

## ارزیابی ارتباط بین پارامترهای عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده آسفالتی

داریوش دریایی<sup>۱\*</sup>، محمود عامری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

### کلمات کلیدی:

ارتباط آماری

خستگی

شیار شدگی

جوان‌ساز

قیر بازیافتی

**خلاصه:** در بازیافت گرم آسفالت، قیر سال‌خورده مستخرج شده از مصالح خرده آسفالتی را با نام قیر بازیافتی می‌شناسند. در این تحقیق عملکرد ترکیبات قیری حاوی درصد‌های مختلف قیر بازیافتی (۰، ۲۵ درصد و ۵۰ درصد) و مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف مصالح خرده آسفالتی (۰، ۲۵ درصد و ۵۰ درصد) در دو شرایط با و بدون استفاده از جوان‌ساز مقایسه شد. علاوه بر این چون هدف اصلی این تحقیق ارزیابی ارتباط بین پارامترهای عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی بود، ارتباط بین پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های خستگی و شیارشدگی قیر (به ترتیب آزمایش جاروب دامنه خطی و آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش) با پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی (به ترتیب آزمایش تیر چهار نقطه‌ای و خزش دینامیکی) در مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی برای اولین بار بررسی شد. نتایج نشان داد که رفتار مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش‌های مربوط به مقاومت خستگی و شیارشدگی با نتایج به دست آمده از آزمایش جاروب دامنه خطی و آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش که بر روی ترکیبات قیری با درصد‌های مختلف قیر بازیافتی صورت گرفته بود، هم‌سو می‌باشد. علاوه بر این از نظر آماری، ارتباط آماری خوبی بین عمر خستگی قیر و عمر خستگی مخلوط آسفالتی و ارتباط آماری نسبتاً خوبی بین پارامترهای مقاومت شیارشدگی قیر و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی وجود دارد.

### ۱- مقدمه

مربوط به قیر و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارتباط خوبی از نظر آماری وجود دارد [۴]. صبوری و همکارانش در سال ۲۰۱۸، با انجام آزمایش جاروب دامنه خطی و رثومتر برشی دینامیکی ( $DSR^2$ ) بر روی قیرهای حاوی پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن و گیلسونایت دریافتند که پارامتر A در آزمایش LAS نسبت به پارامتر  $G^* \sin \delta$  دارای ارتباط بهتری با عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی که از تیر چهار نقطه‌ای به دست آمده اند، دارد [۵]. همچنین تحقیقات فراوانی برای مقایسه پارامتر شیارشدگی  $G^* / \sin \delta$  و یا پارامترهای به دست آمده از آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش ( $MSCR^3$ ) با

خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی به شدت وابسته به قیر مورد استفاده در این مخلوط‌ها دارد [۱]. محققین دریافتند که بهبود مقاومت خستگی و یا مقاومت شیارشدگی قیرها نقش بسزایی در بالا بردن کیفیت مخلوط‌های آسفالتی دارد [۲ و ۳]. عامری و همکارانش در سال ۲۰۱۶ ارتباط بین نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی ( $LAS^1$ ) و عمر خستگی به دست آمده از آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی را در مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با پلیمر بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که بین پارامتر A در آزمایش جاروب دامنه خطی

2- Dynamic Shear Rheometer  
3-Multiple Stress Creep and Recovery

1- Linear Amplitude Sweep  
\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: d.daryae@malayeru.ac.ir



آسفالتی (RAP) و همچنین ترکیبات قیری حاوی قیر سال خورده در زمینه ارتباط بین پارامترهای خستگی و مقاومت شیارشدگی قیر با پارامترهای خستگی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد. به این منظور در این تحقیق با استفاده از مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۰،۲۵ و ۵۰ درصد مصالح خرده آسفالتی در دو شرایط با و بدون استفاده از جوان‌ساز ارتباط بین نتایج آزمایش های قیر با نتایج آزمایش‌های مخلوط آسفالت بررسی شد.

## ۲- هدف و روش تحقیق

هدف از این تحقیق، بررسی ارتباط بین پارامترهای خستگی و مقاومت شیارشدگی قیر و پارامترهای خستگی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد های مختلف مصالح خرده آسفالتی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از آزمایش‌های جاروب دامنه خطی و خزش و بازیابی در چند سطح تنش به ترتیب پارامترهای مقاومت خستگی و مقاومت شیارشدگی ترکیبات قیری حاوی درصد‌های مختلف قیر بازیافتی (RAB<sup>۳</sup>) بررسی می‌شود، سپس با استفاده از آزمایش‌های تیر چهار نقطه‌ای خستگی و خزش دینامیکی نیز عمر خستگی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. وجود ارتباط بین پارامترهای عملکردی قیر و پارامترهای عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده آسفالتی می‌تواند در تخمین سریع‌تر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر پدیده‌هایی نظیر خستگی و شیارشدگی در پروژه‌های بازیافت گرم نقش بسزایی داشته باشد.

## ۳- مصالح مورد استفاده

### ۳-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی تازه مورد استفاده در این تحقیق از جنس مصالح آهکی بوده و مشخصات آن مطابق با جدول ۱ می‌باشد. دانه بندی مصالح سنگی تازه مورد استفاده در این تحقیق مطابق با شکل ۱، در محدوده مجاز آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) قرار دارد [۱۴]. مصالح خرده آسفالتی، از بزرگراه همت در شهر تهران جمع آوری شده است. درصد قیر موجود در مصالح خرده آسفالتی ۵/۵ درصد وزنی مخلوط آسفالتی بود. دانه بندی مصالح

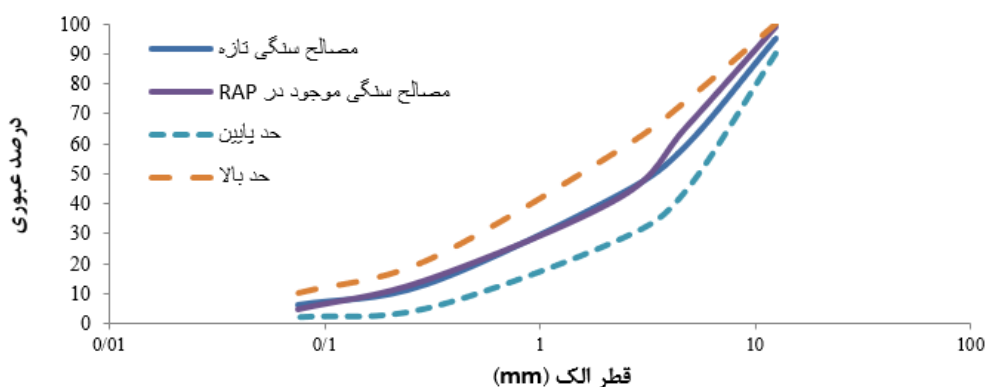
مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است [۷] و [۶]. ژانگ و همکارانش ارتباط بین پارامتر  $J_{nr}$  و  $G^*/\sin\delta$  را با پارامتر عمق شیار در مخلوط‌های آسفالتی در دو نوع مخلوط آسفالت داغ و آسفالت ماستیک سنگ‌دانه ای بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که نتایج آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش در قیر ارتباط خوبی با عمق شیار به دست آمده در مخلوط‌های آسفالتی دارد [۸]. در تحقیقاتی که بر روی قیرهای اصلاح شده با پلیمرهای گوناگون صورت گرفت، با مقایسه نتایج آزمایش‌های خزش و بازیابی در چند سطح تنش و یا رئومتر برشی دینامیکی بر روی قیرها و نتایج آزمایش چرخ کامیون بر روی مخلوط‌های آسفالتی، این نتیجه حاصل شد که پارامتر  $J_{nr}$  نسبت به پارامتر  $G^*/\sin\delta$  دارای ارتباط بهتری از نظر آماری با مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی است [۹ و ۱۰]. دوبوئیس<sup>۱</sup> و همکارانش ده نمونه قیری با رده‌های عملکردی مختلف را با استفاده از آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش مورد ارزیابی قرار دادند و سپس با نتایج آزمایش خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش  $J_{nr}$  از  $1\text{ kPa}^{-1}/5$ ، مقاومت شیارشدگی با افت ناگهانی مواجه می‌شود. آن‌ها ارتباط خوبی بین پارامتر  $J_{nr}$  و پارامترهای مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی پیدا نکردند [۱۱]. باباگلی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با انجام آزمایش بر روی مخلوط‌های آسفالت ماستیک سنگ‌دانه ای حاوی ساسوبیت و زایکوتم دریافتند که ارتباط خوبی بین نتایج آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش قیر و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد [۱۲]. رادمن<sup>۲</sup> و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۹ بر روی محدوده بیشتری از قیرها با درجه عملکردی مختلف و افزودنی‌هایی از جمله پلیمرهای استایرن-بوتادین-استایرن و پلی فتال آمید، ارتباط بین نتایج مقاومت شیارشدگی قیر با استفاده از آزمایش‌های خزش و بازیابی در چند سطح تنش و رئومتر برشی دینامیکی و نتایج مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمایش ویل تراک را بررسی کردند. آن‌ها نیز دریافتند که پارامتر  $J_{nr}$  نسبت به پارامتر  $G^*/\sin\delta$  دارای ارتباط بهتری از نظر آماری با مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی است [۱۳]. با توجه به تحقیقات گذشته مشخص شد که یک خلاء تحقیقاتی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده

3 Reclaimed Asphalt Pavement  
4 Reclaimed Asphalt Binder

1 DuBois  
2 Radman

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده  
Table 1. Characteristics of virgin aggregates

مقدار	روش استاندارد	خصوصیات
۲۲	AASHTO T96	درصد سایش به روش لوس آنجلس (%)
۹۲	ASTM D5821	درصد شکستگی در دو جبهه (%)
۱/۹	ASTM C127	درصد جذب مصالح درشت‌دانه (%)
۲/۲	ASTM C128	درصد جذب مصالح ریزدانه (%)
۲/۶	ASTM C127	وزن مخصوص میانگین مصالح سنگی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی تازه و مصالح سنگی موجود در مصالح خرده آسفالتی

Fig. 1. Gradation of virgin and RAP aggregates

جدول ۲. خصوصیات قیر ۶۰/۷۰ مورد استفاده

Table 2. Typical curve of total accumulated strain versus number of cycles in dynamic creep test

مقدار	استاندارد	مشخصه
۱/۰۱۷	ASTM D70	چگالی مخصوص در دمای ۲۵ درجه
۶۵	ASTM D5	درجه نفوذ بر حسب دهم میلی‌متر
۴۹	ASTM D36	نقطه نرمی بر حسب درجه سانتیگراد
۲۹۹	ASTM D99	نقطه اشتعال بر حسب درجه سانتیگراد
۱۱۰	ASTM D113	خاصیت انگمی بر حسب سانتی‌متر
۳۶۰	ASTM D4402	ویسکوزیته دورانی در دمای ۱۳۵ درجه بر حسب مگا پاسکال - ثانیه

جدول ۳. مشخصات جوان ساز مورد استفاده در تحقیق  
Table 3. Characteristics of rejuvenator used in research

مقدار	واحد	خصوصیات	
۲۶۵	mPa.s	ویسکوزیته دینامیکی در دمای ۶۰ درجه	
۱۹۷	°C	نقطه اشتعال	
۰/۹۲	-	وزن مخصوص	
عسلی	-	رنگ	
۱۵/۲	(%)	ترکیبات اشباع	
۵۹/۹	(%)	آروماتیک ها	اجزای شیمیایی
۲۴/۹	(%)	رزین ها	تشکیل دهنده
-	(%)	آسفالتن ها	

جدول ۴. ترکیبات قیری مختلف مورد استفاده در این تحقیق  
Table 4. The different binder compounds used in this study

شماره ترکیبات قیری	کد ترکیب قیری	طرح اختلاط ترکیب قیری
۱	قیر کنترل	قیر ۶۰/۷۰
۲	25%RAB	۲۵٪ قیر بازیافتی+۷۵٪ قیر ۶۰/۷۰
۳	50%RAB	۵۰٪ قیر بازیافتی+۵۰٪ قیر ۶۰/۷۰
۴	25%RAB+Rej.	۲۵٪ قیر بازیافتی+۷۵٪ قیر ۶۰/۷۰+جوان ساز
۵	50%RAB+Rej.	۵۰٪ قیر بازیافتی+۵۰٪ قیر ۶۰/۷۰+جوان ساز

#### ۴- آماده کردن نمونه ها

قیر موجود در مصالح مصالح خرده آسفالتی با استفاده از حلال مورد نظر مطابق روش ASTM D2172 از مصالح مصالح خرده آسفالتی جدا شده و سپس با استفاده از روش تقطیر دورانی (ASTM D5404)، بازیافت شد. آزمایش های فیزیکی اولیه نشان داد که قیر بازیافتی دارای درجه نفوذ ۳۰ دهم میلی متر، نقطه نرمی ۵۷ درجه سانتیگراد و ویسکوزیته چرخشی ۲۸۸۳ میلی پاسکال - ثانیه در دمای ۱۳۵ درجه می باشد. برای تهیه نمونه های قیری، قیر بازیافتی به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد گرم شده و سپس توسط همزن با ۷/۵ درصد وزنی جوان ساز به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط می شود. قیر بازیافتی جوان سازی شده در درصد های ۲۵ و ۵۰ درصد با قیر ۶۰/۷۰ ترکیب می شوند. در نمونه های بدون جوان ساز نیز قیر بازیافتی گرم شده با قیر ۷۰/۶۰ در درصد های مختلف مخلوط می شوند. جدول ۴، ترکیبات مختلف قیر و کدگذاری آن ها را در این تحقیق نشان می دهد.

خرده آسفالتی (بعد از استخراج قیر) به همراه مصالح سنگی تازه در شکل ۱ آورده شده است. دانه بندی مصالح خرده آسفالتی با افزودن ۴ درصد پودر سنگ به عنوان فیلر تصحیح شده است.

#### ۳-۲- جوان ساز مورد استفاده

جوان ساز "رپی اویل"<sup>۱</sup> یک جوان ساز جدید است که به صورت مایع برای کاهش ویسکوزیته قیر در طول پروسه ساخت آسفالت استفاده می شود. در این تحقیق رپی اویل به عنوان یک روغن روان کننده با کارایی نرم کنندگی<sup>۲</sup> [۱۵] برابر ۵، در مخلوط های حاوی مصالح خرده آسفالتی استفاده شده است. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی اندازه گیری شده برای این جوان ساز در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به تحقیقات قبلی بر روی این جوان ساز، درصد جوان ساز بهینه ۷/۵ درصد وزنی قیر بازیافتی تعیین شد [۱۶]. بنابراین در ساخت ترکیب های قیری با جوان ساز، از جوان ساز با مقدار ۷/۵ درصد وزنی قیر بازیافتی استفاده می شود.

1 RAPIOL  
2 Softening efficiency

جدول ۵. نتایج طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی  
Table 5. Results of mix design for asphalt mixtures

درصد قیر بهبینه	درصد جوان‌ساز بر حسب وزن مخلوط	درصد قیر تازه	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد تخلخل	G <sub>mb</sub>	G <sub>mm</sub>	طرح اختلاط مخلوط
۴/۸	-	۴/۸	۱۴/۵۳	۴/۰	۲/۳۷۹	۲/۴۷۲	مخلوط کنترل
۵/۳۵	-	۴/۰۱	۱۵/۲	۴/۰	۲/۳۷۷	۲/۴۷۶	۲۵ درصد RAP
۵/۵	-	۲/۷۵	۱۵/۴	۴/۰	۲/۳۸	۲/۴۷۹	۵۰ درصد RAP
۵/۳۵	۰/۱۲	۳/۸۹	۱۴/۸۵	۴/۰	۲/۳۸۱	۲/۴۷۹	۲۵ درصد RAP به همراه جوان‌ساز
۵/۵	۰/۲۰	۲/۶۵	۱۴/۹۳	۴/۲	۲/۳۸۵	۲/۴۸۹	۵۰ درصد RAP به همراه جوان‌ساز

۲ ساعت قبل از شروع عملیات مخلوط کردن، مصالح مصالح خرده آسفالتی به مصالح سنگی تازه داغ شده (در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد) اضافه شد. همچنین جوان‌ساز نیز به طور مستقیم به همراه قیر تازه گرم شده به مصالح اضافه شد [۱۸]. در این تحقیق از هر طرح اختلاط، سه نمونه استوانه‌ای شکل برای آزمایش خزش دینامیکی تهیه شد. نمونه‌های استوانه‌ای شکل با استفاده از دستگاه تراکم کننده چرخشی سوپرپیو شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران با سطح تنش ۶۰۰ کیلو پاسکال، سرعت چرخش ۳۰ دور در دقیقه و زاویه چرخش ۱/۲۵ درجه تهیه شدند، زیرا تراکم با این دستگاه به شرایط تراکم در عمل شبیه‌تر می‌باشد. درصد فضای خالی برای هر نمونه استوانه‌ای شکل  $1 \pm 0.7$  درصد بود. برای انجام آزمایش تیر چهارنقطه‌ای خستگی با استفاده از دستگاه پرس باکس مستقر در دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دال تراکم به ابعاد  $150 \times 160 \times 450$  میلی‌مترمکعب تهیه شد. سپس هر دال به ۶ نمونه تیرچه به ابعاد  $50 \times 63 \times 380$  میلی‌متر برش داده شد. درصد فضای خالی بتن آسفالتی برای هر تیرچه  $2 \pm 0.4$  درصد بود. برای هر سطح کرنش سه نمونه تیرچه مورد ارزیابی با آزمایش تیر چهارنقطه‌ای

در این تحقیق پنج نوع طرح مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت: مخلوط ۱: مخلوط آسفالتی کنترلی که بدون مصالح خرده آسفالتی است و ۱۰۰ درصد از مصالح سنگی تازه و قیر ۶۰/۷۰ استفاده شده است. مخلوط ۲: مخلوط آسفالتی که حاوی ۲۵ درصد مصالح خرده آسفالتی و بدون جوان‌ساز می‌باشد. مخلوط ۳: مخلوط آسفالتی که حاوی ۵۰ درصد مصالح خرده آسفالتی بدون جوان‌ساز می‌باشد. مخلوط ۴: مخلوط آسفالتی که حاوی ۲۵ درصد مصالح خرده آسفالتی می‌باشد و جوان‌ساز در آن استفاده شده است. مخلوط ۵: مخلوط آسفالتی که حاوی ۵۰ درصد مصالح خرده آسفالتی می‌باشد و جوان‌ساز در آن استفاده شده است.

برای تعیین درصد قیر بهینه در هر مخلوط آسفالتی از روش طرح اختلاط مارشال مطابق استاندارد ASTM D 1559 استفاده شد [۱۷]. جدول ۵ نتایج طرح اختلاط را برای هر مخلوط نشان می‌دهد. برای آماده سازی نمونه های آسفالتی، مصالح سنگی تازه و قیر تازه در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به ترتیب به مدت ۴ ساعت و ۲ ساعت قبل از شروع مرحله مخلوط کردن حرارت داده شدند. برای بهتر مخلوط شدن مصالح مصالح خرده آسفالتی و مصالح تازه،

خستگی قرار گرفت و معدل آن‌ها به عنوان عمر خستگی در سطح کرنش مورد نظر معرفی شد.

می‌شود:

$$N_f = A\gamma^{-B} \quad (2)$$

که در آن  $\gamma$ : حداکثر کرنش برشی مورد استفاده،  $N_f$  عمر خستگی و مقادیر  $A$  و  $B$  ثابت‌های مدل هستند [۱۹].

### ۵-۲- آزمایش خزش و بازیابی قیر در چند سطح تنش

این آزمایش طبق استاندارد AASHTO TP70 جهت تعیین تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر به وسیله دستگاه رئومتر برش دینامیکی مدل آنتون پار در شرکت نفت جی اصفهان در دماهای بالای عملکردی قیر بر روی نمونه‌های پیر شده توسط آون لعاب نازک چرخشی<sup>۲</sup> انجام گرفت [۲۰]. این آزمایش در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد بر روی نمونه‌های قیر با قطر ۲۵ میلی‌متر و با ضخامت ۱ میلی‌متر انجام گرفت. در این آزمایش بار ۱ ثانیه بر نمونه اعمال و ۹ ثانیه استراحت داده می‌شود. ابتدا ۱۰ سیکل بارگذاری تحت باربرشی ۰/۱ kPa بر نمونه وارد و سپس بار برشی ۳/۲ kPa برای ۱۰ سیکل دیگر بر نمونه وارد می‌شود [۲۰]. پارامترهای که از آزمون خزش و بازیابی در چند سطح تنش به دست می‌آید شامل  $J_{nr}$  و درصد بازیابی ( $R$ ) می‌باشند که  $J_{nr}$  نمایان‌گر پتانسیل شیارشدگی یا کرنش باقی‌مانده در یک نمونه بعد از سیکل بارگذاری و باربرداری در قیر و درصد بازیابی ( $R$ ) نمایان‌گر پاسخ‌های الاستیک در قیر می‌باشند. این پارامترها برای ارزیابی و بررسی عملکرد قیر در دمای عملکردی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقدار  $J_{nr}$  و درصد بازیابی ( $R$ ) را از رابطه (۳) و (۴) محاسبه می‌گردد [۲۰]:

$$J_{nr} = \frac{\tilde{\epsilon}_{nr}}{\sigma} \quad (3)$$

$$R(\%) = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_t} \quad (4)$$

که در آن،  $\epsilon_{nr}$ ،  $\epsilon_r$  و  $\epsilon_t$  به ترتیب کرنش غیر قابل برگشت، کرنش برگشت‌پذیر و کرنش کل هستند و  $\sigma$  سطح تنش می‌باشد.

### ۵-۳- آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی

یکی از قابل‌اعتمادترین آزمایش‌ها برای ارزیابی عملکرد خستگی

### ۵- برنامه انجام آزمایش‌ها

#### ۵-۱- آزمایش جاروب دامنه خطی

در این تحقیق، آزمایش جاروب دامنه خطی توسط دستگاه رئومتر برشی دینامیکی مدل آنتون پار<sup>۱</sup> در شرکت نفت جی اصفهان و بر روی نمونه‌های قیر با قطر ۸ میلی‌متر که به صورت پیرشدگی تحت فشار<sup>۲</sup> تهیه شده‌اند، در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شده است [۱۹]. در آزمایش جاروب دامنه خطی، آزمایش در دو قسمت صورت می‌گیرد: قسمت اول: منحنی جاروب فرکانس

این قسمت برای تعیین مقدار پارامتر مصالح بدون خرابی ( $\alpha$ ) استفاده می‌شود. در این حالت در یک دمای خاص، و با بارگذاری با مقدار کرنش ۰/۱ درصد، در فرکانس‌های مختلف از ۰/۲ تا ۳۰ هرتز مقدار  $G^*$  و  $\delta$  (مدول برشی مختلط و زاویه فاز) توسط دستگاه رئومتر برشی دینامیکی تعیین می‌شود [۱۹].

قسمت دوم: جاروب دامنه

در این قسمت، آزمایش در دمای مورد نظر و در فرکانس ۱۰ هرتز انجام می‌شود. بارگذاری به صورت خطی از کرنش ۰ تا ۳۰ درصد اعمال می‌شود. مقدار حداکثر تنش برشی، حداکثر کرنش برشی،  $G^*$  و  $\delta$  (مدول برشی مختلط و زاویه فاز) در هر ثانیه قرائت می‌شود. سپس مقدار خرابی ( $D(t)$ ) به صورت رابطه (۱) در هر زمان محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n [\pi(\gamma_i)^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (1)$$

که در آن  $C(t)$ ، نسبت مقدار  $G^*$  در زمان  $t$  به مقدار مقدار  $G^*$  اولیه

$\gamma_i$ : کرنش برشی در زمان مورد نظر بر حسب درصد،

و  $\alpha$ : ثابت مربوط به نوع مصالح که در قسمت اول آزمایش تعیین شده

$t$ : زمان بر حسب ثانیه می‌باشد. با استفاده از روابط ویسکوالاستیک

مکانیک محیط‌های پیوسته قانون خستگی مطابق با رابطه (۲) تعریف

1 Anton Paar  
2 Pressure Aging Vessel

سختی خمشی<sup>۱</sup> بر اساس رابطه (۷) تعیین می‌شود:

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (7)$$

که در آن، S سختی خمشی بر حسب پاسکال می‌باشد.

#### ۴-۵- آزمایش خزش دینامیکی

در این تحقیق با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی رفتار مخلوط‌های مختلف در برابر تغییر شکل‌های ماندگار بررسی شد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری ویژگی تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی، اعمال چندین هزار بار تکراری به وسیله یک آزمایش بار تکرار شونده و ثبت تغییر مکان‌های دائمی تجمعی به عنوان تابعی از تعداد سیکل‌های بارگذاری است. یک بار نیمه سینوسی به مدت ۰/۵ ثانیه با زمان استراحت ۱/۵ ثانیه در زمان آزمایش (حدود ۳ ساعت یا ۱۰۰۰۰ سیکل) بر نمونه استوانه‌ای با ارتفاع ۱۰۰ یا ۱۵۰ میلی‌متر اعمال می‌شود [۲۳]. نتایج این آزمایش به صورت منحنی کرنش دائمی تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری ارائه می‌شود. شکل ۲ به صورت شماتیک منحنی کرنش تجمعی کل در برابر سیکل بارگذاری را نشان می‌دهد. منحنی کرنش تجمعی به سه ناحیه تقسیم می‌شود: ناحیه اول، ناحیه دوم، ناحیه سوم. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عدد روانی (FN<sup>۲</sup>) شناخته می‌شود. برای تعیین عدد روانی با ترسیم منحنی نرخ تغییرات کرنش در برابر تعداد سیکل، حداقل نرخ کرنش تعیین می‌شود و این نقطه نشان‌گر شروع ناحیه سوم و یا همان عدد روانی است. این روش توسط "یو" و همکارانش پیشنهاد شده است [۲۴]. در ناحیه اول تغییر مکان‌های دائمی به طور ناگهانی روی هم انباشته می‌شوند، در ناحیه دوم افزایش روند (شیب) تغییر مکان دائمی کاهش می‌یابد تا به مقدار ثابتی می‌رسد و در ناحیه سوم شیب تغییر مکان دائمی دوباره افزایش می‌یابد و مقدار تغییر مکان دائمی به شدت روی هم انباشته می‌شود.

این آزمایش بر اساس استاندارد NCHRP 19-9 و با استفاده از دستگاه 25P UTM<sup>۳</sup> در دانشگاه صنعتی امیر کبیر انجام شد. برای انجام آزمایش، ابتدا از هر نوع مخلوط سه نمونه به مدت ۵ ساعت در

مخلوط‌های آسفالتی استفاده از آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی است. آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی بر اساس استاندارد AASHTO T321 انجام می‌شود [۲۱]. قبل از هر آزمایش نمونه‌های تیرچه شکل به مدت ۴ ساعت در دمای مورد آزمایش درون محفظه مخصوص دستگاه تیر چهار نقطه‌ای خستگی مربوط به شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک تهران، قرار گرفتند تا آماده انجام آزمایش در آن دما شوند. در این تحقیق، تیرچه‌های خستگی در معرض بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. آزمایش خستگی با استفاده از روش کنترل کرنش در سه سطح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین صورت گرفت. عمر خستگی در هر نمونه بر اساس تعداد سیکل‌هایی که باعث کاهش ۵۰ درصدی در سختی اولیه نمونه شود محاسبه شده است. سختی اولیه هر نمونه مقدار سختی آن در سیکل پنجاهم آزمایش بوده است. در این روش مقدار حداکثر تنش برشی و حداکثر کرنش برشی بر اساس روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\sigma_t = \frac{0.357P}{bh^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_t = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2} \quad (6)$$

که در آن‌ها،

$\sigma_t$ : تنش برشی حداکثر بر حسب پاسکال،

$\varepsilon_t$ : کرنش برشی حداکثر بر حسب میکرواسترین،

P: بار اعمال شده بر حسب نیوتن،

b: عرض متوسط نمونه بر حسب متر،

h: ارتفاع متوسط نمونه بر حسب متر،

□: حداکثر تغییر شکل مرکز تیر بر حسب متر،

L: فاصله بین گیره‌های خارجی قاب بارگذاری دستگاه که برابر

۰/۳۵۶ متر، و

a: فاصله بین گیره‌های داخلی قاب بارگذاری دستگاه که برابر

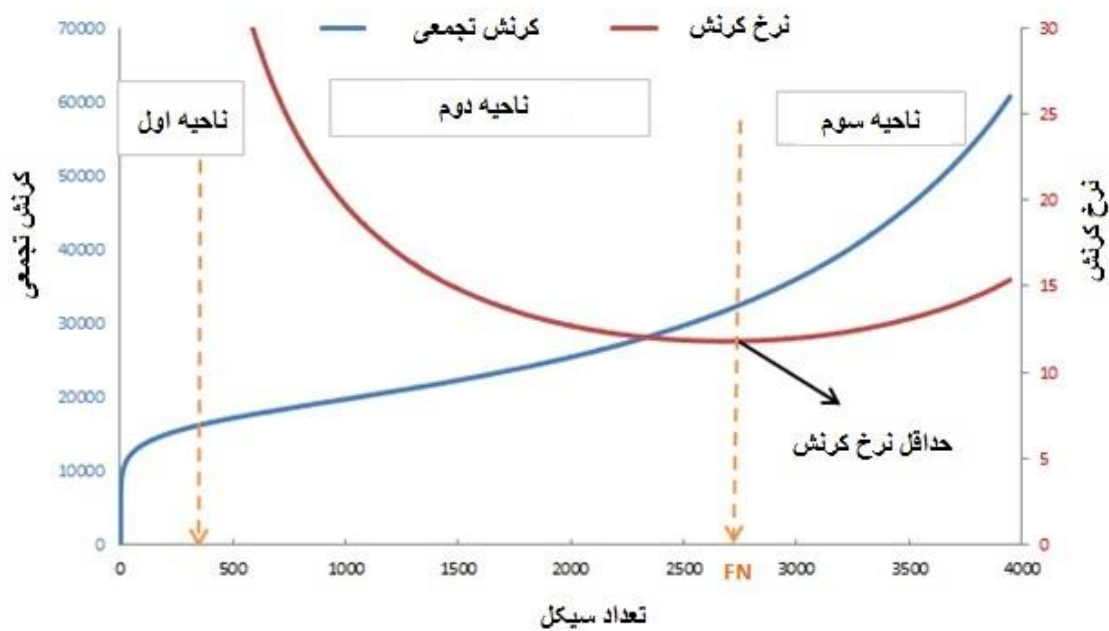
۰/۱۱۹ متر بود.

با اندازه‌گیری حداکثر تنش برشی و حداکثر کرنش برشی مقدار

1 Flexural Stiffness

2 Flow Number

3 Universal Testing Machine



شکل ۲. منحنی کرنش تجمعی کل در برابر سیکل بارگذاری در آزمایش خزش

Fig. 2. Typical curve of total accumulated strain versus number of cycles in dynamic creep test

دارای کمترین عمر خستگی در کرنش‌های مختلف نسبت به سایر ترکیب هاست. این در حالی است که ترکیبات قیر حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد قیر بازیافتی به همراه جوان‌ساز دارای عمر خستگی بالاتری نسبت به قیر کنترلی می‌باشند. بنابراین جوان‌ساز نقش مهمی در بهبود عملکرد خستگی ترکیبات قیری حاوی قیر بازیافتی در سال‌خوردگی طولانی مدت داشته است.

ماساد<sup>۱</sup> و همکارانش دریافتند که کرنش در آزمایش خستگی قیر تقریباً ۵۰ برابر کرنش در آزمایش خستگی مخلوط‌های آسفالتی است [۲۵]. با توجه به اینکه در این تحقیق عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در سه سطح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین تعیین شده‌اند در نتیجه عمر خستگی ترکیبات قیری مربوط به آزمایش جاروب دامنه خطی متناظر آن‌ها در کرنش‌های ۲/۵، ۳/۵ و ۴ درصد در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۴، مشاهده می‌شود که عمر خستگی در ترکیبات قیر بدون جوان‌ساز نسبت به قیر کنترلی، با افزایش درصد قیر بازیافتی کاهش و در ترکیبات قیر دارای جوان‌ساز با افزایش درصد قیر بازیافتی افزایش

دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. سپس نمونه‌ها در دستگاه آزمایش قرار گرفته و با اعمال بار تغییر شکل‌های ماندگار در برابر تعداد سیکل بارگذاری توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و با تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال و به صورت شبه سینوسی، انجام گرفت.

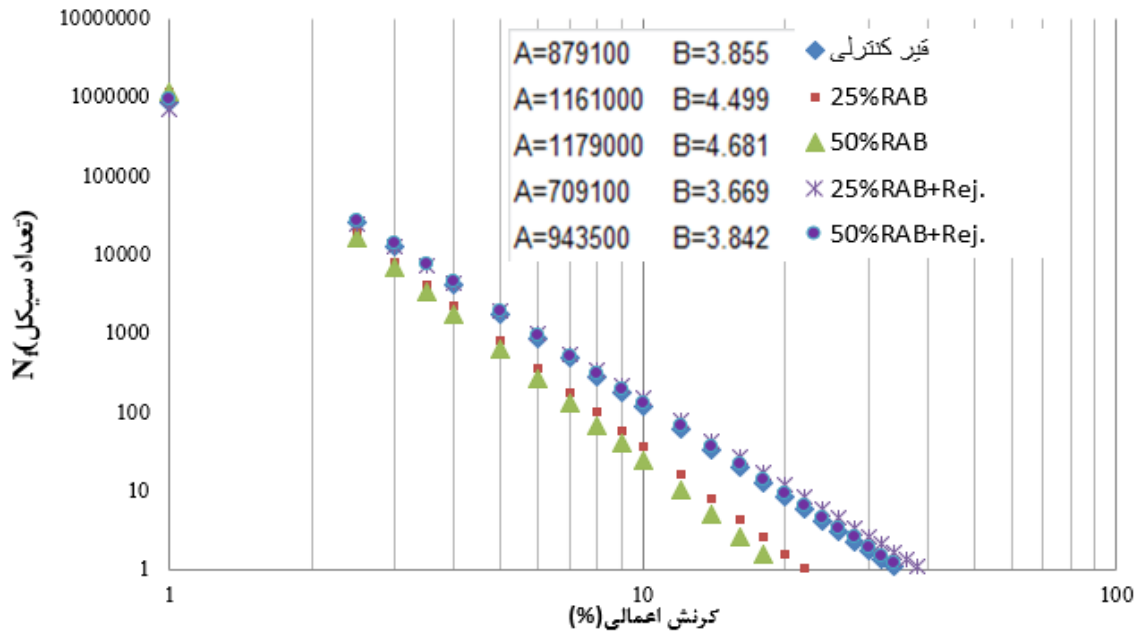
## ۶- نتایج و بحث

### ۶-۱- نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی

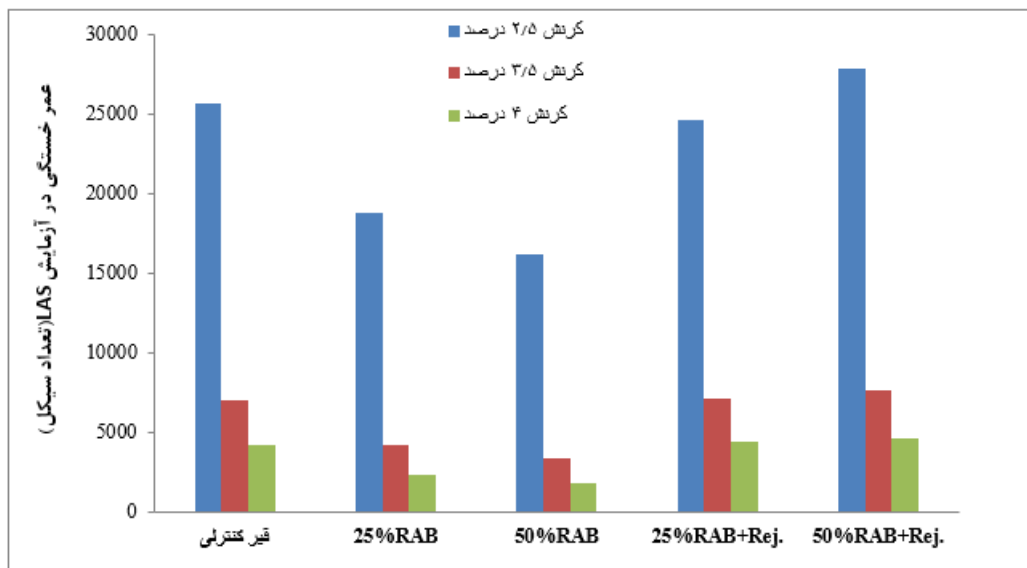
برای هر ترکیب قیری نشان داده شده در جدول ۴، آزمایش جاروب دامنه خطی در دمای ۲۰ درجه صورت گرفت. با استفاده از معیار شکست حداکثر تنش برشی در آزمایش جاروب دامنه خطی، پارامترهای A و B تعیین و عمر خستگی در کرنش‌های مختلف محاسبه شد. شکل ۳، روند تغییرات عمر خستگی را در برابر کرنش اعمال شده برای هر ترکیب قیر نشان می‌دهد. پارامترهای A و B نیز در این شکل نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ترکیب قیر حاوی ۵۰ درصد قیر بازیافتی (بدون جوان‌ساز)

1 Masad





شکل ۳. روند تغییرات عمر خستگی در برابر کرنش اعمال شده برای هر ترکیب قیری  
 Fig. 3. Fatigue life changes against strain applied for each binder compound



شکل ۴. عمر خستگی ترکیبات قیری مربوط به آزمایش جاروب دامنه خطی در کرنش های ۲/۵، ۳/۵ و ۴ درصد  
 Fig. 4. Fatigue life of binder compounds at 2.5, 3.5 and 4% strains in LAS test

خزش و بازیابی در چند سطح تنش در دمای ۶۴ درجه صورت گرفت. منحنی کرنش به ازای زمان برای هر نمونه قیری در دو سطح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل های ۵ و ۶ پیداست، ترکیب قیری

می یابد.

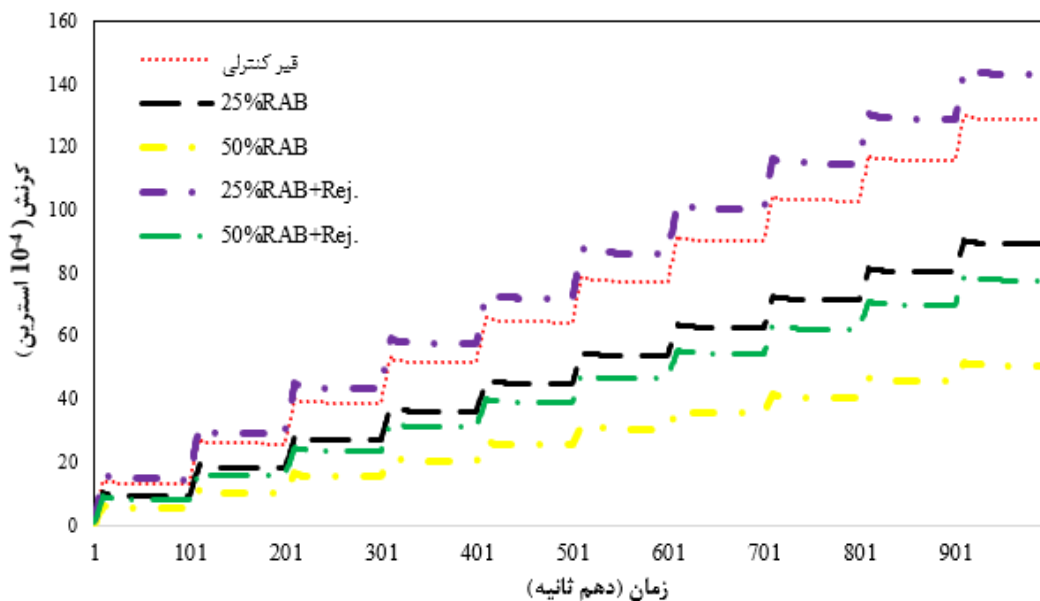
۲-۶- نتایج آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش  
 برای هر ترکیب قیری نشان داده شده در جدول ۴، آزمایش

نسبت به شیارشدگی می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن جوان‌ساز در ترکیبات قیری حاوی درصد های بالای قیر بازیافتی تاثیر منفی بر مقاومت شیارشدگی آن‌ها ندارد.

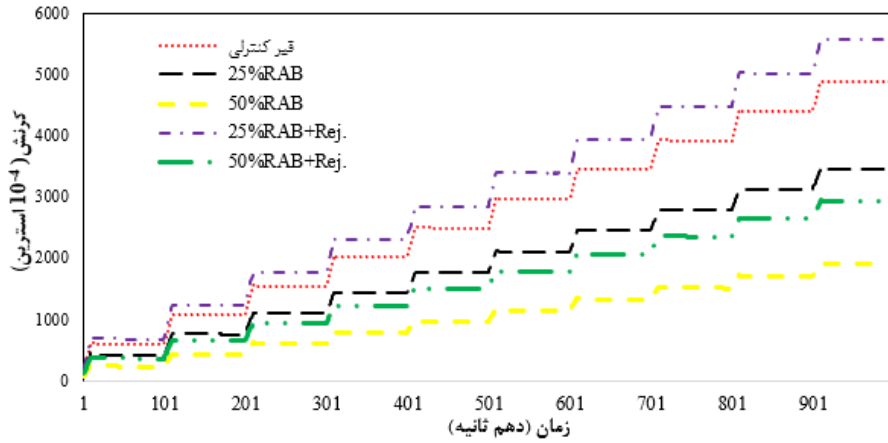
### ۶-۳- نتایج آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی

متوسط عمر خستگی به دست آمده از آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی در سه سطح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین برای مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق، در شکل ۷ آورده شده است. دلیل استفاده از سطوح کرنش مورد نظر این است که در سطوح کرنش کمتر از ۵۰۰ میکرواسترین آزمایش بسیار زمان‌بر و در سطوح کرنش بالاتر از ۸۰۰ میکرواسترین هم برخی از نمونه‌ها در هنگام بارگذاری دچار شکست می‌شدند و امکان ادامه آزمایش میسر نبود. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش درصد مصالح خرده آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی بدون جوان‌ساز عمر خستگی در کرنش‌های مختلف رو به کاهش است. در مخلوط‌های آسفالتی با جوان‌ساز، با افزایش درصد مصالح خرده آسفالتی به ۵۰ درصد عمر خستگی در همه سطوح کرنش بیشتر از مخلوط کنترل (مخلوط بدون مصالح خرده آسفالتی) شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جوان‌ساز نقش مهمی در افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی

دارای ۲۵ درصد قیر بازیافتی به همراه جوان‌ساز دارای کرنش ماندگار بیشتری نسبت به سایر ترکیبات می‌باشد ولی نمونه حاوی ۵۰ درصد قیر بازیافتی به همراه جوان‌ساز دارای تغییر شکل‌های کمتری نسبت به قیر کنترلی است. جدول ۶، مقادیر  $J_{rr}$  و  $R$  را در دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال برای هر ترکیب قیر نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج جدول ۶ پیداست، تقریباً همه ترکیبات قیری مورد استفاده در این تحقیق دارای درصد بازگشت کرنش ( $R$ ) بیشتری نسبت به قیر کنترلی می‌باشند. درصد بالاتر بازگشت کرنش نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که قیر توانایی بازگشت نسبی بیشتری بعد از بارگذاری را دارد. هر چه درصد بازگشت کرنش بیشتر باشد، قیر توانایی بالاتری جهت مقابله با شیارشدگی را دارد. همان‌طور که از نتایج پیداست، قیر خالص کنترلی (قیر ۶۰/۷۰) دارای مقدار بازگشت کرنش کمتری نسبت به سایر ترکیبات قیری در دو سطح تنش می‌باشد که نشان‌دهنده مقاومت کمتر در برابر شیارشدگی می‌باشد. همچنین با مقایسه مقادیر مدول غیر قابل بازگشت ( $J_{rr}$ ) در دو سطح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال می‌توان به این نتیجه رسید که همه ترکیبات قیری به غیر از ترکیب قیری حاوی ۲۵ درصد قیر بازیافتی به همراه جوان‌ساز، دارای مقادیر پارامتر ( $J_{rr}$ ) کمتری نسبت به قیر کنترلی می‌باشند. مقادیر کمتر ( $J_{rr}$ ) نشان‌دهنده مقاومت بیشتر قیر



شکل ۵. منحنی کرنش به ازای زمان برای هر نمونه قیری در سطح تنش ۰/۱ کیلو پاسکال  
**Fig. 5. Time-strain curve for each binder compound at stress level of 0.1 kPa**

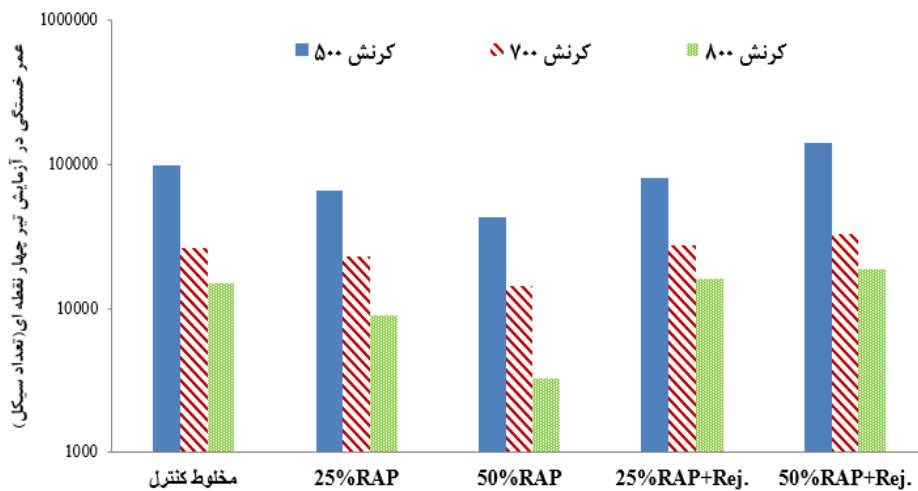


شکل ۶. منحنی کرنش به ازای زمان برای هر نمونه قیری در سطح تنش ۳/۲ کیلو پاسکال  
 Fig. 6. Time-strain curve for each binder compound at stress level of 3.2 kPa

جدول ۶. پارامترهای آزمایش MSCR

Table 6. The MSCR test parameters

R <sub>3200</sub> (%)	R <sub>100</sub> (%)	J <sub>nr@3200 Pa</sub>	J <sub>nr@100 Pa</sub>	ترکیب قیری
۴/۳۴	۱۲/۱	۱/۵	۱/۳	قیر کنترل
۹/۶	۱۶/۴	۱/۰۴	۰/۸۹	25%RAB
۱۳/۵	۲۰	۰/۵۹۵	۰/۵	50%RAB
۳/۷۴	۱۳	۱/۶	۱/۴	25%RAB+Rej.
۸/۳	۱۶/۹	۰/۸۷	۰/۷۷	50%RAB+Rej.



شکل ۷. متوسط عمر خستگی به دست آمده از آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی در سه سطح کرنش در دمای ۲۰ درجه  
 Fig. 7. Average fatigue life obtained from four-point beam fatigue test at three strain levels at 20 °C

حاوی RAP نسبت به مخلوط کنترل دارد.

#### ۴-۶- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

منحنی تغییرات تغییر شکل‌های ماندگار به ازای تعداد سیکل بارگذاری برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف در شکل ۸ ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد مصالح خرد آسفالتی بدون جوان‌ساز دارای تغییر شکل‌های کمتری نسبت به سایر مخلوط‌ها هستند. وجود جوان‌ساز در مخلوط‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد مصالح خرد آسفالتی باعث افزایش کرنش‌های ماندگار نسبت به مخلوط‌های بدون جوان‌ساز شده است. با این وجود مخلوط‌های حاوی مصالح خرد آسفالتی با جوان‌ساز نسبت به مخلوط کنترل دارای تغییر شکل‌های کمتری می‌باشند. با استفاده از روش پیشنهادی یو<sup>۱</sup> مقدار عدد روانی برای مقایسه مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق محاسبه شد [۲۴]. مقادیر عدد روانی نشان داده شده در جدول ۷ بر اساس میانگین سه نمونه تکراری مورد آزمایش برای هر مخلوط آسفالتی ارائه شده است. با توجه به درصد کم انحراف معیار و ضریب تغییرات مشاهده می‌شود که نتایج قابل اطمینان می‌باشند.

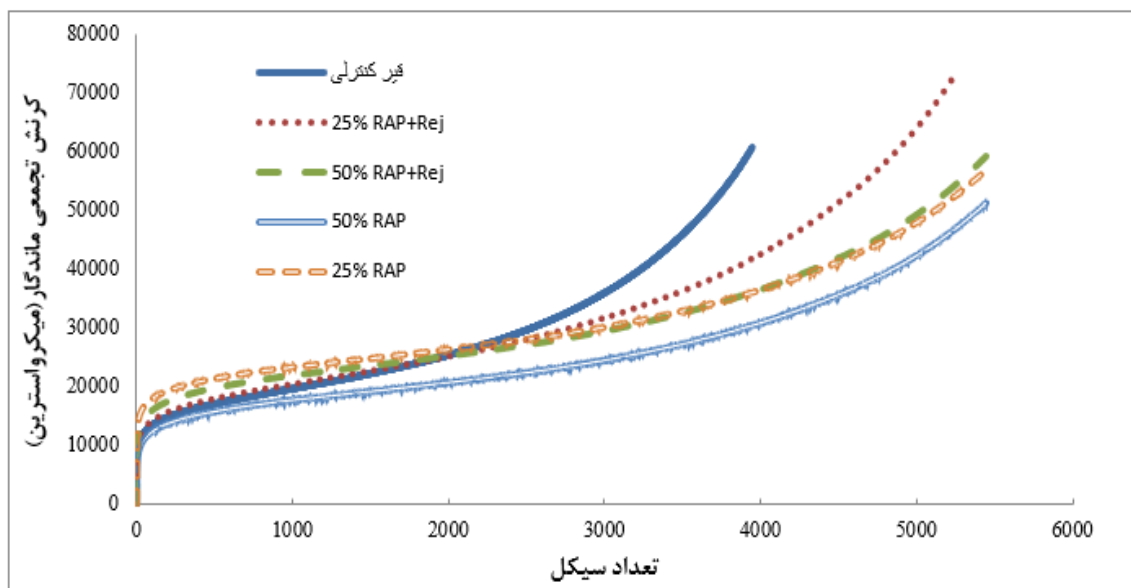
1 You

بر اساس متوسط مقادیر عدد روانی، نیز می‌توان نتیجه گرفت که مخلوط‌های حاوی مصالح خرد آسفالتی بدون جوان‌ساز دارای بیش‌ترین عدد روانی و در نتیجه بیش‌ترین مقاومت شیارشدگی نسبت به سایر مخلوط‌ها می‌باشند. از طرفی وجود جوان‌ساز در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد مصالح خرد آسفالتی به ترتیب فقط باعث کاهش ۱۳/۴ و ۴/۹ درصدی عدد روانی نسبت به مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد مصالح خرد آسفالتی بدون جوان‌ساز شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جوان‌ساز مورد استفاده در این تحقیق تاثیر منفی چندانی بر مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های حاوی مصالح خرد آسفالتی نداشته است.

#### ۵-۶- مقایسه نتایج آزمایش‌های قیر و مخلوط‌های آسفالتی در

##### مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرد آسفالتی

همانطور که اشاره شد هدف از این تحقیق، بررسی ارتباط بین پارامترهای خستگی و مقاومت شیارشدگی قیر و پارامترهای خستگی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف مصالح خرد آسفالتی می‌باشد. شکل‌های ۹ تا ۱۱، مقایسه بین عمر خستگی ترکیبات قیری مورد استفاده در این تحقیق را با استفاده از آزمایش جاروب دامنه خطی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۸. منحنی تغییرات تغییر شکل‌های ماندگار به ازای تعداد سیکل بارگذاری برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف

Fig. 8. Curves of total accumulated strain versus number of cycles for different asphalt mixtures

جدول ۷. مقادیر عدد روانی در مخلوط‌های مختلف

Table 7. FN values for asphalt mixtures

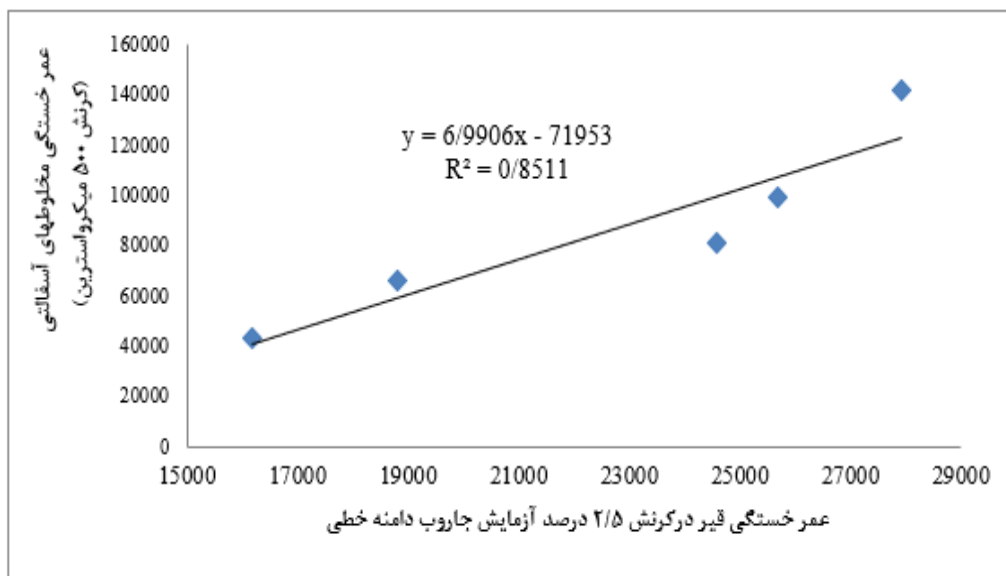
نوع مخلوط	نمونه	عدد روانی	متوسط عدد روانی	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
مخلوط کنترلی	۱	۲۸۸۳	۲۶۷۰	۱۵۲	۵/۷
	۲	۲۵۳۶			
	۳	۲۵۹۱			
25% RAP+ Rej	۱	۳۸۶۹	۳۵۱۰	۲۶۹	۷/۶
	۲	۳۴۳۹			
	۳	۳۲۲۲			
50% RAP+ Rej	۱	۴۳۶۷	۴۰۸۱	۳۵۷	۸/۷
	۲	۳۵۷۸			
	۳	۴۲۹۸			
25% RAP	۱	۴۳۹۵	۴۰۵۴	۳۹۴	۹/۷
	۲	۳۵۰۲			
	۳	۴۲۶۵			
50% RAP	۱	۳۸۰۱	۴۲۹۰	۳۶۵	۸/۵
	۲	۴۳۹۳			
	۳	۴۶۷۶			

شکل‌های ۱۲ تا ۱۵، نیز ارتباط بین پارامترهای آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش ( $J_{nr}$  و  $R$ ) در قیر را با مقادیر عدد روانی به دست آمده در آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهند. همانطور که در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار  $J_{nr}$  قیر، مقادیر عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش مقاومت شیارشدگی است. با توجه به  $R^2$  نسبتاً بالا معادلات رگرسیون، ارتباط آماری نسبتاً خوبی بین مقاومت شیارشدگی قیر و مخلوط آسفالتی وجود دارد. همچنین در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد بازگشت کرنش ( $R$ ) که نشان دهنده افزایش مقاومت شیارشدگی قیر می‌باشد، مقادیر عدد روانی هم رو به افزایش می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ارتباط خوبی بین پارامتر  $R$  و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد.

در سال ۲۰۱۷، دومینگوس<sup>۱</sup> و همکارانش برای مخلوط‌های

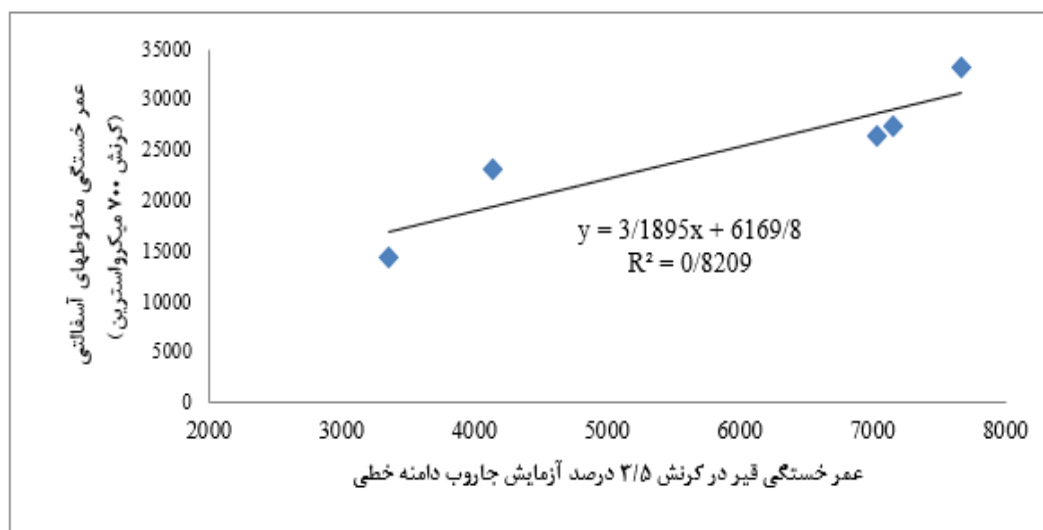
با استفاده از آزمایش تیر چهار نقطه‌ای را در سطوح مختلف کرنش نشان می‌دهند. با توجه به اینکه آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی برای مخلوط‌های آسفالتی در سه سطح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میکرو استرین صورت گرفته بود و همانطور که قبلاً اشاره شد، کرنش در آزمایش خستگی قیر تقریباً ۵۰ برابر کرنش در آزمایش خستگی مخلوط‌های آسفالتی است، بنابراین عمر خستگی ترکیبات قیری مربوط به آزمایش جاروب دامنه خطی در کرنش‌های ۲/۵، ۳/۵ و ۴ درصد به ترتیب با عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در کرنش‌های ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مقایسه شدند. همانطور که در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌شود، با توجه به  $R^2$  بالا معادلات رگرسیون، ارتباط آماری خوبی بین عمر خستگی قیر و عمر خستگی مخلوط آسفالتی وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از عمر خستگی ترکیبات قیری می‌توان تخمین مناسبی از عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده آسفالتی به دست آورد.

1 Domingos



شکل ۹. ارتباط بین عمر خستگی ترکیبات قیری در کرنش ۲/۵ درصد و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در کرنش ۵۰۰

Fig. 9. Correlation between LAS results at 2.5% and 4-point beam fatigue test at 500 με

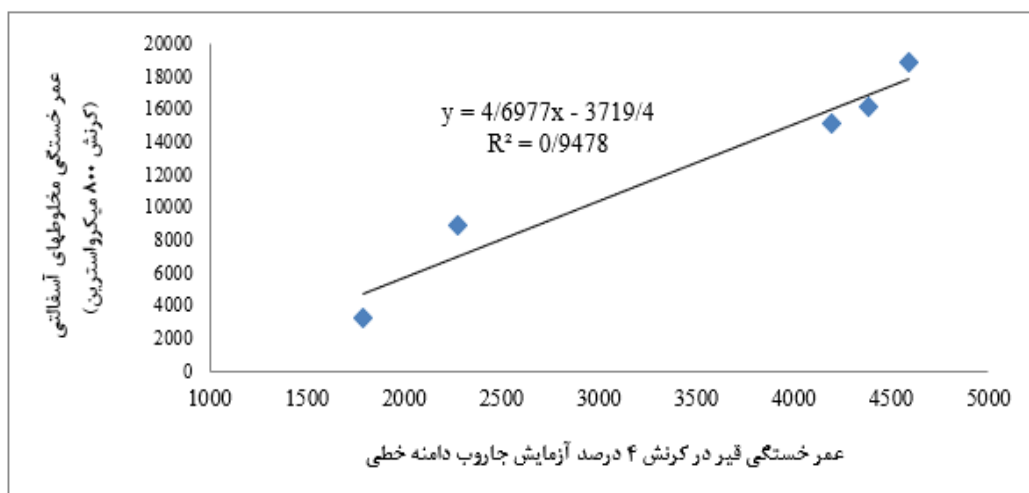


شکل ۱۰. ارتباط بین عمر خستگی ترکیبات قیری در کرنش ۳/۵ درصد و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در کرنش ۷۰۰

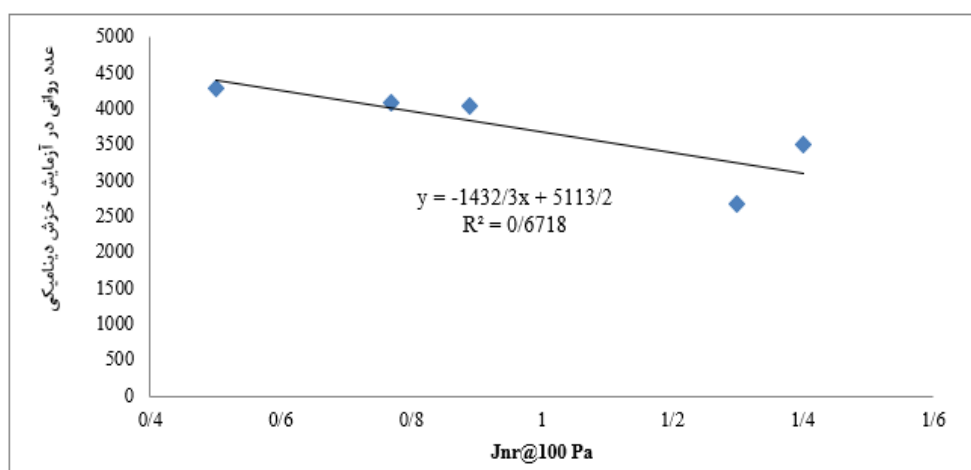
Figure 10. Correlation between LAS results at 3.5% and 4-point beam fatigue test at 700 με

برای مخلوط‌های آسفالت ماستیک سنگ‌دانه‌ای به صورت  $Jnr = 2875/8 - FN + 7469$  برقرار است [۱۲]. با مقایسه بین نتایج تحقیقات پیشین با نتایج به دست آمده در تحقیق جاری، می‌توان نتیجه گرفت که معادلات به دست آمده در مخلوط‌های مختلف تغییر

آسفالتی ساخته شده با قیرهای اصلاح شده پلیمری ارتباط بین  $Jnr$  در تنش ۳۲۰۰ پاسکال با عدد روانی را به صورت معادله  $Jnr = 2000 + FN - 7360$  معرفی کردند [۹]. این در حالی است که بایاگلی و همکارانش نیز دریافتند که ارتباط بین  $Jnr$  ۳۲۰۰ با عدد روانی



شکل ۱۱. ارتباط بین عمر خستگی ترکیبات قیری در کرنش ۴ درصد و عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی در کرنش ۸۰۰  
 Fig. 11. Correlation between LAS results at 4% and 4-point beam fatigue test at 800  $\mu\epsilon$

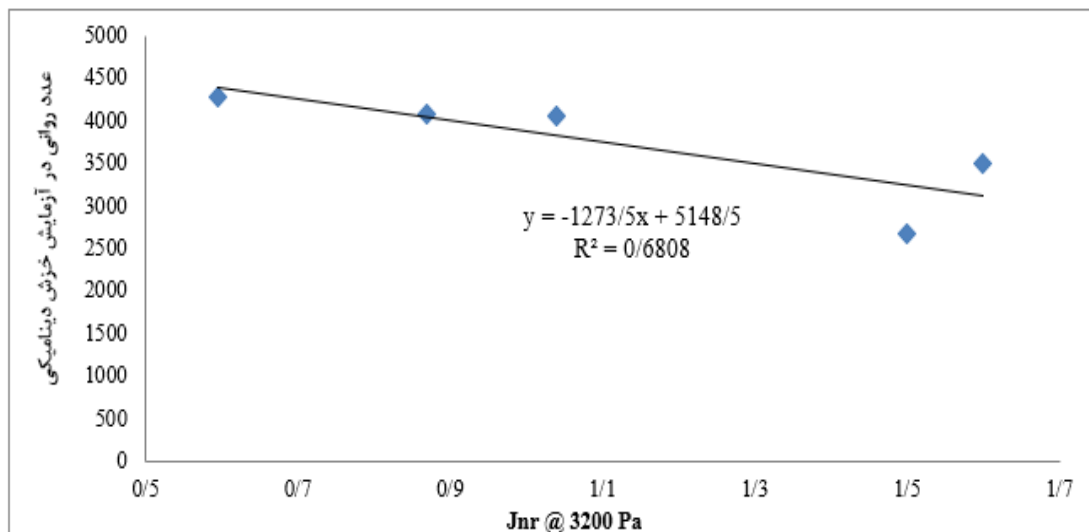


شکل ۱۲. ارتباط بین پارامتر Jnr در تنش ۱۰۰ پاسکال در آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش با مقادیر عدد روانی مخلوطهای آسفالتی  
 Fig. 12. Correlation between MSCR parameter (Jnr) at 100 Pa and flow number

می‌باشند [۵]. همچنین مانان<sup>۱</sup> و همکارانش نشان دادند که رابطه بین عمر خستگی به دست آمده از آزمایش جاروب دامنه خطی و عمر خستگی به دست آمده از تیر چهار نقطه‌ای بستگی به نوع مخلوط و فرکانس بارگذاری دارد [۲]. بنابراین با توجه به اینکه در این تحقیق برای اولین بار بر روی مخلوطهای آسفالتی با درصدهای

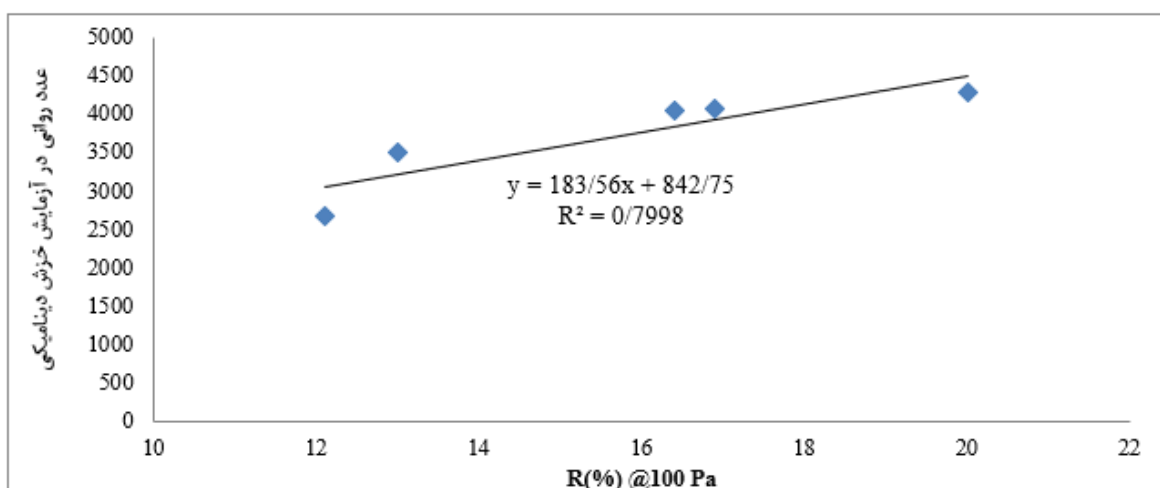
کرده و بستگی به نوع مخلوط دارند. ارتباط بین عمر خستگی به دست آمده از آزمایش جاروب دامنه خطی و عمر خستگی به دست آمده از تیر چهار نقطه‌ای نیز در توسط صبوری و همکارانش بر روی مخلوطهای آسفالتی با قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت بررسی شد که نشان داد که روابط در سطوح مختلف کرنش با همدیگر متفاوت

1 Mannan



شکل ۱۳. ارتباط بین پارامتر Jnr در تنش ۳۲۰۰ پاسکال در آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش با مقادیر عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی

Fig. 13. Correlation between MSCR parameter (Jnr) at 3200 Pa and flow number



شکل ۱۴. ارتباط بین پارامتر R در تنش ۱۰۰ پاسکال در آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش با مقادیر عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی

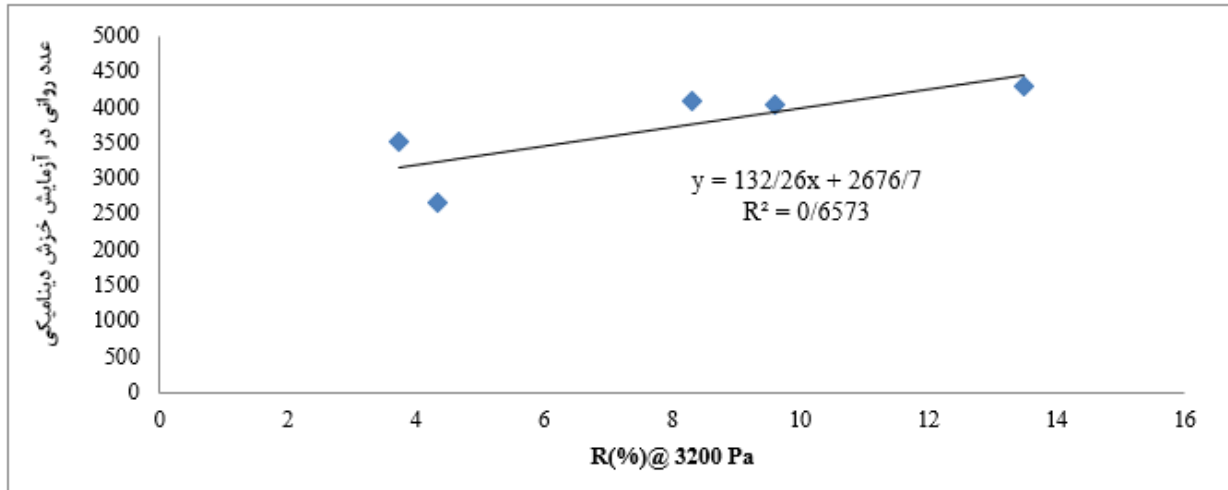
Fig. 14. Correlation between MSCR parameter (R) at 100 Pa and flow number

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد ترکیبات قیری حاوی درصد‌های مختلف قیر بازیافتی و مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف مصالح خرده آسفالتی در دو شرایط با و بدون استفاده از جوان‌ساز مقایسه شد. علاوه بر این چون هدف اصلی این تحقیق ارزیابی ارتباط بین پارامترهای عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی بود، ارتباط بین

مختلف مصالح خرده آسفالتی رابطه بین پارامترهای عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده است و توضیح اشاره شده که روابط به دست آمده وابسته به نوع مخلوط است، لذا مقایسه درستی نمی‌توان بین نتایج به دست آمده این تحقیق با نتایج تحقیقات قبل داشت.





شکل ۱۵. ارتباط بین پارامتر R در تنش ۳۲۰۰ پاسکال در آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش با مقادیر عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی

Fig. 15. Correlation between MSCR parameter (R) at 3200 Pa and flow number

چندانی بر مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی نداشت. با توجه به نتایج فوق مشخص شد که رفتار مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش‌های مربوط به مقاومت خستگی و شیارشدگی با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های جاروب دامنه خطی و خزش و بازیابی در چند سطح تنش که بر روی ترکیبات قیری با درصد‌های مختلف قیر بازیافتی صورت گرفته بود، هم سو می‌باشد. بنابراین با بررسی دقیق تر از نظر آماری مشخص شد که ارتباط آماری خوبی بین عمر خستگی قیر و عمر خستگی مخلوط آسفالتی و ارتباط آماری نسبتاً خوبی بین پارامترهای مقاومت شیارشدگی قیر و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی وجود دارد. بنابراین می‌توان با استفاده از عمر خستگی و مقاومت شیارشدگی ترکیبات قیری، تخمین مناسبی از عمر خستگی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده آسفالتی به دست آورد.

#### مراجع

- [1] Micaelo, R., et al., *Fatigue resistance of asphalt binders: Assessment of the analysis methods in strain-controlled tests*. Construction and Building Materials, 2015. **98**: p. 703-712.
- [2] Mannan, U.A., M.R. Islam, and R.A. Tarefder, *Effects of*

پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های خستگی و شیارشدگی قیر (به ترتیب، آزمایش جاروب دامنه خطی و خزش و بازیابی در چند سطح تنش) با پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی (به ترتیب آزمایش تیر چهار نقطه‌ای و خزش دینامیکی) در مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی برای اولین بار بررسی شد. نتایج عمده که از این تحقیق به دست آمد، عبارتند از:

- در آزمایش جاروب دامنه خطی، عمر خستگی در ترکیبات قیر بدون جوان‌ساز با افزایش درصد قیر بازیافتی نسبت به قیر کنترلی کاهش و عمر خستگی در ترکیبات قیر دارای جوان‌ساز با افزایش درصد قیر بازیافتی افزایش می‌یابد.
- در آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش، با توجه به مقادیر  $J_{nr}$  و R می‌توان نتیجه گرفت که افزودن جوان‌ساز مورد استفاده در این تحقیق در ترکیبات قیری حاوی درصد‌های بالای قیر بازیافتی تاثیر منفی چندانی بر مقاومت شیارشدگی آن‌ها ندارد.
- در آزمایش تیر چهار نقطه‌ای خستگی، جوان‌ساز مورد استفاده نقش مهمی در افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح خرده آسفالتی نسبت به مخلوط کنترل داشت.
- در آزمایش خزش دینامیکی نیز مانند آزمایش خزش و بازیابی در چند سطح تنش، وجود جوان‌ساز مورد استفاده تاثیر منفی

- Building Materials, 2014. **65**: p. 184-190.
- [12] Rezvan, B. and Z. Hassan, *Evaluation of rutting performance of stone matrix asphalt mixtures containing warm mix additives*. Journal of Central South University, 2017. **24**(2): p. 360-373.
- [13] Salim, R., et al., *Relationship between Asphalt Binder Parameters and Asphalt Mixture Rutting*. Transportation Research Record, 2019. **2673**(6): p. 431-446.
- [14] Iran Highway Asphalt Paving Code (IHAPC), Ministry of Road and Transportation Research and Education Center, 2003. (In Persian)
- [15] Ongel, A. and M. Hugener, *Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen*. Construction and Building Materials, 2015. **94**: p. 467-474.
- [16] Mansourkhaki, A., M. Ameri, and D. Daryaei, *Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder*. Construction and Building Materials, 2019. **203**: p. 83-94.
- [17] D, A., *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using marshall apparatus*. 1989, Author Philadelphia, PA.
- [18] Mogawer, W.S., et al., *Using polymer modification and rejuvenators to improve the performance of high reclaimed asphalt pavement mixtures*. Transportation Research Record, 2016. **2575**(1): p. 10-18.
- [19] Test, F.O., *Estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep*. 2010, AASHTO TP.
- [20] AASHTO, T., *Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2009.
- [21] AASHTO, T., *321-07 (2007) Standard method of test for determining the fatigue life of compacted hot-mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending*. Washington, DC: American Association of State and Highway Transportation Officials.
- [22] Dehghan, Z. and A. Modarres, *Evaluating the fatigue recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies*. International Journal of Fatigue, 2015. **78**: p. 72-80.
- [3] Vamegh, M. and M. Ameri, *Rutting performance of road pavement asphalt binders modified by polymers*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2019: p. 1-8.
- [4] Ameri, M., et al., *A study on fatigue modeling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic continuum damage properties of asphalt binder*. Construction and Building Materials, 2016. **106**: p. 243-252.
- [5] Sabouri, M., D. Mirzaiyan, and A. Moniri, *Effectiveness of Linear Amplitude Sweep (LAS) asphalt binder test in predicting asphalt mixtures fatigue performance*. Construction and Building Materials, 2018. **171**: p. 281-290.
- [6] D'Angelo, J., et al., *Revision of the superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test (with discussion)*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2007. **76**.
- [7] Leahy, R.B., E.T. Harrigan, and H. Von Quintus, *Validation of relationships between specification properties and performance*. 1994: Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington, DC.
- [8] Zhang, J., et al., *Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance—A laboratory study*. Construction and Building Materials, 2015. **94**: p. 218-227.
- [9] Domingos, M.D.I., A.L. Faxina, and L.L.B. Bernucci, *Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance*. Construction and Building Materials, 2017. **144**: p. 207-213.
- [10] Laukkanen, O.-V., et al., *Creep-recovery behavior of bituminous binders and its relation to asphalt mixture rutting*. Materials and Structures, 2015. **48**(12): p. 4039-4053.
- [11] DuBois, E., Y. Mehta, and A. Nolan, *Correlation between multiple stress creep recovery (MSCR) results and polymer modification of binder*. Construction and

- [24] Goh, S.W. and Z. You, *A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(11): p. 3398-3405.
- [25] Masad, E., et al., *A unified method for the analysis of controlled-strain and controlled-stress fatigue testing*. International Journal of Pavement Engineering, 2008. **9**(4): p. 233-246.
- properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test*. Construction and Building Materials, 2017. **139**: p. 384-393.
- [23] Standard, A., *AS 2891.12. 1-1995: Methods of sampling and testing asphalt, method 12.1: Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt-dynamic creep test*. Standards Australia, Sydney. New South Wales, Australia, 1995.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

D. Daryaei, M. Ameri, *Evaluation of the Correlation Between Performance Parameters of Asphalt Binder and Mixture in the RAP-Containing Asphalt Mixtures*. Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2315-2334

DOI: [10.22060/ceej.2020.17386.6546](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17386.6546)



