

# ارزیابی تأثیر پودر آجر در بهبود رفتار خستگی مخلوط آسفالتی

محمد تقی پور<sup>۱</sup>، امیر کاووسی<sup>۲\*</sup>، فرید کاظمیان<sup>۳</sup>، مصطفی آدرسی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- استاد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۴- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

kavussia@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۶/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت ۹۵/۰۹/۱۴

## چکیده

روسازی راه‌ها به عنوان سطوحی که تحت بارگذاری مکرر و متعدد محورهای سنگین قرار می‌گیرند، باید دارای مقاومت کافی در برابر خرابی‌ها باشند. بر اساس مطالعات پیشین مشخص شده است که پس از گذشت چند سال استفاده از قیر با توجه به اکسیداسیون که در قیر رخ می‌دهد مستعد شکنندگی و ترک خواهد شد و در نهایت در اثر تکرار بار شکست مکانیکی اتفاق می‌افتد. پدیده خستگی یکی از مهم‌ترین دلایل بروز ضعف در روسازی راه است که بر اثر تکرار بارگذاری در آن رخ می‌دهد. پژوهش‌های بسیاری در مورد اصلاح قیر با مواد بازیافتی برای بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی قیر صورت گرفته است. همچنین پژوهش‌های آزمایشگاهی فراوانی نیز به منظور افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته که در آن‌ها سعی شده تا با استفاده از افزودنی‌های مطلوب، بتوان کیفیت مخلوط‌های بتن آسفالتی در برابر بار وسایل نقلیه افزایش داد. در سالیان اخیر به استفاده از افزودنی‌ها از جمله پلیمر، پودر آهن، آهک هیدراته، ضایعات شیشه، خرده لاستیک و پودر آجر برای بهبود خواص قیر و در نتیجه بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی توجه شده است. در این مقاله تأثیر استفاده از افزودنی پودر آجر ضایعاتی روی پارامترهای خستگی مخلوط آسفالتی ارزیابی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر تأثیر مثبت این افزودنی در بهبود عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی است.

**واژگان کلیدی:** روسازی، مخلوط‌های بتن آسفالتی، افزودنی، پودر آجر

## ۱- مقدمه

و افزایش ابعاد وسایل نقلیه سنگین و با ترکیب‌های مختلف از محورهای ساده و مرکب روبرو هستیم، اهمیت پدیده خستگی به عنوان یکی از عوامل مهم خرابی روسازی‌های آسفالتی بیش از پیش افزایش یافته است [2]. پدیده خستگی یکی از مهمترین عوامل کاهش عمر روسازی‌های آسفالتی است، که ابتدا به علت ترک‌های میکرونی در لایه‌های زیرین آسفالتی آغاز شده و به تدریج به سمت لایه‌های بالایی گسترش می‌یابد. برای افزایش

در روسازی راه‌ها، لایه‌های آسفالتی نقش حفاظت از جسم راه و انتقال تنش‌های فشاری از لایه‌های فوقانی به لایه‌های زیرین را دارد [1]. پدیده خستگی یکی از مهم‌ترین دلایل بروز ضعف در روسازی راه است که بر اثر تکرار بارگذاری در آن رخ می‌دهد. از آنجا که با رشد روز افزون تعداد وسایل نقلیه در جهان

شکل ۱. ترک‌های پوست سوسماری ناشی از خستگی در روسازی آسفالتی

[6]



Fig. 1. Fatigue cracks in asphalt pavement

### ۳- روش‌های تخمین مقاومت خستگی در مخلوط آسفالتی

ویژگی‌های خستگی مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان بر اساس رابطه موجود بین تنش یا کرنش اولیه و تعداد سیکل منجر به شکست با استفاده از معادلات (۱ و ۲) بیان نمود که در این روابط  $N_f$  تعداد سیکل منجر به شکست (عمر خستگی)،  $\epsilon_0$  کرنش اولیه،  $\sigma_0$  تنش اولیه،  $S_0$  سفتی مخلوط‌ها و  $a, b, c, d, e, f$  ضرایب تجربی است [7]:

$$N_f = a \left( \frac{1}{\epsilon_0} \right)^b \times \left( \frac{1}{s_0} \right)^c \quad (1)$$

$$N_f = d \left( \frac{1}{\sigma_0} \right)^e \times \left( \frac{1}{s_0} \right)^f \quad (2)$$

مدل‌های مشابهی نیز برای پیش‌بینی عمر خستگی روسازی‌های آسفالتی ارائه شده است. معادلات ۳ و ۴، رابطه دیگر بین کرنش یا تنش کششی در زیر لایه آسفالتی و تعداد سیکل منجر به شکست در آن لایه را نشان می‌دهد که در این روابط  $\epsilon_t$  کرنش کششی،  $\sigma_t$  تنش کششی و  $k_1$  و  $k_2$  مقادیر ثابت است [8]:

$$N_f = k_1 (\epsilon_t)^{k_2} \quad (3)$$

$$N_f = k_1 (\sigma_t)^{k_2} \quad (4)$$

مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خستگی دو روش زیر وجود داشته که هر دو روش مستلزم افزایش هزینه اجرایی روسازی راه می‌شود [3]:

- ✓ افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی و استفاده از مخلوط‌های آسفالتی مقاوم‌تر
- ✓ افزایش ضخامت روسازی

از این رو در سال‌های اخیر استفاده از افزودنی‌های مختلف در بهبود پارامترهای خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه بسیاری از سوی پژوهشگران قرار گرفته است. افزودنی‌ها موادی هستند که قبلاً به قیر افزوده شده و تحت شرایط معینی کاملاً با آن مخلوط شده‌اند و یا در حین تهیه مخلوط‌های آسفالتی و در جریان اختلاط قیر و مصالح سنگی به واحد مخلوط کننده کارخانه آسفالت اضافه می‌شوند [4]. در این پژوهش ابتدا به بررسی تأثیر مواد افزودنی مختلف که در تحقیقات پژوهشگران صورت گرفته است بر مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته، و سپس به بررسی رفتار مخلوط‌های اصلاح شده با پودر آجر مانند عملکرد خستگی می‌پردازیم.

### ۲- پدیده خستگی در روسازی

ترک خوردگی مهمترین حالت خرابی روسازی آسفالتی بوده به گونه‌ای که ساخت روسازی که با گذشت مدت معینی از بهره‌برداری، دچار ترک‌خوردگی نشود تقریباً غیر ممکن است. توسعه ترک‌ها در سطح روسازی، نشانه افت انسجام و قابلیت خدمت روسازی است. مواد وقتی در معرض تنش بیش از ظرفیت خود قرار می‌گیرند، دچار ترک می‌شوند. از طرفی تعدد عبور و مرور وسایل نقلیه سبب تشدید ترک‌ها شده و به خرابی بیشتر چه در لایه رویه و چه در لایه‌های زیرین منجر می‌شود [5].

ترک‌خوردگی در شکل‌های مختلفی اتفاق می‌افتد که رایج ترین آن ترک پوست سوسماری بوده که بر اثر پدیده خستگی در روسازی‌های آسفالتی بر اثر تعدد بارگذاری بوقوع می‌پیوندد. شکل (۱) ترک‌های پوست سوسماری ناشی از پدیده خستگی را نشان می‌دهد.

#### ۴- ارزیابی تاثیر استفاده از افزودنی‌ها بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی

مواد افزودنی به موادی اطلاق می‌شود که به منظور به وجود آوردن تغییرات ویژه‌ی در آسفالت که منجر به بهبود مشخصات فنی آسفالت شود، در زمان تهیه آسفالت به قیر یا مخلوط اضافه می‌شوند [11]. موضوع افزودنی در آسفالت موضوع جدیدی نیست، لیکن در دهه اخیر تحت مطالعه بیشتری قرار گرفته است.

در پژوهشی به وسیله ژیانگ و همکاران، روی مخلوط‌های HMA حاوی رویه‌های آسفالت بازیافتی (RAP) آزمایش خستگی تیرچه صورت گرفت. در این پژوهش نمونه‌های آسفالتی با مقادیر مختلف (کنترل)، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد RAP تهیه شدند. مطابق شکل (۲) نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بر اساس معیار گسیختگی با کاهش ۵۰٪ سختی، افزودن RAP باعث افزایش عمر خستگی مخلوط‌های HMA شده و مخلوط‌های با RAP بیشتر طول عمر خستگی بیشتری را تجربه می‌کنند [12].

شکل ۲. نتایج آزمایش تیر خستگی: تعداد سیکل منجر به شکست [12]

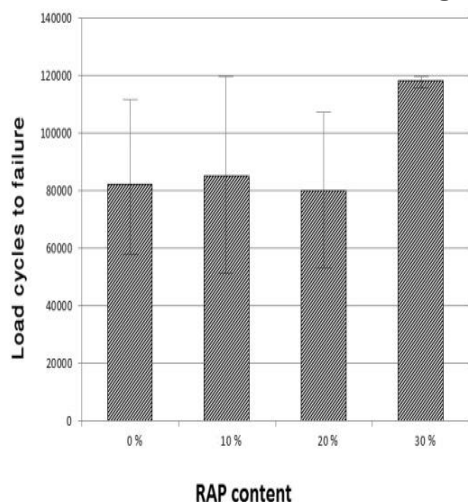


Fig. 2. The number of cycles leading to failure in beam fatigue test.

در دو پژوهش کاملاً مشابه، ویژگی‌های خستگی و دینامیکی مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر، با استفاده از آزمایش خستگی کشش غیر مستقیم در دمای ۱۵ درجه

عمر خستگی یک نمونه آسفالت به کرنش کششی که تحت بار در نمونه توسعه می‌یابد، بستگی دارد. حتی در شرایط متفاوت دما و آهنگ بارگذاری مشاهده شده است، که طول عمر نمونه آسفالتی رابطه منحصر به فردی با کرنش کششی  $\epsilon_t$  دارد. این قانون را می‌توان به صورت یک معادله ثابت در معادله (۵) بیان نمود که در آن  $N$  تعداد دفعات بارگذاری تا زمان شکست و  $n$  معمولاً در حدود ۴ است [9].

$$N = A \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^n \quad (5)$$

هنگامی که ترک شروع می‌شود، به سمت بالا گسترش پیدا کرده و باعث تضعیف تدریجی سازه می‌شود. آسیب ناشی از خستگی در روسازی‌های آسفالتی، پدیده‌ای پیچیده است که از خمش‌های متوالی ناشی شده و موجب ترک‌های میکرونی در روسازی آسفالتی می‌شود.

روش‌های انرژی نیز می‌توانند برای پیش‌بینی رفتار خستگی مخلوط آسفالت استفاده شود. خرابی ناشی از خستگی در ارتباط با میزان انرژی تلف شده در یک نمونه در طول آزمایش است. همچنین پژوهشگران متعددی از مدل‌های وابسته به انرژی برای پیش‌بینی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمودند. بنابراین انرژی تلف شده می‌تواند برای بیان کاهش خواص مکانیکی از قبیل سختی در طول آزمایش استفاده شود. انرژی تلف شده در هر واحد حجم در هر سیکل برای مواد ویسکوالاستیک به صورت معادله (۶) ارائه می‌شود:

$$W_i = \pi \times \sigma_i \times \epsilon_i \times \sin \delta_i \quad (6)$$

در این معادله،  $W_i$  انرژی تلف شده در هر سیکل بار  $i$ ،  $\sigma_i$  دامنه فشار در هر سیکل بار  $i$ ،  $\epsilon_i$  دامنه کشش در هر سیکل  $i$  و  $\delta$  زاویه فاز بین سیگنال امواج فشار کشش و درجه است. انرژی تلف شده در برابر تعداد سیکل‌های منجر به شکست به شرح معادله (۷) است که در این رابطه  $N_f$  تعداد سیکل منجر به شکست،  $W_i$  انرژی تلف شده و  $k_1$  و  $k_2$  ضرایب تجربی است [10].

$$N_f = K_1 \times \left( \frac{1}{W_i} \right)^{K_2} \quad (7)$$

کنترلی داشته است. نتایج تعداد سیکل منجر به شکست نمونه‌ها در شکل (۳)، برای آزمایش خستگی در تنش ثابت نشان می‌دهد که طول عمر خستگی تمامی روش‌های افزودن آهک هیدراته نسبت به مخلوط کنترلی بیشتر است. طول عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش‌های خشک، تر و دوغاب به ترتیب ۴۳، ۴۹ و ۴۳ درصد بیشتر از مخلوط کنترلی بوده است. از این رو می‌توان مشاهده کرد که مقادیر طول عمر خستگی برای مخلوط‌های اصلاح شده به وسیله آهک هیدراته به روش افزودن آن حساس نیست [16].

شکل ۳. تأثیر روش‌های مختلف افزودن آهک هیدراته بر طول عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی [16].

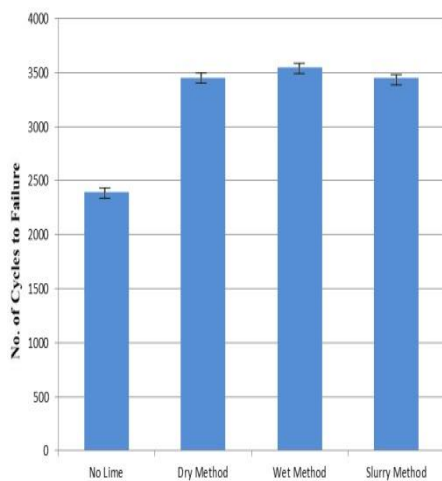


Fig. 3. The effect of addition of hydrated lime on fatigue life of asphalt mixtures.

بطری‌های پلاستیکی بازیافتی از دیگر افزودنی‌های استفاده شده در مخلوط‌های آسفالتی است که سود و منفعت‌های محیطی و اقتصادی بسیاری دارد. مدرس و همکاران در پژوهشی به تأثیر استفاده از این مواد پلاستیکی ضایعاتی که توسط خردکن‌های مخصوص به ذرات ۰/۴۲۵ تا ۱/۱۸ میلی‌متری خرد شدند و با درصد‌های مختلف (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی قیر) به مخلوط آسفالتی افزوده شدند بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی تحت آزمایش ITFT در دو دمای متفاوت ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن بطری‌های پلاستیکی بازیافتی، رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی را در هر دو دمای آزمایش

سانتی‌گراد و نسبت تنش‌های ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ بررسی شدند. سه نوع الیاف از قبیل: الیاف سلولز<sup>۲</sup>، الیاف پلی‌استر<sup>۳</sup> و الیاف معدنی<sup>۴</sup> به عنوان افزودنی به میزان ۰/۳، ۰/۳ و ۰/۴ درصد وزن نهایی مخلوط آسفالتی استفاده شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که سختی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف کاهش یافته و انعطاف پذیری مخلوط بهبود می‌یابد. همچنین پارامتر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف در مقایسه با آسفالت کنترلی کاهش یافته است که نشان دهنده آن است که می‌توان ویژگی‌های خستگی مخلوط آسفالتی را با الیاف اصلاح کننده بهبود داد. در میان الیاف‌های استفاده شده در این دو پژوهش، پلی‌استر عملکرد بهتری در بهبود مقاومت در برابر خستگی در مخلوط آسفالتی داشته است [13,14].

پاستو و همکاران به ارزیابی آزمایشگاهی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با سرباره فولاد تحت آزمایش خستگی خمشی چهار نقطه‌ای پرداخته‌اند. در این پژوهش از سه نوع مصالح سنگی؛ سرباره کوره قوس الکتریک، روسازی آسفالتی اصلاح شده و دانه‌های طبیعی (خرده سنگ آهک، شن و ماسه) استفاده شده است. در این پژوهش پنج مخلوط (SOR2, SOR4, S3R0, S3R2, S3R4) و یک مخلوط با دانه‌بندی طبیعی (SOR0) ساخته شدند که در آنها S0 بدون سرباره فولاد، S3 با ۳۰ درصد سرباره، R0 بدون رویه آسفالتی اصلاح شده و R2 و R4 با ۲۰ و ۴۰ درصد از آن است. با توجه به نتایج آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ۱۰ هرتز صورت پذیرفته است استفاده از ۳۰٪ EAF slag و ۲۰٪ سنگدانه‌های اصلاح شده با سرباره (S3R2)، بیشترین افزایش عمر خستگی را در میان مخلوط‌ها نتیجه می‌دهد [15].

دیاب و همکاران در پژوهشی، مقدار ۳٪ آهک هیدراته را در سه حالت؛ افزودن آهک خشک به سنگدانه‌های خشک یا تر و افزودن دوغاب آهک به سنگدانه‌های خشک به مخلوط اضافه کردند. نتایج نشان از بهبود خواص مکانیکی، چسبندگی بین سنگدانه و قیر و همچنین رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی آهک هیدراته بدون در نظر گرفتن روش اضافه کردن آن (روش‌های تر، خشک و دوغاب) نسبت به مخلوط

شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. بررسی شکل و سطح ذرات پودر آجر توسط آزمایش اسکن میکروسکوپ الکترونی (SEM) انجام شده است. برای تعیین میزان قیر بهینه ابتدا نمودارهای مربوط به استقامت، روانی، وزن مخصوص واقعی، فضای خالی بین مصالح سنگی و فضای خالی نمونه‌های متراکم شده برای درصد‌های مختلف قیر رسم می‌شود. با توجه به نمودارهای ترسیم شده، میانگین سه پارامتر میزان فضای خالی و مقادیر بیشینه استقامت و وزن مخصوص برای تعیین قیر بهینه در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش برای کاهش پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار مخلوط قیر بهینه را برای نمونه کنترلی بدست آورده و برای بقیه نمونه‌ها نیز این مقدار را استفاده نموده‌ایم تا آثار افزایش قیر در نمونه‌های با افزودنی پودر آجر در عملکرد خستگی تاثیرگذار نباشد [18]. نمونه‌های آسفالتی با ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ پودر آجر و مقدار قیر بهینه ۵/۵٪ تهیه شده است.

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح استفاده شده در این مطالعه

Sieve size (mm)	Required passing (%)	Used percentage (%)
19 (3/4)	100	100
12.5 (1/2)	90-100	90-100
4.75 (#4)	44-74	44-74
2.36 (#8)	28-58	28-58
0.3 (#50)	5-21	5-21
0.75 (#200)	2-10	2-10

Table 1. Gradation of the aggregates used in this study.

جدول ۲. دانه‌بندی پودر آجر استفاده شده در این مطالعه

Sieve size (mm)	Percentage passing (%)
4.75 (#4)	100
2.36 (#8)	63
1.18 (#16)	42
0.6 (#30)	27
0.3 (#50)	14
0.15 (#100)	9
0.075 (#200)	2

Table 2. Gradation of the Waste Brick powder used in this study.

افزایش می‌دهد. همچنین مقادیر بیش از ۱۰٪ از این مواد، آثار سودمندی بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی داشته است [17].

## ۵- مصالح و روند انجام آزمایش

### ۵-۱- مصالح

ساختار مصالح سنگی با دوام باعث افزایش مقاومت مخلوط‌های بتن آسفالتی در مقابل تغییر شکل در اثر بار تکراری اعمالی می‌شود. مصالح سنگی و دانه‌بندی تأثیر قابل توجهی روی مقاومت و عملکرد مخلوط‌های بتن آسفالتی دارد. این موضوع امری بدیهی است که ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌ها به طور قابل توجهی روی عملکرد روسازی بتن آسفالتی تأثیر می‌گذارد. دانه‌بندی مصالح سنگی روی مقالات ارسالی باید دارای بخش‌های زیر باشد:

ویژگی‌های بسیار مهم یک مخلوط بتن آسفالتی شامل سختی، دوام، نفوذپذیری، کارایی، مقاومت خستگی، مقاومت اصطکاکی و مقاومت خرابی رطوبتی تأثیر می‌گذارد. دانه‌بندی مصالح استفاده شده در این مطالعه بر اساس حد وسط دانه‌بندی پیشنهادی آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴) برای لایه توپکا بوده که حدود آن در جدول (۱) نشان داده شده است. انتخاب نوع قیر که در تهیه مخلوط‌های آسفالتی به کار می‌رود با توجه به چند عامل مهم انجام می‌گیرد. به این منظور عواملی چون شرایط جوی محل، نوع و شدت ترافیک، نوع روسازی، جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی و چگونگی اجرای روسازی در این ارتباط در نظر گرفته می‌شوند. به این ترتیب که هرچه درجه حرارت متوسط سالیانه منطقه‌ای بالاتر باشد و یا تعداد و وزن وسایل نقلیه افزایش یابد، برای ساختن مخلوط آسفالتی به قیر کند روانتری احتیاج است. از قیر ۶۰-۷۰ برای تهیه نمونه‌ها استفاده شده و پودر آجر استفاده شده در این پژوهش از ضایعات آجر مصالح ساختمانی تامین شده است. دلیل انتخاب، استفاده زیاد این نوع قیر در ساخت روسازی‌های آسفالتی در مناطق معتدل و گرمسیر است. بزرگترین اندازه پودر آجر ۴/۷۵ میلی‌متر است. دانه‌بندی پودر آجر در جدول (۲) نشان داده شده است. شکل (۴) پودر آجر ضایعاتی استفاده

پیوسته ثبت می‌شود. مقادیر مدول برجهندگی میانگین از ۳ آزمایش به عنوان مدول سختی تعیین می‌شود. فرمول‌های استفاده شده برای محاسبه مدول سختی در زیر آورده شده است.

$$S_m = \frac{P (\nu + 0.27)}{t \Delta H} \quad (8)$$

$S_m$ : مدول سختی (مگا پاسکال)

$P$ : بار تکراری (نیوتن)

$\nu$ : نسبت پواسن

$t$ : ضخامت نمونه (میلی‌متر)

$H$ : تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی‌متر)

تغییر شکل افقی نمونه توسط سنسورهایی که به صورت افقی روی نمونه تنظیم شده است اندازه‌گیری شد. مدول سختی یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین عملکرد روسازی برای آنالیز پاسخ روسازی به بارگذاری ترافیکی است. نمونه‌ها در مقدار قیر بهینه ساخته و به وسیله نیروی قطری در بارگذاری پالسی بارگذاری شدند. این دستگاه شامل سیستم کنترل و ثبت داده و نرم‌افزار مربوطه است. این آزمایش با توجه به استاندارد ASTM D4123-82 انجام گرفته است.

از انجام بارگذاری اول، نمونه را ۹۰ درجه چرخانده و بارگذاری دوم، در امتداد این قطر اعمال می‌شود. آزمایش مدول سختی به روش کشش غیرمستقیم ITSM غیر مخرب است و نمونه‌ها را می‌توان برای بارها و دماهای دیگر استفاده نمود. مدول سختی بدست آمده در مرتبه دوم کمتر از مدول بدست آمده در مرتبه اول است. این اختلاف زمانی مشهودتر است که از مواد با سختی پایین استفاده شود و یا آزمایش در دمای خیلی بالا انجام گیرد.

### ۵-۳- آزمایش خستگی با حالت کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم نوعی آزمایش خستگی است که معمولاً به دو صورت بارگذاری با تنش ثابت و با کرنش ثابت انجام می‌گیرد. در آزمایش با تنش ثابت، کرنش با تعداد پالس‌های بارگذاری افزایش می‌یابد و در حالت با کرنش ثابت، تنش‌ها با تعداد پالس‌های بارگذاری کاهش می‌یابد. در

شکل ۴: تصاویر پودر آجر و اسکن میکروسکوپی



Fig. 4. Waste brick Pictures and SEM

۲-۵. آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین مدول سختی آزمایش مقاومت کشش غیر مستقیم از جمله آزمایش‌هایی است که برای تعیین مقاومت کششی مصالح، پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی، ارزیابی حساسیت رطوبتی و عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی استفاده می‌شود. در آزمایش مدول سختی معمولاً بارهای اعمال شده کوچک هستند این آزمایش غیر مخرب محسوب می‌شود و از نمونه‌های ساخته شده موجود می‌توان در آزمایش‌های دیگر نیز استفاده نمود. در استاندارد ASTM D4123 تعیین مدول سختی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم بیان شده است. در این پژوهش برای تعیین مدول سختی از دستگاه NAT بر اساس استاندارد مذکور استفاده شد. با اعمال بار به صورت نیمه سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز و دوره بارگذاری ۱ ثانیه (۹ ثانیه استراحت)، مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی اندازه‌گیری شد. لازم به گفتن است در محاسبه مدول سختی توسط نرم‌افزار موجود در دستگاه NAT از رابطه (۸) که در استاندارد ASTM D4123 به آن اشاره شده، استفاده شده است. فرکانس بار اعمال شده ۱۰ هرتز است که به صورت فشاری نیمه سینوسی اعمال شده است، و داده بار و تغییر شکل متناظر به طور

روی نمونه‌های آسفالتی ساده و محتوی پودر آجر، درصد قیر بهینه مربوط به هر نوع اختلاط (شامل درصد پودر آجر) به کمک آزمایش‌های مارشال تعیین شد و سپس نمونه‌های آسفالتی با درصد قیر بهینه در شرایط مختلف ساخته شد. در شکل‌های (۵ و ۶) تغییرات مدول سختی در نمونه‌های آسفالتی ساده و نمونه‌های آسفالتی حاوی پودر آجر ضایعاتی در درصدهای مختلف و در دماهای متفاوت (۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد) نشان داده شده است.

شکل ۵. تغییرات مدول سختی بر حسب درصد پودر آجر در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد

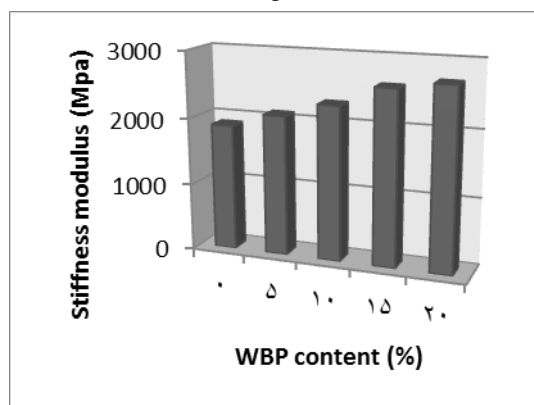


Fig. 5. Changes to the hardness modulus in terms of powdered powder at 5 °C

شکل ۶. تغییرات مدول سختی بر حسب درصد پودر آجر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

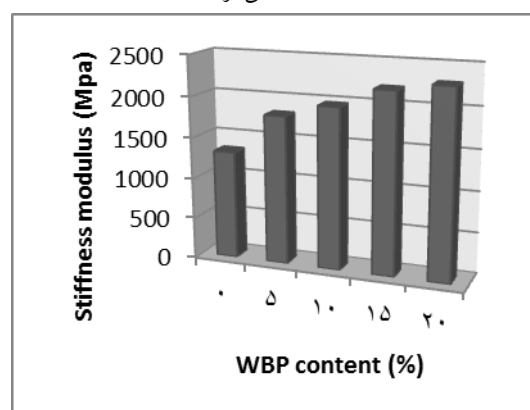


Fig. 6. Changes to the hardness modulus in terms of powdered powder at 25 °C

براساس نتایج، مدول برجهندگی مخلوط‌های اصلاح شده بیشتر از نمونه کنترلی است. این امر به دلیل بهبود ویژگی‌های

آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، نمونه آسفالتی استوانه‌ای شکل در امتداد قطر تحت بار فشاری خطی نسبتاً یکنواختی قرار می‌گیرد. با داشتن کرنش کششی معین برای هر میزان تنش می‌توان نموداری بین کرنش کششی و تعداد سیکل‌های منجر به شکست ترسیم نمود. تعداد سیکل‌هایی که موجب شکست نمونه می‌شود، عمر خستگی (Nf) مخلوط آسفالتی نام دارد. به علت تنش عمودی فشاری در آزمایش خستگی، تنش و کرنش کششی غیرمستقیم بصورت افقی اتفاق می‌افتد و تکرار بارگذاری در نهایت منجر به ایجاد ترک عمودی در مرکز نمونه خواهد شد. چگونگی بارگذاری در آزمایش خستگی، در امتداد محور قطرهای نمونه و به صورت خطی است. آزمایش خستگی هنگامی به پایان می‌رسد که به علت تکرار اعمال کرنش کششی غیر مستقیم، ترک عمودی در مرکز نمونه ایجاد شود. آزمایش از نظر اجرایی ساده و برای بیان ویژگی آسفالت روش موثری است. پژوهشگران مختلفی این شکل آزمایش را برای ارزیابی آسفالت و آنالیز روسازی بکار برده‌اند. نمونه‌های معمول در این آزمایش معمولاً دارای قطری برابر ۴ اینچ و ارتفاع ۲/۵ اینچ بوده و عرض نوار بارگذاری بر کناره‌های نمونه استوانه‌ای ۰/۵ اینچ است. چگونگی بارگذاری در آزمایش خستگی نیز به مانند آزمایش مدول سختی، به صورت خطی و در امتداد محور قطرهای نمونه صورت می‌پذیرد. بارگذاری به صورت شبه سینوسی با فرکانس ۱ Hz، ۰/۱ ثانیه بارگذاری و ۰/۹ ثانیه استراحت و سطح تنش بر اساس شکست نمونه در ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ تکرار بارگذاری انتخاب شده است. در این پژوهش آزمایش خستگی تحت تنش ۲۵۰ کیلو پاسکال و در دو دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است. کرنش ایجاد شده در نمونه‌ها به طور پیوسته توسط دو حسگر LVDT اندازه‌گیری شده است.

## ۶. تحلیل نتایج

۶-۱- بررسی نتایج آزمون تعیین مدول سختی بر روی نمونه‌های آسفالتی

برای مقایسه علمی و منطقی نتایج بدست آمده از آزمایش

در شکل‌های (۸ و ۹) تعداد سیکل‌های منجر به شکست نمونه‌های آسفالتی در برابر میزان درصد پودر آجر به ازای دو دمای مختلف اعمالی نمایش داده شده است. با توجه به این شکل‌های ملاحظه می‌شود که نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده عملکرد خستگی بهتری در مقایسه با نمونه آسفالتی کنترلی از خود بروز می‌دهند. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که اضافه کردن پودر آجر به قیر باعث افزایش ویسکوزیته و در نتیجه چسبندگی بیشتر سنگ‌دانه‌ها به یکدیگر می‌شود که در نتیجه عمر خستگی افزایش می‌یابد.

شکل ۸. تعداد سیکل‌های منجر به شکست در آزمایش خستگی آجر در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد

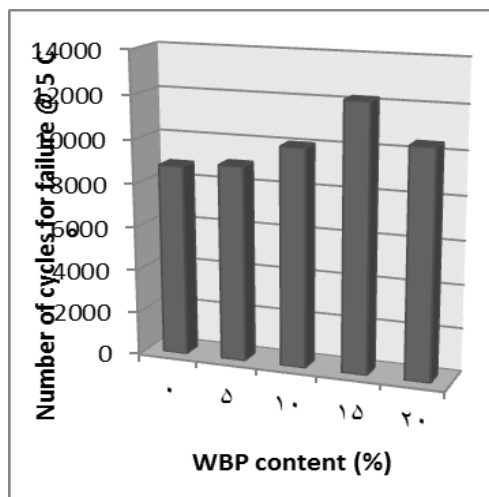


Fig. 8. Fatigue life of all mixtures in 5<sup>0</sup>c.

شکل ۹. تعداد سیکل‌های منجر به شکست در آزمایش خستگی دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

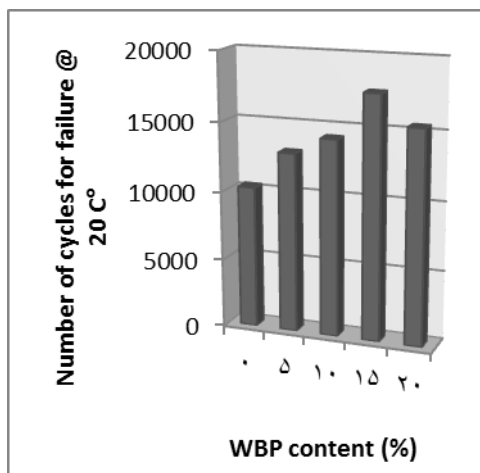


Fig. 9. Fatigue life of all mixtures in 20<sup>0</sup>c.

فیزیکی و رئولوژیکی قیر و در نتیجه افزایش چسبندگی بین مصالح سنگی می‌باشد. مدول سختی نمونه‌های اصلاح شده دارای روند صعودی با اضافه کردن پودر آجر است. با این وجود اختلاف قابل توجهی بین مدول سختی بین نمونه‌های حاوی ۱۵٪ و ۲۰٪ پودر آجر وجود ندارد.

از سوی دیگر مطابق شکل بالا با افزایش دما مدول سختی نمونه‌های آسفالتی کاهش می‌یابد. این روند کاهش به دلیل حساسیت بالای قیر به دما به خاطر ماهیت ویسکوالاستیک آن است. با افزایش دما و کاهش ویسکوزیته قیر اتصال سنگ‌دانه‌ها به یکدیگر کاهش یافته و در نتیجه مدول سختی نمونه‌های حاوی پودر آجر کاهش می‌یابد. از طرفی روند کاهش مدول سختی در هر دمای معین همچنان از روند پیشین تبعیت می‌کند.

## ۶-۲- تحلیل نتایج آزمون خستگی روی نمونه‌های آسفالتی

در کل فرایند خستگی شامل سه مرحله است:

- شروع خرابی با ایجاد ترک خستگی
- رشد ترک در مناطق ترک نخورده تا مرحله تضعیف قطعه روسازی
- شکست نهایی و ناگهانی قطعه روسازی

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در ناحیه ۱ نرخ تغییر شکل ماندگار با افزایش تعداد دفعات بارگذاری کاهش می‌یابد. در ناحیه ۲ نرخ تغییر شکل ماندگار ثابت و در ناحیه ۳، نرخ تغییر شکل ماندگار با افزایش تعداد دفعات بارگذاری افزایش می‌یابد.

شکل ۷. مراحل مختلف سازوکار خستگی

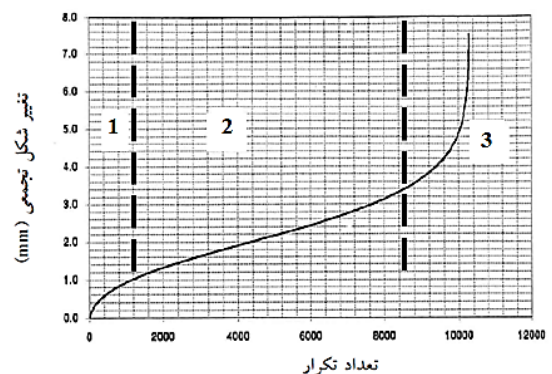


Fig. 7. Three-stage permanent fatigue.



می‌شود. در واقع به سبب بهبود ویژگیهای قیر نمونه‌های اصلاح شده مقاومت بالاتری در مقایسه با نمونه کنترلی در برابر خرابی خستگی نشان داده‌اند. برای نمونه کرنش در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر آجر در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با نمونه ساده ۱۶٪ کاهش یافته است. این امر بدلیل چسبندگی بهتر مصالح سنگی مخلوط آسفالتی است. همچنین با افزایش دما از میزان عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف پودر آجر کاسته می‌شود. این امر به دلیل حساسیت بالای نمونه‌های آسفالتی نسبت به تغییرات دماست. به گونه‌ای که با افزایش دما و نتیجه کاهش مدول سختی نمونه‌ها، شاهد کاهش عمر خستگی نمونه‌ها تحت بارگذاری سیکلی خواهیم بود.

## ۷- نتیجه‌گیری

با توجه به مفاهیمی که از خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش ارائه شد و بر اساس مرور پژوهش‌های پیشین، تاثیر افزودنی‌های مختلف بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده در پژوهش‌های گذشته و پودر آجر در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از این افزودنی‌ها نه تنها سبب بهبود ویژگی‌های قیر شده، بلکه سبب افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر پدیده خستگی می‌شود. در بسیاری از موارد نیز استفاده از مواد افزودنی به علت ضایعاتی بودن آنها، علاوه بر بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر پدیده خستگی، مشکلات ناشی از انباشت آنها در محیط زیست را نیز تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهد.

## References

## ۶- مراجع

- [1]Medani. T.O. and Molenaar . A.A.A. , Estimation of Fatigue Characteristics of Asphaltic Mixes Using Simple Tests , 1999 .
- [2]Newman,k, Polymer-modified asphalt mixture for heavy-duty pavements , u .s. army engineer research ,USA , 2004.
- [3]Arabani M, Mirabdolazimi SM, SasaniAR . The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of

طول عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده نسبت به نمونه‌های آسفالتی عادی بهبود می‌یابد. برای نمونه عمر خستگی نمونه اصلاح شده حاوی ۱۵ درصد پودر آجر حدود ۴۸ درصد نمونه آسفالت متداول با دانه‌بندی پیوسته در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد است.

کرنش‌های بوجود آمده در آزمایش خستگی بر حسب مقادیر مختلف پودر آجر در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است.

شکل ۱۰. کرنش‌های بوجود آمده در آزمایش خستگی بر حسب درصد‌های پودر آجر در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد

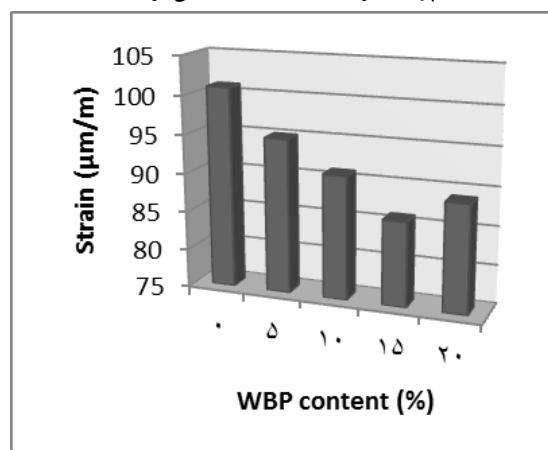


Fig. 10. Final strain of all mixtures in 5<sup>0</sup>c.

شکل ۱۱. کرنش‌های بوجود آمده در آزمایش خستگی دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

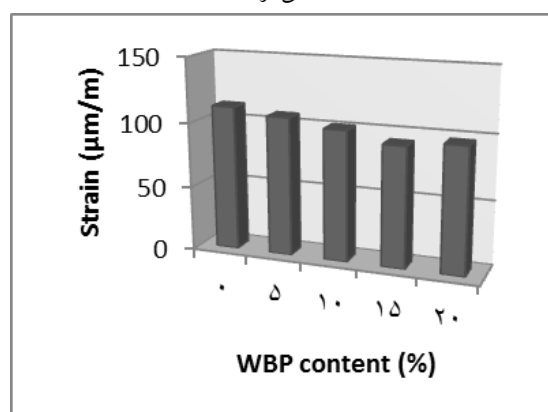


Fig. 11. Final strain of all mixtures in 20<sup>0</sup>c.

ملاحظه می‌شود که افزودن پودر آجر باعث کاهش کرنش‌های کششی ناشی از بارهای دینامیکی در مخلوط‌های آسفالتی

- [12]Xiang Shu ,Baoshan Huang, Dragon Vukosavljevic , Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture , *Construction and Building Materials* 22 (2008), PP.1323–1330 .
- [13]Shaopeng Wu, Qunshan Ye, NingLi , Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 2111–2115 .
- [14]Qunshan Ye a, Shaopeng Wu , Ning Li , Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures , *International Journal of Fatigue* 31 (2009) 1598–1602 .
- [15]Marco Pasetto, Nicola Baldo, Fatigue Behavior Characterization of Bituminous Mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement and Steel Slag, 5th International Congress -Sustainability of Road Infrastructures, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53 ( 2012 ) 297 – 306 .
- [16]Aboelkasim Diab, ZhanpingYou ,Ayman M. Othman , and Hassan Y. Ahmed (2012) , Effect of Hydrated Lime Application Method on Mechanical and Fatigue Properties of HMA, *CICTP 2012*: pp. 3327-3334 .
- [17]A. Modarres, H. Hamedi, Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes, *Materials and Design* 61 (2014) 8–15 .
- [18]Arabani, M., Tahami, S.A. and Taghipoor, M., 2016. Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials. *Road Materials and Pavement Design*, pp.1-17.
- asphalt mixtures. *J. Constr. Build. Mater.*, (2010), 24: 1060-1068.
- [4]Bahia, H., and Davies. R., Effect of crumb-rubber modifiers (CRM) on performance-related properties of asphalt binders, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Volume 63 (1994), pp.414-449.
- [5]Yildirim, Y, Qatan, a. and Prozzi , J., Field Manual for Crack Sealing in Asphalt Pavement, Comparison of Hot –Poured Crak Sealant to Emulsified Asphalt Crack Sealant , Texas Pavement Preservation Center , The University of Texas at Austin Research Project 0-4061 January 2006.
- [6]Bahia, H., Role of Binders in Pavement Performance Pavement Performance Prediction Symposium Laramie, 2006 .
- [7]Khattak, M. J., Baladi, G. Y., Fatigue and permanent deformation models for polymer-modified asphalt mixtures , *Journal of the Transportation Research Board* 1767, pp. 135-145(2001).
- [8]Newcomb , D.E , and Quintus , H.V., Hot Mix Asphalt Technology , December 2002 .
- [9]Thom, N., Asphalt Cracking, A Nottingham Prespective , University of Nottingham, Nottingham Center for Pavement Engineering, Nottingham , NG7 2RD , UK , *Engenharia Civil, UM, Numero 26*, 2006 .
- [10]Xiao F, Zhao PEW, AmirkhanianSN, Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives.*J. Constr. Build. Mater .* (2009) , 23: 3144-3151.
- [11]King, G. N. and H. W. King, Polymer Modified Asphalts, an Overview, *American Society of Civil Engineering* , 1986 , pp 240-254.

# Evaluation of brick powder to improve the fatigue behavior of asphalt

Mohammad Taghipoor<sup>2</sup>, Amir Kavussi<sup>\*1</sup>, Farbod Kazemian<sup>3</sup>, Mostafa Adresi<sup>4</sup>

1- Ph.D Student., Highway Group., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University.

2- Associate Prof., Highway Group., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University.

3- M. Sc Student, Highway Group., Faculty of civil and environmental Eng, Tarbiat Modares university.

4- Assistant professor, civil engineering department, shahid rajaei teacher training university.

\*kavussia@modares.ac.ir

## Abstract:

Fatigue cracking is a primary distress in asphalt pavements caused by the accumulation of damage under repeated traffic loading. Asphalt binder is the weakest constituent of asphalt mixture. Therefore, the inherent fatigue resistance of the asphalt binder contained within the pavement is anticipated to influence pavement performance. Asphalt is a byproduct of petroleum refining, which has complex temperature and rate dependent viscoelastic behavior. The viscoelastic nature of asphalt binder gives rise to a variety of pavement distresses, which depend on climate and traffic conditions. Fatigue cracking is a primary form of pavement distress. Bituminous materials are widely used in construction of flexible pavements. Fatigue cracking is one of the major distresses of flexible pavements and is defined as the damage in asphalt pavements by repetitive stresses and strains due to traffic loading and environmental factors. Acting as a surface which is supposed to tolerate several reloading of heavy axes, pavement shall hold enough resistance against failures. Fatigue phenomenon is one of the most important causes of weakness in road pavement, which is occurred due to reloading of it. Many laboratory researches are carried out with the purpose to enhance fatigue life of asphalt concrete mix, in which researchers have tried to improve quality of asphalt concrete mix against load carrying transportation vehicles. During recent years, additives like polymer, iron powder, hydrated lime, glass wastages, crumb rubber and brick powder are also considered for improving tar and, consequently, asphalt mix properties. It is well recognized that mineral fillers play an important role in the properties of mastics and hot-mix asphalt (HMA) mixtures. In asphalt pavement, asphalt layers maintain the structure of the road and distribute traffic loads from upper layers to lower layers. Safety and comfort of road users are related to these layers, so the quality of them is important. Fatigue phenomenon is one of the most important causes, leading to a reduction in the life of asphalt pavement, which initially due to micro-cracks in the lower layers of asphalt started and progressively spreads to the upper layers. There are two ways to increase the resistance of asphalt mixtures to fatigue that both methods involve increasing the cost of road pavement. Considering the existence of different combinations of simple and compound axes and an increment in the number of vehicles and dimension of heavy vehicles, the importance of fatigue phenomenon as one of the main causes of asphalt pavement failures increases. Better understanding of the effects of fillers on the properties of mastics and HMA mixtures is crucial to good mix design and high performance of HMA mixtures. In this study, the effect of brick powder on fatigue parameters have been investigated. The properties of HMA mixtures were investigated by Marshall, indirect tensile stiffness modulus and indirect tensile fatigue tests. The results indicated that WBP mixtures exhibited higher fatigue life and better performance than control mixtures. With the increase of filler content, some properties of HMA improved while others decreased. Filler content for mix design should be determined based on the overall performance of HMA mixtures. Based on the results, in consequence of increased awareness of environmental issues and natural resources constraints, the studied waste materials can be advantageously utilised in road construction.

**Keywords:** Pavement, Asphalt mixtures, Additive, Waste Brick powder.