نمودن پودر لاستیک به عنوان جایگزین ارزان قیمت تر نسبت به سایر پلیمرها بر اهمیت موضوع افزوده است. در این پژوهش، علاوه بر پودر لاستیک سعی شده از قیر بازیابی شده از خرده آسفالت که یک ماده ضایعاتی محسوب می‌شود. نیز به عنوان جایگزین قیر تازه استفاده شود. لذا، یک نمونه قیر لاستیکی تهیه و با درصدهای مختلف قیر بازیابی شده ترکیب و مورد آزمایش قرار گرفت. هدف از آزمایشات، بررسی عملکرد شیارشدگی و خستگی قیر حاصل به روش‌های جدیدتری مانند روش بازگشت خزشی در چند سطح تنش، جاروب دما، فرکانس و دامنه خطی بوده است. قیربازیابی به نسبت وزنی قیر لاستیکی پایه، جایگزین بخشی از آن شده است. نتایج آزمایشات نشان داد که افزایش ۱۵ تا ۲۵ درصد قیر بازیابی شده به قیر لاستیکی پایه در افزایش مدول مختلط برشی و کاهش زاویه اختلاف فاز نقش قابل توجهی داشته است. بطوریکه باعث بهبود رفتار الاستیک قیر لاستیکی و در نتیجه بهبود عملکرد شیارشدگی قیر گردید ولی به دلیل ماهیت سخت‌کنندگی قیر بازیابی، مقاومت خستگی قیر لاستیکی را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: قیر لاستیکی، شیارشدگی، خستگی، بازگشت خزشی در چند سطح تنش، جاروب دامنه خطی

۱- مقدمه

فرسایشی نقش بسیار مهمی دارد و هرگونه اصلاح در خواص قیر در نهایت به اصلاح عملکرد روسازی آسفالتی خواهد انجامید. در این میان، پژوهش‌هایی که به استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان افزودنی پرداخته با توجه به اثرات مثبت

در حال حاضر بخش مهمی از پژوهش‌های حوزه روسازی‌های آسفالتی در جهان، معطوف به بررسی و بهبود قیر مصرفی در رویه آسفالت است. این جز، علیرغم درصد وزنی کم در مخلوط بتن آسفالتی، در استحکام رویه راه در مقابل عوامل

طباطبایی و کمالی ایبانه (Tabatabaie and Kamali, 2005) میزان ویسکوزیته قیر VB را در برابر افزایش مقدار پودر لاستیک در دماهای مختلف مورد ارزیابی قرار دادند، در این پژوهش سعی بر این بوده که اثر پودر لاستیک به عنوان افزودنی، روی ویسکوزیته چرخشی قیر مورد بررسی قرار گیرد. متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش شامل مقدار پودر لاستیک، زمان و دمای آزمایش و دمای اختلاط پودر لاستیک و قیر بوده است. نتایج نشان داد که با افزایش دمای اختلاط و همچنین افزودن مقدار پودر لاستیک ویسکوزیته قیر افزایش می یابد. از طرفی بین دمای اختلاط و مدت زمان اختلاط تعامل وجود دارد، افزایش یکی و کاهش دیگری نتایج یکسانی را در بر خواهد داشت. در پژوهش حمیدی و همکاران (Hamidi et al., 2007) تأثیر شرایط مختلف بر فرآیند اختلاط قیر و پودر لاستیک بررسی شد. جهت اختلاط از قیر ۶۰/۷۰ و پودر لاستیک با درصد وزنی از ۴ با افزایش ۳ درصدی تا ۲۸ و کوچکتر از اندازه ۰،۴ میلی متر استفاده شد. دمای اختلاط از ۱۶۰ الی ۲۰۰ درجه سانتی گراد و زمان اختلاط از ۱۵ الی ۹۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. روی نمونه‌های حاصل از اختلاط، آزمایشات مختلفی مانند آزمایش مورفولوژی به کمک میکروسکوپ نوری، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و ویسکوزیته انجام و مقدار حساسیت حرارتی قیر و شاخص نفوذ در هر مورد محاسبه گردید. در نهایت با توجه به خروجی آزمایشات، قیر حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک در دمای اختلاط ۱۸۰ درجه سانتی گراد و زمان اختلاط ۷۵ دقیقه بهترین نتایج را از خود نشان داد. آقاجانی و مقدس‌نژاد (Aghajani and Moghadasnejad, 2012) به بررسی اصلاح مشخصات قیر با افزودنی پودر لاستیک توسط آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، بازگشت پذیری الاستیک، کشسانی، نقطه شکست فراس، ویسکوزیته چرخشی، رئومتر برشی دینامیک و پیرشدگی اولیه پرداختند. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که با افزودن ۲۶ درصد پودر لاستیک، درجه نفوذ حداکثر به میزان ۳۲ درصد کاهش یافت. از طرفی نقطه شکست فراس به ۴۲- درجه سانتی‌گراد رسید. همچنین نقطه نرمی و بازگشت پذیری الاستیک حداکثر به میزان ۴۰ و ۳۶۶ درصد کاهش یافتند. حساسیت حرارتی و کشسانی با افزایش درصد پودر لاستیک، کاهش و ویسکوزیته با افزایش پودر لاستیک و پیرشدگی اولیه،

محیط زیستی می‌تواند از اهمیت بیشتری برخوردار باشد. لاستیک مستعمل و ضایعاتی یکی از این مواد محسوب می‌شود. در سال ۱۹۶۰ چارلز مک دونالد برای اولین بار از پودر لاستیک (CR) برای اصلاح مخلوط‌های آسفالتی داغ استفاده کرد. از آن زمان تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و میدانی زیادی بر روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک معروف به قیر لاستیکی انجام شده است (Tortum, et al., 2005. McDaniel and Anderson, 2001. Way, 2003). اختلاط پودر لاستیک با قیر معمولی منجر به بهبود ویژگی‌ها و عملکرد قیر می‌شود که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به مقاومت در برابر شیارشدگی و مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی و خستگی اشاره نمود.

پودر لاستیک به دو روش تر و خشک در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش تر پودر لاستیک به عنوان اصلاح کننده به قیر اضافه می‌شود در حالی که در فرآیند خشک، پودر لاستیک به عنوان بخشی از سنگ دانه‌های ریز عمل می‌کند. وقتی قیر و پودر لاستیک با هم مخلوط می‌شوند، پودر لاستیک با قیر واکنش داده و ذرات آن متورم و نرم می‌شوند. این واکنش به دمای اختلاط، مدت زمان اختلاط، نوع مخلوط کن، اندازه و شکل ذرات پودر لاستیک و مقدار روغن آروماتیک موجود در قیر بستگی دارد (FHWA, 2002). در اختلاط قیر و پودر لاستیک به روش تر نکات مهمی وجود دارد که در طرح اختلاط مخلوط آسفالتی باید مدنظر قرار داد که شامل اندازه ذرات، درصد پودر لاستیک، شکل ذرات و غیره می‌باشد. به عنوان مثال نسبت پودر لاستیک به طور قابل ملاحظه‌ای در مخلوط آسفالتی تغییر می‌کند علت آن ۳ تا ۵ برابر شدن ذرات پودر لاستیک در هنگام مخلوط شدن آن با قیر می‌باشد (Mathias, 2003).

مطالعات (Airey et al., 2003. Bahia, 1994. Palit et al., 2004. Shen, et al., 2006. Xiao, et al., 2006) زیادی نشان می‌دهد که بتن آسفالتی حاوی پودر لاستیک باعث بهبود دوام، مقاومت خستگی، مقاومت لغزندگی، جلوگیری از ترک انعکاسی و مقاومت در برابر شیارشدگی روسازی آسفالتی می‌شود. استفاده از افزودنی‌های قیر ایده‌ی استفاده از ضایعات پلیمری را برای برخی اهداف به وجود آورد، اما استفاده از آسفالت لاستیکی به علت استفاده از پودر لاستیک‌های مستعمل و فرسوده و فواید آن برای محیط زیست از اهمیت بیشتری برخوردار است (Tortum, et al., 2005).

شن و همکاران (Shen, et al., 2009) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که دانه بندی پودر لاستیک و سطح جانبی ذرات آن بر ویسکوزیته قیر اصلاح شده با پودر لاستیک تاثیرگذار است. در هنگام فعل و انفعال ذرات لاستیک با قیر در دمای بالا، ذرات لاستیک با جذب اجزای سبک قیر متورم شده و نتیجه این مکانیسم افزایش سختی قیر اصلاح شده است. از آنجا که فرآیند تورم، فضای آزاد بین ذرات لاستیک را کاهش می دهد، این ذرات برای جابجا شدن در ملات قیر آزادی کمتری خواهند داشت. تورم موجب افزایش قابل توجه ویسکوزیته قیر در قیاس با قیر معمولی یا قیر قبل از فعل و انفعال می شود. براساس مرور مطالعات و پژوهش ها مشخص می شود که قیر اصلاح شده با پودر لاستیک که تحت عنوان قیرلاستیکی شناخته می شود دارای خواص و عملکرد به مراتب بهتری نسبت به قیر پایه است. جمع بندی پژوهش های انجام شده تاکنون نشان می دهد از آزمایشات عملکردی شارپ کمتر برای بررسی عملکرد قیرهای لاستیکی استفاده شده است ضمن اینکه بطور عمده از پودر لاستیک درشت استفاده شده است. لذا در این پژوهش اولاً از پودر لاستیک با اندازه ریزتر استفاده شد تا اختلاط لاستیک و قیر بصورت راحت تر و با پراکنش و اثربخشی بیشتر انجام شود. دوماً از قیر پسماند بازیابی شده از تراشه آسفالت به عنوان یک افزودنی مکمل استفاده شد و فرض شد که می تواند در بهبود رفتار قیر لاستیکی تاثیرگذار باشد. سوماً از آزمایشات جدیدتر (پی جی پلاس) برای بررسی رفتار قیر در برابر شیارشدگی و خستگی بجای آزمایشات پی جی استفاده شد.

۲- مواد و روش

قیر پایه مورد استفاده PG 64-16 از شرکت قیر آکام و پودر لاستیک با سایز مش ۸۰ از شرکت صدرا پوشش طوس که مقدار دوده آن ۰,۳۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب طبق آزمایش استاندارد (ASTM D1513, 2017) است تهیه شد. با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر قیر بازیابی شده بر عملکرد قیر لاستیکی بود لذا تنها یک نمونه قیر لاستیکی با درصد پودر لاستیک مناسب ساخته شد. برای تعیین درصد پودر لاستیک از مرور مطالعات گذشته بهره گرفته شد همچنین درصد پودر لاستیک نباید به اندازه ای باشد که اثر قیر بازیافتی را تحت الشعاع قرار دهد. بر این اساس ۱۱ درصد

افزایش یافت. در ضمن بازه دمایی PG به میزان زیادی افزایش می یابد.

عامری و تقی نژاد (Ameri and Taghinejad, 2009) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر تراشه های آسفالت بر روی خصوصیات قیر و مخلوط های آسفالتی داغ پرداختند. در این پژوهش، خصوصیات قیر مخلوط آسفالتی داغ حاوی درصد های مختلف تراشه های آسفالت (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰)، پس از عمل بازیابی با آزمایش هایی نظیر درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت کشسانی و کندروانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش های انجام شده نشان دادند قیر موجود در تراشه های آسفالت نسبت به قیر اولیه ای که در تهیه مخلوط های آسفالتی به کار رفته، به طور قابل ملاحظه ای سخت تر است. لذا افزایش تراشه های آسفالت به مخلوط های آسفالتی موجب سختی قیر جدید مورد استفاده در تهیه مخلوط شده و در مخلوط هایی که حاوی درصد بیشتری از تراشه های آسفالت بوده، خصوصیات قیر ترکیبی (قیر خرده آسفالت و قیر جدید) مشابه خصوصیات قیر تراشه های آسفالت مورد استفاده است.

در پژوهشی دیگر (Yousefi Kebria et al., 2015) قیر خالص ۶۰/۷۰ بوسیله پودر لاستیک در درصد های وزنی ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ اصلاح گردید و آزمایش های کلاسیک و شارپ بر روی نمونه های قیر انجام شد. نتایج نشان دادند که با افزایش درصد پودر لاستیک، نقطه نرمی افزایش و درجه نفوذ کاهش پیدا می کند و پارامتر $G^*/\sin(\delta)$ که نشانگر مقاومت در برابر پدیده شیارشدگی است در دماهای مختلف قبل و بعد از پیرشدگی اولیه افزایش و پارامتر $G^* \times \sin(\delta)$ که نشانگر میزان پتانسیل ترک های خستگی در دماهای مختلف هست، کاهش می یابد. در درصد های وزنی ۱۶ الی ۲۰ پودر لاستیک، قیر اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد دارای ویسکوزیته بیش از حد مجاز تعیین شده در سوپرپیو می باشد.

در مطالعه تی چجو و چنگ (Te Chiu and ChengLu, 2007) قیر لاستیکی با استفاده از دو نوع پودر لاستیک به اندازه های کوچکتر از ۰,۸۵ میلی متر و کمتر از ۰,۶ میلی متر مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان داد که مخلوط قیر همراه با ۳۰ درصد پودر لاستیک درشت تر برای استفاده در آسفالت مناسب نمی باشد. اما قیر لاستیکی شامل ۲۰ درصد پودر لاستیک با اندازه کوچکتر می تواند مناسب باشد.

به کمک دستگاه سانتیفریژ و تحت استاندارد (ASTM D2172, 2017). سپس جداسازی قیر از حلال که به کمک دستگاه تبخیرکننده چرخشی تحت استاندارد (ASTM D5404, 2017) انجام شد. قیر پسماند حاصل از بازیابی، قیر سفتی بود که نتیجه آزمایش درجه نفوذ برای آن عدد ۲۸ دهم میلی متر را نشان داد.

پودر لاستیک در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد و دور اختلاط ۴۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۴۵ دقیقه انتخاب شد. خواص کلاسیک قیر پایه و قیر لاستیکی در جدول ۱. ارایه شده است. و شکل (۱) دستگاه اختلاط جهت ساخت قیر اصلاح شده را نشان می دهد. قیر پسماند بازیابی شده از تراشه آسفالت نیز در دو مرحله بدست آمد. ابتدا با جداسازی قیر از تراشه آسفالت

جدول ۱. خواص قیر پایه و قیر لاستیکی

شماره استاندارد	قیر لاستیکی	قیر پایه	ویژگی
ASTM D5	۳۱	۶۶	درجه نفوذ-۲۵°C، ۵۵.۱۰۰.g
ASTM D36	۶۴	۴۹.۵	نقطه نرمی-°C
ASTM D113	۱۵.۸	>۱۰۰	کش پذیری-۲۵°C، cm



شکل ۱. دستگاه اختلاط جهت ساخت قیر اصلاح شده

۳- روش اختلاط قیر لاستیکی و قیر بازیابی شده

برای بررسی تاثیر قیر بازیابی شده بر عملکرد قیر لاستیکی لازم بود تا نمونه هایی با درصد های متفاوت تهیه و مورد مقایسه قرار گیرند. لذا از ۴ درصد مختلف ۰، ۱۵، ۲۵ و ۴۰ برای نسبت اختلاط قیر بازیابی شده به وزن قیر لاستیکی استفاده شد. اختلاط قیر بازیابی شده به قیر لاستیکی در دمای اختلاط نرمال قیر یعنی ۱۵۰ درجه سانتیگراد با دور اختلاط ۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد.

۴- آزمایشات

آزمایش های جاروب دما، جاروب فرکانس، بازگشت خزشی در چند سطح تنش و جاروب دامنه خطی به کمک دستگاه رئومتر برشی دینامیکی بر روی قیر لاستیکی ترکیب شده با درصد های گوناگون قیر بازیابی شده به انجام رسید. شرح مختصر هر آزمایش طبق استاندارد مربوطه در ادامه ارایه شده است.

۴-۱- آزمایش جاروب دما^۱

که به کمک دستگاه رئومتر برش دینامیکی انجام می شود. آزمایش بر روی قیرلاستیکی با درصدهای گوناگون قیر بازیابی شده در دمای ۶۴ درجه سانتی گراد با استفاده از نمونه به قطر ۲۵ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر طبق استاندارد ASTM D7405 انجام گرفت. دو پارامتر خروجی از این آزمایش به شرح زیر است:

الف- نرمی خزشی غیر قابل بازگشت J_{nr}

مطالعات نشان دادند شاخص سوپرپیو ($G^*/\sin \delta$) همبستگی کافی با شیارشدگی ندارد لذا در آزمایش MSCR پارامتر J_{nr} به عنوان شاخص سنجش شیارشدگی قیر در مخلوط آسفالتی پیشنهاد شده است، که میانگین کرنش غیرقابل بازگشت (ویسکوز) را نشان می دهد. طول مدت خزش، طول مدت بازیابی، تعداد سیکل های بارگذاری و البته تنش برشی اعمال شده، به طور آشکار بر J_{nr} تاثیر می گذارند. به عبارت دیگر، مقدار J_{nr} بستگی به مشخصات مکانیکی آزمایش دارد. این پارامتر از رابطه ۱ محاسبه می شود:

$$J_{nr} = \sum_{1}^{10} \frac{\text{کرنش برشی غیر قابل بازگشت}}{\text{تنش برشی اعمال شده}} \quad (1)$$

میانگین کرنش های برگشت ناپذیر در ۱۰ سیکل بارگذاری و باربرداری بر میزان تنش اعمالی تقسیم می شود و مقدار نرمی خزشی برگشت ناپذیر (J_{nr}) بدست می آید. میزان نرمی خزشی برای تنش ۰٫۱ کیلو پاسکال از تقسیم کرنش بعد از ۱۰ سیکل بر ۰٫۱ کیلو پاسکال بدست می آید.

ب- درصد کرنش الاستیک (بازگشتی) $R\%$

این پارامتر میزان میانگین کرنش برگشت پذیر در هر سطح تنش را نشان می دهد. به عبارت دیگر درصد بازیابی ($R\%$) به صورت نسبت کرنش برگشت پذیر به کل کرنش تعریف می شود.

$$R\% = \sum_{1}^{10} \frac{\text{کرنش برشی قابل بازگشت}}{\text{کرنش برشی بیشینه}} \quad (2)$$

۴-۲- آزمایش جاروب دامنه خطی^۲

آزمایش جاروب دامنه خطی به منظور غلبه بر مشکل زمان طولانی آزمایش جاروب زمان، برای ارزیابی و اندازه گیری عملکرد خستگی قیر استفاده می شود که توسط مارتونو و بهیا در سال ۲۰۰۸ پیشنهاد شد و ترکیبی از آزمایش جاروب دامنه و مدل VECD است. با تحلیل نتایج این آزمایش به کمک مدل

آزمایش جاروب دما با استفاده از دستگاه رئومتر برشی دینامیکی بر روی قیرلاستیکی مخلوط شده با درصدهای گوناگون قیر بازیابی شده و نمونه های با قطر ۲۵ و ضخامت ۱ میلی متر در بازه دمایی ۳۰ تا ۹۰ درجه سانتی گراد با نرخ ثابت افزایش دمای ۴ درجه در دقیقه انجام پذیرفت. فرکانس برابر با ۱۰ رادیان بر ثانیه (معادل ۱/۵۹ هرتز) و کرنش نوسانی ۱٪ معین شد. سایر موارد اعم از زمان هم دمایی و غیره مطابق با استاندارد مربوطه (AASHTO T315, 2010) در نظر گرفته شد.

۴-۳- آزمایش جاروب فرکانس^۲

این آزمایش مطابق استاندارد مربوطه (AASHTO T315, 2010) با استفاده از نمونه های با قطر ۲۵ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر ولی تحت کرنش ۴ درصد و تغییر فرکانس از ۱ الی ۱۰۰ رادیان بر ثانیه برای هر یک از دماهای ۳۰ تا ۹۰ درجه انجام شد. منحنی های مدول مختلط (G^*) و همچنین زاویه اختلاف فاز (δ) به کمک مدل کریستینسن- اندرسون ترسیم (Anderson, et al., 1994) و منحنی های مرجع تحلیل رفتار قیر تحت تغییرات بارگذاری برای دمای ۷۰ درجه سانتی گراد با استفاده از تابع انتقال ویلیامز-لندل-فری بدست آمد (Rowe&Sharrok, 2011).

۴-۴- آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش^۳ (MSCR)

آزمایش MSCR یکی از آزمایش های توسعه داده شده در برنامه راهبردی شارپ و در قالب روش پی جی پلاس است که به منظور بررسی عملکرد شیارشدگی قیر در دمای بالا با اندازه گیری درصد بازیابی الاستیک R و خزش غیرقابل برگشت J_{nr} انجام می شود. برتری این روش بر روش مرسوم پی جی سطوح تنش و کرنش بالاتر است که ارزیابی عملکرد قیرهای پلیمری را امکان پذیر می کند. سطح تنش مورد استفاده در روش پی جی نمی تواند قیرهای بهبود یافته را بخوبی تحت تاثیر قرار داده و فعال کند. این آزمایش شامل ۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه باربرداری در سطح تنش های ۰٫۱ و ۳٫۲ کیلو پاسکال در دمای عملکردی بالا در ۱۰ سیکل برای هر سطح تنش است

$$D_f = \left(\frac{C_0 - C_{at \text{ peak stress}}}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (7)$$

همچنین تعداد سیکل های بارگذاری تا مرحله شکست که همان عمر خستگی قیر است به صورت معادله ۸ محاسبه می شود.

$$N_f = A(\gamma_{max})^{-B} \quad (8)$$

که در آن γ_{max} حداکثر کرنش مورد انتظار در روسازی و A و B پارامترهای مدل هستند و طبق معادلات ۹ و ۱۰ محاسبه می شوند.

$$A = \frac{f(D_f)^{1+(1-C_2)\alpha}}{(1 + (1 - C_2)\alpha)(\pi C_1 C_2)^\alpha} \quad (9)$$

$$B = 2\alpha \quad (10)$$

۵- نتایج و بحث

۵-۱- تحلیل نتایج جاروب دما

بطور کلی بر اساس پارامترهای سوپرپیو و توصیه های شارپ، مخلوط آسفالتی تهیه شده از قیری که دارای G^* بالاتر و زاویه اختلاف فاز پایین تر (الاستیک تر) است در برابر خرابی مانند شیارشدگی مقاومتر است. این مهم با توجه و بررسی نمودارهای تغییرات مدول مختلط برشی (G^*) و زاویه اختلاف فاز (δ) قابل بررسی است.

در شکل ۲-الف مشاهده می شود که افزودن ۱۵ و ۲۵ درصد قیر بازیابی شده به قیر لاستیکی پایه منجر به افزایش G^* در دماهای بالای ۵۰ درجه می شود. اگر چه در دماهای بالای ۷۰ درجه سانتیگراد افزایش بسیار جزئی G^* نمونه ۱۵ درصدی نسبت به ۲۵ درصدی مشاهده می شود ولی می توان قضاوت نمود که اختلافی بین آنها وجود ندارد. این روند افزایشی برای نمونه حاوی ۴۰ درصد قیر بازیابی شده ادامه پیدا نکرده و G^* آن حتی نسبت به نمونه قیر لاستیکی پایه نیز کمتر است. دو دلیل برای این اتفاق میتوان متصور بود. یکی اینکه چون قیر بازیابی شده جایگزین بخشی از قیر لاستیکی می شود لذا با افزایش سهم قیر بازیابی در نمونه ۴۰ درصدی، عملاً سهم پودر لاستیک در نمونه ترکیبی حاصل، کم شده و لذا عملکرد ضعیف تری نسبت به نمونه قیر لاستیکی پایه از خود نشان می دهد. دوم اینکه افزایش قیر می تواند موجب متورم

مکانیکی خرابی محیط های پیوسته ویسکو الاستیک، طبق استاندارد AASHTO TP101 می توان مقاومت خستگی قیرها را تخمین زد. آزمایش جاروبدانه خطی با استفاده از دستگاه رتومتر برش دینامیکی با استفاده از دو صفحه موازی به قطر ۸ میلیمتر و فاصله ۲ میلی متر در دمای میانی ۲۵ درجه سانتیگراد انجام می شود. این آزمایش در دو مرحله انجام می شود:

الف-آزمایش جاروب فرکانس با دامنه کرنش بسیار پایین ۰٫۱ درصد و فرکانس (0.2-30HZ) صورت می گیرد.

ب-آزمون جاروب دامنه در فرکانس ۱۰ هرتز با بارگذاری دینامیکی در کرنش برشی کنترل شده از صفر تا ۳۰ درصد به صورت خطی انجام می شود که در هر ۱۰۰ سیکل، ۱ درصد به کرنش اضافه می شود.

در مجموع در آزمایش جاروب دامنه ۳۱۰۰ سیکل در ۳۱۰ ثانیه انجام می پذیرد که تنش و کرنش برشی حداکثر در هر ۱۰ سیکل بارگذاری ثبت می گردد. میزان خرابی تجمعی قیر طبق رابطه ۳ محاسبه می گردد.

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N \{ (\pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i))^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{\alpha+1}} \} \quad (3)$$

که در آن C_i پارامتر یکپارچگی است و طبق رابطه ۴ محاسبه می شود، γ_0 درصد کرنش اعمالی، G^* مدول مختلط برحسب مگاپاسکال، t زمان آزمایش بر حسب ثانیه، α که شیب لگاریتمی بین مدول ذخیره و فرکانس اعمالی بوده و برابر معادله ۵ محاسبه می شود.

$$C(t) = \frac{|G^*(t)|}{|G^*_{initial}|} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (5)$$

مدل ریاضی بین میزان C و خرابی تجمعی به صورت معادله ۶ بدست می آید.

$$C(t) = C_0 - C_1 D^{C_2} \quad (6)$$

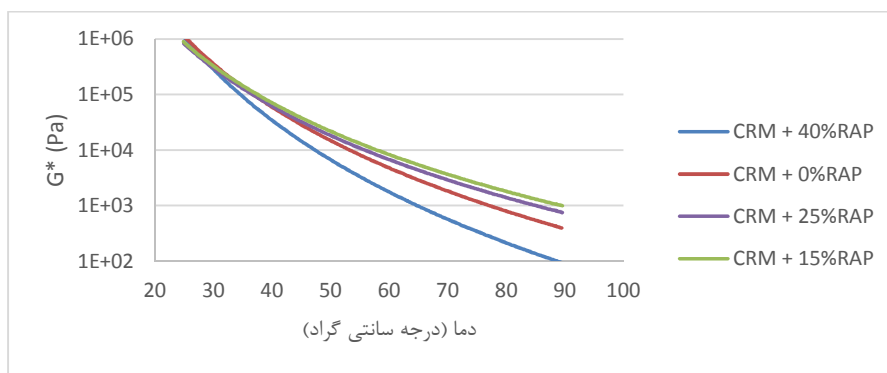
که در آن C_1 و C_2 پارامترهای مدل خرابی محیط پیوسته هستند.

نقطه شکست در این آزمایش نقطه ای است که قیر حداکثر سطح تنش را تحمل می کند بنابراین مقدار پارامتر خرابی در نقطه شکست D_f بصورت رابطه ۷ می باشد.

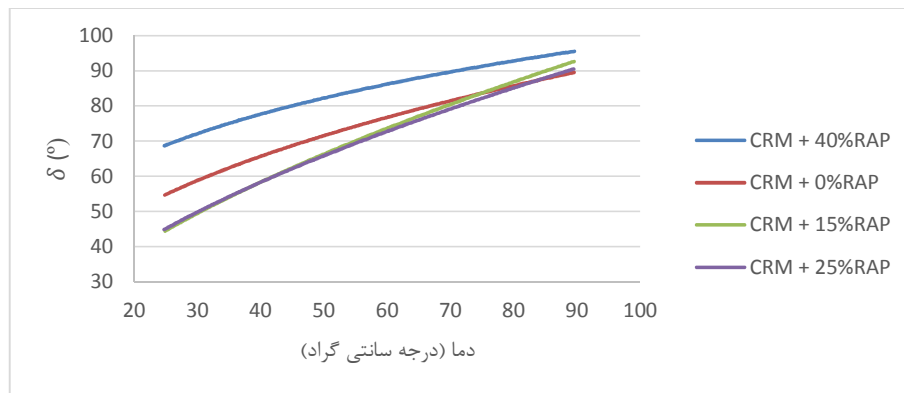
قیر بازیابی شده در تمام دماها وضعیت نامناسب تری نسبت به سایر نمونه ها دارد و زاویه اختلاف فاز آن از همه نمونه ها بیشتر است. در جمع بندی می توان گفت قیرهای لاستیکی حاوی ۱۵ و ۲۵ درصد قیر بازیابی شده رفتار الاستیکی تری نسبت به قیر لاستیکی فاقد قیر بازیابی شده دارد ولی این موضوع برای درصدهای بیشتر قیر بازیابی شده به دلیل تخریب و وابسپارش ساختار قیر صادق نمی باشد.

شدن ذرات لاستیک و بروز پدیده وابسپارش در ساختار قیر گردد.

بر اساس شکل ۲-ب زاویه اختلاف فاز در دماهای متوسط تا بالا برای نمونه های ۱۵ و ۲۵ درصد یکسان و نسبت به قیر لاستیکی پایه کمتر است. البته δ در حدود دمای ۸۰ درجه سانتیگراد با مقدار حدود ۸۴ درجه برای نمونه های حاوی ۱۵ و ۲۵ درصد قیر بازیابی شده با نمونه قیر لاستیکی پایه یکسان می شود. همچنین مشاهده می شود که نمونه حاوی ۴۰ درصد



الف- منحنی مدول مختلط برشی



ب- منحنی زاویه اختلاف فاز

شکل ۲- منحنی های تغییرات مدول مختلط برشی و زاویه اختلاف فاز بر حسب دما

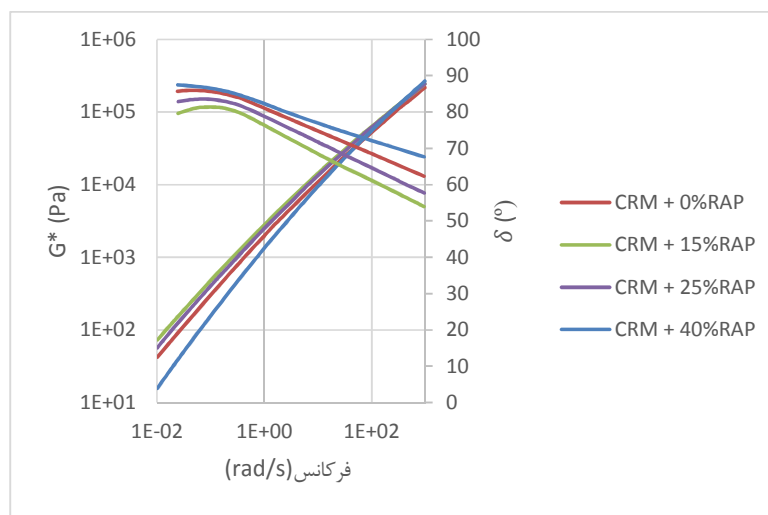
بازیابی شده در دمای مرجع ۷۰ درجه سانتیگراد را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود نمونه های دارای ۱۵٪ و ۲۵٪ قیر بازیابی شده از G^* بالاتر و δ ی کمتری در مقایسه با قیرلاستیکی پایه در کل محدوده دمایی برخوردار است. در این

۲-۵- تحلیل نتایج جاروب فرکانس

شکل ۳ منحنی های مرجع برای مدول مختلط برشی G^* و زاویه اختلاف فاز δ بر حسب فرکانس های بارگذاری برای نمونه های قیر لاستیکی حاوی درصدهای متفاوتی از قیر

پژوهش‌های قبلی نیز بدست آمده بود. بر اساس این مطالعات، وابسپارش ذرات لاستیک می‌تواند به شبکه قیری آسیب رسانده و باعث کاهش مدول مختلط برشی شود (Celauro, et al., 2012. Dong, et al., 2012). همچنین ملاحظه می‌شود که حساسیت مدول مختلط برشی نسبت به تغییر درصد قیر بازیابی شده در فرکانس‌های پایین تر، بیشتر و بالعکس حساسیت زاویه اختلاف فاز در فرکانس‌های بیشتر نسبت به تغییرات درصد قیر بازیابی شده بیشتر است.

میان نمونه حاوی ۱۵٪ قیر بازیابی شده دارای بالاترین مقدار G^* و کمترین δ است. از طرفی نمونه حاوی ۴۰٪ قیر بازیابی شده کاهش در مدول مختلط برشی و افزایش در زاویه اختلاف فاز را نشان می‌دهد. از این نتایج می‌توان استنتاج نمود که افزودن قیر بازیابی شده تا حدی منجر به افزایش سختی و بازیابی الاستیک قیرلاستیکی می‌شود، ولی افزایش مقدار قیر بازیابی شده می‌تواند موجب تورم بیش از اندازه ذرات لاستیک و وابسپارش ذرات لاستیک شود. این نتیجه در برخی



شکل ۳. منحنی مرجع مدول مختلط برشی و زاویه اختلاف فاز بر حسب فرکانس بارگذاری

نمونه های دارای ۱۵ و ۲۵ درصد قیر بازیابی شده نسبت به نمونه قیر لاستیکی پایه کمتر است که نشان دهنده سفتی ناشی از تاثیر قیر بازیابی شده است. البته مجددا این روند برای قیر لاستیکی حاوی ۴۰ درصد قیر بازیابی شده صدق نمی‌کند.

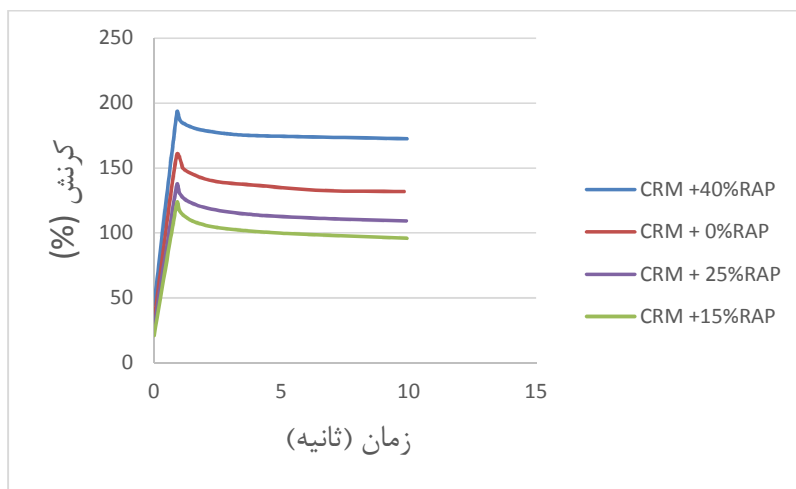
نمودار شکل ۵ وضعیت پارامترهای درصد کرنش الاستیک (R) و نرمی خزشی غیرقابل بازگشت (Jnr) را برای نمونه های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین کرنش الاستیک و کمترین نرمی خزشی به ترتیب با مقدار ۲۴٫۲ درصد و $0.37kpa^{-1}$ مربوط به نمونه حاوی ۱۵ درصد قیر بازیابی شده است. نتایج نمونه حاوی ۲۵ درصد قیر بازیابی شده نیز به نمونه ۱۵ درصدی نزدیک است. کرنش نمونه ۱۵ درصدی حدود ۳۷ درصد بیشتر از کرنش قیر

۳-۵- تحلیل عملکرد شیار شدگی

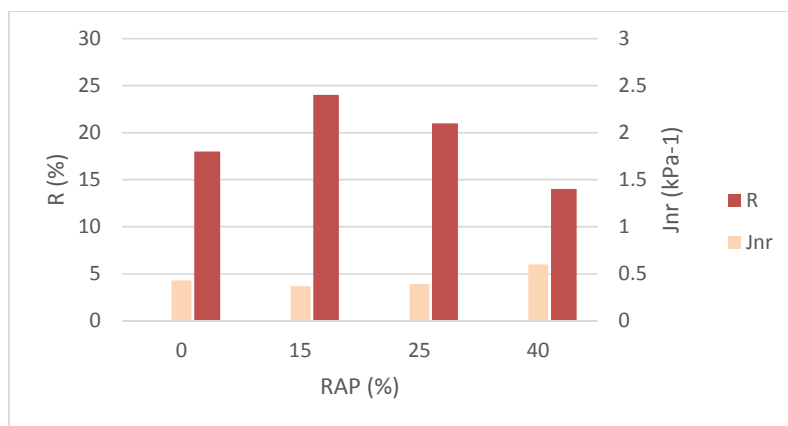
همانطور که قبلا اشاره شد، آزمایشات پی جی پلاس برای ارزیابی بهتر عملکرد قیرها به ویژه قیرهای پلیمری و اصلاح شده توسعه داده شده اند. یکی از این آزمایشات، آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR) است که برای ارزیابی عملکرد قیرها در برابر شیارشدگی به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش پی جی ارایه شده است. محدودیت اصلی روش پی جی در پایین بودن سطح تنش و کرنش است که در روش MSCR افزایش یافته است. شکل ۴ منحنی کرنش در برابر زمان را برای سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال در ۶۴ درجه سانتی‌گراد و نمونه های قیر لاستیکی با درصد های مختلف قیر بازیابی شده نشان می‌دهد. بر این اساس کرنش

محدود و تا حدود ۲۰ درصد باعث افزایش سفتی و رفتار الاستیک قیر و قابلیت برگشت‌پذیری کرنشی قیر در برابر بارگذاری شده و بالتبع مقاومت آن را در برابر شیارشدگی نیز افزایش می‌دهد.

لاستیکی پایه و نرمی خزشی آن حدود ۱۴ درصد کمتر از نرمی خزشی قیر لاستیکی پایه بدست آمد. از طرفی نمونه حاوی ۴۰ درصد قیر بازیابی شده به دلیل واپسپارش دارای کمترین کرنش الاستیک و بیشترین نرمی خزشی است. بر اساس مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که اضافه کردن قیر بازیابی شده بصورت



شکل ۴. منحنی کرنش حاصل از آزمون MSCR برای نمونه‌های مختلف قیر



شکل ۵. نمودار مقادیر پارامترهای R و Jnr در برابر درصد قیربازیابی شده مورد استفاده در نمونه‌های قیر لاستیکی

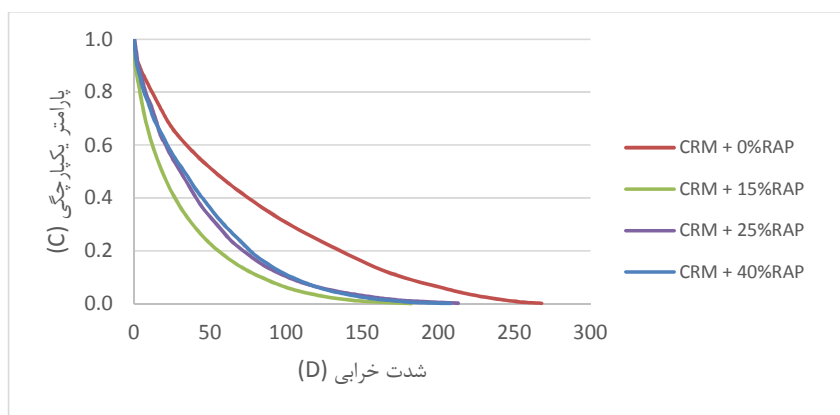
شکست قیر را در برابر کرنش برای نمونه‌های قیر لاستیکی با درصدهای متفاوت قیر بازیابی شده نشان می‌دهد. چنانچه قیر خصوصیات اولیه خود را حفظ نماید و مدول برشی مختلط در خلال سیکل‌های بارگذاری تغییر نکند پس پارامتر C برابر و یا

۵-۴- تحلیل عملکرد خستگی

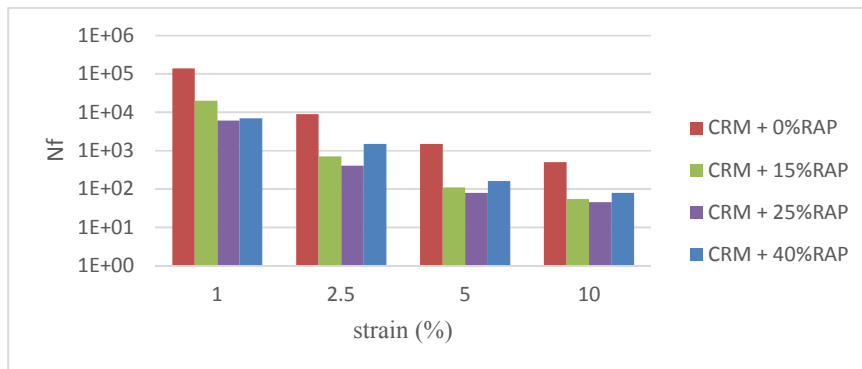
نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی در قالب دو شکل نشان داده شده است. شکل ۶ ارتباط بین شدت آسیب (D) و پارامتر یکپارچگی (C) و شکل ۷ تعداد سیکل بارگذاری تا مرحله

زمان و تحت تنش نسبت به سایر نمونه هاست. در نمودار شکل ۷ بیشترین عمر خستگی در تمامی سطوح کرنش متعلق به قیر لاستیکی پایه است. بعد از آن در سطح کرنش پایین (۱٪) نمونه حاوی ۱۵ درصد قیر بازیابی شده، سپس نمونه ۴۰ درصد و در آخر نمونه ۲۵ درصدی دارای بیشترین عمر خستگی هستند. ولی در سطوح تنش بالاتر نمونه ۴۰ درصدی بعد از نمونه پایه بیشترین عمر خستگی را دارد. در هر صورت افزایش قیر بازیابی شده به قیر لاستیکی پایه در تمامی سطوح کرنش سبب کاهش عمر خستگی شده است. این کاهش در سطوح کرنش کم حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد و در سطوح کرنش بالا به حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزودن قیر بازیابی شده به علت ماهیت سخت کنندگی آن باعث کاهش عمر خستگی قیر لاستیکی و افزایش احتمال ترک خوردن آن در دماهای میانی می‌شود.

نزدیک به ۱ خواهد بود و شرایط بدون خرابی و یکپارچگی کامل را نشان می‌دهد و در صورت تخریب قیر و کاهش مقدار مدول مختلط برشی این پارامتر به سمت صفر میل می‌نماید. شکل ۶ نشان می‌دهد که به تدریج با افزایش سیکل بارگذاری، پارامتر C کاهش و شدت خرابی افزایش می‌یابد. در این میان نمونه های حاوی قیر بازیابی شده با سرعت بیشتری نسبت به نمونه قیرلاستکی پایه با افت پارامتر C مواجه می‌شوند. یکی از دلایل این موضوع را می‌توان در سفتی بیشتر نمونه حاوی قیر بازیابی شده دانست که مقاومت آن را در برابر خستگی و شکست کاهش می‌دهد. همانطور که از نتایج آزمایش جاروب دما و فرکانس مشخص شد، مقدار مدول مختلط برشی برای نمونه ۱۵ درصدی از سایر نمونه ها بیشتر بود. این در حالیست که در شکل ۶ سریعترین روند افت پارامتر C متعلق به این نمونه است که نشان دهنده افت بیشتر مدول مختلط برشی در



شکل ۶. منحنی تغییرات شدت خرابی در مقابل پارامتر یکپارچگی



شکل ۷. تعداد سیکل های بارگذاری تا مرحله شکست قیر در مقابل کرنش اعمال شده

۶- نتیجه گیری

نتیجه گیری کلی از نتایج آزمایشات عملکردی بر روی نمونه های قیر لاستیکی حاوی درصد های مختلف قیر بازیابی شده به شرح زیر قابل ذکر است:

۱- آزمون جاروب دما نشان داد که افزودن ۱۵ و ۲۵

درصد قیر بازیابی شده به قیر لاستیکی پایه منجر به افزایش G^* در دماهای بالای ۵۰ درجه می شود. این روند افزایشی برای نمونه حاوی ۴۰ درصد قیر بازیابی شده ادامه پیدا نکرده و G^* آن حتی نسبت به نمونه قیر لاستیکی پایه نیز کمتر است.

دو دلیل متصور برای این موضوع می تواند کاهش سهم پودر لاستیک در نمونه مذکور با افزایش سهم قیر و دیگری، متورم شدن ذرات لاستیک و بروز پدیده وابسپارش در ساختار قیر باشد. از طرفی نتایج نشان داد زاویه اختلاف فاز در دماهای متوسط تا بالا برای نمونه های ۱۵ و ۲۵ درصد یکسان و نسبت به قیر لاستیکی پایه کمتر است. همچنین مشاهده می شود که نمونه حاوی ۴۰ درصد قیر بازیابی شده در تمام دماها وضعیت نامناسب تری نسبت به سایر نمونه ها دارد و زاویه اختلاف فاز آن از همه نمونه ها بیشتر است. در جمع بندی می توان گفت قیر های لاستیکی حاوی ۱۵ و ۲۵ درصد قیر بازیابی شده رفتار الاستیک تری نسبت به قیر لاستیکی فاقد قیر بازیابی شده دارد ولی این موضوع برای درصد های بیشتر قیر بازیابی شده به دلیل تخریب و وابسپارش ساختار قیر صادق نمی باشد.

۲- آزمون جاروب فرکانس نشان داد که نمونه های دارای ۱۵ و ۲۵ درصد قیر بازیابی شده از G^* بالاتر و δ ی کمتری در مقایسه با قیر لاستیکی پایه در کل محدوده دمایی برخوردار است. در این میان نمونه حاوی ۱۵ درصد قیر بازیابی شده دارای بالاترین G^* و کمترین δ است. از طرفی نمونه حاوی ۴۰٪ قیر بازیابی شده کاهش در مدول مختلط برشی و افزایش در زاویه اختلاف فاز را نشان می دهد. از این نتایج می توان استنتاج نمود که افزودن قیر بازیابی شده تا حدی منجر به افزایش سختی و بازیابی الاستیک قیر لاستیکی می شود ولی افزایش مقدار قیر بازیابی شده می تواند موجب تورم بیش از اندازه ذرات لاستیک و وابسپارش ذرات لاستیک شود.

۳- نتایج آزمون بازگشت خزشی در چند سطح تنش برای بررسی عملکرد شیارشدگی نشان داد که بیشترین کرنش الاستیک و کمترین نرمی خزشی مربوط به نمونه حاوی ۱۵

درصد قیر بازیابی شده است. نتایج نمونه حاوی ۲۵ درصد قیر بازیابی شده نیز به نمونه ۱۵ درصدی نزدیک است. از طرفی نمونه حاوی ۴۰ درصد قیر بازیابی شده به دلیل وابسپارش دارای کمترین کرنش الاستیک و بیشترین نرمی خزشی است. بر اساس مشاهدات می توان نتیجه گرفت که اضافه کردن قیر بازیابی شده بصورت محدود و تا حدود ۲۰ درصد باعث افزایش سفتی و رفتار الاستیک قیر و قابلیت برگشت پذیری کرنشی قیر در برابر بارگذاری شده و بالتبع مقاومت آن را در برابر شیارشدگی نیز افزایش می دهد.

۴- نتایج آزمون جاروب دامنه خطی برای بررسی عملکرد خستگی نشان داد که افزایش قیر بازیابی شده به قیر لاستیکی پایه در تمامی سطوح کرنش سبب کاهش عمر خستگی شده است. این کاهش در سطوح کرنش کم حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد و در سطوح کرنش بالا به حدود ۴۰ درصد می رسد. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که افزودن قیر بازیابی شده به علت ماهیت سخت کنندگی آن باعث کاهش عمر خستگی قیر لاستیکی و افزایش احتمال ترک خوردن آن در دماهای میانی می شود.

پانویس

1. temperature sweep
2. frequency sweep
3. Multi Stress Creep and Recovery
4. Linear Amplitude Sweep

۷- مراجع

-آقاجانی، پ. و مقدس نژاد، ف.، (۱۳۹۰)، "اصلاح مشخصات قیر با استفاده از افزودنی پودر لاستیک"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان.

-حمیدی، ی. و صرافی، ا. و طهمورسی، م. و جمشیدی، ر.، (۱۳۸۷)، "تأثیر شرایط مختلف بر فرآیند اختلاط قیر و پودر لاستیک"، نخستین همایش تخصصی و کاربردی مخلوط آسفالتی، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-طباطبایی، ن. و کمالی ایپانه، ز.، (۱۳۸۳)، "بررسی رفتار کندروانی قیر VB اصلاح شده با پودر لاستیک"، دومین

ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.

-Bahia, H.U. & Davies, R., (1994), "Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders". *Asphalt paving technology*, 63, pp. 414-414.

-Celauro B., Celauro C., Presti DL., Bevilacqua A., (2012), "Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber". *Construction and Building Materials*, 37, pp.562-572

-Dong, D., Huang, X., Li, X., Zhang, L., (2012), "Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt". *Construction and Building Materials*. 29, pp.316–322.

-Federal Highway Administration, (2002), "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Washington", D.C.

-Mathias Leite, LF, Almeida da Silva, P. Edel, G. Goretti da Motta, L. & Herrmann do Nascimento, LA. (2003), "Asphalt rubber in Brazil: Pavement performance and laboratory study ". Paper presented at the Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia, Brazil.

-McDaniel, R. & Anderson, R.M., (2001), "Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Super pave mix design method": Guidelines: Transportation Research Board, National Research Council.

-Palit, SK, Reddy, K.S. & Pandey, BB., (2004), "Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes". *Journal of materials in civil engineering*, 16(1), pp. 45-53.

-Shen J., and Amirkhani S., and Xiao F. and Tang B., (2009), "Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders", *Construction and Building Materials*, 23, pp304–310.

-Shen, JN, Amirkhani, SN, & Xiao, FP., (2006), "HP-GPC characterization of aging of recycled CRM Binders containing rejuvenating

همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، موسسه قیر و آسفالت ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

-سامری، م. و تقی‌نژاد عمران، ع.، (۱۳۸۷)، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر تراشه‌های خرده آسفالت بر روی خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی گرم"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۵، شماره ۲، ص. ۱۵۷-۱۶۵.

-Airey, G.D. Rahman, M.M. & Collop, A.C. (2003), "Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method". *International Journal of Pavement Engineering*, 4(2), pp. 105-119.

-AASHTO:T 315., (2010), "Standard Method of test for determining the rheological properties of asphalt binder Using dynamic shear rheometer (DSR)", AASHTO designation T315-10.

-AASHTO: TP 101. (2014), "Estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep". American association of state highway and transportation officials' standards for tests, 2014. pp. 1–7.

-Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G., Antle, C. E. & Button, J., (1994), "Binder characterization and evaluation, National academy of sciences", Vol. 3, (SHRP-A-369).

-ASTM D7405, (2010), "Standard test method for multiple stress creep and recovery (MSCR) of asphalt binder using a dynamic shear rheometer". Pennsylvania, USA: American Society for Testing and Materials.

-ASTM D1513-05, (2017), "Standard Test Method for Carbon Black, Pelleted—Pour Density, ASTM International, West Conshohocken", PA, www.astm.org.

-ASTM D2172 / D2172M-17e1, (2017), "Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken", PA, www.astm.org.

-ASTM D5404 / D5404M-12, (2017), "Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator",

Journal of Materials in Civil Engineering. 26, pp.721-727.

-Way, GB., (2003), "The rubber pavements association, technical advisory board leading the way in asphalt rubber research". Paper presented at the Proceedings of the asphalt rubber 2003 conference, Brasilia, Brazil.

-Xiao, F. Putman, B.J. & Amirhanian, S.N., (2006), "Laboratory investigation of dimensional changes of crumb rubber reacting with asphalt binder". Paper presented at the Proceedings of Asphalt Rubber 2006 Conference.

-Yousefi Kebria, D and Moafimadani, S. r. and Goli, Y., (2015), "Laboratory investigation of the effect of crumb rubber on the characteristics and rheological behavior of asphalt binder", Road Materials and Pavement Design, Vol. 16, issue4, pp. 946-956.

agents". Transportation Research Board, Washington, DC (1962), pp. 21-27.

-Te Chiu, C., and Cheng Lu, L., (2007), "A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber" Construction and Building Materials, May, Vol. 21, pp.1027.

-Tortum, A. Çelik, C. & Cüneyt Aydın, A., (2005), "Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete". Building and environment, 40(11), pp. 1492-1504.

-Tortum, A. Çelik, C. & Cüneyt Aydın, A., (2005), "Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete". Building and environment, 40(11), pp. 1492-1504.

-Vahidi S., Mogawer W., Booshehrian A., (2014), "Effects of GTR and treated GTR on asphalt binder and high-RAP mixtures".