مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست یکم، شماره 4، سال1400

****

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

**امیرکاووسی1\*، مهردخت دوستی، مهدی آذرنیا 3**

1. استاد، دانشکده عمران و محیط­زیست، دانشگاه تربیت مدرس

2. دانشجو کارشناسی ارشد عمران گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

3. دانشجوی دکتری عمران گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

**Kavussia@modares.ac.ir**

تاریخ دریافت تاریخ پذیرش

**چکيده**

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 به‌آسانی 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[[1]](#footnote-1) و3 ITFT) 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 اصلاح­شده با پودرلاستیک ساده و فرآوری­شده به ترتیب دارای 22 و 24 درصد 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 20% پودرلاستیک فرآوری­شده، در مقایسه با نمونه های آسفالتی حاوی پودرلاستیک تهیه شده به روش تر، 11 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، پودر لاستیک فرآوری شده، قیرلاستیک

**1- مقدمه**

زوال و از بین رفتن روسازی­های آسفالتی متاثر 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 تاثیر 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 آب­و­هوایی 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 مصالح­سنگی 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 تاثیر 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 می­توانند 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 زودهنگام روسازی شود [12 ,14]. نتایج پژوهش­های گذشته نشانداده است که خرابی رطوبتی می­تواند مدول سختی مخلوط آسفالتی را تا 25% و عمر خستگی را نیز تا 30% کاهش و پتانسیل شیارشدگی را تا 60% 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 شیارشدگی، کاهش آلودگی صوتی و به طورکلی کاهش هزینه­های تعمیر و نگهداری را به همراه دارد [17-22]. در حال حاضر، از دو روش "خشک" و "تر" برای به کارگیری پودرلاستیک در روسازی آسفالتی استفاده می­شود. در روش خشک، پودرلاستیک به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی عمل کرده و با مصالح سنگی داغ قبل از اضافه شدن قیر ترکیب می­شود. در روش تر نیز ابتدا پودرلاستیک و قیر داغ در دمای بالا و تحت شرایطخاصی با یکدیگر ترکیب شده و سپس به مصالح سنگی اضافه می­شوند [23-25].

این در حالی است که پژوهش‌های 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 اصلاح­شده موجب شده تا استفاده از این افزودنی چندان مورد استقبال قرار نگیرد [23 ,26]. این امر موجب شده تا در سال­های اخیر پژوهشگران با استفاده از روش­های مختلف همچون گرمایش نمونه با امواج ماکروویو، استفاده از هیدروژن پراکسید، مواد شیمیایی متورم کننده و ماده معدنی فعال­کننده سطح به فرآوری پودرلاستیک بپردازند. در جدیدترین توسعه، پودرلاستیک فرآوری­شده طراحی و ابداع شد که امکان اضافه کردن آن به صورت خشک فراهم است.

پژوهشهایی که تاکنون در زمینه استفاده از پودرلاستیک فرآوری شد*ه* به عنوان اصلاح­کننده در قیر و مخلوط آسفالتی انجام شده، نشان می­دهد که استفاده از این افزودنی بهبود چشمگیر مشخصات قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر خرابی­هایی 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 پژوهش‌های آزمایشگاهی بیشتری در زمینه عملکرد مخلوط­های آسفالتی اصلاح­شده با آن صورت پذیرد.

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

2- مواد و آزمایش­ها

**2-1- 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 70/60 پالایشگاه تهران بوده است.

نتیجه آنالیز شیمیایی فیلر مصالح سنگی در جدول (1) آورده شده است. در شکل (1) دانه­بندی مخلوط انتخاب شده و محدوده دانه بندی شماره 4 نشریه 234 سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی نشان داده شده است.

نتیجه آزمایش­های صورت گرفته روی مصالح سنگی و قیر خالص مورد استفاده نیز در جدول­های (1 تا 3) آورده شده است. نتایج XRF[[2]](#footnote-2) مصالح حاکی از مقادیر بالای سیلیس در فیلر مصالح سنگی (در حدود 50 درصد) بود و می­توان این مصالح را جزء سیلیسی دسته‌بندی نمود.

**2-2- 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 نامنظم­تر است که سبب واکنش بهتر با قیر می­شود [23].

میزان رطوبت موجود در آن مطابق استاندارد­های فنی گزارش شده بوده و کمتر از 075/0 درصد وزنی آن است. در جدول 4. دانه­بندی پودرلاستیک استفاده شده نشان داده شده است.

**جدول 1.** نتایج آزمایش XRF فیلر مصالح سنگی

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Elements****SiO2** | **Al2O3** | **Fe2O** | **CaO** | **MgO** | **K2O** | **Na2O** | **P2O5** | **Sr** | **SO3** | **Percent loss** |
| **(%)****52.74** | 10.98 | 3.466 | 14.31 | 2.044 | 2.633 | 1.984 | 0.165 | 0.033 | 0.039 | 1.94 |

**Table 1.** XRF testing results of the aggregates

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Result** | **Specification** | **Test** |
|  **Coarse aggregates** |
| **2.468** |  ASTM C127 | Bulk Specific gravity (g/cm3) |
| **2.628** |  | SSD Specific gravity (g/cm3)  |
| **1.2** |  | Apparent Specific gravity (g/cm3) |
| **29** |  ASTM C131 | Abrasion loss (%) |
| **Fine aggregates** |
| **2.477** | ASTM C128 | Bulk Specific gravity (g/cm3) |
| **2.645** |  | SSD Specific gravity (g/cm3)  |
| **2.664** |  | Apparent Specific gravity (g/cm3) |

 **جدول 2.** وزن مخصوص مصالح سنگی منتخب

**Table 2.** Physical properties of aggregates.

**جدول 3**. 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/cm3)** | 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 1.** نمودار دانه­بندی مصالح سنگی

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

**3- قیر اصلاح شده با پودرلاستیک**

قیر اصلاح شده با پودرلاستیک مرسوم به روش تر در این پژوهش مطابق با استاندارد ASTM D-8 تهیه 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 تهیه 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 ۱۷۵درجه سانتی گراد در دستگاه مخلوط­کن با هم ترکیب شدند. در نهایت قیر اصلاح شده با پودرلاستیک در مقادیر 16 تا 20 درصد پودرلاستیک (مطابق با برنامه آزمایش‌ها) تهیه و نتایج آزمایش­های آن در جدول (5) 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 5.** نتایج آزمایش­های قیر اصلاح شده با پودرلاستیک

|  |  |
| --- | --- |
| **Test** | **Crumb Rubber Content** |
| 16% | 18% | 20% |
| **Penetration at 25 Ċ, 100 g, (0.1 mm)** | 58.7 | 53 | 46 |
| **Softening point (Ċ)** | 59 | 65 | 67 |
| **Specific gravity (g/cm3)** | 1.11 | 1.15 | 1.18 |

 **Table 5.** Results of Crumb Rubber modified asphalt

**2-4-پودرلاستیک فرآوری شده**

مرکز تحقیقات راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس با همکاری گروه شیمی بر پایه روش و رویکرد فرآوری پودرلاستیک تهیه 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 شدهرا تولید نمود. محصول جدید ترکیبی از قیر نرم به مقدار تقریبی 18 درصد، 60 درصد پودرلاستیک،20 درصد ماده پایدار­کننده فعال ([[3]](#footnote-3)AMBS) و2 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 فرآوری­شده در مدت کوتاه و بدون نیاز به دستگاه مخلوط­کن 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].

**3- تهیه نمونه‌ها**

به منظور ارزیابی مقاومت خستگی و حساسیت رطوبتی مخلوط شاهد و مخلوط­های اصلاح شده نمونه­های مختلف تهیه شد. در این پژوهش نمونه­های آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده در مقادیر مختلف (16 تا 20 % وزن قیر) به ترتیب به روش تر و خشک مطابق با جدول (6) تهیه شدند. لازم به ذکر است که مخلوط آسفالت‌های اصلاح شده با پودرلاستیک به دلیل افزایش ویسکوزیته در دمای کمی بالاتر (بیش از 165 درجه سانتیگراد) تهیه شده اند. برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط­ها، نمونه­های مارشال مطابق روش ASTM D1559 ساخته شدند [34]. براساس پارامترهای مارشال، درصد قیر بهینه 8/5 برای همه نمونه­ها تعیین شد.

**جدول 6.** 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

**4-آزمایش‌ها**

**4-1- 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 ((AASHTOO-T283 [35] استفاده شد. آزمایش کشش غیر مستقیم (ITS) با بارگذاری استاندارد با سرعت mm/min 50 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 و شکسته شدن آن در امتداد این قطر می­شود. برای محاسبه مقاومت کششی غیرمستقیم از رابطه 1 استفاده شده است :



در این رابطه:

ITS= مقاومت کششی غیرمستقیم (kPa)

= P بیشینه بار وارد شده بر حسب نیوتن

= t ضخامت نمونه برحسب میلی متر

= D قطر نمونه بر حسب میلی متر

**4-2- آزمایش کشش غیر مستقیم در شرایط خستگی**

یکی ازآزمایش­های خستگی آزمایش خستگی بارگذاری كشش غیر مستقیم (*ITFT*) است. این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM[[4]](#footnote-4) و مطابق با استاندارد EN12697-24استفاده شد [36]. بارگذاری این آزمایش در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شد.

در این آزمایش بارگذاری به صورت شبه سینوسی با فركانس یک هرتز، مدت زمان بارگذاری 1/0 ثانیه و با زمان استراحت 9/0 ثانیه اعمال شد. این آزمایش در دمای 25 درجه سانتی گراد در حالت­های تنش ثابت 250 و 400 کیلوپاسکال بر اساس استاندارد EN12697-24 انجام شد. در این آزمایش خستگی به صورت گسیختگی نمونه و تغییر شکل قطری 9 میلی­متر تعریف شده است.

**5. نتایج**

**5-1- 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 قیر اصلاح شده با پودرلاستیک در شکل­های 2 و 3 نشان داده شده است.

**شکل 2.** مقاومت كششي غيرمستقيم 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 20% پودرلاستیک در شرایط خشک حدود 22% و در شرایط یک سیکل ذوب-یخ حدود 56% 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، دیپلیمیزه 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 مقاومبت مخلوط در 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 3:** مقاومت كششي غيرمستقيم 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 (3) 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 موثری­تر در افزایش مقاومت نمونه­ها داشته، به طوری که نمونه آسفالتی حاوی 20% پودرلاستیک فرآوری شده در شرایط خشک حدود 26% و در شرایط اشباع حدود 70% افزایش مقاومت را نسبت به نمونه شاهد داشته است. مشاهده شد كه با حضور آب در این مخلوط‌ها ذرات

P-CRM از تورم و واكنش با آب خودداری كرده 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 كند. علاوه بر این، قیر، ذرات RAR و سنگدانه را پوشانده و از این رو احتمال از بین رفتن چسبندگی را كاهش داده و از كاهش مقاومت ناشی از وجود رطوبت تا حد زیادی جلوگیری می كند .پیوند بهتر قیر-پودرلاستیک- مصالح سنگی که موجب افزایش چسبندگی قیر اطراف مصالح­سنگی شده و استفاده از فیلرهای معدنی که خاصیت ضد عریان­شدگی دارند، موجب شده تا عملکرد این افزودنی نسبت به پودرلاستیک موثرتر باشد.

**5-1-1-پارامتر شاخص کششیTSR ) (**

پارامتر شاخص کشش[[5]](#footnote-5) *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 (15) 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 شدهدر مقایسه با پودرلاستیک در درصدهای مشابه، عملکرد بهتری دارد به طوری که نمونه آسفالتی حاوی 20% پودرلاستیک فرآوری شدهحدودا %5 مقاومت بیشتری در برابر حساسیت رطوبتی از خود نشان می‌دهد. مطابق آیین نامه روسازی­های آسفالتی ایران، تنها نمونه حاوی 20% پودرلاستیک و 20% پودرلاستیک فرآوری شدهتوانسته است معیار $TSR\geq 70\%$ را تامین کند. از طریق اصلاح قیر خالص توسط پودرلاستیک می­توان بروز خرابی­هاي روسازي آسفالتی از جمله چالـه، شـن زدگی و ترك خوردگی از طریـق مکانیزم اثرات رطوبتی بر لایه­هاي روسازي آسفالتی را کاهش داد. دیگر نمونه­های حاوی پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده با وجود افزایش مقادیر TSR، هیجکدام معیار آیین­نامه را تامین نکرداند. 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 4 .**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

**5-2- آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم** (ITFT)

نتایج آزمایش ITFT در دمای 25 درجه سانتیگراد و تحت تنش­های 250 و 400 کیلوپاسکال در شکل­های (5 و 6) 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 كششی افقی ایجاد شده باعث تشکیل ترک­های عمودی می­شود و از انتشار این ترک­ها در امتداد قطر نمونه­های آسفالت جلوگیری می­كند. این مسئله سبب افزایش عمر خستگی نمونه­های اصلاح شده می­شود .مقایسه نتایج شکل­های (5 و 6) 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 كه با افزایش سطح تنش وارد شده، از رفتار الاستیک و ارتجاعی مخلوط كاسته شده و این مخلوط نمی‌تواند در مقابل تنش­های كششی و برشی وارد شده از خود مقاومت لازم را نشان دهد.

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 نمونه­آسفالتی حاوی 20% پودرلاستیک فرآوری شده در سطح تنش­های 250 و 400 کیلوپاسکال به ترتیب 11 و 13 درصد عمرخستگی بیشتر نسبت به نمونه حاوی 20% پودرلاستیک دارند. علت این امر پیوند قوی­تر ذرات پودرلاستیک با قیر و همین‌گونه وجود ماده پایدار كننده فعال AMBS هست كه با افزودن آن مخلوط منسجم­تری به وجود می­آید. مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی تـابع چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی و همچنین پیوستگی جزء قیر مخلوط آسفالتی است. اصلاح قیر خالص توسـط پودر لاستیک باعث ایجاد قشر ضخیم‌تری از قیر روی مصالح سنگی و چسبندگی بهتـر قیر به مصالح سنگی به دلیل افزایش كندروانی قیر می­شود. افزایش ضخامت قیر روی سنگدانه‌ها، باعث می­شود که مصالح سنگی در كنار یکدیگر باقی بمانند و در نتیجه مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی افزایش ­یابد. افزایش مقاومت كششی غیرمستقیم مخلوط­های آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده نشان می­دهد كه این مخلوط­ها می­توانند قبل از گسیختگی مقدار تنش­های بیشتری را تحمل كنند و می­توانند بدون ترک‌خوردگی در بارگذاری كششی كشیده شوند. خستگی روسازی آسفالتی در اثر كشش بوجود می­آید و بنابراین افزایش مقاومت كششی مخلوط آسفالتی باعث افزایش مقاومت آن در برابر خستگی می­شود.

**شکل 5.** نتایج آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم نمونه‌های

اصلاح شده در سطح تنش kPa250

**Fig. 5.** ITFT results of modified asphalt mixturesat 250 kPastress level.

**شکل 6.** نتایج آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم نمونه­های اصلاح شده در سطح تنش **kPa**400

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

**6.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.

1-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.

2-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 70% است.

3-بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش ITFT نشان می­دهد که نمونه­های حاوی پودرلاستیک فرآوری شده دارای عملکرد بهتری بوده به شکلی که نمونه­های اصلاح­شده با پودرلاستیک فرآوری شده در سطح تنش­های 250 و 400 کیلوپاسکال به ترتیب 11 و 13 درصد عمر بیشتری نسبت به نمونه­های حاوی پودرلاستیک داشتند. همچنین نتایج نشان داد که نمونه­های اصلاح­شده با پودرلاستیک فرآوری شده حساسیت کمتری به افزایش تنش دارد به طوری که نمونه آسفالتی اصلاح­شده با 20% پودرلاستیک فرآوری شده کمترین افت عمر خستگی را با افزایش تنش از 250 به 400 کیلوپاسکال از خود نشان داد.

**7-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
4. 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.
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-butadine-styrine 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. [Arabian J Sci and Eng](https://link.springer.com/journal/13369).(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 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, Svechinsky 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.
32. ( 2013); 2371: 32–40.
33. 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 .
34. 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.).
35. 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.
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 Kavussi1\*, 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≥ 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)

1. 1. Indirect Tensile Strength

2. Indirect Tensile Fatigue Test [↑](#footnote-ref-1)
2. . X-ray fluorescence spectrum [↑](#footnote-ref-2)
3. Activated Mineral Binder Stabilizer [↑](#footnote-ref-3)
4. Universal Testing Machine [↑](#footnote-ref-4)
5. Tensile Strength Ratio [↑](#footnote-ref-5)