

ارزیابی حساسیت رطوبتی و مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک و پودر لاستیک فرآوری شده

امیر کاووسی^{۱*}، مهرداد دوستی، مهدی آذرنیا^۲

۱. استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس
۳. دانشجوی دکتری عمران گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

Kavussia@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش

تاریخ دریافت

چکیده

پژوهشگران روسازی در دهه‌های اخیر به منظور بهبود مشخصات و ویژگی‌های رئولوژیکی قیر اقدام به استفاده از افزودنی‌های اصلاح‌کننده مانند پودر لاستیک و عملکرد مخلوط آسفالتی نموده‌اند. پودر لاستیک علاوه بر بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، همچون افزایش عمر خستگی، مقاومت شیار شدگی و کاهش حساسیت رطوبتی، نقش مؤثری در اهداف محیط‌زیستی ایفا دارد. با وجود مزایای ذکر شده، استفاده از پودر لاستیک به روش‌تر در روسازی‌های آسفالتی با مشکلاتی مانند افزایش هزینه تولید، پیرشدگی اولیه و دلمه و دوفازی شدن قیر لاستیکی همراه بوده است. یکی از روش‌های نوین تسهیل در استفاده از پودر لاستیک، فرآوری آن با مواد معدنی فعال‌کننده سطحی است که منجر به تولید پودرلاستیک فرآوری شده شده که به صورت خشک در تهیه مخلوط آسفالتی به کار برده می‌شود. در این روش پودرلاستیک با افزودنی‌های شیمیایی و قیر ترکیب شده و محصولی تولید می‌شود که به آسانی در دماهای متداول اختلاط با مصالح سنگی مخلوط می‌شود. با توجه به جدید بودن این ماده، نیاز است تا پژوهش‌های جامع آزمایشگاهی در راستای ارزیابی مشخصات قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با آن انجام شود. بدین منظور، در این پژوهش با به کارگیری پودرلاستیک فرآوری شده حساسیت رطوبتی و مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی با انجام آزمایش‌های کشش غیر مستقیم استاتیکی و دینامیکی (ITS^۱ و ITFT^۳) مورد ارزیابی قرار گرفته و نمونه‌های تهیه شده با قیر لاستیکی تولید شده به روش متداول تر مقایسه شد. نتایج حساسیت رطوبتی نمونه‌ها نشان داد که استفاده از هر دو افزودنی پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده مقاومت نمونه‌ها را در شرایط خشک و اشباع بهبود بخشید به گونه‌ای که نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک ساده و فرآوری شده به ترتیب دارای ۲۲ و ۲۴ درصد

1. Indirect Tensile Strength
2. Indirect Tensile Fatigue Test

مقاومت کششی بیشتر نسبت به نمونه شاهد هستند. این در حالی است که پودرلاستیک فرآوری شده عملکرد به مراتب بهتری نسبت به پودرلاستیک ساده داشته و این موضوع در شرایط اشباع محسوس‌تر است. از سوی دیگر، نتایج آزمایش خستگی نشان داد که نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده با ۲۰٪ پودرلاستیک فرآوری‌شده، در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی حاوی پودرلاستیک تهیه شده به روش تر، ۱۱ درصد عمرخستگی بیشتر از خود نشان دادند. نتایج فوق نشان می‌دهند که به طوری کلی استفاده از پودرلاستیک فرآوری‌شده عملکرد بهتر نمونه‌های آسفالتی را موجب می‌شوند.

واژه های کلیدی: خستگی مخلوط آسفالتی، حساسیت رطوبتی، پودرلاستیک فرآوری شده، قیرلاستیک

۱- مقدمه

زوال و از بین رفتن روسازی‌های آسفالتی متأثر از شدت بارگذاری، شرایط سخت آب و هوایی، ضعف مشخصات و ویژگی‌های لایه‌های روسازی است. ترک‌های خستگی از انواع خرابی‌های سازه‌ای روسازی‌های آسفالتی به شمار می‌رود که موجب کاهش عمر روسازی شده و به صورت مستقیم در کیفیت و سطح سرویس‌دهی رویه‌های آسفالتی تأثیر دارند [1,2]. ترک‌های خستگی در اثر انباشت ترک‌های ناشی از بارگذاری ترافیکی واقع می‌شوند [3,4].

در طول عمر خدمت‌دهی روسازی، پیرشدگی قیر و تکرار بارگذاری ترافیکی موجب کاهش رفتار ارتجاعی و مقاومت کششی لایه آسفالتی می‌شود که در نتیجه آن ریزترک‌ها در قسمت پایین لایه آسفالتی آغاز و به سطح رویه گسترش می‌یابد [5-7].

از طرف دیگر، پارامترهای محیطی همچون نفوذ آب و رطوبت به درون لایه‌های روسازی نیز می‌تواند شدت گسترش ترک‌های خستگی را افزایش دهد [8].

خرابی رطوبتی از جمله مشکلات روسازی‌های آسفالتی در طول دوران بهره‌برداری بشمار می‌رود که در اثر شرایط آب‌و-هوایی اتفاق افتاده و می‌تواند به شدت مقاومت و عمر روسازی را کاهش دهد [9, 10]. در واقع، پوشش ضعیف مصالح سنگی توسط قیر وضعف چسبندگی قیر و مصالح سنگی تحت اثر سیکل‌های ذوب و یخ موجب کاهش مدول سختی و مقاومت سازه‌ای مخلوط آسفالتی می‌شود. در نتیجه، حساسیت رطوبتی می‌تواند مقاومت روسازی را در برابر تنش‌ها و کرنش‌های وارد شده در اثر بارگذاری ترافیکی تحت تأثیر قرار دهد [11, 12].

حساسیت رطوبتی یک خرابی پیچیده بوده که دارای سه سازوکار مختلف است. گروه اول شامل ویژگی شیمیایی و فیزیکی قیر و مصالح سنگی بوده و گروه دوم شامل مشخصات مخلوط آسفالتی همچون درصد قیر مخلوط، ضخامت پوشش قیری اطراف مصالح سنگی و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی است. کیفیت روسازی، ترافیک و شرایط محیطی نیز از جمله عوامل مربوط به گروه سوم است [9, 13]. از سوی دیگر همزمان شدن تنش ایجاد شده و نفوذ رطوبت به درون لایه‌های روسازی در اثر تکرار بارگذاری‌های ترافیکی می‌تواند مقاومت چسبندگی مخلوط آسفالتی را کاهش داده و جدا شدگی قیر از مصالح سنگی را تسریع کرده و بستر مناسبی برای ایجاد سایر خرابی‌ها و اضمحلال زود هنگام روسازی شود [12]. [14]. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داده است که خرابی رطوبتی می‌تواند مدول سختی مخلوط آسفالتی را تا ۲۵٪ و عمر خستگی را نیز تا ۳۰٪ کاهش و پتانسیل شیاردگی را تا ۶۰٪ افزایش دهد [15].

به منظور کاهش خرابی‌های روسازی، ضروری است تا مشخصات لایه رویه آسفالتی که بیشتر در معرض عوامل مخرب قرار دارد، اصلاح شود. استفاده از افزودنی‌هایی مانند الیاف، پلیمر و لاستیک به منظور اصلاح قیر یکی از متداول‌ترین رویکردهای بهبود عملکرد و مشخصات مکانیکی روسازی‌های آسفالتی است [16].

پژوهش‌های گذشته نشان داده است که استفاده از پودرلاستیک در روسازی‌های آسفالتی افزایش عمر روسازی، افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و شیاردگی، کاهش آلودگی صوتی و به طور کلی کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به همراه دارد [17-22]. در حال حاضر، از دو

از این روی، در این پژوهش به بررسی و مطالعه آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی، مدول سختی و عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک فرآوری شده (تهیه شده در مرکز تحقیقات روسازی گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس) پرداخته شده و نتایج آن با نمونه شاهد و نمونه-های اصلاح شده با قیر لاستیکی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و آزمایش ها

۲-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع سیلیسی و از معادن استان تهران تهیه شده است. قیر مورد کاربرد از نوع قیر خالص ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران بوده است. نتیجه آنالیز شیمیایی فیلر مصالح سنگی در جدول (۱) آورده شده است. در شکل (۱) دانه بندی مخلوط انتخاب شده و محدوده دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی نشان داده شده است. نتیجه آزمایش های صورت گرفته روی مصالح سنگی و قیر خالص مورد استفاده نیز در جدول های (۱ تا ۳) آورده شده است. نتایج XRF_2 مصالح حاکی از مقادیر بالای سیلیس در فیلر مصالح سنگی (در حدود ۵۰ درصد) بود و می توان این مصالح را جزء سیلیسی دسته بندی نمود.

۲-۲- پودر لاستیک

پودرلاستیک استفاده شده در این پژوهش از کارخانه یزد تایر و از تایرهای ضایعاتی خودروهای سواری و خودروهای سنگین بوده و در فرآیند خرد کردن در دمای محیط تولید شده است. این محصول در مقایسه با نوع تهیه شده با روش برودتی دارای ذرات با شکل نامنظم و سطح زبر است که با قیر بهتر واکنش داده و قیرلاستیکی تهیه شده در مقایسه با پودرلاستیک تهیه شده به روش برودتی زبرتر و نامنظم تر است که سبب واکنش بهتر با قیر می شود [23].

روش "خشک" و "تر" برای به کارگیری پودرلاستیک در روسازی آسفالتی استفاده می شود. در روش خشک، پودرلاستیک به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی عمل کرده و با مصالح سنگی داغ قبل از اضافه شدن قیر ترکیب می شود. در روش تر نیز ابتدا پودرلاستیک و قیر داغ در دمای بالا و تحت شرایط خاصی با یکدیگر ترکیب شده و سپس به مصالح سنگی اضافه می شوند [23-25].

این در حالی است که پژوهش های گذشته نشان داده است که روش تر عملکرد بهتری برای اصلاح و بهبود مشخصات قیر و مخلوط آسفالتی دارد [26, 27]. با وجود مزایایی که استفاده از پودرلاستیک به روش تر به همراه دارد، مشکلاتی مانند نیاز به اعمال دمای بالا برای اختلاط قیر و پودرلاستیک، دمای بالا برای تراکم مخلوط آسفالتی، تجهیز کارخانه آسفالت، هزینه تولید اولیه و امکان دلمه و دوفازی شدن قیر اصلاح شده موجب شده تا استفاده از این افزودنی چندان مورد استقبال قرار نگیرد [23, 26]. این امر موجب شده تا در سال های اخیر پژوهشگران با استفاده از روش های مختلف همچون گرمایش نمونه با امواج ماکروویو، استفاده از هیدروژن پراکسید، مواد شیمیایی متورم کننده و ماده معدنی فعال کننده سطح به فرآوری پودرلاستیک بپردازند. در جدیدترین توسعه، پودرلاستیک فرآوری شده طراحی و ابداع شد که امکان اضافه کردن آن به صورت خشک فراهم است.

پژوهشهایی که تاکنون در زمینه استفاده از پودرلاستیک فرآوری شده به عنوان اصلاح کننده در قیر و مخلوط آسفالتی انجام شده، نشان می دهد که استفاده از این افزودنی بهبود چشمگیر مشخصات قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر خرابی هایی مانند خستگی، شیارشدگی و حساسیت رطوبتی را به همراه داشته است [28-32].

با توجه به اینکه فرآوری پودرلاستیک با استفاده از ماده پایدارکننده معدنی یک رویکردی جدید دارد، نیاز است تا پژوهش های آزمایشگاهی بیشتری در زمینه عملکرد مخلوط-های آسفالتی اصلاح شده با آن صورت پذیرد.

میزان رطوبت موجود در آن مطابق استانداردهای فنی گزارش شده بوده و کمتر از ۰/۰۷۵ درصد وزنی آن است. در جدول ۴، دانه‌بندی پودر لاستیک استفاده شده نشان داده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش XRF فیلر مصالح سنگی

Percent loss	SO ₃	Sr	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O	Al ₂ O ₃	Elements SiO ₂ (%)
1.94	0.039	0.033	0.165	1.984	2.633	2.044	14.31	3.466	10.98	52.74

Table 1. XRF testing results of the aggregates

جدول ۲. وزن مخصوص مصالح سنگی منتخب

Test	Specification	Result
Coarse aggregates		
Bulk Specific gravity (g/cm ³)	ASTM C127	2.468
SSD Specific gravity (g/cm ³)		2.628
Apparent Specific gravity (g/cm ³)		1.2
Abrasion loss (%)	ASTM C131	29
Fine aggregates		
Bulk Specific gravity (g/cm ³)	ASTM C128	2.477
SSD Specific gravity (g/cm ³)		2.645
Apparent Specific gravity (g/cm ³)		2.664

Table 2. Physical properties of aggregates.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های قیر خالص مورد استفاده

Test	Value	Standard method
Penetration (100 g, 5 s, 25°C), 0.1 mm	64	ASTM D5
Specific gravity at 25°C (g/cm ³)	1.02	ASTM D70
Softening point (°C)	51	ASTM D36
Ductility (25 °C, 5 cm/min), cm	112	ASTM D113
Flash Point (°C)	262	ASTM D92

Table 3. Physical properties of the bitumen binder

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی

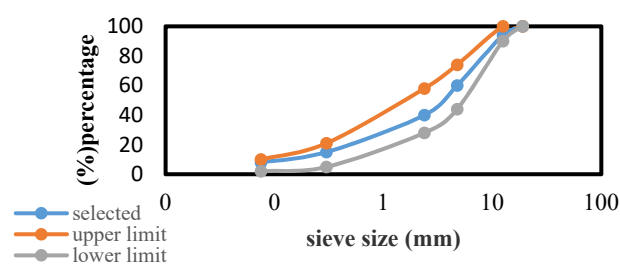


Fig 1. Gradation of the crumb rubber used in this research

۳- قیر اصلاح شده با پودرلاستیک

قیر اصلاح شده با پودرلاستیک مرسوم به روش تر در این پژوهش مطابق با استاندارد ASTM D-8 تهریه شده است. طبق این استاندارد قیر لاستیکی به صورت ترکیبی از قیر، پودرلاستیک، روغن‌های روان کننده و مواد افزودنی خاص است که باید در دما و طول زمان کافی با هم اختلاط یافته و واکنش دهند [23]. برای تهریه قیر اصلاح شده با پودرلاستیک از دستگاه مخلوط کن برشی سریع استفاده شده است. قیر و پودرلاستیک به مدت ۶۰ دقیقه، با سرعت چرخشی ۵۰۰۰ دور در دقیقه و شرایط کنترل دمای ۱۷۵ درجه سانتی گراد در دستگاه مخلوط کن با هم ترکیب شدند. در نهایت قیر اصلاح شده با پودرلاستیک در مقادیر ۱۶ تا ۲۰ درصد پودرلاستیک (مطابق با برنامه آزمایش‌ها) تهریه و نتایج آزمایش‌های آن در جدول (۵) آورده شده است (با این وجود، آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی به عنوان روش‌های قابل اعتماد برای توصیف ویژگی‌های فیزیکی قیرهای اصلاح شده با پودرلاستیک در نظر گرفته نمی‌شوند).

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های قیر اصلاح شده با پودرلاستیک

Test	Crumb Rubber Content		
	16%	18%	20%
Penetration at 25 °C, 100 g, (0.1 mm)	58.7	53	46
Softening point (°C)	59	65	67
Specific gravity (g/cm ³)	1.11	1.15	1.18

Table 5. Results of Crumb Rubber modified asphalt

۴-۲- پودرلاستیک فرآوری شده

مرکز تحقیقات راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس با همکاری گروه شیمی بر پایه روش و رویکرد فرآوری پودرلاستیک تهریه شده توسط Sousa و همکاران [29]، به مطالعه و توسعه طرح فرآوری پودرلاستیک با استفاده از مواد و امکانات موجود در ایران پرداخت و یک محصول جدید به نام پودرلاستیک

فرآوری شده را تولید نمود. محصول جدید ترکیبی از قیر نرم به مقدار تقریبی ۱۸ درصد، ۶۰ درصد پودرلاستیک، ۲۰ درصد ماده پایدارکننده فعال (AMBS⁺) و ۲ درصد فیلر معدنی است. ماده پایدارکننده از سنتز یک ماده شیمیایی فعال‌ساز سطح بر روی یک ماده معدنی (سیلیکا) به عنوان بستر پایدارساز تشکیل شده است. استفاده از این ترکیب سنتز شده این امکان را فراهم می‌آورد که در ادامه پودرلاستیک فرآوری شده در مدت کوتاه و بدون نیاز به دستگاه مخلوط کن برشی با قیر ترکیب شود. در واقع استفاده از این ماده موجب افزایش بارهای سطحی روی پودرلاستیک و افزایش قدرت پیوند اتصال قیر و لاستیک شود. همچنین استفاده از این رویکرد موجب کنترل تورم پودرلاستیک در مراحل اختلاط و تراکم می‌شود که در نتیجه آن کنترل و حفظ درصد فضای خالی مدنظر تسهیل می‌شود [33].

۳- تهریه نمونه‌ها

به منظور ارزیابی مقاومت خستگی و حساسیت رطوبتی مخلوط شاهد و مخلوط‌های اصلاح شده نمونه‌های مختلف تهریه شد. در این پژوهش نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده در مقادیر مختلف (۱۶ تا ۲۰٪ وزن قیر) به ترتیب به روش تر و خشک مطابق با جدول (۶) تهریه شدند. لازم به ذکر است که مخلوط آسفالت‌های اصلاح شده با پودرلاستیک به دلیل افزایش ویسکوزیته در دمای کمی بالاتر (بیش از ۱۶۵ درجه سانتیگراد) تهریه شده اند. برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌ها، نمونه‌های مارشال مطابق روش ASTM D1559 ساخته شدند [34]. براساس پارامترهای مارشال، درصد قیر بهینه ۵/۸ برای همه نمونه‌ها تعیین شد.

و شکسته شدن آن در امتداد این قطر می‌شود. برای محاسبه مقاومت کششی غیرمستقیم از رابطه ۱ استفاده شده است:

$$ITS = 2000P / \pi DT \quad (۱)$$

در این رابطه:

ITS = مقاومت کششی غیرمستقیم (kPa)

P = بیشینه بار وارد شده بر حسب نیوتن

t = ضخامت نمونه بر حسب میلی متر

D = قطر نمونه بر حسب میلی متر

۴-۲- آزمایش کشش غیر مستقیم در شرایط خستگی

یکی از آزمایش‌های خستگی آزمایش خستگی بارگذاری کشش غیر مستقیم (ITFT) است. این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM و مطابق با استاندارد EN12697-24 استفاده شد [36]. بارگذاری این آزمایش در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شد.

در این آزمایش بارگذاری به صورت شبه سینوسی با فرکانس یک هرتز، مدت زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و با زمان استراحت ۰/۹ ثانیه اعمال شد. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در حالت‌های تنش ثابت ۲۵۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال بر اساس استاندارد EN12697-24 انجام شد. در این آزمایش خستگی به صورت گسیختگی نمونه و تغییر شکل قطری ۹ میلی‌متر تعریف شده است.

۵. نتایج

۵-۱- مقاومت کششی غیر مستقیم

آزمایش ITS بر روی نمونه‌های آسفالتی مختلف در حالت خشک و پس از یک سیکل ذوب-یخ انجام گردید. نتایج این آزمایش برای نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده با قیر لاستیکی و

جدول ۶. مخلوط‌های مورد استفاده در این پژوهش

Mixture	Characteristics
Control	Prepared with conventional 60/70 penetration grade Asphalt
C+16%CRM	Prepared with conventional 60/70 penetration grade asphalt modified with 16% crumb rubber (by weight of binder) by wet process
C+18%CRM	Prepared with conventional 60/70 penetration grade asphalt modified with 18% crumb rubber (by weight of binder) by wet process
C+20%CRM	Prepared with conventional 60/70 penetration grade asphalt modified with 20% crumb rubber (by weight of binder) by wet process
C+16%PCRM	Prepared with conventional 60/70 penetration grade asphalt modified with 16% P-CRM (by weight of binder) by dry process
C+18%PCRM	Prepared with conventional 60/70 penetration grade asphalt modified with 16% P-CRM (by weight of binder) by dry process
C+20%PCRM	Prepared with conventional 60/70 penetration grade asphalt modified with 20% P-CRM (by weight of binder) by dry process

Table 6. Mixtures used in this study

۴-۳- آزمایش‌ها

۴-۱- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش‌های گوناگونی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی صورت می‌گیرد اما توافق و نظر جامعی در مورد بهترین آزمایش وجود ندارد. به این منظور در این پژوهش به منظور سنجش حساسیت رطوبتی از آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO-T283) [35] استفاده شد. آزمایش کشش غیر مستقیم (ITS) با بارگذاری استاندارد با سرعت ۵۰ mm/min انجام شد. در این آزمایش، نمونه استوانه‌ای شکل آسفالتی تحت بارگذاری فشاری وارد بر سطح جانبی نمونه قرار می‌گیرد. این گونه بارگذاری باعث ایجاد تنش کششی یکنواختی در امتداد قطر بارگذاری نمونه آسفالتی

برابر حضور آب بیشتر می‌شود.

به طور کلی کاهش حساسیت رطوبتی نمونه‌های حاوی CRM را می‌توان مربوط به خاصیت کشسانی و ویسکوزیته بیشتر CRMB دانست که موجب بهبود نقش قیر در استحکام اسکلت مخلوط آسفالتی و پوشش بهتر سنگدانه‌ها می‌شود.

شکل ۳: مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با

پودرلاستیک فرآوری شده در حالت‌های خشک و تر

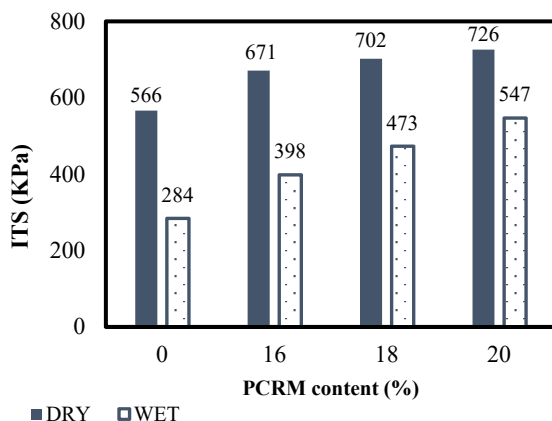


Fig. 3. ITS results of processed crumb rubber modified asphalt mixes (Dry and Wet condition)

نتایج بدست آمده در شکل (۳) نشان می‌دهد که استفاده از پودرلاستیک فرآوری شده نیز موجب افزایش مقاومت نمونه‌های آسفالتی در شرایط خشک و اشباع شده است. این در حالی است که در مقایسه با نمونه‌های تهیه شده با قیرلاستیکی، پودرلاستیک فرآوری شده عملکرد بهتر و موثرتری در افزایش مقاومت نمونه‌ها داشته، به طوری که نمونه آسفالتی حاوی ۲۰٪ پودرلاستیک فرآوری شده در شرایط خشک حدود ۲۶٪ و در شرایط اشباع حدود ۷۰٪ افزایش مقاومت را نسبت به نمونه شاهد داشته است. مشاهده شد که با حضور آب در این مخلوط‌ها ذرات

P-CRM از تورم و واکنش با آب خودداری کرده و با دیگر ذرات RAR توده‌هایی را تشکیل می‌دهند. این رفتار برای مخلوط آسفالت در حضور رطوبت بسیار مناسب است تا از آسیب ناشی از آب جلوگیری کند. علاوه بر این، قیر، ذرات RAR و سنگدانه را پوشانده و از این رو احتمال از بین رفتن چسبندگی را کاهش داده و از کاهش مقاومت ناشی از وجود رطوبت تا حد زیادی جلوگیری می‌کند. پیوند بهتر قیر-

قیر اصلاح شده با پودرلاستیک در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

شکل ۲: مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با پودرلاستیک در حالت‌های خشک و تر

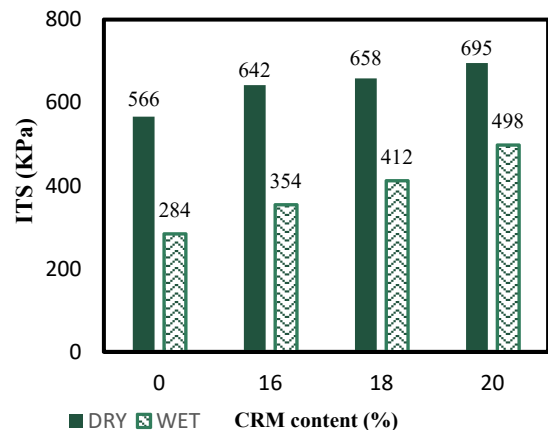


Fig. 2. ITS results of crumb rubber modified asphalt mixes (Dry and Wet condition)

با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از پودرلاستیک موجب افزایش مقاومت نمونه‌های آسفالتی در شرایط خشک و اشباع شده و با افزایش مقدار افزودنی، افزایش مقاومت نمونه‌های آسفالتی محسوس‌تر می‌شود به طوری که نمونه آسفالتی حاوی ۲۰٪ پودرلاستیک در شرایط خشک حدود ۲۲٪ و در شرایط یک سیکل ذوب-یخ حدود ۵۶٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش درصد پودرلاستیک موجب افزایش چسبندگی و پوشش قیری اطراف مصالح شده و تا حدود قابل توجهی ضعف مخلوط آسفالتی تهیه شده با مصالح سنگی سیلیسی در برابر رطوبت را جبران نموده است. پودرلاستیک پس از ترکیب شدن با قیر، دیپلمیزه و درون قیر هضم شده و در ترکیب با زنجیره‌های هیدروکربنی قیر، موجب تشکیل پیوندهای عرضی و سه‌گانه می‌شود و در نتیجه آن چسبندگی قیر به مصالح سنگی افزایش می‌یابد [37]. در حالت اشباع واکنش قیر و پودرلاستیک بخشی از مواد روغنی قیر به وسیله پودرلاستیک جذب شده و ژل حاصل از ترکیب دو ماده موجب قرارگیری غشای سخت و چسباننده اطراف مصالح سنگی شده و مقاومت مخلوط در

شکل ۴. مقایسه نتایج پارامتر TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده

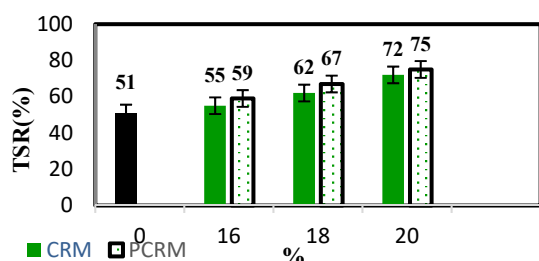


Fig. 4. TSR results of asphalt mixes containing different percentages of Crumb Rubber and Processed Crumb Rubber

۲-۵- آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم (ITFT)

نتایج آزمایش ITFT در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و تحت تنش‌های ۲۵۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال در شکل‌های (۵ و ۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه‌های حاوی افزودنی دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد هستند این امر نشان می‌دهد که ماهیت ارتجاعی و رفتار الاستیک قیر و مخلوط آسفالتی با استفاده از پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده بهبود یافته که در نتیجه آن عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی افزایش یافته است. مقاومت کم نمونه‌ها در برابر تنش‌های کششی افقی ایجاد شده باعث تشکیل ترک‌های عمودی می‌شود و از انتشار این ترک‌ها در امتداد قطر نمونه‌های آسفالت جلوگیری می‌کند. این مسئله سبب افزایش عمر خستگی نمونه‌های اصلاح شده می‌شود. مقایسه نتایج شکل‌های (۵ و ۶) نشان می‌دهد که با افزایش سطح تنش بارگذاری، عمر خستگی نمونه‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. این در حالی است که نمونه‌های حاوی پودرلاستیک فرآوری شده نسبت به نمونه‌های حاوی پودرلاستیک دارای حساسیت کمتری نسبت به افزایش سطح تنش بوده‌اند. بدیهی است که با افزایش سطح تنش وارد شده، از رفتار الاستیک و ارتجاعی مخلوط کاسته شده و این مخلوط نمی‌تواند در مقابل تنش‌های کششی و برشی وارد شده از خود مقاومت لازم را نشان دهد.

پودرلاستیک- مصالح سنگی که موجب افزایش چسبندگی قیر اطراف مصالح سنگی شده و استفاده از فیلرهای معدنی که خاصیت ضد جریان‌شدگی دارند، موجب شده تا عملکرد این افزودنی نسبت به پودرلاستیک موثرتر باشد.

۱-۵- پارامتر شاخص کششی (TSR)

پارامتر شاخص کشش TSR ، از حاصل تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع نسبت به حالت خشک بدست می‌آید که شاخص موثری برای ارزیابی مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی است. در شکل (۱۵) مقایسه نتایج پارامتر TSR مخلوط‌های اصلاح شده با پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده مشاهده می‌شود.

با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که استفاده از پودرلاستیک فرآوری شده در مقایسه با پودرلاستیک در درصد‌های مشابه، عملکرد بهتری دارد به طوری که نمونه آسفالتی حاوی ۲۰٪ پودرلاستیک فرآوری شده حدوداً ۵٪ مقاومت بیشتری در برابر حساسیت رطوبتی از خود نشان می‌دهد. مطابق آیین‌نامه روسازی‌های آسفالتی ایران، تنها نمونه حاوی ۲۰٪ پودرلاستیک و ۲۰٪ پودرلاستیک فرآوری شده توانسته است معیار $TSR \geq 70\%$ را تأمین کند. از طریق اصلاح قیر خالص توسط پودرلاستیک می‌توان بروز خرابی‌های روسازی آسفالتی از جمله چاله، شن زدگی و ترک خوردگی از طریق مکانیزم اثرات رطوبتی بر لایه‌های روسازی آسفالتی را کاهش داد. دیگر نمونه‌های حاوی پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده با وجود افزایش مقادیر TSR ، هیچکدام معیار آیین‌نامه را تأمین نکردند. به نظر می‌رسد که علت این مساله ویژگی‌های سنگدانه‌های سیلیسی باشد، زیرا این نوع سنگدانه‌ها با وجود استحکام بیشتر نسبت به سنگدانه‌های آهکی، در شرایط اشباع، ضعف زیادی از خود نشان می‌دهند.

شکل ۶. نتایج آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم نمونه‌های اصلاح شده در سطح تنش ۴۰۰ kPa

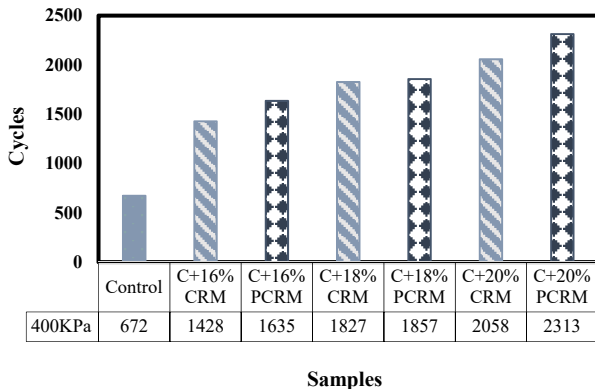


Fig. 6. ITFT results of modified asphalt mixtures at 400 kPa stress level.

۶. نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، ارزیابی حساسیت رطوبتی و عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک فرآوری شده در مقادیر مختلف و مقایسه آن با نمونه‌های اصلاح‌شده با پودرلاستیک به روش متداول تر بود که نتایج آن به صورت خلاصه به شرح زیر است.

۱- نتایج آزمایش *ITS* نشان داد که استفاده از هر دو افزودنی پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده، مقاومت نمونه‌های آسفالتی را در هر دو شرایط خشک و اشباع افزایش می‌دهد. این در حالی است که نمونه‌های حاوی پودرلاستیک فرآوری شده دارای عملکرد بهتری، به ویژه در شرایط اشباع را نسبت به نمونه‌های حاوی پودرلاستیک به همراه دارد.

۲- استفاده از افزودنی‌های پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده بهبود مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی و افزایش پارامتر *TSR* را به همراه دارند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مربوط به نمونه حاوی پودرلاستیک فرآوری شده با *TSR* معادل ۷۰٪ است.

۳- بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش ITFT نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی پودرلاستیک فرآوری شده دارای عملکرد

همچنین مقایسه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نمونه‌های آسفالتی حاوی پودرلاستیک فرآوری شده عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی پودرلاستیک داشته، به طوری که نمونه آسفالتی حاوی ۲۰٪ پودرلاستیک فرآوری شده در سطح تنش‌های ۲۵۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۱۱ و ۱۳ درصد عمرخستگی بیشتر نسبت به نمونه حاوی ۲۰٪ پودرلاستیک دارند. علت این امر پیوند قوی‌تر ذرات پودرلاستیک با قیر و همین‌گونه وجود ماده پایدار کننده فعال AMBS هست که با افزودن آن مخلوط منسجم‌تری به وجود می‌آید. مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی تابع چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی و همچنین پیوستگی جزء قیر مخلوط آسفالتی است. اصلاح قیر خالص توسط پودر لاستیک باعث ایجاد قشر ضخیم‌تری از قیر روی مصالح سنگی و چسبندگی بهتر قیر به مصالح سنگی به دلیل افزایش کندروانی قیر می‌شود. افزایش ضخامت قیر روی سنگدانه‌ها، باعث می‌شود که مصالح سنگی در کنار یکدیگر باقی بمانند و در نتیجه مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی افزایش یابد. افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده نشان می‌دهد که این مخلوط‌ها می‌توانند قبل از گسیختگی مقدار تنش‌های بیشتری را تحمل کنند و می‌توانند بدون ترک‌خوردگی در بارگذاری کششی کشیده شوند. خستگی روسازی آسفالتی در اثر کشش بوجود می‌آید و بنابراین افزایش مقاومت کششی مخلوط آسفالتی باعث افزایش مقاومت آن در برابر خستگی می‌شود.

شکل ۵. نتایج آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم نمونه‌های اصلاح شده در سطح تنش ۲۵۰ kPa

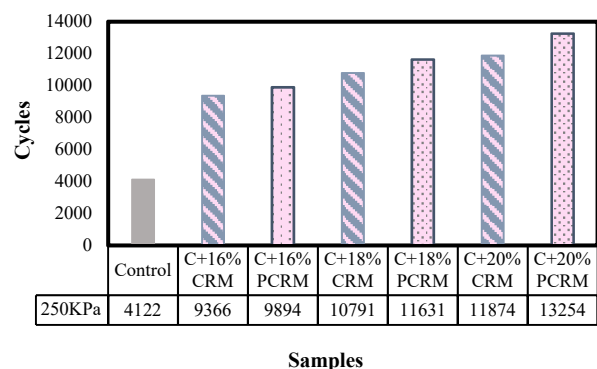


Fig. 5. ITFT results of modified asphalt mixtures at 250 kPa stress level.

- [8] H. Wang, X. Liu, M. van de Ven, G. Lu, S. Erkens, A. Skarpas, Fatigue performance of long-term aged crumb rubber modified bitumen containing warm-mix additives, *Constr Build Mater.* (2020) ; 239 ;117824.
- [9] S. Amani, A. Kavussi, M.M. Karimi, Effects of aging level on induced heating-healing properties of asphalt mixes, *Constr. Build. Mater.* (2020); 263: 105-120.
- [10] Breakah M and Williams R. Dynamic testing of hot mix asphalt for moisture susceptibility assessment. *Constr Build Mater* (2013); 47: 636–642.
- [11] Sengoz B, Agar E. Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. *Build Environ* (2007); 42:3621–3628
- [12] Kakar M.R, Hamzeh M.O, Valentin J. A review on moisture damage of hot and warm mix asphalt and related investigation. *J Clean Prod.* (2015); 99: 39-58.
- [13] Kok B.V, Yilmaz M. The effect of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. *Constr Build Mater.* (2009); 23(5): 1999-2005.
- [14] Kavussi A, Azarnia M. Controlling stiffening effect of sulphur in asphalt mixes using polymer and crumb rubber modified binder, Paper presented at the third conferences of Middle East Society of Asphalt Technologist (MESAT), (2015).
- [15] caro S, Masad E, Airey G, et al. Probabilistic analysis of fracture in asphalt mixtures caused by moisture damage. *J Transport Res Board* (2008); 2057: 28-36.
- [16] Mehrara A, Khodaii A. A review of state of art on stripping phenomenon in asphalt concrete. *Constr Build Mater.* (2013); 38: 423-442.
- [17] Irfan M, Yasir A, Sarfraz A, et al. Performance Evaluation of Crumb Rubber-Modified Asphalt Mixtures Based on Laboratory and Field Investigations.
- بهتری بوده به شکلی که نمونه‌های اصلاح‌شده با پودر لاستیک فرآوری شده در سطح تنش‌های ۲۵۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۱۱ و ۱۳ درصد عمر بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی پودر لاستیک داشتند. همچنین نتایج نشان داد که نمونه‌های اصلاح‌شده با پودر لاستیک فرآوری شده حساسیت کمتری به افزایش تنش دارد به طوری که نمونه آسفالتی اصلاح‌شده با ۲۰٪ پودر لاستیک فرآوری شده کمترین افت عمر خستگی را با افزایش تنش از ۲۵۰ به ۴۰۰ کیلوپاسکال از خود نشان داد.

۲-مراجع

- [1] Q. Li, H.J. Lee, T.W. Kim, A simple fatigue performance model of asphalt mixtures based on fracture energy, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 605–611.
- [2] Ameri M, Nobakht N, Molayem M, et al. A study on fatigue modeling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic continuum damage properties of asphalt binder. *Constr Build Mater* (2016); 106: 243–252.
- [3] U.A. Mannan, M.R. Islam, R.A. Tarefder, Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies, *Int. J. Fatigue* . (2015); 78 :72–80.
- [5] Y. Gao, Y. Zhang, Y. Yang, J. Zhang, F. Gu, Molecular dynamics investigation of interfacial adhesion between oxidised bitumen and mineral surfaces, *Appl. Surf. Sci.* (2019) ;479: 449–462.
- [6] H. Wang, Z. Dang, L. Li, Z. You, Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture, . *Constr Build Mater.* (2013) ;47 :1342–1349.
- [7] Y. Zhang, Y. Gao, Predicting crack growth in viscoelastic bitumen under a rotational shear fatigue load, *Road Mater. Pavement Des.* (2019) 1–20.

- bitumen modified with ground tire rubber: A review, *Fuel Process. Technol.* (2017); 159: 272–279.
- [27] 26. Zhang F, Hu CB. The research for structural characteristics and modification mechanism of crumb rubber compound modified asphalts. *Constr Build Mater* (2015); 76(1): 330–342.
- [28] T. Ma, H. Wang, Y. Zhao, X. Huang, S. Wang, Laboratory Investigation of Crumb Rubber Modified Asphalt Binder and Mixtures with Warm-Mix Additives, *Int. J. Civ. Eng.* (2017); 15: 185–194.
- [29] 28. Kedarisetty S, Biligiri K P, and Sousa J. Advanced rheological characterization of reacted and activated rubber (RAR) modified asphalt binders. *Constr Build Mater.* (2016); 122: 12–22.
- [30] 29. Ishai I, Svehinsky G, Sousa J. Introducing an Activated Mineral as Innovative Binder-Stabilizer for SMA Paving Mixtures. *Compendium, International Road Congress on Innovation in Road Infrastructures. International Road Federation—IRF, Moscow, Russia, (2011).*
- [31] 30. Sousa J, Vorobiev A, Rowe G, Ishai I. Reacted and activated rubber: elastomeric asphalt extender. *J Transp Res Board.* (2013); 2371: 32–40.
- [32] 31. Chen SY, Gong F.Y, Ge D.D, You Z.P, Sousa J.B. Use of reacted and activated rubber in ultra-thin hot mixture asphalt overlay for wet-freeze climates. *J Clean Prod* (2019); 232 :369–378 .
- [33] 32. J.B. Sousa, A. Purwadi, G. Way, Road Pavement Preservation Trial with Reacted and Activated Rubber at JORR W2 Toll Road- Indonesia, (n.d.).
- [34] 33. Wu, Chunying, Jorge B Sousa, Aifang Li, and Zhe Zhao. (2012.) "Activated Minerals as Binder Stabilizers in Middle Course's Asphalt Concrete Paving Mixtures." In.
- Arabian *J Sci and Eng.* (2018); 43: 1795–1806
- [18] Wang H, You ZH, Mills-Beale J, Hao P. Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber, *Constr Build Mater.* (2012); 26 (1) :583–590.
- [19] S. Kim, S.J. Lee, Y. Bin Yun, K.W. Kim, The use of CRM-modified asphalt mixtures in Korea: Evaluation of high and ambient temperature performance, *Constr Build Mater.* (2014); 67: 244–248.
- [20] C. Sangiorgi, S. Eskandarsefat, P. Tataranni, A. Simone, V. Vignali, C. Lantieri, G. Dondi, A complete laboratory assessment of crumb rubber porous asphalt, *Constr Build Mater.* (2017); 132: 500–507.
- [21] S. Wang, D. Cheng, F. Xiao, Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt, *Constr. Build. Mater.* (2017); 131: 101–113.
- [22] M. Khalili, K. Jadidi, M. Karakouzian, S. Amirkhanian, Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method, *Case Stud. Constr Mater.* 11 (2019) :276.
- [23] Ghazi GA, Khaled ZR. Investigation of the effect of rubber on rheological properties of asphalt binders using Superpave DSR. *KSCE J Civil Eng.* (2015); 19(1): 127–135.
- [24] Presti DL. Recycled tire rubber modified bitumen for road asphalt mixture: a literature review. *Constr Build Mater.* (2013); 49: 863–881.
- [25] F. Gong, S. Guo, S. Chen, Z. You, Y. Liu, Q. Dai, Strength and durability of dry-processed stone matrix asphalt containing cement pre-coated scrap tire rubber particles, *Constr Build Mater.* (2019); 214: 475–483.
- [26] M. Sienkiewicz, K. Borzędowska-Labuda, A. Wojtkiewicz, H. Janik, Development of methods improving storage stability of

- [36] 34.ASTM D-1559, “Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus”, American Society for Testing and Materials, (2017).
- [37] 35. AASHTO, 2014b. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, AASHTO T283. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [38] 36. AENOR. UNE-EN 12697-24. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. part 24: Resistance to fatigue.
- [39] 37. Lee S, Akisetty K, and Amirkhanian N. The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements. Constr Build Mater (2008); 22: 1368-1376.

Evaluation of fatigue resistance and Moisture susceptibility of HMA mixes containing processed asphalt rubber

Amir Kavussi^{1*}, Mehrdokht Doosti², Mehdi Azarnia³

1- Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran

2- M.Sc. Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Iran

3- Phd. Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Iran

kavussia@modares.ac.ir

Abstract

Traffic Loading, environmental condition and pavement layers weakness properties affect pavement failure and deterioration. Fatigue cracking is one of the most significant and common type of pavement distresses which can effects on the pavement performance and durability. On the other hand, moisture susceptibility would intensify structural distresses and affect pavements serviceability life. Over the past decades, pavement researchers have taken different approaches to enhance rheological properties of bitumen and promote performance of asphalt mixtures. Application of additives such as Crumb Rubber (CR) in asphalt layers of pavements is one of the most economic approaches and would reduce environmental pollution issues. CR modification has been perceived to be a very reliable and effective additive in improving the performance and characteristics of asphalt pavements. The use of CR not only improves performance of asphalt mixtures by increasing fatigue life and rutting resistance of mixes but it reduces moisture susceptibility of mixes and bring about several environmental benefits. Despite the above mentioned advantages, mixing CR with bitumen in wet processing results in problems such as increased production cost, initial aging, and coagulation of rubber modified bitumen, as well as phase separation of the modified binder. In order to overcome the above problems, an innovative technique was developed to produce CRM mixtures in TMU Road Research Centre. This method, named Processed Crumb Rubber (PCR), was consisted of incorporating blending surface activate materials, CR and soft bitumen in order to produce processed rubber type granules. No need to high shear mixer, lower PCR-Bitumen mixing time, reduced coagulation problems in modified bitumen are some advantages of this new product. Since this material is new, extensive experimental research works are required to evaluate rheological properties of the PCR modified bitumen and performance of asphalt mixtures prepared with that. In this research, with producing reacted and activated crumb rubber modified bitumen, the moisture susceptibility and fatigue resistance of asphalt mixtures modified with CR (wet process) and PCR were investigated. In order to obtain performance of samples contain these two additives, Indirect Tensile Strength (ITS) under dry and wet conditions and Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) were applied. In addition, properties of the PCR modified specimens were compared with those of the wet-processed rubber modified bitumen. Moisture susceptibility testing results showed that the CR (modifying bitumen with wet processing) increased indirect tensile strength of samples as well as PCR in both dry and saturated conditions. However, because of surface activated minerals in PCR, specimens prepared using PCR had more ITS value in saturated conditions that result in better performance and lower moisture susceptibility. Finally, Tensile Strength Ratio (TSR) results showed that only asphalt mixtureS contains 20% of PCR and 20%CR reached the minimum TSR value ($TSR \geq 70$). Fatigue life of samples was investigated under two stress level (250 and 400 kPa).

Results showed that incorporation these two additives increased fatigue life of control mix. On the other hand, results indicated that as stress level increased, fatigue life of samples decreased but samples modified with PCR had better performance and more fatigue life up to 12 percent.

Keywords: Fatigue resistance, moisture susceptibility Crumb rubber modified bitumen, Processed Crumb Rubber. (PCR)