

# ارزیابی تأثیر پودر لاستیک فرآوری شده بر ویژگی‌های شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و استخوان‌بندی سنگدانه‌ای

امیر کاوسی<sup>۱\*</sup>، سعید جعفری<sup>۲</sup>، مهدی آذرنیا<sup>۳</sup>، حمید عزیزی<sup>۲</sup>

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

Kavussia@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

## چکیده

استفاده از پودرلاستیک در مخلوط‌های آسفالتی یک روش مقرون به صرفه برای اصلاح مخلوط‌های آسفالتی است. مشکلاتی همچون دماهای اختلاط و تراکم بالا، نیاز به تجهیزات اضافی در کارخانه‌های آسفالت، هزینه اولیه زیاد و پتانسیل دوفازی و دل‌مه شدن قیر لاستیکی موجب شده تا به کارگیری آن در صنعت با محدودیت‌هایی همراه باشد. یکی از روش‌های نوین برای کاهش مشکلات استفاده از قیرهای لاستیکی، استفاده از پودر لاستیک فرآوری شده است، که ترکیبی از پودرلاستیک ریز، قیر نرم، مواد معدنی و آهک هیدراته است که در یک فرآیند حرارتی کوتاه‌مدت تهیه شده و امکان بکارگیری آن به روش خشک ممکن می‌باشد. در این پژوهش ابتدا طرح مخلوط آسفالتی مارشال اصلاح و سپس مقاومت نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک فرآوری‌شده با دانه‌بندی پیوسته و متخلخل آسفالتی در برابر شیارشدگی با استفاده از آزمایش‌های چرخ بارگذاری در شرایط و بارگذاری محوری تکراری مورد ارزیابی قرار گرفته و با نمونه‌های حاوی قیر خالص و قیر لاستیکی به روش تر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهند که بکارگیری هر دو افزودنی پودرلاستیک مرسوم و پودرلاستیک فرآوری‌شده، مقاومت نمونه‌ها را در برابر شیارشدگی افزایش می‌دهند به طوری که در آزمایش چرخ بارگذاری، استفاده از ۲۵ درصد پودرلاستیک فرآوری‌شده موجب بهبود ۳ الی ۵ برابری مقاومت در برابر شیارشدگی در شرایط خشک و غرقاب نسبت به نمونه شاهد می‌شود. تحلیل نتایج آزمایش بارگذاری تکراری محوری نشان می‌دهد استفاده از ۲۵ درصد پودرلاستیک فرآوری‌شده، کاهش ۳ الی ۶ برابری سیکل‌های لازم گسیختگی را برای برای نمونه‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و متخلخل را نسبت به نمونه‌ی شاهد به همراه دارد. به طور کلی مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی منقطع (آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای) به دلیل اتصال سنگدانه‌ها به یکدیگر و داشتن درصد قیر بیشتر عملکرد بهتری در برابر تغییرشکل‌های دائمی از خود نشان دادند.

**واژگان کلیدی:** شیارشدگی، پودرلاستیک، فرآوری، روش تر.

## ۱- مقدمه

تغییر شکل‌های دائمی ناشی از بارگذاری‌های مکرر در دمای بالای یکی از خرابی‌های متداول در روسازی‌های آسفالتی است. این تغییر شکل‌ها بیشتر در لایه‌های بالای روسازی‌های آسفالتی، به صورت فرورفتگی‌های طولی در مسیر چرخ‌ها و برآمدگی در طرفین مسیر عبور چرخ‌ها ظاهر می‌شود [1]. پدیده شیارشدگی، با افزایش ناهمواری راه‌ها و جریان یافتن آب درون ناهمواری‌ها، آثار مخربی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی دارد [2]. علاوه بر این شیارشدگی بیش‌از اندازه منجر به شکست سازه‌ای روسازی نیز می‌شود؛ بنابراین، شیارشدگی علاوه بر کاهش عمر مفید روسازی، عملکرد ایمنی راه‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [3].

از راهکارهای مؤثر به منظور کاهش خرابی‌های روسازی، می‌توان به اصلاح قیر برای بهبود ویژگی‌های قیر اشاره کرد [4]. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود مشخصات قیر، استفاده از افزودنی‌هایی مانند مواد پلیمری، الیاف و دیگر افزودنی‌ها است که از رایج‌ترین آن‌ها لاستیک است [5]. استفاده از قیر لاستیکی در روسازی، باعث افزایش سختی قیر، افزایش پوشش ضخامت قیر روی سنگدانه‌ها و در نتیجه مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی بهبود و هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی‌های کاهش می‌یابد [6-9].

امروزه از پودر لاستیک به دو روش تر و خشک در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. در روش تر، قیر و پودر لاستیک در دمای بالای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴۵ تا ۶۰ دقیقه با یکدیگر مخلوط و پودر لاستیک به عنوان بخشی از قیر خالص جایگزین می‌شود [10, 11]. در روش خشک، پودر لاستیک به عنوان بخشی از مصالح در هنگام اختلاط و قبل از اضافه شدن قیر به مخلوط با مصالح سنگی، ترکیب و مخلوط آسفالت لاستیکی تولید می‌شود [12].

پژوهش‌های صورت گرفته حاکی از آن است که سطح واکنش بین قیر و پودر لاستیک در روش تر در مقایسه با روش خشک بیشتر و مشخصات عملکردی آسفالت لاستیکی تهیه شده در روش تر بهتر است، اما مشکلاتی مانند عدم پایداری در دوره بهره‌برداری و جداسازی پودر لاستیک در صورت عدم واکنش

مناسب با قیر، نیاز به اعمال دمای بالای اختلاط قیر و پودر لاستیک، ضرورت به کارگیری تجهیزات پیشرفته در کارخانه‌های آسفالت و هزینه‌های بالای تولید اولیه باعث جلوگیری از کاربرد آسفالت‌های لاستیکی شده است [12, 13]. این مشکلات باعث شده است تا در سال‌های گذشته پیش‌فرآوری و فعال‌سازی سطح پودر لاستیک با استفاده از مواد فن‌آوری‌هایی همچون سدیم کلرایت، هیدروژن پراکساید، امواج ماکروویو، مواد متورم کننده شیمیایی و مواد معدنی مورد توجه قرار گیرند [14]. در این میان استفاده از پیش‌فرآوری پودر لاستیک با استفاده از مواد معدنی یک رویکرد مناسب و با ارزش شناخته شده است که امکان استفاده از پودر لاستیک را به روش خشک فراهم می‌سازد [15]. پودر لاستیک فرآوری‌شده حاوی قیر نرم، پودر لاستیک، ماده معدنی AMBS<sup>۱</sup> و آهک هیدراته است که در یک فرآیند حرارتی در مدت‌زمان کوتاهی با یکدیگر ترکیب و محصول فرآوری می‌شود [16]. تحقیقات نشان می‌دهند که با اضافه کردن پودر لاستیک فرآوری‌شده به میزان بیش از ۱۵ درصد می‌توان بهبود قابل توجهی در مشخصه‌های قیر کسب نمود. البته چنانچه مقدار استفاده از پودر لاستیک فرآوری‌شده بیش از مقدار معینی شود، پوشش قیری سنگدانه‌ها به خوبی صورت نگرفته و فضای خالی مخلوط افزایش می‌یابد [17].

در یک تحقیق آزمایشگاهی، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پودر لاستیک مرسوم و فرآوری‌شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از آزمایش بارگذاری تکراری محوری تحت تنش‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که استفاده از پودر لاستیک فرآوری‌شده در مقایسه با مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک مرسوم نتایج بهتری داشتند [18]. در پژوهشی دیگر مقاومت مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک مرسوم به روش تر و پودر لاستیک فرآوری‌شده به روش خشک در برابر شیارشدگی با استفاده از آزمایش چرخ بارگذاری و آزمایش بارگذاری تکراری محوری در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که استفاده از پودر لاستیک مرسوم

فرآوری شده این موضوع لحاظ نشده است. از این رو، در این پژوهش به بررسی و مطالعه تغییر شکل پذیری مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک فرآوری شده (تهیه شده در مرکز تحقیقات روسازی دانشگاه تربیت مدرس) با در نظر گرفتن شرایط بهینه سازی طرح مخلوط مارشال پرداخته شده است. سپس با استفاده از طرح مخلوط به دست آمده، عملکرد مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی پیوسته و مخلوط‌های با استخوان بندی سنگدانه ای درشت اصلاح شده حاوی پودر لاستیک فرآوری شده مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با نمونه‌های شاهد و نمونه‌های اصلاح شده با قیر لاستیکی مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- مواد و مصالح

مصالح سنگی مورد استفاده بیشتر از جنس سیلیسی بود. قیر مورد استفاده نیز، قیر درجه نفوذ ۷۰-۶۰ بود که جدول (۱) نتایج آزمایش‌های قیر را نشان می‌دهند. در پژوهش از دو دانه بندی، یکی دانه بندی پیوسته و دیگری دانه بندی با استخوان بندی سنگدانه ای درشت دانه استفاده شد.

دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده در پژوهش برای مخلوط‌های آسفالتی با دانه بندی پیوسته و دانه بندی منقطع آسفالت با استخوان بندی سنگدانه ای به ترتیب از دانه بندی‌های شماره ۴ مربوط به جداول (۹-۱ و ۱۳-۳) نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور است که در ساخت رویه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمودار دانه بندی‌های انتخابی در شکل‌های (۱ و ۲) آورده شده است.

به منظور تعیین و بررسی مشخصات شیمیایی مصالح سنگی، آزمایش XRF روی فیلر مصالح سنگی صورت پذیرفت. نتیجه تحلیل برای عناصر اصلی به صورت اکسید و برای عناصر فرعی به صورت عنصری در جدول (۲) گزارش شده است. با توجه به نتایج این جدول تحلیل نتایج آزمایش XRF حاکی از وجود مقادیر زیاد سیلیس در فیلر مصالح سنگی (بالای ۵۵ درصد) بوده و بنابراین می‌توان این مصالح را جزو مصالح سنگی سیلیسی دسته بندی نمود.

و پودر لاستیک فرآوری شده منجر به بهبود عملکرد مخلوط‌ها در برابر شیارشدگی شده و بکارگیری ۲۵ درصد پودر لاستیک فرآوری شده بهترین نتایج را به همراه داشت [19]. در تحقیقی دیگر مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر خالص و قیر اصلاح شده با پودر لاستیک مرسوم به روش تر و پودر لاستیک فرآوری شده به روش خشک با انجام آزمایش خزش دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که استفاده از پودر لاستیک فرآوری شده باعث حصول نتایج بهتری در مقایسه سایر مخلوط‌های آسفالتی شد [20]. همچنین در یک تحقیق کاربردی عملکرد دمای بالای مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک فرآوری شده با دانه بندی منقطع ریز مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق پودر لاستیک فرآوری شده به مقدار ۴۰ و ۴۵ درصد وزنی قیر به مخلوط آسفالتی اضافه شد. نتایج نشان دادند که استفاده از پودر لاستیک فرآوری شده، مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [21].

با وجود تحقیقات و پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک فرآوری شده در دمای بالا، متأسفانه تاکنون در این پژوهش‌ها عدم کفایت واکنش بین قیر و افزودنی به دلیل عدم در نظر گرفتن شرایط عمل‌آوری و اصلاح طرح مخلوط مارشال به منظور بهبود مشخصات نمونه‌های آسفالتی صورت پذیرفته است [22, 23]. از سوی دیگر از آنجایی که فرآوری پودر لاستیک با استفاده از مواد معدنی یک رویکرد جدید است، تحقیقات صورت گرفته بسیار محدود بوده و عملکرد این محصول مورد بررسی جامع و دقیقی قرار نگرفته است. در تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، بررسی و بهبود طرح مخلوط، روش عمل‌آوری و تراکم نمونه‌های اصلاح شده با پودر لاستیک فرآوری شده به طور جامع مدنظر قرار نگرفته است.

اگرچه تحقیقات گذشته نشان می‌دهد در صورت بکارگیری پودر لاستیک به صورت خشک نیز تا حدودی بین قیر و افزودنی واکنش صورت خواهد گرفت، در مقالات و پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه پودر لاستیک

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی پیوسته انتخابی منطبق بر نشریه ۲۳۴

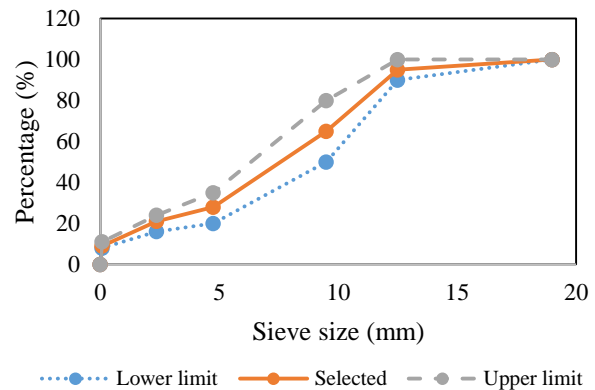


Fig. 1. Grading Curve of the Dense graded mix, corresponding with Spec.No.234

شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مخلوط آسفالتی استخوان‌بندی سنگدانه‌ای انتخابی

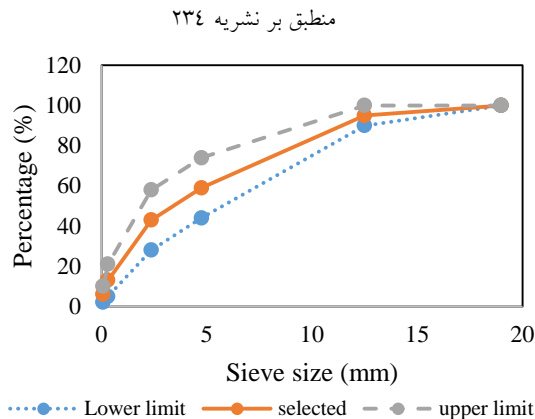


Fig. 2. The Stone Mastic Asphalt Gradation corresponding with Spec.No.234

جدول ۱. آزمایشات قیر خالص

Test Method	Value	Standard
Penetration (100 g, 5 s, 25 <sup>0</sup> C)	65	ASTM D5
Specific gravity at 25 <sup>0</sup> C (g/cm <sup>3</sup> )	1.016	ASTM D70
Softening point (° C)	50.8	ASTM D36
Ductility (25 <sup>0</sup> C, 5 cm/min), cm	+100	ASTM D113
Flash Point (° C)	306	ASTM D92

Table 1. Physical properties of the asphalt binder

جدول ۲. نتایج تحلیل XRF مصالح سنگی انتخاب‌شده

Component	L.O.I	SO <sub>3</sub>	Sr	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Amount (%)	1.87	0.037	0.051	0.273	1.984	2.73	3.25	12.95	4.35	9.68	56.23

Table 2. XRF Testing Results of the selected Aggregates

### ۲-۳- پودر لاستیک فرآوری شده

پودر لاستیک فرآوری شده مورد استفاده در پژوهش توسط مرکز تحقیقات راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس با همکاری گروه شیمی-فیزیک دانشگاه بر پایه روش و رویکرد فرآوری پودر لاستیک تولیدشده توسط Sousa و همکاران [17]، تهیه شد. برای تولید قیر لاستیکی از ۵۸ درصد پودر لاستیک، ۲۰ درصد قیر با درجه نفوذ زیاد، ۲۰ درصد پایدارکننده معدنی و ۲ درصد وزنی آهک هیدراته استفاده شد. این مواد به مدت ۵ دقیقه و روی یک گرم‌کن در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد با استفاده از یک مخلوط‌کن برشی سریع، ترکیب می‌شوند. برای این حل مشکلات استفاده از پودر لاستیک در روسازی‌ها، یک تجربه آزمایشگاهی منجر به تهیه ماده‌ای شده است که دارای اجزاء فعال کننده سطحی بوده و به همراه برخی از مواد دیگر مانند نانوسیلیس، محصولی به نام ماده پایدارکننده معدنی (AMBS) از آن

### ۲-۱- پودر لاستیک

پودر لاستیک استفاده شده در این پژوهش با اندازه عبوری از الک ۴۰٪ شرکت یزد تایر و به روش خرد کردن در دمای محیط تهیه شده است.

### ۲-۲- قیر اصلاح شده با پودر لاستیک

قیر اصلاح شده با پودر لاستیک مرسوم به روش تر مطابق با استاندارد ASTM D-6114 تهیه شد. در این پژوهش، با توجه به تحقیقات گذشته، برای تهیه قیر اصلاح شده با پودر لاستیک، به مقدار ۲۰ درصد وزنی قیر، پودر لاستیک به قیر اضافه و با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن برشی سریع، قیر و پودر لاستیک به مدت ۶۰ دقیقه، با سرعت چرخشی ۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد باهم ترکیب شدند [18].

منظور تعیین ویژگی‌های تغییر شکل پذیری مخلوط‌ها بودند که در ادامه تشریح شده‌اند.

#### ۴-۱- آزمایش مارشال

طرح مخلوط و ساخت نمونه‌های آسفالتی مارشال بر اساس روش مارشال و طبق استاندارد ASTM-D1559 انجام و نمونه‌ها تحت ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه متراکم شدند. سپس نمونه‌های ساخته‌شده برای بهینه‌سازی طرح مخلوط و تعیین درصد قیر بهینه تحت آزمایش‌های مارشال قرار گرفتند.

#### ۴-۲- آزمایش چرخ بارگذاری هامبورگ

برای بررسی پدیده شیارشدگی، یکی از روش‌ها استفاده از دستگاه چرخ بارگذاری هامبورگ است. در این پژوهش آزمایش شیارافتادگی نمونه‌های آسفالتی مختلف توسط دستگاه چرخ بارگذاری هامبورگ و بر اساس روش استاندارد AASHTO T234 روی نمونه‌های دال شکل انجام گرفت [26]. در این آزمایش به دلیل اینکه چرخ در تماس مستقیم با نمونه آسفالتی قرار دارد به‌خوبی، تغییر شکل‌های دائمی شبیه‌سازی می‌شود. برای انجام این آزمایش نمونه‌های آسفالتی در شرایط خشک و اشباع در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد، زیر بار چرخ ۷۰۵ نیوتن و با سرعت ۵۲ عبور در دقیقه، تحت ۷۵۰۰ عبور (رفت و برگشت) تحت آزمایش قرار گرفتند.

#### ۴-۳- آزمایش بارگذاری تکراری محوری

آزمایش بارگذاری تکراری محوری، یکی از قابل‌اعتمادترین روش‌ها در میان روش‌های ارزیابی تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی است. در این آزمایش برای بررسی مقاومت در برابر شیارشدگی، نمونه‌های آسفالتی شاهد و نمونه‌های اصلاح‌شده با پودرلاستیک به روش تر مرسوم و پودرلاستیک فرآوری شده با دو دانه‌بندی پیوسته و استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، با استفاده از دستگاه (NAT) Nottingham Asphalt Tester، مطابق با استاندارد BS DD 226:1996 روی نمونه‌های استوانه‌ای مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفتند [27]. دستگاه NAT قابلیت ارزیابی

حاصل می‌شود. این ماده هنگام اختلاط با قیر، پودرلاستیک و مصالح سنگی داغ وارد عمل شده و ذرات پودرلاستیک را آماده برای ترکیب در قیر و پوشش سنگدانه‌ها می‌کند. ساختار شیمیایی این گونه مواد اغلب شامل انواعی از مواد شیمیایی هستند که ویژگی‌هایی با یک مولکول نسبتاً بلند دارند که دارای یک انتهای آب‌گریز و انتهای دیگر آب‌دوست هستند. قسمت آب‌گریز این مواد (دنباله هیدروکربنی بلند) با رزین موجود در قیر سازگار بوده و به سمت آن حرکت می‌کند، در حالی‌که قسمت آبدوست آن به سمت بیرون جهت‌گیری نموده (به سمت فاز آب) و با احاطه نمودن رزین باعث سازگاری آن با آب می‌شود. در این عملکرد، مواد فعال‌کننده سطحی، انرژی سطحی را بین سطوح به میزان زیادی افزایش داده و موجب افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها می‌شوند [26].

#### ۳- ساخت نمونه‌ها

به منظور تعیین شرایط مناسب اختلاط و بهینه‌سازی طرح مخلوط به روش خشک مرسوم، نمونه‌های مارشال طبق درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی شاهد حاوی ۵٫۴ درصد قیر و ۲۰ درصد وزنی قیر، پودرلاستیک فرآوری‌شده ساخته شده و به منظور ارزیابی مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های شاهد و مخلوط‌های اصلاح‌شده، نمونه‌های مختلفی تهیه شدند. نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک به مقدار ۲۰ درصد وزنی قیر به روش تر و نمونه‌های اصلاح‌شده با پودرلاستیک فرآوری‌شده به روش خشک در مقادیر مختلف (۲۰، ۲۵ و ۳۰٪) مطابق با جدول (۳) تهیه شدند. برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی از روش طرح مخلوط مارشال مطابق با استاندارد ASTM D1559 استفاده شد [25].

#### ۴- آزمایش‌ها

آزمایش‌ها شامل دودسته آزمایش مارشال به منظور اصلاح طرح مخلوط و تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی و آزمایش‌های چرخ بارگذاری و بارگذاری محوری تکراری به

نمونه‌های استوانه‌ای شکل برای تعیین تغییر شکل‌های دائم تحت بارگذاری‌های تک‌محوری، استاتیک و تکراری را دارد. در این دستگاه بار توسط یک محرک دیافراگمی غلتشی روی نمونه‌ها وارد می‌شود.

بار وارد شده توسط سیستم اندازه‌گیری بار (Load Cell) کنترل شده و تغییر شکل به وسیله دو عدد تغییر شکل سنج (LVDT) ثبت می‌شود. در این پژوهش آزمایش بارگذاری محوری تکراری روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۰۰ و ۶۰ میلی‌متر، در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد و با اعمال تنش‌های بارگذاری ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال انجام شد. بارگذاری به صورت ۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه زمان استراحت روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. در هنگام انجام آزمایش، تغییر شکل نمونه‌ها توسط دو عدد تغییر شکل سنج (LVDT) که در صفحه بالایی قاب دستگاه نصب می‌شوند اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. بارگذاری تا زمانی که تغییر شکل به ۸ درصد برسد ادامه پیدا می‌یافت.

## ۵- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

نتایج و تحلیل آزمایش‌ها برحسب طرح مخلوط و آزمایش‌های صورت گرفته به شرح زیر است.

### ۵-۱- بهینه‌سازی طرح مخلوط

جدول (۳)، درصد قیر بهینه تعیین شده از طرح مخلوط مارشال و جدول (۴) نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی طرح مخلوط به روش مارشال را نشان می‌دهد. برای اصلاح و بهینه‌سازی طرح مخلوط آسفالتی حاوی پودرلاستیک فرآوری شده به روش خشک مرسوم پارامترهای زمان اختلاط (اختلاط مصالح سنگی و پودرلاستیک فرآوری شده و اختلاط این دو با قیر خالص)، نقش اعمال بارگذاری روی نمونه‌ها برای کنترل تورم نمونه‌ها در زمان واکنش بین قیر و پودرلاستیک به دلیل زمان کم واکنش بین آن‌ها، عمل‌آوری (زمان و دمای انجام واکنش بین پودرلاستیک فرآوری شده و قیر) و چگونگی انجام تراکم (تعداد ضربات، دما) مورد ارزیابی قرار گرفتند. مراحل و شرایط طرح مخلوط به طور خلاصه در جدول (۴) آورده شده است. در روش خشک،

اختلاط در دو مرحله بلافاصله متوالی انجام می‌شود. در مرحله اول اختلاط مصالح سنگی با پودرلاستیک فرآوری شده و در مرحله دوم اختلاط قیر با مصالح انجام می‌شود. با در نظر گرفتن مرحله اول به مدت ۳۰ ثانیه، برای مرحله دوم شرایط ۳۰، ۶۰ و ۹۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت و حالت ۳۰ ثانیه مرحله اول و ۶۰ ثانیه مرحله دوم به دلیل حصول نتایج بهتر مقاومت مارشال و درصد فضای خالی درصد استاندارد به عنوان حالت بهینه انتخاب شد. به دلیل درصد بالای فضای خالی نمونه‌ها و احتمال تغییر شکل در دوران بهره‌برداری، شرایط اعمال بارگذاری روی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله پس از ساخت نمونه‌ها و به منظور جلوگیری از تورم آن‌ها یک بار ثابت به ترتیب به اندازه وزن نمونه ساخته شده و دو برابر وزن نمونه ساخته شده روی نمونه‌ها وارد شد. این کار می‌تواند منجر به جلوگیری تورم نمونه‌ها پس از اختلاط شود. ولی به دلیل این‌که در عمل امکان اعمال این بار ثابت روی روسازی‌ها دشوار و تقریباً غیرممکن است، اقدام به تخصیص یک زمان واکنش بین قیر و پودرلاستیک فرآوری شده شد. بدین منظور با در نظر گرفتن زمان‌های عمل‌آوری ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ دقیقه در دماهای ۱۳۰، ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به بررسی نقش پارامتر زمان و دما پرداخته شد. در هر مرحله از انجام آزمایش حالت‌های بهینه به دست آمد که در جدول (۳) نتایج آن گزارش شده است. سپس این حالات با یکدیگر مقایسه و در نهایت یک‌زمان عمل‌آوری ۶۰ دقیقه در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان حالت بهینه عمل‌آوری انتخاب شد. در آخرین قدم شرایط تراکم نمونه‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش به بررسی پارامترهای مؤثر در تراکم همچون چگونگی تراکم، تعداد ضربات تراکم و دمای تراکم با در نظر گرفتن مقاومت مارشال و درصد فضای خالی مخلوط‌ها پرداخته شد. بدین منظور پنج حالت تراکم با بررسی تأثیر دماهای مختلف در نظر گرفته شد که در جدول (۵) این حالات نشان داده شده است. در نظر گرفتن حالت‌های مختلف تراکم به منظور کنترل سطح تورم، کنترل میزان انبساط مخلوط و تأمین درصد فضای خالی صورت

عمل سبب عدم تراکم یافتن مناسب نمونه‌ها شد. در پایان به دلیل وجود مشکلات اجرا در واقعیت و اختلاف ناچیز میان نتایج حاصل از برخی حالات مختلف تراکم، تراکم تک‌مرحله‌ای ۷۵ ضربه در دمای ۱۳۵ درجه‌سانتی‌گراد به عنوان حالت بهینه انتخاب شد.

پذیرفت. در این حالت به دلیل واکنش‌های بین قیر و پودرلاستیک فرآوری‌شده، مخلوط آسفالتی کمی متورم می‌شود که تراکم دومرحله‌ای امکان جلوگیری از این تورم را ایجاد می‌کند. بررسی نتایج نشان دادند که به‌طورکلی در مرحله دوم تراکم، کاهش دما باعث کاهش مقاومت مارشال و همچنین افزایش درصد فضای خالی نمونه‌ها می‌شود. این

جدول ۳. درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده به روش‌های مختلف

Mix denomination	Mix type	OBC (%)	Additive type & Content	Modification Process
DC	Dense	5.4	-	-
GC	Stone Mastic Asphalt	6.1	-	-
DR	Dense	5.85	20% CRM	Wet
GR	Stone Mastic Asphalt	6.6	20% CRM	Wet
DP20%	Dense	5.6	20% PCR	Dry
DP25%	Dense	5.72	25% PCR	Dry
DP30%	Dense	5.8	30% PCR	Dry
GP20%	Stone Mastic Asphalt	6.2	20% PCR	Dry
GP25%	Stone Mastic Asphalt	6.3	25% PCR	Dry
GP30%	Stone Mastic Asphalt	6.5	30% PCR	Dry

Table 3. The Optimum Bitumen Contents of the Various Asphalt Mixtures

جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی طرح مخلوط

Parameter	Test Condition	Marshall Stability (Kg)	Void (%)	Optimum
Mix Time	30s + 30s	949	6.3	30s + 60s
	30s + 60s	1042	6	
	30s + 90s	1028	6.1	
Overload	Without	1042	6.1	2400 gr
	1200 gr	1112	4.3	
	2400 gr	1197	4.15	
Curing	30 min - 175 <sup>0</sup> C	1235	4.7	60 - 145 <sup>0</sup> C
	45 min - 175 <sup>0</sup> C	1219	4.1	
	60 min - 145 <sup>0</sup> C	1281	4.1	
	75 min - 145 <sup>0</sup> C	1228	3.95	
Compaction	75	1336	4.05	75
	25/50 - 115 <sup>0</sup> C	1178	4.3	
	50/25 - 115 <sup>0</sup> C	1341	3.85	
	35/40 - 115 <sup>0</sup> C	1097	4.3	
	40/35 - 115C	1132	4.1	

Table 4. Mixing Design Optimization Results

جدول ۵. عوامل مؤثر در بخش اصلاح شرایط تراکم

Stages	Single Stage	Double Stage	Double Stage	Double Stage	Double Stage
Number of Blows	75 Blows on One side	First Stage: 40 Blows Second Stage: 35 Blows	First Stage: 35 Blows Second Stage: 40 Blows	First Stage: 50 Blows Second Stage: 25 Blows	First Stage: 25 Blows Second Stage: 50 Blows
Compaction temperature (°C)	First Stage: 135 Second Stage: 80, 90, 105, 115	First Stage: 135 Second Stage: 80, 90, 105, 115	First Stage: 135 Second Stage: 80, 90, 105, 115	First Stage: 135 Second Stage: 80, 90, 105, 115	First Stage: 135 Second Stage: 80, 90, 105, 115

Table 5. Effective factors in the correction of compaction conditions

## ۵-۲- چرخ بارگذاری هامبورگ

در آزمایش چرخ بارگذاری هامبورگ عمق نهایی شیار ایجاد شده در نمونه‌های مورد آزمایش تعیین و منحنی‌های مربوط به آن‌ها ترسیم و نتایج به دست آمده در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای دانه‌بندی‌های پیوسته و منقطع درشت‌دانه به ترتیب در شکل‌های (۳ و ۴) آورده شده است. در این نمودارها عمق نهایی شیار نمونه‌های آسفالتی شاهد، حاوی ۲۰ درصد پودرلاستیک مرسوم به روش تر و همچنین نمونه‌های حاوی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد پودرلاستیک فرآوری-شده به روش خشک مقایسه شده است.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، اصلاح مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری‌شده سبب کاهش عمق شیار می‌شود. عمق شیار کمتر مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری‌شده می‌تواند به دلیل جذب بخش روغنی مالتین قیر توسط پودرلاستیک و در نتیجه افزایش ذرات آسفالتین جامد قیر موجب شود که این امر سبب سفت شدن قیر و کاهش عمق شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.

به طور کلی استفاده از پودرلاستیک فرآوری‌شده به مقدار ۲۵ درصد وزنی قیر به روش خشک عملکرد بهتری نسبت به سایر مقادیر در برابر مقاومت شیارشدگی داشته است. وقتی شرایط آزمایش از حالت خشک به غرقاب تغییر می‌یابد، عمق

شیار افزایش می‌یابد، به طوری که در نمونه شاهد در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای دانه‌بندی‌های پیوسته و استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، به ترتیب ۲۳۰ و ۲۲۰ درصد افزایش عمق شیار حادث شد. در مخلوط‌های حاوی ۲۵ درصد پودرلاستیک فرآوری‌شده برای دانه‌بندی‌های پیوسته و استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، افزایش عمق شیار به ترتیب به ۱۶۰ و ۱۷۵ درصد رسید. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که قیر لاستیکی در حدود کمتر از ۱۰ درصد نسبت به ۲۰ درصد پودرلاستیک فرآوری‌شده عملکرد بهتری دارد، ولی با افزایش مقدار پودرلاستیک فرآوری‌شده به ۲۵ و ۳۰ درصد وزنی قیر، عملکرد مخلوط آسفالتی نسبت به استفاده از قیر لاستیکی بهبود می‌یابد. افزایش دما نیز از ۴۰ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد موجب بحرانی‌تر شدن شرایط و افزایش عمق شیار در مخلوط‌های آسفالتی به میزان ۵۰ تا ۷۰ درصد می‌شود که این رفتار نشان از حساسیت مخلوط‌های آسفالتی به تغییرات دمایی است. تغییر دانه‌بندی از پیوسته به دانه‌بندی منقطع درشت‌دانه (آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای) نیز موجب کاهش عمق شیار و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود. این عملکرد بهتر آسفالت با دانه‌بندی استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، می‌تواند به دلیل افزایش اتصال سنگدانه‌های درشت به یکدیگر در این مخلوط‌ها باشد.

شکل ۳. نتایج عمق شیار در آزمایش چرخ بارگذاری (۷۵۰۰ سیکل رفت‌وبرگشت و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد)

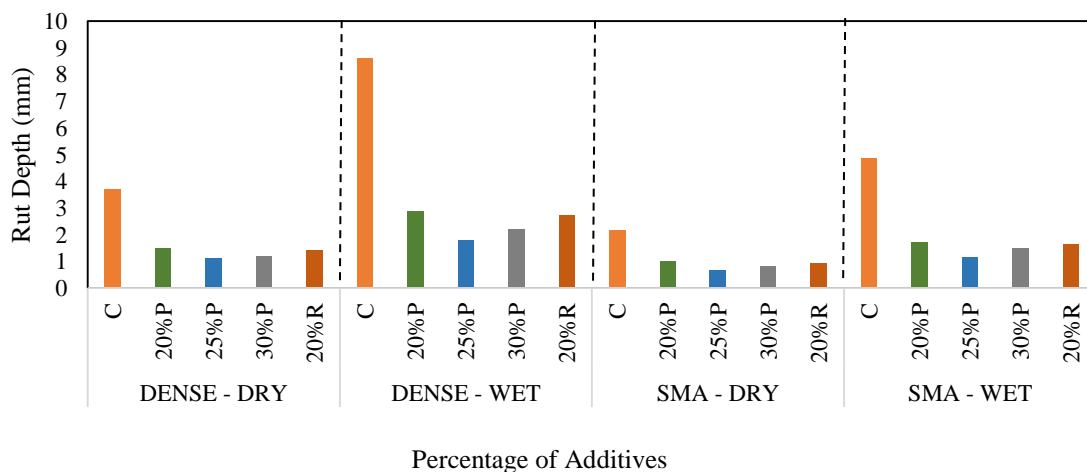


Fig. 3. Wheel Track Testing Results (7500 Cycles and 40 °C)



شکل ۴. نتایج عمق شیار در آزمایش چرخ بارگذاری (۷۵۰۰ سیکل رفت و برگشت و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد)

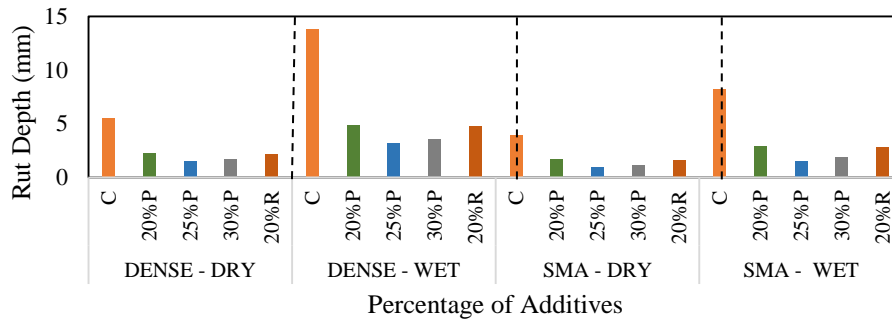


Fig. 4. Wheel Track Testing Results (7500 Cycles and 50 ° C)

درصد می‌شود. به طوری که برای نمونه شاهد در دمای ۴۰ درجه و دانه‌بندی‌های پیوسته و استخوان‌بندی سنگدانه‌ای تعداد سیکل‌ها برای رسیدن به گسیختگی، به ترتیب در حدود ۴۰۰ و ۴۵۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش تعداد سیکل برای مخلوط آسفالتی دارای ۲۵ درصد افزودنی پودرلاستیک فرآوری شده برای دانه‌بندی‌های پیوسته و استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به ترتیب برابر با ۲۳۹ و ۲۳۷ درصد است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که قیر لاستیکی به طور محسوس در حدود کمتر از ۵ درصد، عملکرد بهتری نسبت به نمونه آسفالتی حاوی ۲۰ درصد پودرلاستیک فرآوری شده دارد، این در حالی است که نمونه‌های آسفالتی حاوی ۲۵ و ۳۰ درصد پودرلاستیک فرآوری شده به مراتب عملکرد بهتری در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی حاوی ۲۰ درصد پودرلاستیک مرسوم و پودرلاستیک فرآوری شده دارند. با افزایش دما مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار در نمونه‌های آسفالتی بین ۲۰ تا ۸۰ درصد کاهش پیدا می‌یابد. افزایش دما روی ویسکوزیته قیر تأثیر گذاشته و باعث کاهش مقاومت در برابر گسیختگی نمونه‌ها می‌شود.

با تغییر دانه‌بندی از پیوسته به استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، عملکرد نمونه‌های آسفالتی بهبود پیدا می‌کنند. در این شرایط هر چه مقدار درصد افزودنی افزایش یابد، درصد بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی نیز افزایش می‌یابد. به طوری که در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و تنش ۱۵۰ کیلو پاسکال، در نمونه شاهد بهبود نمونه‌های استخوان‌بندی سنگدانه‌ای در

### ۳-۵- آزمایش بارگذاری محوری تکراری

شکل‌های (۵ و ۶) به ترتیب نتایج تعداد سیکل بارگذاری برای رسیدن به گسیختگی را در آزمایش بارگذاری محوری تکراری در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

در این آزمایش استفاده از افزودنی‌های پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده موجب افزایش تعداد سیکل بارگذاری و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر گسیختگی شد. این موضوع نشان دهنده بهبود مشخصات قیر و افزایش سختی قیر در دماهای بالا شده که در نتیجه آن مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های ماندگار بهبود یافته و تعداد سیکل‌های لازم برای رسیدن به کرنش ۸ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش تعداد سیکل بارگذاری معادل عمق کمتر شیارشدگی برای نمونه‌های اصلاح شده با پودرلاستیک و پودرلاستیک فرآوری شده است. در این فرآیند، اتصال زنجیره‌های هیدروکربنی پودرلاستیک با قیر، موجب افزایش و تقویت پیوندهای عرضی زنجیره‌های هیدروکربنی قیر می‌شود که در نتیجه آن مقاومت قیر در برابر تغییر شکل در دماهای بالا افزایش می‌یابد.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پودرلاستیک فرآوری شده به مقدار ۲۵ درصد وزنی قیر به روش خشک بهترین عملکرد در برابر تغییر شکل‌های ماندگار را دارد. همچنین افزایش تنش از ۱۵۰ به ۳۰۰ کیلو پاسکال موجب کاهش تعداد سیکل‌های بارگذاری برای رسیدن به کرنش ۸

یکدیگر است که موجب افزایش مقاومت این دانه‌بندی در برابر گسیختگی می‌شود. همچنین استفاده از مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای موجب افزایش درصد قیر مخلوط‌ها و در نتیجه افزایش ضخامت قشر قیر روی سنگدانه‌ها می‌شود که به دوام مقاومت در برابر تغییر شکل در دماهای بالا کمک می‌کند.

حدود ۱۵ درصد و در نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد پودر لاستیک فرآوری شده به ۲۶ درصد رسید. پس از آن و در درصد افزودنی پودر لاستیک فرآوری شده به میزان ۳۰ درصد، مقدار بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی دوباره روند کاهشی پیدا کرد. دلیل عملکرد بهتر مخلوط آسفالتی دارای استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، اتصال سنگدانه‌های درشت به

شکل ۵. نتایج تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش بارگذاری تکراری محوری جهت رسیدن به کرنش ۸ درصد در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

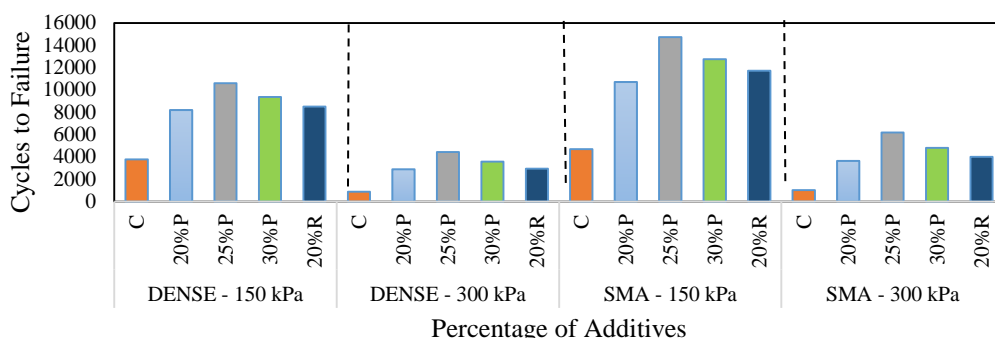


Fig. 5. RLA Results to Approach 8% Strain in 40 °C

شکل ۶. نتایج تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش بارگذاری تکراری محوری جهت رسیدن به کرنش ۸ درصد در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد

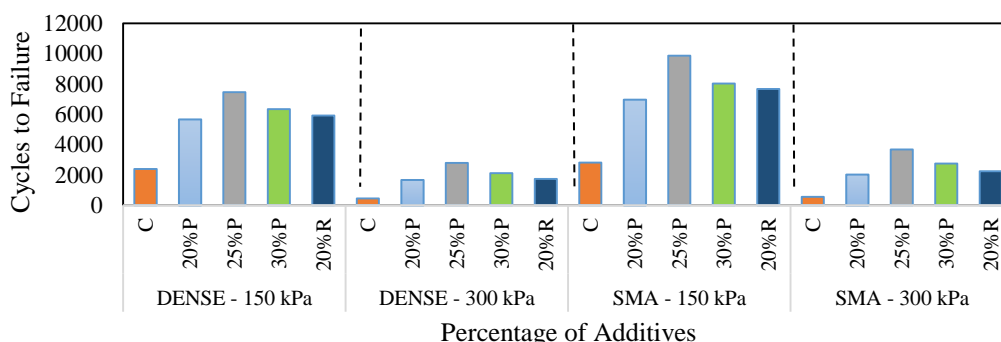


Fig. 6. RLA Results to Approach 8% Strain in 50 °C

شکل ۷. همبستگی آزمایش چرخ بارگذاری و بارگذاری تکراری محوری

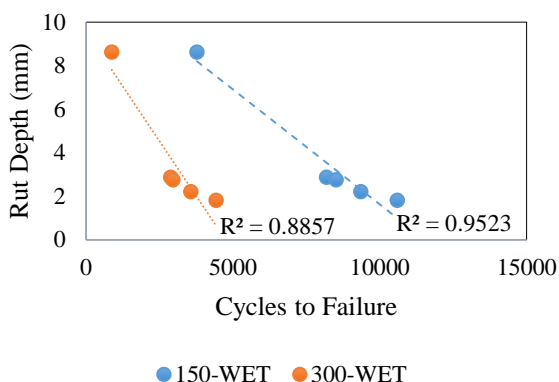


Fig. 7. Correlation between RLA and HWT test

#### ۴-۵- همبستگی آزمایش‌های چرخ بارگذاری و بارگذاری تکراری محوری

برای بررسی همبستگی بین دو آزمایش، از نتایج عمق شیارشدگی آزمایش چرخ بارگذاری و تعداد سیکل بارگذاری آزمایش بارگذاری تکراری محوری استفاده شد. بررسی ارتباط نتایج عمق شیار و تعداد سیکل‌های بارگذاری آزمایش‌ها بیانگر همبستگی بین ۸۵ تا ۹۵ درصدی این دو آزمایش می‌باشد که نمونه آن در شکل (۷) ارائه شده است.

## ۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، طرح مخلوط مارشال به منظور بهبود سطح واکنش قیر و افزودنی در روش خشک اصلاح شد. در ادامه و پس از کسب نتایج آزمایشگاهی بخش‌های مختلف بهبود طرح مخلوط مارشال، نمونه‌های آسفالتی با دانه‌بندی متراکم و منقطع درشت‌دانه اصلاح‌شده با پودرلاستیک فرآوری‌شده و مرسوم تهیه و مقاومت آن‌ها در برابر شیارشدگی ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شد که نتایج آن به صورت خلاصه به شرح زیر است:

۱- اصلاح طرح مخلوط آسفالتی مارشال و در نظر گرفتن پارامترهایی همچون شرایط اختلاط، شرایط عمل‌آوری و چگونگی تراکم ضمن بهبود شرایط واکنش قیر و افزودنی موجب بهبود مقاومت مارشال تا ۴۰ درصد و قرارگیری درصد فضای خالی در محدوده تعیین شده مشخصات فنی شده است.

۲- بررسی نتایج آزمایش‌های عملکردی دمای بالا نشان می‌دهند که بکارگیری افزودنی‌ها موجب کاهش عمق شیارشدگی تا ۶۰٪ در آزمایش چرخ بارگذاری و افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری آزمایش بارگذاری تکراری محوری برای رسیدن به کرنش ۸٪ در حدود ۳/۵ برابر نسبت به نمونه شاهد شده است.

۳- بهبود سطح واکنش بین قیر و افزودنی‌ها به واسطه اصلاح طرح مخلوط آسفالتی موجب افزایش سختی قیر، افزایش چسبندگی و پوشش قیر اطراف مصالح سنگی می‌شود از جمله دلایل افزایش مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل در دمای بالا می‌باشد. همچنین ارزیابی مشخصات و ویژگی‌های رئولوژی قیر اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف افزودنی نیز در دمای بالا به منظور بررسی بهتر نتایج مخلوط آسفالتی برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

۴- نتایج آزمایش‌های نشان دادند با وجود اینکه استفاده از هر دو افزودنی موجب بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شوند، نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد پودر لاستیک فرآوری‌شده، بهترین نتایج برای هر دو مخلوط آسفالتی

پیوسته و مخلوط آسفالتی دارای استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به همراه دارند.

۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌ها موجب کاهش حساسیت نمونه‌های آسفالتی نسبت به سطح تنش بارگذاری و دما شده است به طوری که نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده با دانه‌بندی منقطع کمترین مقدار حساسیت را دارند.

۶- بررسی داده‌های آزمایشگاهی بیانگر همبستگی قابل قبول و معناداری ( ۸۵ الی ۹۰ درصد) بین نتایج آزمایش چرخ هامبورگ و بارگذاری محور تکراری می‌باشد. همچنین در ادامه تحقیقات می‌توان میزان همبستگی بین نتایج آزمایش MSCR<sup>۳</sup> قیر و نتایج آزمایش‌های عملکردی مخلوط آسفالتی را مورد بررسی قرار داد.

## ۷- مراجع

- [1] Xu T., Huang X. 2012, Investigation into Causes of in-place Rutting in Asphalt Pavement, Journal of Constr. Build. Mater, 28(1): 525-530.
- [2] Zhang Y. 2012, Anisotropic Characterization of Asphalt Mixtures in Compression, Texas A&M University, Corpus Christi.
- [3] Li Q., Ni F., Gao L., et al. 2014, Evaluating the Rutting Resistance of Asphalt Mixtures using an Advanced Repeated Load Permanent Deformation Test under Field Conditions, Journal of Constr. Build. Mater, 61: 241-251.
- [4] Mehrara A., Khodaii A. 2013, A Review of State of Art on Stripping Phenomenon in Asphalt Concrete. Journal of Constr. Build. Mater, 38: 423-442.
- [5] Yildirim Y. 2007, Polymer Modified Asphalt Binders, Journal of Constr. Build. Mater, 21: 66-72.
- [6] Jeong., Dong k., Lee S.J., Amirhanian S.N., and Kim K.W. 2010, Interaction Effects of Crumb Rubber Modified Asphalt Binders., Journal of Constr. Build. Mater, 24: 824-31.
- [7] Ameli A., Babagoli R., Asadi S., Norouzi N. 2021, Investigation of the Performance Properties of Asphalt Binders and Mixtures Modified by Crumb Rubber and Gilsonite. Journal of Constr. Build. Mater, 279: 122424.
- [8] Bakheit I., Xiaoming H. 2019, Modification of the Dry Method for Mixing Crumb Rubber Modifier with Aggregate and Asphalt Based on the Binder Mix Design, Journal of Constr. Build. Mater, 220: 278-284.
- [9] Unsiwilia S., Sangpetngam B. 2018, Influence of Particle Size and Content on Deformation Resistance

<sup>۳</sup> Multiple Stress Creep Recovery

- [19] sahebzamani H., Fazeli R., Mahmoodinia N. 2022, Comparing the effectiveness of using SBS and Crumb Rubber as Asphalt Mixture Modifiers with Different Modification Processes, International Conference Rubberized Asphalt, Asphalt Rubber, Spain.
- [20] Saha G., Kedarisetty S., Sousa J.B. 2017, Performance Characterization of Reacted and Activated Rubber (RAR) Modified Dense Graded Asphalt Mixtures, 96<sup>th</sup> Annual Meeting Transportation Research Board, USA, Washington D.C, 1626345: 15p.
- [21] Sousa J.B., Francisco Silva M. 2016, Development of New Asphalt Mixture Thin Gap 9.5 mm with Reacted and Activated Rubber, SHRP Report.
- [22] Abdul Hassan N., Airey G., Putra Jaya R., Mashros N., Aziz Md. 2014, A Review of Crumb Rubber Modification in Dry Mixed Rubberized Asphalt Mixtures, Journal of Teknologi, 70: 127-134
- [23] Yu M., Easa S., Wu G., Zhou J. 2014, Proposed Compaction Procedure for Dry Process Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures using Air Void Content and Expansion Ratio, Journal of Testing and Evaluation, 42: 1-15.
- [24] Ishai I., Svehinsky G., and Sousa J.B. 2011, 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, held in Moscow, Russia., November.
- [25] ASTM D-1559. 2017, Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures using Marshall Apparatus, American Society for Testing and Materials.
- [26] T. American Association of State Highway and Transportation Officials, 324. 2014, Standard Method of Test for Hamburg Wheel-track Testing of Compacted Hot mix asphalt (HMA), Washington, DC.
- [27] BS DD 226: 1996, Method for Determining Resistance to Permanent Deformation of Bituminous Mixtures Subjected to Unconfined Dynamic Loading, Br. Stand.
- of Crumb Rubber Modified Asphalt using Dry Process Mix, Journal of Engineering, 22: 182-193.
- [10] Chen S.Y., Ge D.D., Gong F.Y., You Z.P., Diab A., Ye M.X. 2020, Rheological Properties and Chemical Characterisation of Reacted and Activated Rubber Modified Asphalt Binder, Journal of Road Mater. Pavement, 21: 140-154.
- [11] Moreno F., Rubio M.C., Martinez-Echevarria M.J. 2012, The Mechanical Performance of Dry Process Crumb Rubber Modified Hot Bituminous Mixes: The Influence of Digestion time and Crumb Rubber Percentage, Journal of Constr. Build. Mater, 26: 466-474.
- [12] Presti D.L. 2013, Recycled Tire Rubber Modified Bitumen for Road Asphalt Mixture: A literature Review, Journal of Constr. Build. Mater, 49: 863-881.
- [13] Bressi S., Fiorentini N., Huang J., Losa, M. 2019, Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of Art and Statics. Journal of Coating, 384: 1-22.
- [14] Svehinsky G.I.I., Sousa J.B. 2011, Developing Warm SMA Paving Mixes using Activated Mineral Stabilizers and Bitumen Flow Modifiers, A Paper to be Presented at the 2<sup>nd</sup> International Conference on Warm Mix Asphalt St. Louis Missouri.
- [15] Sampat K., Biligiri P., and Sousa J.B. 2016, Advanced Rheological Characterization of Reacted and Activated rubber (RAR) modified asphalt binders, Journal of Constr. Build. Mater, 122: 12-22.
- [16] Sousa J.B., Vorobiev A., Ishai I., and Svehinsky G. 2012, Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes. Presented at the 5<sup>th</sup> International Asphalt Rubber Conference, Munich, Germany.
- [17] Sousa J. B., Vorobiev A., Rowe G.M., and Ishai I. 2013, Reacted and Activated Rubber, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2371: 32-40.
- [18] kavussi A., Doosti M., Azarnia M., Javadian S., Mollenhauer K. 2022, Evaluation of Hot Mix Asphalt Containing Processed and Conventional Crumb Rubber. International Conference Rubberized Asphalt, Asphalt Rubber, Spain.

# The role of processed crumb rubber on rutting resistance of dense and gap graded asphalt mixes

Amir Kavussi<sup>1\*</sup>, Saeed Jafari<sup>2</sup>, Mehdi Azarnia<sup>3</sup>, Hamid Azizi<sup>2</sup>

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

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

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

Received: 2022/11/23

Accepted: 2023/10/19

Kavussia@modares.ac.ir

## Abstract

Pavement distresses are the major concern in asphalt pavement industry. Permanent deformation is one of the most common types of pavement distresses. This kind of distress which is caused by repeated traffic loading at high temperatures appears mainly in upper layers of asphalt pavements in form of longitudinal depressions in wheel paths and small changes on the sides of the wheel paths. This phenomena not only leads to pavement structural failure, but it results in reduced service life of pavements and affects safety of road users. Over the past decades, pavement researchers have taken different approaches to improve rheological properties of bitumen and promote performance of asphalt mixtures. Application of additives such as Crumb Rubber (CR) in asphalt layers is one of the most economic approaches that results also is reduced environmental pollution. Crumb Rubber has been experienced in asphalt mixtures as an effective modifier for several decades. Despite numerous advantages of the application of crumb rubber in asphalt mixtures, there is still no extensive use of it in road pavements worldwide. This might be related to problems such as increased production cost of Crumb Rubber Modified (CRM) mixes, early aging due to high temperature at mixing and laying down faces and eventual coagulation of rubber particles in mixes, as well as phase separation of the CRM modified binder. In order to overcome the above mentioned negative issue, one of the latest methods of CRM modified mix Production is the application of Processed Crumb Rubber (PCR) instead of the application of commonly methods of wet processing. This type of crumb rubber is a combination of fine rubber powder, soft bitumen, minerals and hydrated lime, which are mixed in a short time processing. Processed crumb rubber can easily be added to asphalt mixes in dry mode mixing and improves performance of asphalt mixes. Lower Processed crumb rubber -Bitumen mixing time reduces problems of coagulation of rubber particles and have several advantages. Due to the fact that the Processed Crumb Rubber approach is relatively new, it is necessary to carry out comprehensive laboratory research works in order to evaluate characteristics of bitumen and performance of asphalt mixtures. In this research, rutting resistance of Crumb Rubber and Processed Crumb Rubber modified asphalt mixtures of a dense and a gap graded mix was evaluated. With this regard, Marshall Mix Design was modified in order to use the Processed Crumb Rubber in dry method. Hamburg Wheel-Track and repeated axial load tests were carried out to investigate rutting resistance of the modified mixes. Hamburg Wheel-Track test was performed in dry and saturated conditions and repeated axial load was assessed under stresses of 150 kPa and 300 kPa. The results were compared on samples containing conventional bitumen and wet processed crumb rubber. Although, the results showed that using both crumb rubber additives increased resistance of mixes against rutting, samples contains 25% Processed Crumb Rubber showed the highest resistance against permanent deformation. Moreover, application of Processed Crumb Rubber in stone mastic asphalt mixes showed superior performance against permanent deformation due to better stone to stone contact and higher amounts of Processed Crumb Rubber bitumen in mixes.

**Key words:** Rutting resistance, Process Crumb Rubber (PCR), Crumb rubber modified bitumen, Wet processed