

ارزیابی درجه عملکردی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک ضایعاتی به کمک آزمایش‌های شارپ و شارپ پلاس

مقاله پژوهشی

مجید قاسمی*، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

شاهین شعبانی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران، ایران

پرهام حیاتی، استادیار، گروه راه و ترابری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Majid_ghasemie@yahoo.com

دریافت: ۹۹/۰۸/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

صفحه ۱۱۴-۱۰۳

چکیده

تأثیر مستقیم خواص قیر بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی باعث گردیده تا اصلاح رفتار قیر همواره یکی از موضوعات کلیدی پژوهشگران محسوب شود. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داده که پودر لاستیک ضایعاتی، تأثیرات مثبت و قابل قبولی بر رفتار کلاسیک قیر داشته ولی رفتار رئولوژیکی قیر کمتر بررسی شده است. در این پژوهش از پودر لاستیک ضایعاتی در اندازه مش ۸۰ و در درصد‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ نسبت به وزن قیر استفاده و سپس آزمایش‌های شارپ شامل ویسکومتر دورانی (RV)، رئومتر برش دینامیکی (DSR)، رئومتر تیر خمشی (BBR)، پیرشدگی کوتاه مدت (RTFO) و پیرشدگی بلند مدت (PAV) و شارپ پلاس شامل آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR) بر روی نمونه‌ها انجام گردید. در انتها درجه عملکردی قیر (PG) به روش استاندارد و همچنین تحت تأثیر نتایج آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد پودر لاستیک، ویسکوزیته و دمای بالا PG افزایش یافته بطوری که نمونه حاوی ۱۶ درصد پودر لاستیک بیشترین دمای بالای عملکردی را داشته است. همچنین پیرشدگی بعد از RTFO تأثیری بر دمای بالای PG نداشته است. افزایش درصد پودر لاستیک تأثیر مثبت بر J_{nr} داشته و رفتار الاستیک و بالتبع مقاومت قیر در برابر شیارشدگی را افزایش داد بویژه نمونه حاوی ۱۶ درصد افزودنی سطح ترافیکی H که شامل تحمل بار ترافیک سنگین (۱۰ تا ۳۰ میلیون محور منفرد معادل) یا در حال حرکت آرام است را بدست آورد، همچنین باعث بهبود عملکرد قیر در دمای پایین برای نمونه‌های حاوی ۸ و ۱۶ درصد پودر لاستیک گردید. بررسی نقشه پهنه‌بندی درجه عملکردی قیرها در ایران، نشان داد که قیرهای حاوی پودر لاستیک ضایعاتی قابلیت استفاده در اغلب مناطق کشور را دارا است.

واژه‌های کلیدی: آزمایش‌های شارپ، پودر لاستیک ضایعاتی، درجه عملکردی قیر (PG)، آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR)

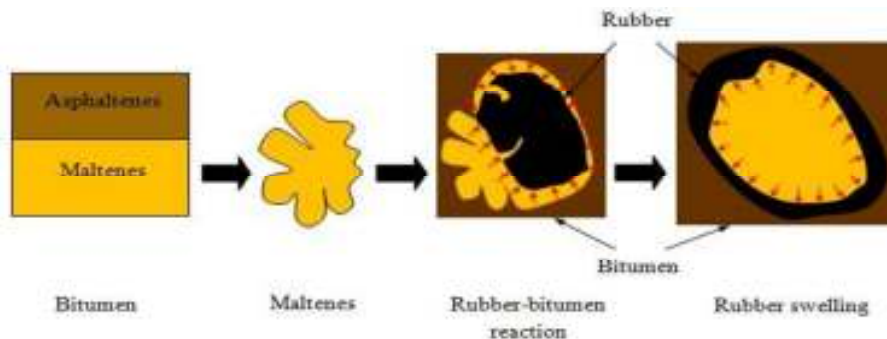
۱- مقدمه

باعث بالا رفتن کیفیت آن و افزایش عمر سرویس دهی رویه راه گردیده و در نتیجه هزینه‌های نگهداری روسازی به میزان چشمگیری کاسته می‌شود (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۵) و (Navarro et al., 2015). یکی از روش‌های متداول اصلاح خواص قیر استفاده از افزودنی‌ها است. در این میان، استفاده مجدد از مواد به عنوان افزودنی بازیافتی یا ضایعاتی با توجه به

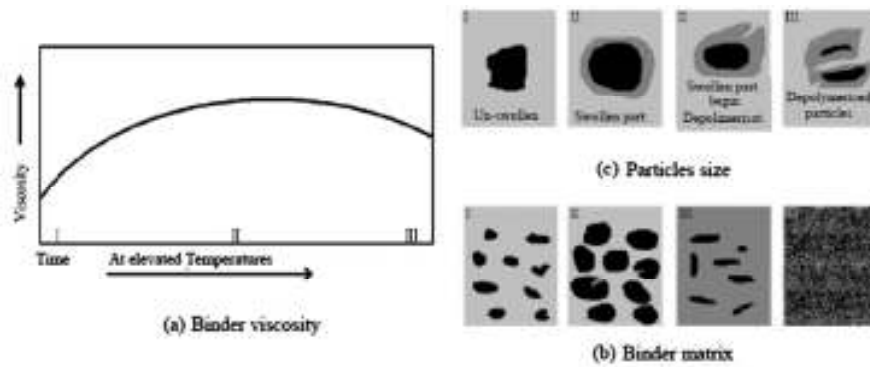
قیر علیرغم درصد وزنی کم در مخلوط بتن آسفالتی، در استحکام رویه راه در مقابل عوامل فرسایشی نقش بسیار مهمی دارد و هرگونه اصلاح در خواص قیر در نهایت به اصلاح عملکرد روسازی آسفالتی خواهد انجامید. قیرهای اصلاح شده عمدتاً عواملی نظیر شیارشدگی، خستگی، ترک انقباضی و چسبندگی مصالح را بهبود می‌بخشند. اصلاح خواص قیر

در فرایند اول، با جذب اجزای سبک قیر توسط پودر لاستیک، قیری با درصد آسفالتین بالا به دست می آید. وجود مقدار زیادی آسفالتین با وزن مولکولی بالا در قیر، باعث افزایش ویسکوزیته و مدول برشی دینامیکی (G^*) قیر می شود. همچنین تورم ذرات پودر لاستیک و کاهش فاصله میان آنها، خود دلیل دیگری برای افزایش ویسکوزیته قیر است (دانشور، ۱۳۹۶). جذب روغن فاز مالتن توسط پودر لاستیک سبب افزایش ویسکوزیته و در نتیجه سبب افزایش ضخامت فیلم قیر بر روی سنگدانه ها در مخلوط آسفالتی می شود. افزایش ضخامت فیلم قیر بر روی سنگدانه ها نیز باعث دوام بیشتر، ترک خوردگی حرارتی و خستگی کمتر مخلوط آسفالتی و کاهش پیرشدگی قیر می شود (Putman and Amirkhanian, 2006). استفاده از قیرهایی با درجه نفوذ پایین سبب کاهش سرعت و میزان تورم پودر لاستیک در قیر می شوند. استفاده از قیرهای با درجه نفوذ بالاتر سبب تاثیر پذیری بیشتر قیر از مشخصات پودر لاستیک می شود. خواص ذرات پودر لاستیک که می تواند بر روی برهمکنش تاثیر گذارند شامل روش تولید، اندازه ذرات، سطح مخصوص و ترکیبات شیمیایی دارد. سطح ذرات پودر لاستیک بیشترین تاثیر را در برهمکنش دارد (Loh et al., 2000) و (Lee et al., 2008). سرعت و شدت واکنش مذکور رابطه ای مستقیم با دما و زمان اختلاط دارد. با اینحال دما و زمان زیاد اختلاط ممکن است باعث تجزیه و تخریب پلیمرهای پودر لاستیک شوند. با تجزیه پلیمری، پیوند و نقاط اتصال زنجیرهای مولکولی گسسته شده و به واحدهایی با جرم مولکولی کمتر تجزیه می شوند. ذرات تجزیه شده داخل قیر پخش و باعث کاهش مدول برشی دینامیکی و کندروانی قیر اصلاح شده می شوند که با هدف اصلاح قیر در تناقض است (Attia and Abdelrahman, 2009). شکل ۲ بیانگر نحوه رخداد پدیده مذکور در قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک است.

اثرات مثبت محیط زیستی می تواند از اهمیت بیشتری برخوردار باشد. لاستیک ضایعاتی یکی از این مواد محسوب می شود. هر لاستیکی که دور انداخته می شود، یک تهدید برای سلامتی جامعه و محیط زیست است. با گسترش حمل و نقل جاده ای، میزان لاستیک های فرسوده و دور ریز سالانه رو به افزایش است. پودر لاستیک (CR)^۱ که از آسیاب کردن لاستیک های مستعمل بدست می آید، راه حل مناسبی برای استفاده بهینه از این ماده دور ریز و تجزیه ناپذیر در طبیعت به شمار می رود (Celik and Atis, 2008). اساسی ترین مزیت کاربرد لاستیک در قیر، انتقال الاستیسیته لاستیک به قیر است، این افزایش در الاستیسیته همچنین باعث افزایش انعطاف پذیری روسازی و در نتیجه کاهش ترک های انقباضی می گردد. افزایش مقاومت در برابر پیری، مقاومت کششی، نرمی، چغرمگی، برجهنگی، سختی و به طور کلی افزایش دوام مخلوط های آسفالتی از جمله نتایج بکارگیری لاستیک در قیر است (Zhong et al., 2002). برهمکنش داخلی بین ذرات پودر لاستیک و قیر از نوع فیزیکی است. در اندرکنش قیر و پودر لاستیک، دوفراپند به صورت همزمان رخ می دهد (Presti, 2013). در فرآیند اول، اجزای سبک تر قیر (آروماتیک های موجود در مالتن) به داخل ذرات پودر لاستیک نفوذ کرده و باعث تورم آنها می شوند، این موضوع در شکل ۱ نشان داده است. طبق تحقیقات صورت گرفته، میزان تورم ذرات پودر لاستیک در اثر این فرآیند بین ۳ تا ۵ برابر است. در فرآیند دوم که شامل حل شدن جزئی ذرات پودر لاستیک داخل قیر است، برخی اجزای روغنی و سبک پودر لاستیک از پودر لاستیک جدا شده و در داخل قیر حل می شوند، اما این مقدار در مقایسه با اجزای سبک و روغنی قیر که به داخل ذرات پودر لاستیک نفوذ کرده اند، ناچیز است. معمولاً محل تجمع اجزای سبک و روغنی جدا شده از ذرات پودر لاستیک، در بخش ترکیبات آروماتیکی قیر قرار دارد. لازم به ذکر است



شکل ۱. تورم ذرات پودر لاستیک در اثر جذب اجزای سبک قیر (Hassan et al., 2014)



شکل ۲. تأثیر افزایش دما و زمان اختلاط بر تجزیه و تخریب ساختار پلیمری و تغییر خواص قیر اصلاح شده (Presti, 2013)

آقاجانی و مقدس نژاد (آقاجانی و مقدس نژاد، ۱۳۹۰) به بررسی اصلاح مشخصات قیر با افزودنی پودر لاستیک توسط آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، بازگشت پذیری الاستیک، کشسانی، نقطه شکست فراس، ویسکوزیته دورانی، 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، افزایش یافت. در ضمن بازه دمایی PG به میزان زیادی افزایش می‌یابد. (صحاف و همکاران، ۱۳۹۳) در تحقیقی از قیر ۶۰/۷۰ و پودر لاستیک در درصدهای وزنی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ برای تهیه قیر لاستیکی استفاده شد و آزمایش‌های کلاسیک قیر شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی، میزان کشش‌پذیری، خاصیت بازگشت‌پذیری و همچنین آزمایش شارپ رئومتر برش دینامیکی (DSR) بر روی نمونه‌های پیرشده و پیرنشده با لعاب نازک دورانی قیر (RTFO) به انجام رسید. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درصد پودر لاستیک به قیر درجه نفوذ کاهش، نقطه نرمی و بازگشت پذیری الاستیک افزایش یافته و همچنین حساسیت حرارتی قیر کمتر شده است، خاصیت کشش‌پذیری در اکثر نمونه‌ها با کاهش همراه بوده است و مقادیر درجه بالای عملکردی در همه نمونه‌ها بهبود یافته است

طباطبایی و کمالی ابیانه (۱۳۸۳) 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 دورانی 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 است. نتایج نشان داد که با افزایش دمای اختلاط و همچنین افزودن مقدار پودر لاستیک ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. 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 (حمیدی و همکاران، ۱۳۸۷) 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 تا ۳۰ درصدی تا ۲۸ و کوچکتر از اندازه ۰٫۴ میلی‌متر استفاده شد. دمای اختلاط از ۱۶۰ الی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد 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 سانتی‌گراد و زمان اختلاط ۷۵ دقیقه بهترین نتایج را از خود نشان داد.

پودرلاستیک و قیر بصورت راحت‌تر و با پراکنش و اثربخشی بیشتر انجام شود.

۲- مواد و مصالح مورد استفاده

قیر پایه مورد استفاده در این پژوهش، از نوع PG 64-16 بود که از شرکت قیر آکام و پودرلاستیک ضایعاتی با سایز مش ۸۰ از شرکت صدرا پوشش طوس مشهد که مقدار دوده آن ۰,۳۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب طبق آزمایش استاندارد (ASTM D1513, 2017) است. خصوصیات قیر استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات قیر مورد استفاده در پژوهش

استاندارد	نتیجه	خصوصیات
ASTM D5	۶۶	درجه نفوذ در ۲۵ سانتی‌گراد، (میلی متر ۰,۱)
ASTM D36	۴۹/۵	نقطه نرمی، سانتی‌گراد
ASTM D113	>۱۰۰	شکل‌پذیری در ۲۵ سانتی‌گراد
ASTM D70	۱/۰۱۸	جرم مخصوص، گرم بر سانتی مترمکعب
ASTM D92	۳۱۵	نقطه اشتغال، سانتی‌گراد

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های قیری

دور اختلاط (rpm)	مقدار افزودنی به نسبت وزنی قیر (%)		کد نمونه	ردیف
	CR	Paraffin Wax		
-	۰	۰	neat	۱
۴۵۰۰	۸	۰	8C	۲
۴۵۰۰	۱۲	۰	12C	۳
۴۵۰۰	۱۶	۰	16C	۴

۳- روش انجام پژوهش

۳-۱ ساخت نمونه‌ها

به طور کلی تعداد ۴ نمونه قیری مورد بررسی قرار گرفت که در آن یک نمونه قیر پایه مطابق مشخصات ذکر شده و نمونه‌های حاوی پودرلاستیک ضایعاتی در درصدهای ۸، ۱۲ و ۱۶ به نسبت وزنی قیر آماده گردیدند. مشخصات نمونه‌های قیر مطابق با جدول ۲ می‌باشد. به منظور اختلاط مواد افزودنی، از دستگاه همزن برشی با دور بالا استفاده شد. نمونه‌ها در دستگاه همزن برشی با دور ۴۵۰۰ rpm به مدت ۷۵ دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت نیروی برشی قرار گرفتند. دمای

در پژوهشی دیگر (Yousefi Kebria et al., 2015)

قیر خالص ۶۰/۷۰ بوسیله پودر لاستیک در درصدهای وزنی ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ اصلاح گردید و آزمایش‌های کلاسیک و شارپ بر روی نمونه‌های قیر انجام شد. نتایج نشان دادند که با افزایش درصد پودر لاستیک، نقطه نرمی افزایش و درجه نفوذ کاهش پیدا می‌کند و پارامتر $G^*/\sin(\delta)$ که نشانگر مقاومت در برابر پدیده شیارشستگی است در دماهای مختلف قبل و بعد از پیرشدگی اولیه افزایش و پارامتر $G^* \times \sin(\delta)$ که نشانگر میزان پتانسیل ترک‌های خستگی در دماهای مختلف هست، کاهش می‌یابد. در درصدهای وزنی ۱۶ الی ۲۰ پودر لاستیک، قیر اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد دارای ویسکوزیته بیش از حد مجاز تعیین شده در سوپریو می‌باشد. در مطالعه تی چیو و چنگ (Te Chiu and ChengLu, 2007) لاستیکی با استفاده از دو نوع خرده لاستیک به اندازه‌های کوچکتر از ۰,۸۵ میلی‌متر و کمتر از ۰,۶ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان داد که مخلوط قیر همراه با ۳۰ درصد خرده لاستیک درشت‌تر برای استفاده در آسفالت مناسب نمی‌باشد. اما قیر لاستیکی شامل ۲۰ درصد خرده لاستیک با اندازه کوچکتر می‌تواند مناسب باشد. شن و همکاران (Shen, et al., 2009) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که دانه‌بندی 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 می‌دهد، 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 از فعل و انفعال می‌شود. براساس مرور مطالعات و پژوهش‌ها مشخص می‌شود که قیر اصلاح شده با پودرلاستیک که تحت عنوان قیر لاستیکی شناخته می‌شود دارای خواص و عملکرد به مراتب بهتری نسبت به قیر پایه است. ولی از آنجایی که در پژوهش‌های قبلی از آزمایش‌های عملکردی تحت استاندارد شارپ کمتر استفاده شده است. لذا در این پژوهش از آزمایش‌های شارپ برای بررسی رفتار رئولوژی قیر استفاده گردید، همچنین از پودرلاستیک با اندازه ریزتر استفاده شد تا اختلاط

(Jnr) یا همان خزش غیر قابل بازگشت برنامه ریزی شده است. بر این اساس برای سطوح ترافیکی مختلف درجه بندی های زیر توصیف شده اند:

S استاندارد- بار ترافیکی استاندارد و کمتر از ۱۰ میلیون محور منفرد معادل

H سنگین- بار ترافیکی در حال حرکت آرام یا بین ۱۰ تا ۳۰ میلیون محور منفرد معادل

V خیلی سنگین- بار ترافیکی ایستا یا بیشتر از ۳۰ میلیون محور منفرد معادل

E بی نهایت- بار ترافیکی ایستا و بیشتر از ۳۰ میلیون محور منفرد معادل

بنابراین پارامتر خزش غیر قابل بازگشت باید شرایط زیر را داشته باشد (شریف زاده و همکاران، ۱۳۹۴):

$$Jnr_{3,2} < 4 \dots\dots\dots S$$

$$Jnr_{3,2} < 2 \dots\dots\dots H$$

$$Jnr_{3,2} < 1 \dots\dots\dots V$$

$$Jnr_{3,2} < 0.5 \dots\dots\dots E$$

آزمایش ها در این پژوهش با شماره استاندارد به شرح جدول ۳ انجام پذیرفتند. همچنین طرح و برنامه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

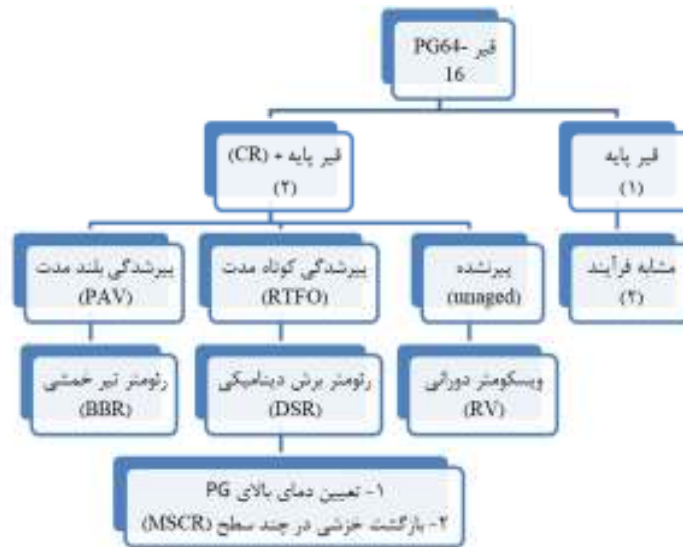
جدول ۳. استاندارد آزمایش های انجام شده

استاندارد		آزمایش
AASHTO	ASTM	
M320-T350	D7175-D7405	رئومتر برش دینامیکی (DSR)
T313	D6648	رئومتر تیرچه خمشی (BBR)
T316	D4402	کند روانی (RV)
T240	D2872	پیرشدگی کوتاه مدت (RTFO)
R28	D6521	پیرشدگی بلند مدت (PAV)

اختلاط در محدوده 180 ± 5 درجه سانتی گراد کنترل شد و به جهت جلوگیری از تخریب و پیرشدگی تحت هیچ شرایطی قیر دمای بیش از ۲۰۰ را تجربه نکرد.

۲-۳- آزمایش ها

به منظور اندازه گیری ویژگی های ویسکوالاستیک قیرها از دستگاه رئومتر برش دینامیکی (DSR)^۲ استفاده می شود. رفتار قیر در دمای بالا و میانی، مجموعه ای از رفتارهای ویسکوالاستیک است. برای تعیین رفتار ویسکوالاستیک قیر لازم است تا پارامترهایی تعیین شوند که اثرات دما و زمان بارگذاری را همزمان در نظر بگیرند. این پارامترها همان مدول مختلط (G^*) و اختلاف فاز (δ) است مدول مختلط معیاری از پایداری قیر در برابر تغییر شکل است و اختلاف فاز نشانه ای از مقادیر نسبی تغییر شکل قابل برگشت و غیر قابل برگشت می باشد. به منظور بررسی خصوصیات قیر در دمای پایین و رفتار خزشی آن از آزمایش رئومتر تیر خمشی (BBR)^۴ استفاده شد. از دستگاه ویسکومتر دورانی (RV)^۵ برای سنجش کندروانی (ویسکوزیته) قیر و همچنین برای شبیه سازی شرایط پیرشدگی کوتاه مدت از آزمایش لعاب نازک دورانی (RTFO)^۱ و برای شبیه سازی شرایط پیرشدگی بلند مدت از آزمایش محفظه تسریع پیری (PAV)^۶ استفاده شد و از آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR)^۷ به منظور بررسی پتانسیل قیر اصلاح شده در برابر شیارشدگی انجام شد. تست های PG برای بررسی وجود پلیمر در قیر می توانند مفید باشند ولی در صورتی که ترافیک ناشی از وسایل نقلیه سنگین و یا سرعت ترافیک کند باشد مانند چهار راه ها، مسیرهای سربالایی، پارکینگ ها و عوارضی ها و ...، درجه بندی قیر را باید افزایش داد، این فرآیند ارتقا درجه بندی نامیده می شود، در صورت ارتقا درجه بندی دمای بالا یک یا دو درجه افزایش می یابد. افزایش درجه بندی قیر به این صورت برای قیرهای پلیمری می تواند اطلاعات نادرست و گمراه کننده ای بدهد. بسیاری از پلیمرها به سرعت در دماهای بالاتر نرم می شوند و همین مسئله می تواند در ارائه نتایج دقیق تاثیر بگذارد. مشخصات و ویژگی های جدید قیر بر پایه فاکتور



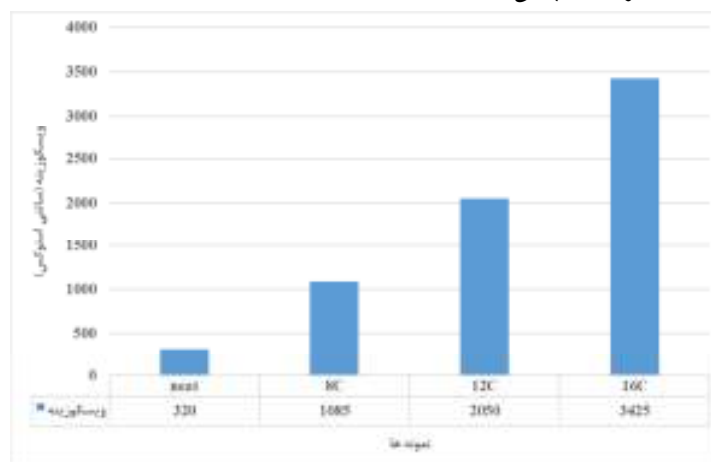
شکل ۲. طرح و برنامه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

۴- نتایج

۴-۱- نتایج آزمایش ویسکومتر دورانی (RV)

آن متورم می‌شوند و در اثر جذب این روغن‌ها میزان آسفالتن در قیر زیاد شده که سبب افزایش ویسکوزیته می‌شود از طرف دیگر وجود ذرات حل نشده پودرلاستیک در قیر باعث افزایش ویسکوزیته به طور مستقیم به خصوص در درصدهای بالا پودرلاستیک می‌شود و حتی ممکن است ذرات پودرلاستیک با یکدیگر تماس پیدا کنند و ویسکوزیته را به طور چشمگیری افزایش دهند که این موضوع در نمونه حاوی ۱۶ درصد پودرلاستیک دیده می‌شود.

این آزمایش در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام پذیرفت. همچنین حداکثر میزان کندروانی مجاز مطابق آیین نامه ۳ پاسکال-ثانیه می‌باشد تا عمل پمپاژ قیر با مشکل رو به رو نشود. نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی در شکل ۳ قابل مشاهده است. همان طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، ویسکوزیته نمونه‌های حاوی ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد پودرلاستیک افزایش قابل توجهی در مقایسه با نمونه شاهد (neat) دارد. پودرلاستیک روغن‌های آروماتیک قیر را جذب می‌کند و ذرات



شکل ۳. نتایج آزمایش ویسکومتر دورانی

۴-۲- نتایج آزمایش تعیین درجه عملکردی (PG)^۹

این آزمایش مطابق با استانداردهای ذکر شده (ASTM D7175) و (AASHTO M320) بر روی نمونه‌های قیری پیر نشده (unaged) و پیر شده کوتاه مدت (RTFO) انجام پذیرفت که بر اساس آن دمای عملکردی بالای قیر توسط دستگاه گزارش شده که به شرح جدول ۴ می‌باشد. لازم به ذکر است حداقل مجاز توصیه شده توسط آیین نامه برای پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$)، ۱ کیلوپاسکال برای قیر پیر نشده و ۲،۲ کیلوپاسکال برای قیر پیر شده می‌باشد. لذا هر کدام که در دمای پایین‌تری این مقدار را پاس کند به عنوان دمای بالای نمونه معرفی می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود که افزودن پودرلاستیک به قیر باعث افزایش دمای بالا PG می‌شود و بیشترین تاثیر را نمونه حاوی ۱۶ درصد پودرلاستیک داشته که ۱۲ درجه سانتی‌گراد (دو درجه عملکردی) دمای بالای PG را افزایش داده است. دلیل آن هم این است که ذرات حل شده پودرلاستیک محیط قیر را بهبود داده و سبب می‌شود که محیط قیر در دمای بالا سفت‌تر شود و وجود ذرات حل نشده نیز مستقیماً سبب سفتی بالاتر می‌شود، در ضمن مشاهده شد پیرشدگی بعد از RTFO تاثیری بر دمای بالای PG نداشته است.

جدول ۴. نتایج دمای بالای عملکردی PG

ردیف	کد نمونه	دمای بالای PG	$(G^*/\sin\delta)$ -temp (Pa)-(°C)	
			Original	RTFO
۱	neat	۶۴	۶۴-۱۱۶۰	۶۴-۲۲۱۰
۲	8C	۷۰	۷۰-۱۲۷۳	۷۰-۲۴۲۱
۳	12C	۷۰	۷۰-۱۸۰۲	۷۰-۳۲۳۲
۴	16C	۷۶	۷۶-۱۳۴۰	۷۶-۳۰۸۶

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

این آزمایش توسط دستگاه DSR انجام پذیرفت. نمونه قیری به تعداد ۱۰ مرتبه تحت بارگذاری ۱۰۰ پاسکال قرار گرفته و سپس بلافاصله به تعداد ۱۰ مرتبه تحت تنش ۳۲۰۰ پاسکال قرار می‌گیرد. در طی هر سیکل بارگذاری، ۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه استراحت و اجازه بازگشت الاستیک داده می‌شود. این آزمایش بر روی نمونه‌های قیری تحت پیرشدگی

کوتاه مدت (RTFO) در دمای بالای عملکردی PG هر نمونه انجام شد. هدف از این آزمایش بررسی پتانسیل شیارشدگی قیر اصلاح شده با پارامترهای J_{nr} (کنش تجمعی غیر قابل بازگشت) و $R\%$ ، درصد بازگشت الاستیک قیر و حساسیت به تنش است. نتایج حاصل از این آزمایش به شرح جدول ۵ می‌باشد. در مقایسه بین نمونه‌های 8C، 12C و 16C دیده می‌شود که افزایش درصد پودرلاستیک تاثیر مثبت بر J_{nr} داشته و رفتار الاستیک و بالتبع مقاومت قیر در برابر شیارشدگی را افزایش داد. بویژه نمونه حاوی ۱۶ درصد افزودنی، سطح ترافیکی H که شامل تحمل بار ترافیک سنگین (۱۰ تا ۳۰ میلیون محور منفرد معادل) یا در حال حرکت آرام است را بدست آورد.

جدول ۵. نتایج حاصل از آزمایش MSCR

ردیف	کد نمونه	دمای آزمایش	درجه سطح ترافیک	J_{nr} 0.1 (kPa^{-1})	J_{nr} 3.2 (kPa^{-1})	J_{nr} diff
۱	neat	۶۴	S	۲/۲۸	۳/۶۵	۷۳
۲	8C	۷۰	S	۲/۱۴	۳/۳۲	۶۹
۳	12C	۷۰	S	۱/۸۰	۲/۸۴	۷۴
۴	16C	۷۶	H	۱/۳۱	۱/۹۳	۷۰

۴-۴- نتایج آزمایش رئومتر خمشی (BBR)

رئومتر تیر خمشی مقدار افت و خیز نمونه قیری را تحت بار ثابت در دمای ثابت اندازه‌گیری می‌کند. با اعمال بار ثابت به وسط تیرچه و اندازه‌گیری خیز تیر در مدت ۴ دقیقه آزمایش، سفتی خزشی (S_t) و مقدار نرخ تغییرات سفتی خزشی (m_t) بر حسب زمان تعیین می‌شود که نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۶ آورده شده است. بر اساس آیین‌نامه مقدار m -value که شیب نمودار لگاریتم سفتی در مقابل لگاریتم زمان است، باید بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۳ باشد. سفتی خزشی که بیانگر مقاومت آسفالت تحت بار ثابت است نیز باید حداکثر ۳۰۰ مگاپاسکال باشد. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، درجه عملکردی (PG) نمونه‌های قیری این پژوهش در جدول ۶ قابل مشاهده است. افزودن پودرلاستیک به قیر تاثیر مناسبی در بهبود عملکرد قیر در دمای پایین دارد. سفتی خزشی (S_t) برای نمونه‌های 8C و 12C و 16C در دمای ۱۲- ابتدا

درصد اختلاط ارایه شده است، لازم به ذکر است استعمال قیمت مواد مربوط به شهریور ماه سال ۱۳۹۸ می‌باشد. شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی درجه عملکردی قیرها در مناطق مختلف کشور ایران است که با همکاری شرکت نفت پاسارگاد و پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تهیه شده و بیانگر این مطلب است که قیر ۶۰/۷۰ که عمده قیر تولید داخل کشور است، برای استفاده در همه مناطق آب و هوایی ایران مناسب نیست. پس پژوهشگر بر این اساس در پژوهش خود با انجام آزمایش‌های رئولوژی به ساخت قیرهای مورد استفاده برای بعضی از استان‌ها که قیر ۶۰/۷۰ قابل استفاده نیست، پرداخته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که نمونه‌ی 8C که یک درجه دمای بالا و پایین عملکردی قیر را نسبت به قیر پایه افزایش می‌دهد (PG64-16) را به PG70-22 ارتقا می‌دهند) و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است برای استفاده در دروسازی استان‌های فارس، بوشهر، هرمزگان، کرمان، زاهدان، یزد، قم، سمنان، ایلام، تنب بزرگ، تنب کوچک، جزیره کیش، بعضی از مناطق استان اصفهان و کرمانشاه، یاسوج و شهرکرد مفید است، همچنین نمونه 16C که سبب افزایش در دو درجه دمای بالا عملکردی و یک درجه دمای پایین عملکردی نسبت به قیر پایه می‌شود (PG64-16) را به PG76-22 ارتقا می‌دهد، پاسخ گوی نیاز استان خوزستان برای استفاده در روسازی‌های آن به سبب افزایش دماست که می‌تواند از بروز خرابی‌ها در این استان جلوگیری کند.

جدول ۸. قیمت هر کیلوگرم از قیر پایه و افزودنی‌های به کار رفته در این پژوهش

ماده	قیر PG64-16	پودرلاستیک ضایعاتی
قیمت (تومان)	۴۰۰۰	۴۵۰۰

جدول ۹. هزینه ساخت هر کیلوگرم از ترکیب‌ها

ردیف	کد نمونه	قیمت (تومان)
۱	neat	۴۰۰۰
۲	8C	۴۰۴۰
۳	12C	۴۰۶۰
۴	16C	۴۰۸۰

افزایش و سپس کاهش دارد و برای نمونه 12C بیشترین است، دلیل آن این است که در نمونه 8C ذرات حل نشده پودرلاستیک کمتری وجود دارند و تمرکز تنش دور این ذرات کمتر از نمونه 12C است. در هر دو نمونه 8C و 12C اثر پودرلاستیک (بخش حل شده پودرلاستیک) بر بهبود قیر (محیط قیر) کمتر از نمونه 16C است که بیشترین میزان پودرلاستیک را دارد و به این دلیل با توجه به میزان بیشتر پودرلاستیک در نمونه 16C سفتی خزشی (S_t) برای آن از دو نمونه 8C و 12C کمتر است و همچنین مقدار m -value برای دو نمونه ۸ و ۱۶ درصد پودرلاستیک بیشتر از ۰/۳ است که مقدار مناسبی است ولی برای نمونه ۱۲ درصد پودرلاستیک از مقدار تعیین شده (۰/۳) کمتر است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، درجه عملکردی (PG) هریک از نمونه‌ها به شرح جدول ۷ می‌باشد.

جدول ۶. نتایج دمای پایین عملکردی PG

ردیف	کد نمونه	سفتی خزشی (S_t)			m-value در دمای مربوطه	دمای پایین PG
		۰	-۶	-۱۲		
۱	neat	-	۸۳	-	۰/۳۶	-۱۶
۲	8C	-	-	۱۰۱	۰/۳۱	-۲۲
۳	12C	-	-	۱۱۱	۰/۲۸	-۱۶
۴	16C	-	-	۷۶	۰/۳۴	-۲۲

جدول ۷. درجه عملکردی (PG) نمونه‌های قیری

ردیف	کد نمونه	درجه عملکردی (PG)
۱	neat	PG64-16 S
۲	8C	PG70-22 S
۳	12C	PG70-16 S
۴	16C	PG76-22 H

۵- بررسی اقتصادی

پارامترهای اقتصادی را می‌توان یکی از عوامل موثر در ارزیابی پروژه‌های مهندسی دانست. برای بررسی اقتصادی قیرهای اصلاح شده با افزودنی، مطابق جدول ۸، با در نظر گرفتن قیمت تقریبی افزودنی پودرلاستیک قیمت یک کیلوگرم از نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش تعیین شدند. در جدول ۹ هزینه ساخت هر کیلوگرم از ترکیب‌ها با توجه به



شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی درجه عملکردی قیرها در ایران

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از پودرلاستیک ضایعاتی به جهت بهبود قیر استفاده شد که نتایج حاصل از آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشد:

به جهت تعیین ویسکوزیته از آزمایش ویسکومتر دورانی (RV) استفاده گردید و مشاهده شد که افزودن پودرلاستیک باعث افزایش ویسکوزیته قیر پایه می‌شود. همچنین با افزودن درصد‌های بیشتر پودرلاستیک، ویسکوزیته نیز افزایش می‌یابد. پودرلاستیک به دو دلیل باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود دلیل اول اینکه پودرلاستیک روغن قیر را جذب می‌کند و دلیل دوم اینکه ذرات پودرلاستیک در کنار یکدیگر ویسکوزیته را مجدداً افزایش می‌دهند. برای تعیین درجه عملکردی قیر در دمای بالا از دستگاه رئومتر برش دینامیکی (DSR) انجام شد، که نشان داد افزودن پودرلاستیک به قیر باعث افزایش دمای بالا PG می‌شود و بیشترین تأثیر را نمونه حاوی ۱۶ درصد پودرلاستیک داشته که ۱۲ درجه سانتی‌گراد (دو درجه عملکردی) دمای بالای PG را افزایش داده است. دلیل آن هم این است که ذرات حل شده پودرلاستیک محیط قیر را بهبود داده و سبب می‌شود که محیط قیر در دمای بالا سفت‌تر شود و وجود ذرات حل نشده نیز مستقیماً سبب سفتی بالاتر می‌شود، در ضمن مشاهده شد پیرشدگی بعد از RTFO تأثیری بر دمای بالای PG نداشته است.

- در مقایسه بین نمونه‌های 8C، 12C و 16C دیده می‌شود که افزایش درصد پودرلاستیک تأثیر مثبت بر Jnr داشته و رفتار الاستیک و بالتبع مقاومت قیر در برابر شیارشدگی را افزایش داد

بوئزه نمونه حاوی ۱۶ درصد افزودنی، سطح ترافیکی H که شامل تحمل بار ترافیک سنگین (۱۰ تا ۳۰ میلیون محور منفرد معادل) یا در حال حرکت آرام است را بدست آورد.

- برای تعیین درجه عملکردی قیر در دمای پایین از آزمایش رئومتر تیر خمشی (BBR) استفاده شد که نشان داد افزودن پودرلاستیک به قیر تأثیر مناسبی در بهبود عملکرد قیر در دمای پایین دارد. سفتی خزشی (S_t) برای نمونه‌های 8C و 12C و 16C در دمای ۱۲- ابتدا افزایش و سپس کاهش دارد و برای نمونه 12C بیشترین است، دلیل آن این است که در نمونه 8C ذرات حل نشده پودرلاستیک کمتری وجود دارند و تمرکز تنش دور این ذرات کمتر از نمونه 12C است. در هر دو نمونه 8C و 12C اثر پودرلاستیک (بخش حل شده پودرلاستیک) بر بهبود قیر (محیط قیر) کمتر از نمونه 16C است که بیشترین میزان پودرلاستیک را دارد و به این دلیل با توجه به میزان بیشتر پودرلاستیک در نمونه 16C سفتی خزشی (S_t) برای آن از دو نمونه 8C و 12C کمتر است و همچنین مقدار m-value برای دو نمونه ۸ و ۱۶ درصد پودرلاستیک بیشتر از ۰/۳ است که مقدار مناسبی است ولی برای نمونه ۱۲ درصد پودرلاستیک از مقدار تعیین شده (۰/۳) کمتر است.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که نمونه‌ی 8C که یک درجه دمای بالا و پایین عملکردی قیر را نسبت به قیر پایه افزایش می‌دهد (PG64-16) را به PG70-22 ارتقا می‌دهند) و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است برای استفاده در در

طباطبایی، ن. و کمالی ابیانه، ز.، (۱۳۸۳)، "بررسی رفتار کندروانی قیر VB اصلاح شده با پودر لاستیک"، دومین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، موسسه قیر و آسفالت ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

صحاف، س.ع. و چوگونی، م. و ابادری طریقه، ن. و علیزاده، ع.، (۱۳۹۳)، "اصلاح خواص قیر با استفاده از پلیمرهای پلی اتیلن سبک و پودر لاستیک در مناطق گرمسیر"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی.

شریف زاده، ا. و ملکوتی خواه، ع. و عیسی زاده، م.، (۱۳۹۴)، "پدیده شیارشدگی جاده‌ای و آزمون MSCR"، هفتمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی.

-Attia, M., & Abdelrahman, M., (2009), "Enhancing the performance of crumb rubber-modified binders through varying the interaction conditions", International Journal of Pavement Engineering, 10(6), pp.423-434.

-Celik, O.N. and Atis, C.D., (2008), "Compactibility of hot bituminous mixtures made with crumb rubber-modified binders," Construction and Building Materials, ISSN. 0950-0618, Vol. 22, Issue: 6, pp. 1143-1147.

-Hassan, N. A., Airey, G. D., Jaya, R. P., Mashros, N., & Aziz, M. A., (2014), "A review of crumb rubber modification in dry mixed rubberised asphalt mixtures", Journal Teknologi, 70(4), pp.127-134.

-F. J. Navarro, P. Partal, F. Martínez-Boza, C. Valencia, and C. Gallegos, (2012), "Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens," Chemical Engineering Journal, Vol. 89, No. 1-3, pp.53-61.

-Presti, D. L., (2013), "Recycled tyre rubber modified bitumen for road asphalt mixtures: a literature review", Construction and Building Materials, 49, pp.863-881.

-Putman, B.J and Amirkhani, S.N., (2006), "Crumb Rubber Modification of Binders:

روسازی استان‌های فارس، بوشهر، هرمزگان، کرمان، زاهدان، یزد، قم، سمنان، ایلام، تنب بزرگ، تنب کوچک، جزیره کیش، بعضی از مناطق استان اصفهان و کرمانشاه، یاسوج و شهرکرد مفید است، همچنین نمونه 16C که سبب افزایش در دو درجه دمای بالا عملکردی و یک درجه دمای پایین عملکردی نسبت به قیر پایه می‌شود (PG64-16) را به PG76-22 ارتقا می‌دهد، پاسخ گوی نیاز استان خوزستان برای استفاده در روسازی های آن به سبب افزایش دماست که می‌تواند از بروز خرابی‌ها در این استان جلوگیری کند.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Crumb Rubber, CR
2. High Shear Mixer
3. Dynamic Shear Rheometer, (DSR)
4. Bending Beam Rheometer, (BBR)
5. Rotational Viscometer, (RV)
6. Rolling Thin Film Oven, (RTFO)
7. Pressure Aging Vessel, (PAV)
8. Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)
9. Performance Grading, (PG)

۸- مراجع

-آقاجانی، پ. و مقدس‌نژاد، 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.

-دانشور، د.، (۱۳۹۶)، "بررسی روش‌های مختلف اصلاح با پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی سرد"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

-رحیمی، ا.، ابوطالبی اصفهانی، م. و گلی خوراسگانی، ا.، (۱۳۹۵)، "بررسی تاثیر استفاده از پودر لاستیک و ساسوبیت بر مقاومت روسازی آسفالتی"، هشتمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی- سازمان راهداری حمل و نقل جاده‌ای، معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران- شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک.

-Yousefi Kebria, D., 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.

- Zhong, X. Zeng, Xiangwu & Rose, J., (2002), "Shear Modulus and Damping Ratio of Rubber-modified Asphalt Mixes and Unsaturated Subgrade Soils", *Journal of Materials in Civil Engineering*, J mater civil engineering.

Interaction and Particle Effects", *Road Materials and Pavement Design*.

-Shen J., Amirkhanian S., 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, pp.304-310.

-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.

-Lee, S. J., Akisetty, C. K., & Amirkhanian, S. N., (2008), "The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements", *Construction and Building Materials*, 22(7), pp.1368-1376.

-Loh, S. Kim, S and Bahia, h., (2000), "Characterization of Simple and Complex Crumb Rubber Modified Binders", *Wisconsin Department of Transportation*.

Evaluation of Performance Grade of Modified Bitumen with Waste Crumb Rubber Using SHRP and SHRP Plus Tests

Majid Ghasemi, M.Sc., Student, Department of Highway and Transportation, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Shahin Shabani, Assistant Professor, assistance professor. civil engineering department, Faculty of engineering, payam noor university of tehran, Iran.

Parham Hayati, Assistant Professor, Department of Highway and Transportation, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic, Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: majid_ghasemie@yahoo.com

Received: March 2021-Accepted: July 2021

ABSTRACT

The direct impact of bitumen properties on the performance of asphalt mixtures has made bitumen behavior modification one of the key issues for researchers. Studies in this area have shown that waste Crumb Rubber have positive and acceptable effects on classical behavior of bitumen, but the rheological behavior of bitumen has been less studied. In this study, 8, 12 and 16 percent of Waste Crumb Rubber (#80 sieve size) by the weight of bitumen were used and then SHRP tests including Rotational Viscometer (RV), Dynamic Shear Rheometer (DSR), Bending Beam Rheometer (BBR), Rolling Thin-Film Oven (RTFO) and Pressure Aging Vessel (PAV) and SHRP Plus test including Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) were performed on the samples. Finally the Performance Grade (PG) of bitumens was evaluated by standard method and also by the results of MSCR test. The results showed that with increasing CR percentage, viscosity and high temperature PG increased so that the sample containing 16 percent CR had the highest temperature grade. Also aging after RTFO had no effect on high temperature of PG. Increasing the CR had a positive effect on Jnr and increased the elastic behavior and consequently the bitumen's rutting resistance, especially the specimen containing 16 percent CR achieved the H traffic level which included heavy traffic load (10 to 30 ESALs) or slow moving. It also improved the low-temperature performance of bitumen for samples containing 8 and 16 percent of CR. Review of the PG map of Iran showed that bitumen containing waste Crumb rubber is usable in most parts of the country

Keywords: LSHRP tests, waste Crumb Rubber, Performance Grade (PG), Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)