

# بررسی اثر مشخصات مخلوط بتن آسفالتی بر شیارافتادگی با استفاده از آزمایش خزش استاتیکی

علیرضا خاوندی خیای، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

سعید منصوری (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

E-mail: saeedmansoori@znu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱۴

دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۰۱

## چکیده:

خزش به صورت رفتار تغییر شکل وابسته به زمان برای مصالح ویسکوالاستیک تحت بارگذاری تعریف می‌شود. در این تحقیق رفتار خزشی مخلوط‌های بتن آسفالتی به روش اعمال بار استاتیکی و اندازه‌گیری تغییر شکل ایجاد شده با استفاده از دستگاه تحکیم خاک که دستگاهی ساده و در دسترس بوده و در اکثر آزمایشگاه‌ها موجود است، طبق استاندارد BS-598 Part111 بررسی شده است. در این پژوهش، نمودار کرنش- زمان به عنوان خروجی آزمایش خزش به ۴ قسمت تقسیم شده و برای هر قسمت یک کرنش تعریف شده است. این چهار کرنش عبارتند از: کرنش اولیه، کرنش نهایی، کرنش کلی و کرنش بازگشت‌پذیر. در این تحقیق از ۲ دانه‌بندی، ۳ درصد قیر و ۲ نوع قیر استفاده شد. آزمایش‌ها در ۳ دمای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد از بین ۴ کرنش تعریف شده در این تحقیق، کرنش اولیه و نهایی به دست آمده با دستگاه تحکیم خاک به عنوان خروجی آزمایش خزش، بیان‌کننده اثر مشخصات مخلوط بتن آسفالتی بر رفتار شیارافتادگی هستند. کرنش‌های کلی و بازگشت‌پذیر از روند منظمی پیروی نمی‌کنند و نمی‌توان از آنها در بررسی رفتار شیارشدگی مخلوط بتن آسفالتی بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: مخلوط بتن آسفالتی، خزش استاتیکی، دستگاه تحکیم خاک، کرنش اولیه، کرنش نهایی

## ۱. مقدمه

تغییر شکل دائمی روسازیهای آسفالتی (شیار افتادگی) اهمیت زیادی در عملکرد روسازی دارد [Khan & Kamal 2012; Ku-mar & Veeraragavan, 2011; Miljković & Radenberg, 2011]. شیار افتادگی عمر مفید روسازی را کاهش داده و بر کیفیت جابجایی وسیله نقلیه تأثیر می‌گذارد. همچنین جمع شدن آب در محل گود افتادگی شیارها و وقوع پدیده هیدروپلانینگ از دیگر معضلات این پدیده است.

امروزه برای ارزیابی مقاومت شیار افتادگی، آزمایش‌های مختلفی مانند خزش استاتیکی، دینامیکی و تعیین عمق شیار با استفاده از تجهیزات پیشرفته و گران قیمت آزمایشگاهی نظیر دستگاه UTM و یا دستگاه ویلتراک انجام می‌شود. این تجهیزات، با توجه به قیمت آنها و همچنین در دسترس نبودن، خصوصاً در کشور ما، و نیاز به نیروهای آموزش دیده برای کار با آنها عملاً برای استفاده در پروژه‌های در حال اجرا توسط آزمایشگاهها مقدور نیست و بنابراین استفاده از این گونه وسایل آزمایشگاهی فراگیر نیست. این موضوع باعث شده تا در فرآیند طرح اختلاط و کنترل کیفیت مخلوط‌های بتن آسفالتی هیچ آزمایشی برای ارزیابی مقاومت شیار افتادگی در کشور انجام نشود، بنابراین، ارایه روشی کم هزینه و قابل انجام با امکانات موجود می‌تواند در بهبود کیفیت مخلوط‌های بتن آسفالتی در کشور بسیار مؤثر باشد.

این موضوع، به ویژه با توجه به هزینه‌های قابل توجهی که همه ساله از بودجه کشور جهت تعمیر و ترمیم راههای موجود صرف می‌شود، امری ضروری است. هدف این تحقیق علاوه بر بررسی تأثیر مشخصه‌های مخلوط بتن آسفالتی بر شیار افتادگی، بررسی عملکرد دستگاهی ساده و ارزان برای بررسی این نوع خرابی است تا از هزینه‌های تحمیلی برای انجام آزمایش‌های پرهزینه جلوگیری شود.

در این تحقیق رفتار شیار افتادگی مخلوط‌های بتن آسفالتی به

روش خزش استاتیکی و اندازه‌گیری تغییر شکل ایجاد شده با استفاده از دستگاه تحکیم خاک که دستگاهی ساده و در دسترس بوده و در اکثر آزمایشگاهها موجود است، طبق استاندارد BS-598 Part 111 و در دماهای مختلف بررسی می‌شود.

## ۲. پیشینه تحقیق

آزمایش خزش یکی از متداول‌ترین آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری مقاومت در برابر تغییر شکل دائم (شیارشدگی) مخلوط‌های بتن آسفالتی است. آزمایش خزش برای محاسبه عمق چرخها ناشی از تغییر شکل دائمی لایه آسفالتی قابل استفاده است. خزش به صورت رفتار تغییر شکل وابسته به زمان برای مصالح ویسکوالاستیک تحت بارگذاری تعریف می‌شود [Huang, 2010]. مصالح ویسکوالاستیک علاوه بر رفتار الاستیک، از خود رفتار روانی و جاری شدن نیز نشان می‌دهند.

آزمایش‌های تک‌محوری استاتیکی، ساده‌ترین آزمایش‌های مورد استفاده برای توصیف رفتار تغییر شکل ویسکوالاستیک مصالحی مانند مخلوط‌های بتن آسفالتی هستند. این آزمایش‌ها معمولاً به دو صورت تنش ثابت (آزمایش خزش) و نرخ کرنش ثابت در کشش یا فشار انجام می‌شوند [Taherkhani, 2006]. در تلاشی برای توسعه روشی برای تعیین مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی و پیشبینی عمق شیار در روسازی، شرکت نفتی شل آزمایش خزش استاتیکی محوری را برای مصالح آسفالتی توسعه داد [Hills, 1973].

آزمایش خزش استاتیکی تنش ثابت، توسط تعدادی از پژوهشگران برای ارزیابی مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی مخلوط بتن آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. ون دلو (1974) پیشنهاد کرد که آزمایش خزش استاتیکی باید در محدوده رفتار خطی، جایی که سختی مستقل از سطح تنش است، انجام شود [Van de Loo, 1974]. دلیل این پیشنهاد این بود که زمان بارگذاری

## بررسی اثر مشخصات مخلوط بتن آسفالتی بر شیارافتادگی با استفاده از آزمایش خزش استاتیکی

است [Taherkhani, 2006]. زاوادسکی، در سال ۱۹۹۷ در تحقیقی به بررسی آزمایش‌های خزش استاتیکی و تکرارشونده آهسته<sup>۱</sup> به منظور ارزیابی تغییر شکل دائمی مخلوط‌های بتن آسفالتی پرداخت [Zawadzki, 1997]. او آزمایش‌های خود را بر روی ۴ نوع مخلوط متفاوت در سه دمای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد انجام داد. خروجی‌هایی که این محقق از آنها استفاده کرد شامل کرنش اولیه، کرنش نهایی، کرنش کلی، کرنش بازگشت پذیر پس از ۱۵ ثانیه بعد از شروع باربرداری، کرنش بازگشت پذیر بعد از یک ساعت از باربرداری و کرنش ماندگار است. او در آزمایش خزش تکرارشونده آهسته از ۶۰ چرخه ۴ دقیقه‌ای (۱ دقیقه بارگذاری و ۳ دقیقه باربرداری) استفاده کرد. او در توجیه این چرخه، آن را مشابه با توقف اتوبوس در ایستگاه دانست. وی در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که آزمایش خزش استاتیکی، روش مناسبی برای ارزیابی تغییر شکل دائمی مخلوط‌های بتن آسفالتی با قیر اصلاح شده است، به شرطی که این آزمایش در دمای استاندارد (۴۰ درجه سانتیگراد) و ۶۰ درجه سانتیگراد انجام شود. موسی (۲۰۰۳)، در ابتکاری جالب، آزمایش خزش استاتیکی را با استفاده از دستگاه تحکیم خاک انجام داد [Moussa, 2003]. او با ذکر این نکته که دستگاه‌های آزمایش خزش استاتیکی در هر آزمایشگاهی پیدا نمی‌شود، از دستگاه تحکیم خاک به دلیل دسترسی آسان و هزینه پایین آن در آزمایش‌های خزش استفاده کرد. موسی از تغییر شکل کلی، تغییر شکل پلاستیک و تغییر شکل الاستیک به عنوان خروجی‌های آزمایش خزش استفاده کرد. این محقق تنها در دمای محیط این آزمایش را انجام داد [Moussa, 2003]. موسی (۲۰۰۳) در تحقیق خود آزمایش خزش را به صورت ۱ ساعت بارگذاری و ۳۰ دقیقه باربرداری انجام داد. وی از تنشی معادل ۲۰۰ کیلوپاسکال استفاده کرد، در حالی که در تحقیق حاضر

واقعی در محل، در مقایسه با بارگذاری آزمایش خزش کمتر است و تغییر شکل دائمی در محدوده خطی باقی می‌ماند. اکثر پژوهشگران، شرایط استاندارد آزمایش خزش استاتیکی را دمای ۴۰ درجه سانتیگراد، یک ساعت بارگذاری و تنش معادل ۰/۱ مگاپاسکال انتخاب می‌کنند. آزمایش خزش نه تنها برای به دست آوردن ضریب نرمی خزش در زمانهای مختلف و استفاده از آنها در تحلیل سیستمهای ویسکوالاستیک استفاده می‌شود، بلکه همچنین برای محاسبه عمق شیار مسیر چرخها، ناشی از تغییر شکل دائمی لایه آسفالتی قابل استفاده است [Huang, 2010]. براساس آزمایش‌های خزش، ون دلو (۱۹۷۴، ۱۹۷۸) روشی را برای تخمین عمق شیار مسیر چرخها پیشنهاد داد که در دستورالعمل طراحی روسازی شل گنجانده شده است [Huang, 2010].

رو و کوپر (۱۹۸۸) پیشنهاد کردند که آزمایش خزش محدودنشده استاندارد، در سطح تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال، ۳۰ درجه سانتیگراد و مدت زمان ۵/۵ ساعت بارگذاری انجام شود [Rowe and Cooper, 1988]. هادی پور و اندرسون (۱۹۸۸) و مانیسمیت و تیبالی (۱۹۸۸) آزمایش خزش تک‌محوری را در بازه تنش ۱۰۳ تا ۲۰۷ کیلوپاسکال و ۴۰ درجه سانتیگراد انجام دادند [Hadipour and Anderson, 1988; Monismith and Tayebali, 1988]. براساس شرایط بارگذاری واقعی و آبوهوا، برون و فو (۱۹۹۴) شرایط آزمایش خزش استاتیکی را با سطح تنش ۱۳۸ کیلوپاسکال و در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد پیشنهاد کردند [Brown & Foo, 1994]. همچنین، کولوپ و همکارانش (۱۹۹۹) رفتار تغییر شکل مخلوطها تحت بارگذاری محوری تکرار شونده در دامنه وسیعی از دما و بارگذاری بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال مورد بررسی قرار دادند [Collop and Khanzada, 1999]. آنها پی بردند که تغییرات کرنش محوری در مقابل تعداد چرخه همانند آزمایش خزش استاتیکی دارای سه ناحیه اولیه، دوم و سوم متمایز

مصالح حاصل از معدن رودخانه‌ای تهیه شد. سرم موجود به صورت دپوهای فیلر، ۶-۰، ۱۲-۶، ۱۹-۱۲ و ۲۴-۱۹ تفکیک شده بودند. جنس مصالح سنگی، سیلیسی است.

جدول (۱)، نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی را نشان می‌دهد. به منظور پوشش طیف وسیعی از دانه‌بندی‌های مورد استفاده در فعالیتهای اجرایی، در تحقیق حاضر، از دو دانه‌بندی پیوسته متداول بر اساس آیین‌نامه روسازی راههای ایران (نشریه ۲۳۴) (دانه‌بندی‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب برابر با دانه‌بندی‌های شماره ۴ و ۳ موجود در نشریه است) استفاده شد.

در این تحقیق از دو نوع قیر ۷۰/۶۰ پالایشگاه تبریز و ۱۰۰/۸۵ پالایشگاه تهران استفاده شده است.

مشخصات قیرهای مصرفی در جدول (۳) بر اساس آورده شده است. مشخصات ارایه شده توسط تولیدکننده و برخی نیز در آزمایشگاه انجام شده است.

تنش اعمال شده مطابق با استاندارد BS، ۱۰۰ کیلوپاسکال است. کاظمی (۲۰۱۲)، در تحقیقی بر روی مخلوط‌های آسفالتی گرم مسلح شده با الیاف، تأثیر این الیاف را بر روی شیارشدگی مخلوط‌ها با آزمایش خزش استاتیکی مورد بررسی قرار داد [Kazemi, 2012]. وی نیز مانند موسی از دستگاه تحکیم خاک استفاده کرد. این محقق در تحقیقاتش آزمایش‌های خزش استاتیکی را در دو دمای محیط و ۴۵ درجه سانتیگراد انجام داد. خروجیهای آزمایش خزش این محقق شامل کرنش جمععی، کرنش ماندگار، کرنش بازگشت پذیر و مدول سختی خزشی مخلوط است [Kazemi, 2012].

### ۳. روش تحقیق

#### ۳-۱ مصالح مصرفی

سنگدانه‌های بکاررفته در ساخت نمونه‌های آسفالتی از دپوی

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی

| نتایج آزمایش  |               |                 |              |                  | مشخصه                             |
|---------------|---------------|-----------------|--------------|------------------|-----------------------------------|
| فیلر مصالح    | ۶-۰ میلیمتر   | مخلوط درشت‌دانه | ۱۲-۶ میلیمتر | شن ۱۹-۱۲ میلیمتر |                                   |
| -             | ۵۳            | -               | -            | -                | ارزش ماسه‌ای                      |
| -             | -             | C               | C            | B                | درصد افت وزنی                     |
| -             | -             | ۵۰۰             | ۵۰۰          | ۵۰۰              | در مقابل سایش                     |
| -             | -             | ۲۲              | ۲۲           | ۱۹               | به روش لوس آنجلس                  |
| N.P           | N.P           | -               | -            | -                | دامنه خمیری                       |
| -             | -             | -               | -            | -                | حد خمیری                          |
| غیرقابل تعیین | غیرقابل تعیین | -               | -            | -                | حد روانی                          |
| -             | -             | ۸۶              | ۹۲           | ۸۰               | درصد شکستگی مصالح روی الک شماره ۴ |
| -             | -             | بیش از ۹۵       | بیش از ۹۵    | بیش از ۹۵        | درصد اندود قیر به مصالح سنگی      |
| -             | -             | ۱۳              | ۱۱           | ۱۳               | درصد دانه‌های پولکی               |
| -             | ۲/۱۲          | ۰/۵۹            | -            | -                | درصد افت وزنی                     |
| -             | -             | ۰/۹۰            | ۰/۴۴         | ۰/۱۷             | در مقابل سولفات سدیم              |

## بررسی اثر مشخصات مخلوط بتن آسفالتی بر شیارافتادگی با استفاده از آزمایش خزش استاتیکی

### ۲-۳ طرح اختلاط

نمونه‌های مورد آزمایش بیش از ۱۰۸ نمونه است.

برای تهیه نمونه، ابتدا مصالح سنگی به وزن ۱۲۰۰ گرم با دانه‌بندی ۲ تهیه و در گرمخانه با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد.

قیر نیز حدود ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده سپس مقدار قیر مورد نظر به مصالح سنگی اضافه و کاملاً مخلوط شدند. سپس مخلوط بتن آسفالتی داخل قالب مارشال ریخته شده و با اعمال ۷۵ ضربه با استفاده از چکش مارشال به هر دو طرف نمونه متراکم شدند. در جدول ۴، مشخصات نمونه‌های آسفالتی آورده شده است.

در این پژوهش، بر اساس طرح اختلاط کارگاهی از در صد قیر بهینه و تیم درصد بیشتر و نیم درصد کمتر از آن برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات نمونه‌ها در جدول (۴) آورده شده است.

### ۳-۳ ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش نمونه‌های مخلوط بتن آسفالتی به روش مارشال با دو نوع قیر، سه درصد قیر برای ۲ نوع دانه بندی شماره ۱ و ۲ ساخته شدند. با توجه به اینکه آزمایش در ۳ دمای مختلف انجام شد، تعداد

جدول ۲. مقادیر وزنی هر یک از مصالح تفکیک شده دانه‌بندی‌های ۱ و ۲

| درصد وزنی رد شده |             | اندازه الک               |
|------------------|-------------|--------------------------|
| دانه بندی ۲      | دانه بندی ۱ |                          |
| ۱۰۰              | -           | ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ)     |
| ۹۵               | ۱۰۰         | ۱۹ میلی‌متر (۳/۴ اینچ)   |
| -                | ۹۵          | ۱۲/۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ) |
| ۶۸               | -           | ۹/۵ میلی‌متر (۳/۸ اینچ)  |
| ۵۰               | ۶۱          | شماره ۴                  |
| ۳۶               | ۴۱          | شماره ۸                  |
| ۱۲               | ۱۱          | شماره ۵۰                 |
| ۵                | ۶           | شماره ۲۰۰                |
| ۰                | ۰           | سینی (فیلر)              |

جدول ۳. مشخصات قیرهای تهیه شده از پالایشگاه تبریز و تهران

| قیر ۸۵/۱۰۰ |            | قیر ۶۰/۷۰   |       | روش آزمایش | مشخصه   |
|------------|------------|-------------|-------|------------|---|
| محدوده     | نتیجه      | محدوده      | نتیجه |            |   |
| ۱۰۰-۸۵     | ۹۴         | ۶۰-۷۰       | ۶۲    | ASTM-D5    | درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بر حسب ۰/۱ میلی‌متر |
| ۵۲-۴۵      | ۴۵/۱       | ۴۹-۵۶       | ۵۲/۶  | ASTM-D36   | نقطه نرمی، بر حسب درجه سانتی‌گراد                         |
| بیش از ۱۰۰ | بیش از ۱۰۰ | بیش از ۱۰۰  | ۱۵۰   | ASTM-D113  | مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد، بر حسب سانتی‌متر         |
| -          | -          | حد اقل ۲۵۰  | ۲۹۸   | ASTM-D92   | درجه اشتعال، بر حسب درجه سانتی‌گراد                       |
| -          | -          | حد اقل ۹۹/۵ | ۹۹/۸  | ASTM-D2042 | حلالیت در تری کلرو اتیلن، بر حسب درصد                     |
| -          | -          | ۱/۰۱۶-۱/۰۱۶ | ۱/۰۱۶ | ASTM-D70   | وزن مخصوص در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد                      |
| -          | -          | حد اکثر ۰/۲ | ۰/۰۳  | ASTM-D6    | افت حرارتی، بر حسب درصد وزنی                              |
| -          | -          | حد اکثر ۲۰  | ۲     | ASTM-D6&D5 | نسبت افت درجه نفوذ بعد حرارت دهی، بر حسب درصد             |

### ۳-۴ آزمایش خزش استاتیکی

در این تحقیق برای بررسی رفتار تغییر شکل دائمی مخلوطهای بتن آسفالتی از آزمایش خزش استاتیک تکمحوره به روش استاندارد BS-598 Part 111 استفاده شد. برای اعمال تنش ثابت و اندازه‌گیری تغییر شکل به وجود آمده از دستگاه تحکیم خاک استفاده شد. شکل (۱) این دستگاه را به همراه تمهیداتی که برای حفظ دمای مورد نظر ساخته شده است، نشان می‌دهد. در این آزمایش، از رابطه (۱) استفاده شده است:

$$\varepsilon_s(t, T) = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (1)$$

که در آن:

$\varepsilon_s(t, T)$  برابر با کرنش طولی در زمان  $t$  (برحسب ثانیه) و دمای  $T$  (برحسب درجه سانتیگراد)؛

$\Delta h$  برابر با تغییر شکل (برحسب هزارم میلیمتر)؛

$h_0$  برابر با ارتفاع نمونه قبل از اعمال بار (برحسب هزارم میلیمتر) است.

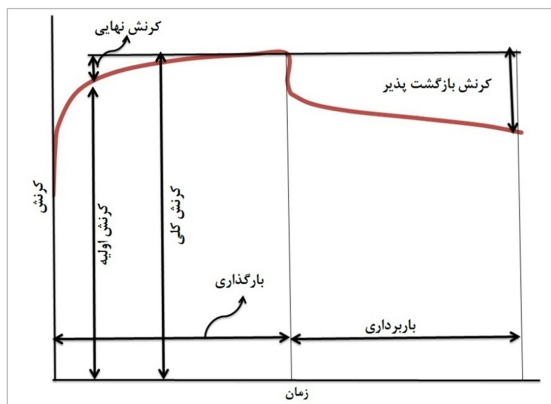
آزمایش‌ها در ۳ دمای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد انجام شدند. برای رساندن دمای نمونه به دماهای ۴۰ و ۶۰ درجه، به ترتیب نمونه به مدت ۴ ساعت در کوره با دماهای ۴۰ یا ۶۰ درجه قرار گرفت. برای کنترل دما از یک نمونه مشابه که در مرکز آن سوراخی ایجاد شده و دماسنجی در داخل آن قرار گرفته بود، استفاده شد. برای جلوگیری از افت دمای نمونه در حین انجام آزمایش نیز، از یک قاب چوبی که مانند گلخانه با نایلون ضخیم یا پوشش برزنتی پوشانده شده بود، استفاده گردید. برای ایجاد حرارت در درون این قاب از حمام آب استفاده شد. شکل (۱)،

جدول ۴. مشخصات نمونه‌ها به ترتیب شماره

| شماره نمونه | دانه‌بندی | درصد قیر | نوع قیر |
|-------------|-----------|----------|---------|
| ۱           | ۱         | ۵٪/۱۲    | ۸۵/۱۰۰  |
| ۲           | ۱         | ۴٪/۱۷    | ۸۵/۱۰۰  |
| ۳           | ۱         | ۵٪/۱۷    | ۸۵/۱۰۰  |
| ۴           | ۱         | ۵٪/۱۲    | ۶۰/۷۰   |
| ۵           | ۱         | ۴٪/۱۷    | ۶۰/۷۰   |
| ۶           | ۱         | ۵٪/۱۷    | ۶۰/۷۰   |
| ۷           | ۲         | ۴٪/۱۸    | ۸۵/۱۰۰  |
| ۸           | ۲         | ۴٪/۱۳    | ۸۵/۱۰۰  |
| ۹           | ۲         | ۵٪/۱۳    | ۸۵/۱۰۰  |
| ۱۰          | ۲         | ۴٪/۱۸    | ۶۰/۷۰   |
| ۱۱          | ۲         | ۴٪/۱۳    | ۶۰/۷۰   |
| ۱۲          | ۲         | ۵٪/۱۳    | ۶۰/۷۰   |



شکل ۱. دستگاه تحکیم به همراه تجهیزات جهت حفظ دمای مورد نظر



شکل ۲. اجزای کرنش اندازه‌گیری شده در طول بارگذاری و باربرداری در آزمایش خزش استاتیکی

در این تحقیق کرنشهای چهارگانه فوق بر اساس متغیرهای درصد قیر، نوع قیر و اندازه سنگدانه مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج حاصل در ذیل آورده شده است:

#### ۴-۱- کرنش اولیه

شکل (۳)، کرنش اولیه را برای ۳ پارامتر درصد قیر، نوع قیر و نوع دانه‌بندی، به ترتیب از راست به چپ برای آزمایش خزش استاتیکی نشان می‌دهد. از آنجایی که کرنش در ۱۵ ثانیه ابتدایی اندازه‌گیری نشد، از درونیابی خطی بین دو زمان ۱۰ و ۴۰ ثانیه، جهت به دست آوردن کرنش در زمان مورد نظر استفاده شد. با توجه به زیاد بودن تعداد متغیرها و نمودارها، تنها چند نمودار به عنوان نمونه در اینجا آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما در نمونه‌ها باعث افزایش کرنش اولیه می‌شود.

در مقایسه نوع قیر و تأثیر بر کرنش اولیه، همان طور که انتظار می‌رود، قیر ۸۵/۱۰۰ کرنش اولیه بیشتری از خود نشان داده است. همچنین با افزایش دما، کرنش اولیه نیز افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود پارامتر کرنش اولیه حساسیت خوبی نسبت به نوع قیر دارد. (به عبارت دیگر اگر ستونهای مرتبط با یک نوع قیر به یکدیگر وصل شود، هیچگونه تلاقی دیده نمی‌شود. این عدم تلاقی، خود بیانگر حساسیت بالای نوع قیر در کرنش

پوشش نایلونی برای رسیدن به دمای ۴۰ و پوشش برزنتی برای رسیدن به دمای ۶۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. پس از رسیدن دمای محفظه به دمای مورد نظر، ابتدا به مدت ۱۰ دقیقه بار نشاننده که تنش ۱۰ کیلوپاسکال به نمونه را ایجاد می‌کند، وارد شد. پس از ۱۰ دقیقه، تنش اصلی که معادل ۱۰۰ کیلوپاسکال است به نمونه اعمال شد. طبق استاندارد BS-598 Part 111، کرنشهای حاصل شده در زمان‌های ۱۰، ۴۰، ۱۰۰، ۴۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۶۰۰ ثانیه پس از اعمال بار اصلی یادداشت شد. سپس تنش اعمالی برداشته شد و کرنشها مجدداً در زمان‌های فوق پس از برداشتن بار ثبت گردید.

#### ۴. تحلیل نتایج آزمایش خزش استاتیکی

در این پژوهش، برای تحلیل نتایج، نمودار کرنش- زمان به ۴ قسمت تقسیم شدند. کرنش اولیه<sup>۱</sup>، کرنش نهایی<sup>۲</sup>، کرنش کلی<sup>۳</sup> و کرنش بازگشت‌پذیر<sup>۴</sup>، کرنشهایی هستند که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. کرنش ابتدایی<sup>۱</sup>، به کرنش ایجاد شده در نمونه بعد از ۱۵ ثانیه از شروع بارگذاری گفته می‌شود. کرنش نهایی<sup>۲</sup>، به کرنش ایجاد شده بین ۱۵ ثانیه تا ۱ ساعت از بارگذاری (انتهای بارگذاری) گفته می‌شود.

کرنش کلی<sup>۳</sup>، به مجموع کرنش اولیه و کرنش نهایی اطلاق می‌شود. کرنش بازگشت‌پذیر<sup>۴</sup> به کرنش برگشت یافته از شروع باربرداری تا ۱ ساعت پس از باربرداری (انتهای باربرداری) گفته می‌شود. شکل (۲)، تقسیم‌بندی شماتیک این کرنشها را نشان می‌دهد.

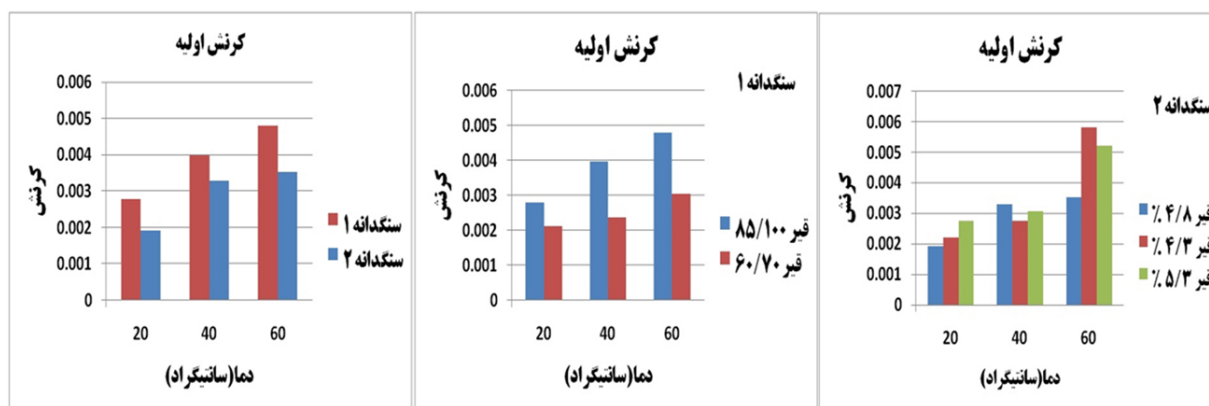
پیرو تحقیقات زاوادسکی، در بررسی ارتباط این کرنشها با شیارشدگی می‌توان گفت، هرچه سه کرنش اول یعنی کرنشهای اولیه، نهایی و کلی بیشتر باشند، پتانسیل شیارشدگی نیز افزایش می‌یابد.

از طرف دیگر، با کاهش کرنش بازگشت‌پذیر، پتانسیل شیارشدگی افزایش می‌یابد.

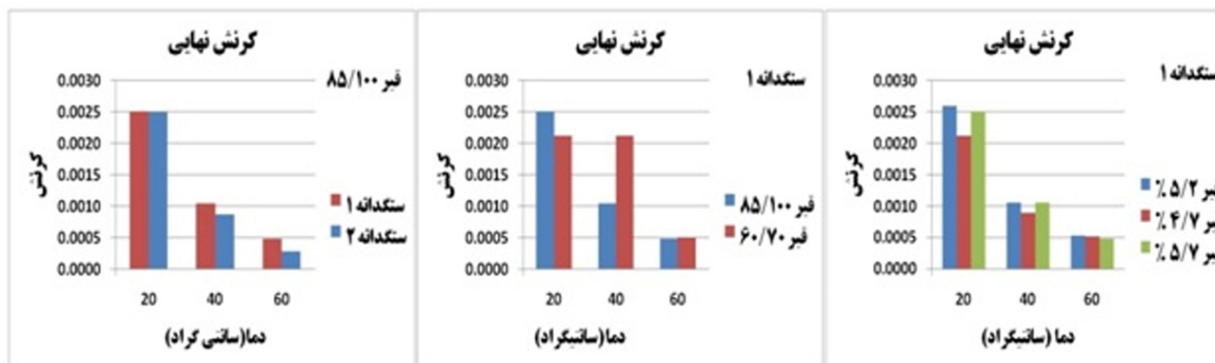
#### ۲-۴ کرنش نهایی

شکل (۴)، کرنش نهایی را برای ۳ پارامتر درصد قیر، نوع قیر و نوع دانه بندی، به ترتیب از راست به چپ، برای آزمایش خزش استاتیکی نشان می دهد. نکته ای که در ابتدا به نظر می رسد، شیب منفی نمودارها بر حسب دما است. یعنی با افزایش دما کرنش نهایی کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با افزایش دما بیشترین مقدار کرنش نمونه ها تحت بار، در همان ۱۵ ثانیه ابتدای بارگذاری رخ می دهد. کرنش نهایی بر خلاف کرنش اولیه به طور کلی برای قیر ۶۰/۷۰ بیشتر از قیر ۸۵/۱۰۰ است. تفاوت این مقدار در دمای ۴۰ درجه به وضوح دیده می شود. پارامتر کرنش نهایی در مقایسه اندازه سنگدانه، همانند درصد قیر و نوع قیر، از روند نزولی با افزایش دما پیروی می کند. همچنین با نگاه به هر دو منحنی سنگدانه ۱ و ۲ می توان دید که روند نزولی کرنش نهایی نمونه ها

اولیه است). با دقت در نمودار مقایسه نوع قیر، فاصله دو منحنی قیر ۸۵/۱۰۰ و ۶۰/۷۰ این موضوع را اثبات می کند و نتایج حاصل شده، به همان صورتی است که انتظار می رود. البته با توجه به متفاوت بودن نوع دانه بندی، مشخصات حجمی مخلوط های بتن آسفالتی تهیه شده نیز متفاوت است. بنابراین یکی از دلایلی که نمی توان به راحتی سنگدانه ها را مقایسه کرد، تغییر درصد قیر بکار رفته در آنهاست. با این وجود در نتایج دانه بندی، انتظار بر این است که دانه بندی شماره ۱ کرنشهای کمتری داشته باشد، اما با دقت در کرنش اولیه مشاهده می شود که منحنیهای دو سنگدانه ۱ و ۲ در نقاطی دارای تلاقی هستند؛ هر چند از روند افزایشی با افزایش دما تبعیت می کنند. همچنین می توان گفت که با توجه به نزدیک بودن دانه بندی های شماره ۱ و ۲، پارامتر کرنش اولیه نسبت به این تغییر اندازه سنگدانه، حساس نیست.



شکل ۳. نمودارهای مقایسه های کرنش - دما بر حسب پارامتر کرنش اولیه برای ۳ پارامتر مختلف (درصد قیر، نوع قیر و اندازه سنگدانه)



شکل ۴. نمودارهای مقایسه های کرنش - دما بر حسب پارامتر کرنش نهایی برای ۳ پارامتر مختلف (درصد قیر، نوع قیر و اندازه سنگدانه)



## بررسی اثر مشخصات مخلوط بتن آسفالتی بر شیارافتادگی با استفاده از آزمایش خزش استاتیکی

۶۰/۷۰ در دمای ۴۰ درجه اتفاق افتاده است. در صورتی که انتظار می‌رفت بیشترین و کمترین کرنش، به ترتیب در دماهای ۲۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد رخ دهد، یا در مقایسه سنگدانه‌ها با یکدیگر، می‌توان دید در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه، سنگدانه شماره ۱ کرنش کلی بیشتری نسبت به کرنش کلی سنگدانه شماره ۲ دارد. این در حالی است که در دمای ۶۰ درجه، کرنش کلی سنگدانه شماره ۲ بیشتر از کرنش کلی سنگدانه شماره ۱ است. در نتیجه، همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز بیان شد، بر اساس نتایج این تحقیق پارامتر کرنش کلی از نظم و قاعده خاصی پیروی نمی‌کند.

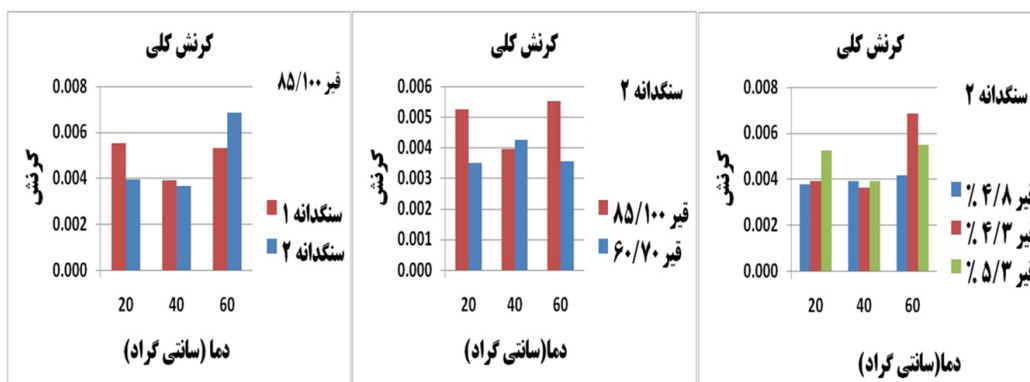
### ۴-۴ کرنش بازگشت پذیر

شکل (۶)، کرنش بازگشت پذیر را برای ۳ پارامتر درصد قیر، نوع قیر و نوع دانه‌بندی، به ترتیب از راست به چپ، برای آزمایش خزش استاتیکی نشان می‌دهد. در نگاه اول، چنین به نظر می‌رسد

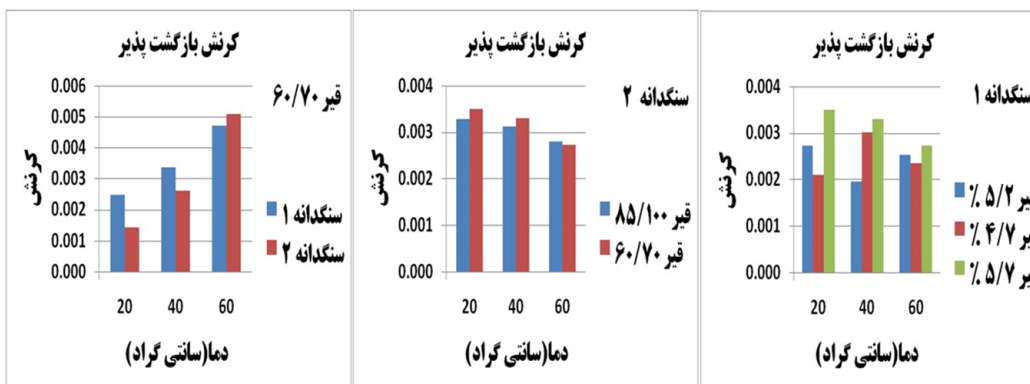
بسیار نزدیک به هم هستند. هرچند که دانه‌بندی شماره ۱ دارای کرنش نهایی بیشتری نسبت به دانه‌بندی شماره ۲ است. این شیب معکوس در نمودارهای حاصل از تحقیق زاوادمسکی [Zawadzki, 1997] نیز مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تطابق نتایج است.

### ۳-۴ کرنش کلی

شکل (۵)، کرنش کلی را برای ۳ پارامتر درصد قیر، نوع قیر و نوع دانه‌بندی، به ترتیب از راست به چپ، برای آزمایش خزش استاتیکی نشان می‌دهد. درمقایسه کرنش کلی در همان ابتدا می‌توان دید که نمونه‌ها از نظم و قاعده خاصی پیروی نمی‌کنند. با توجه به نمودارها، می‌توان دید که با افزایش دما، کرنش کلی گاهی افزایش و گاهی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، کمترین کرنش کلی نمونه‌های ساخته شده با قیر ۸۵/۱۰۰ در دمای ۴۰ درجه مشاهده می‌شود. در حالی که بیشترین کرنش کلی نمونه ساخته شده با قیر



شکل ۵. نمودارهای مقایسه‌ای کرنش - دما بر حسب پارامتر کرنش کلی برای ۳ پارامتر مختلف (درصد قیر، نوع قیر و اندازه سنگدانه)



شکل ۶. نمودارهای مقایسه‌ای کرنش - دما بر حسب پارامتر کرنش کلی برای ۳ پارامتر مختلف (درصد قیر، نوع قیر و اندازه سنگدانه)

## ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق سعی بر آن شد تا رفتار خزشی مخلوط‌های بتن آسفالتی به روش اعمال بار استاتیکی و اندازه‌گیری تغییر شکل ایجاد شده با استفاده از دستگاه تحکیم خاک که دستگاهی ساده و ارزان بوده و در اکثر آزمایشگاهها موجود است، بررسی شود. از این رو، کرنش حاصل از این پژوهش، به ۴ دسته تقسیم شد. به طور کلی می‌توان نتایج حاصل از این تحقیق را چنین بیان کرد:

- \* کرنش اولیه به دست آمده از آزمایش خزش انجام شده توسط دستگاه تحکیم خاک، مطابق انتظار است. یعنی به طور کلی با افزایش دما در هر ۳ نمودار مقایسه درصد قیر، نوع قیر و اندازه سنگدانه، کرنش اولیه نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان به نتایج کرنش اولیه حاصل از آزمایش خزش استاتیکی انجام شده با دستگاه تحکیم خاک اعتماد کرد.

- \* با افزایش دما، برای هر ۳ نمودار مقایسه درصد قیر، نوع قیر و اندازه سنگدانه، کرنش نهایی دارای شیبی منفی است. نتایج کرنش نهایی نیز با نتایج و نمودارهای حاصل از تحقیق زاوادمسکی مطابقت دارد [Zawadzki, 1997].

- \* کرنش کلی از روند خاصی پیروی نمی‌کند. با دقت در نمودارهای مقایسه درصد قیر، نوع قیر و اندازه سنگدانه این بی‌نظمی را می‌توان دید.

پس می‌توان گفت که کرنش کلی به دست آمده از آزمایش خزش استاتیکی با دستگاه تحکیم، دارای روندی نیست که بتوان بر آن تکیه کرد.

- \* کرنش بازگشت‌پذیر از روند خاصی پیروی نمی‌کند. طبق تعریف کرنش بازگشت‌پذیر، به کرنش کلی وابسته است. با توجه به اینکه نتایج حاصل از کرنش کلی نیز قابل اعتماد نیستند، می‌توان دلیل این بی‌نظمی را توجیه کرد. بنابراین نمی‌توان از کرنش بازگشت‌پذیر در تحلیل نتایج آزمایش خزش استاتیکی با دستگاه تحکیم خاک استفاده کرد.

که کرنش بازگشت‌پذیر دارای نظم و قاعده است، در صورتی‌که با مقایسه نمودارها ملاحظه می‌شود که کرنش بازگشت‌پذیر گاهی افزایش و گاهی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با مقایسه اندازه سنگدانه، مشاهده می‌شود که کرنش بازگشت‌پذیر با افزایش دما، افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، با مقایسه نوع قیر، می‌توان دید که با افزایش دما کرنش بازگشت‌پذیر کاهش می‌یابد. به علاوه این روند بی‌نظم در مقایسه درصد قیر کامل می‌شود؛ زیرا که دارای یک روند نوسانی است. با دقت بیشتر در نمودار مقایسه سنگدانه، می‌توان دید که سنگدانه شماره ۱ در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه، کرنش بازگشت‌پذیر بیشتری نسبت به سنگدانه شماره ۲ دارد. در صورتی که در دمای ۶۰ درجه عکس این نتیجه حاصل شده است. یا در نمودار مقایسه قیرها، قیر ۶۰/۷۰ در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه کرنش بازگشت‌پذیر بیشتری نسبت به قیر ۸۵/۱۰۰ دارد. ولی این روند در دمای ۶۰ درجه دنبال نمی‌شود. این بی‌نظمی‌ها در نمودار مقایسه درصد قیر نیز پیداست. جایی که درصد قیر ۵/۲٪ در دمای ۴۰ درجه کمترین کرنش کلی را به خود اختصاص داده است. در حالی که در دو دمای دیگر، کمترین کرنش کلی مربوط به درصد قیر ۴/۷٪ است. از این رو با توجه به شکل، می‌توان گفت که کرنش بازگشت‌پذیر نیز همانند کرنش کلی از روند و نظم خاصی پیروی نمی‌کند. یکی از دلایلی که می‌توان این بی‌نظمی را با آن توجیه کرد، وابستگی کرنش بازگشت‌پذیر به کرنش کلی است. با توجه به تعریف کرنش بازگشت‌پذیر، تفاضل مقدار کرنش از شروع باربرداری تا اساعت از شروع باربرداری از مقدار کرنش کلی حاصل شده در انتهای یک ساعت بارگذاری، به دست می‌آید که این خود نشان دهنده وابستگی کرنش بازگشت‌پذیر به کرنش کلی است.

بنابراین، با توجه به اینکه کرنش کلی از نظم و قاعده خاصی پیروی نمی‌کند، قابل پیش‌بینی بود که کرنش بازگشت‌پذیر نیز از اینچنین روند بی‌نظمی تبعیت کند.

- Collop, A. C. and Khanzada, S. (1999) "Permanent deformation behavior of idealized bituminous mixtures", Proc. 3rd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Established Composites, Leeds UK, pp. 47-58.

- Hadipour, K. and Anderson, K. O. (1988) "An evaluation of permanent deformation and low temperature characteristics of some recycled asphalt concrete mixtures", J. of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 57, pp. 615-645.

- Hills, J. F. (1973) "The creep of asphalt mixes", Journal of the Institute of Petroleum, Vol. 59, pp. 247-262.

- Khan, K. M. and Kamal, M. A. (2012) "Rutting based evaluation of asphalt mixes", Pak. J. Engg. & Appl. Sci. Vol. 11, pp. 60-65.

- Miljković, M. and Radenberg, M. (2011) "Rutting mechanism and advanced laboratory testing of asphalt mixtures resistance against permanent deformation", Architecture and Civil Engineering Vol. 9, pp. 407 – 417.

- Monismith, C. L. and Tayebali, A. A. (1988) "Permanent deformation (rutting) considerations in as-

\* با توجه به نتایج حاصل از دستگاه تحکیم خاک، این دستگاه قابلیت استفاده برای انجام آزمایش خزش استاتیکی و بررسی خصوصیات شیارشدگی مخلوط بتن آسفالتی را دارد.

\* با توجه به تعداد تکرار آزمایش و تطبیق با نتایج به دست آمده با نتایج زاوادیسی، می توان به نتایج اعتماد کرد. برای اطمینان بیشتر و همچنین برای یافتن ارتباط واقعی با شیار شدگی، پیشنهاد می شود نتایج با نتایج آزمایش ویل تراک مقایسه شود.

## ۶. مراجع

- کاظمی، بابک (۱۳۹۱) "بررسی آزمایشگاهی عملکرد بتن آسفالتی گرم مسلح شده با الیاف پلی استر و اکریلیک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد، واحد زنجان.

- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (۱۳۹۰) «آیین نامه روسازی راههای ایران (نشریه ۲۳۴)»، تجدید نظر اول، تهران.

- British Standard Inst. (1995) "BS 598: Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas", part III, "Method for determination of resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined uniaxial loading", England: BSI.

- Brown, E. R. and Foo, K. Y. (1994) "Comparison of unconfined and confined creep tests for hot mix asphalt", Journal of Materials in Civil Engineering 6(2), pp. 307-326.

- Huang, Y. H. (2010) "Pavement analysis and design", USA: Pearson Education, pp. 316-320.

- Zawadzki, J (1997) "Adaptation of a creep test for evaluation of the permanent deformation of bituminous mixes", Mechanical Tests for Bituminous Materials, Rilem.

#### ۷. پی نوشتها

1-Slow repeated creep test

2-Initial Strain

3-Final Strain

4-Total Strain

5-Reversible Strain

phalt concrete pavement sections", J. of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 57, p 414.

- Mousa, G. K. (2003) "Effect of addition of short fibers of poly-acrylic and polyamide to asphalt mixtures", Alexandria Engineering Journal, Vol. 3, pp. 329-336.

- Rowe, G. M. and Cooper, K. E. (1988) "A practical approach to evaluation of bituminous mix properties for the structural design of asphalt pavements", J. of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 57.

- Kumar, S. A and Veeraragavan, A. (2011) "Dynamic mechanical characterization of asphalt concrete mixes with modified asphalt binders", Materials Science and Engineering A 528, pp. 6445– 6454.

- Taherkhani, H. (2006) "Experimental characterization of the compressive permanent deformation behaviour in asphalt mixtures", Department of Civil Engineering, University of Nottingham, UK. pp. 37-44.

- Van de Loo, P. J.(1974) "Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability", J. of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43, pp. 253-285.