

تعیین عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی در کرنشهای کم با استفاده از آزمایش تیر خمشی با فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز

علیرضا خاوندی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

محمود عامری، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: akhavandi@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۱۵

چکیده:

برای جلوگیری از خرابی ناشی از خستگی در روسازیهای با عمر طولانی، یافتن سطح کرنش کششی که مخلوط آسفالتی بتواند در آن سطح، تعداد بارگذاری بی‌نهایتی را تحمل کند (حد تحمل)، بسیار اهمیت دارد. اغلب پژوهشگران برای تعیین حد تحمل مخلوطهای آسفالتی از آزمایش تیر خمشی در کرنشهای کمتر از ۲۵۰ میکرواسترین استفاده کردند، ولی در انجام آزمایش، با افزایش مدت زمان آزمایش و پدیده خود ترمیمی مواجه شدند که باعث سختی فرآیند تعیین حد تحمل می‌شود. در این پژوهش برای کاهش مدت زمان آزمایش و کاهش اثر پدید خود ترمیمی، پیشنهاد انجام آزمایش تیر خمشی در فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز به جای ۱۰ هرتز داده شد. برای تعیین عمر خستگی در فرکانس ۱۰ هرتز بر حسب نتایج فرکانس ۲۵ هرتز نیز با انجام آزمایش در سطوح کرنش مختلف، دو رابطه برای محدوده کرنشهای معمول (بیشتر از ۲۵۰ میکرواسترین) و کرنشهای کم (کمتر از ۲۵۰ میکرواسترین) ارائه شد. این روابط نشان داد که ارتباط منطقی بین عمرهای خستگی حاصل از فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز و ۲۵ هرتز وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: خستگی، تیر خمشی، کرنش کم، خود ترمیمی، فرکانس بارگذاری

۱. مقدمه

حد تحمل به حداکثر کرنش یا تنش اطلاق می‌شود که مصالح می‌توانند در آن حد، تعداد بی‌نهایت سیکل بارگذاری- باربرداری را تحمل کنند. آگاهی از مقدار حد تحمل مخلوطهای آسفالتی باعث می‌شود تا ضخامت لایه آسفالتی روسازی راه و فرودگاه بیش طراحی نشود [Carpenter, Ghuzlan and Shen, 2003]. مدت زمانی طولانی است که وجود حد تحمل در مواد ثابت شده است. مفهوم حد تحمل ابتدا بوسیله Wohler برای مواد فلزی بیان شد [Shen and Carpenter, 2005]. مطالعات Monismith نشان داد که نمودارهای خستگی مخلوطهای آسفالتی مختلف در سطح کرنش برابر با ۷۰ میکرواسترین همگرا می‌شوند و با افزایش عمر خستگی (تعداد تکرار بار) مقدار کرنش ثابت می‌ماند [Monismith, 1972]. Carpenter و همکارانش بر اساس نتایج آزمایشهای خستگی در سطوح کرنش مختلف، مشاهده کردند که در تعداد تکرار بار بیشتر از ۱۱ میلیون، در رفتار مخلوطهای آسفالتی تفاوت آشکاری رخ می‌دهد و روند افزایش عمر خستگی بیشتر می‌شود

[Shen and Carpenter, 2005]. Prowell و همکارانش نشان دادند که یک روسازی با عمر بالا در طول دوره بهره‌برداری (۴۰ سال) حداکثر ۵۰۰ میلیون تکرار بار را تحمل می‌کند. این تعداد بار با در نظر گرفتن ضریب انتقال برابر با ۱۰ (بین نتایج میدانی و آزمایشگاهی در صورت وجود ۱۰ درصد ترک در مسیر عبور چرخ - حاصل از تحقیقات SHRP) معادل با ۵۰ میلیون تعداد تکرار بار در آزمایشگاه است. با این استدلال، حد تحمل را برابر با کرنشی تعریف کردند که نمونه در آن سطح کرنش بتواند ۵۰ میلیون تکرار بار را تحمل کند [Prowell and Brown, 2006]. AUSTROAD در گزارشی ارتباط مقادیر حد تحمل با طرح ضخامت روسازی را ارزیابی کرد [Austroad, 2009]. در سال ۲۰۱۰، نتایج حاصل از بررسی انواع روشهای مختلف برای تعیین

حد تحمل در گزارش NCHRP-۶۴۶ منتشر شد

افزایش ترافیک و نیز افزایش هزینه‌های نگهداری روسازیهای آسفالتی در راه و فرودگاه، پژوهشگران را بر آن داشت تا یک نوع روسازی طراحی کنند که بتواند دوره بهره‌برداری طولانی‌تری، با قابلیت خدمت دهی مناسب و بدون نیاز به نگهداری سازه‌های داشته باشد. در این راستا برای اولین بار آزمایشگاه تحقیقات حمل و نقل^۱ (TRL)، نوعی روسازی آسفالتی با عنوان روسازی‌های ماندگار^۲ یا روسازیهای با عمر طولانی^۳ معرفی کرد. این ایده در چند سال اخیر در نواحی مختلف دنیا مانند ایالت کالیفرنیا در آمریکا اجرا و بررسی شده است [Newcomb, Buncher and Huddleston, 2001].

این نوع روسازیها به روسازیهای آسفالتی اطلاق می‌شود که دارای عمر ۴۰ سال باشند. این روسازیها معمولاً دارای سه لایه آسفالتی هستند. لایه رویه و لایه میانی باید دارای مقاومت شیارافتادگی بالا و لایه زیرین دارای مقاومت خستگی کافی باشد تا در دوره بهره‌برداری هیچگونه خرابی در آنها مشاهده نشود [Newcomb, Buncher and Huddleston, 2001]. با توجه به این ویژگیها و میزان ترافیک عبوری از روی آنها در دوره بهره‌برداری، ضخامت این نوع روسازیها بیشتر از روسازیهای متداول است. در نتیجه طراحان روسازی به دنبال یافتن ضخامت بهینه‌ای هستند که هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده و هم بتواند در طول عمر بهره‌برداری بدون نیاز به ترمیم، قابلیت خدمت دهی مناسب را داشته باشد. برای جلوگیری از خرابی ناشی از خستگی در لایه زیرین این نوع روسازیها، یافتن سطح کرنش کششی که مخلوط آسفالتی بتواند در آن سطح، تعداد بارگذاری بی‌نهایتی را تحمل کند، بسیار اهمیت دارد. زیرا در این سطح از کرنش نیاز به افزایش ضخامت لایه آسفالتی نیست [Prowell and Brown, 2006]. این سطح کرنش را حد تحمل می‌نامند [Carpenter, Ghuzlan and Shen, 2003].

تعیین عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی در کرنشهای کم با استفاده از آزمایش تیر خمشی با فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز

که بررسی حد تحمل بر روی نمونه‌های مختلف با توجه به مدت زمان آزمایش و نیز محدودیت تعداد دستگاههای آزمایش بسیار مشکل است. به طور کلی این مشکل یکی از مهم ترین دلایل برای محدود بودن تعداد مطالعات انجام شده در این زمینه نیز هست.

* عدم امکان تعیین رابطه کاهش سختی در کرنشهای کم در برخی نمونه‌ها به دلیل پدیده خودترمیمی و ثابت ماندن انرژی تلف شده [Pais et al., 2009]

خودترمیمی پدیده‌ای است که علیرغم اثبات و پذیرش آن در مخلوطهای آسفالتی، هنوز علل آن به طور کامل مشخص نشده و نیاز به تحقیق بیشتری دارد.

پتانسیل خود ترمیمی به این شکل تعریف شده است [Carpenter and Shen, 2006]

$$H=SE-DE \quad (1)$$

که

H = پتانسیل خودترمیمی^۵

SE = انرژی سطح^۶

DE = انرژی تلف شده

اگر انرژی سطح کمتر از انرژی تلف شده باشد، آنگاه پتانسیل خود ترمیمی منفی خواهد شد و بنابراین مصالح میل به افزایش انرژی سطح با ایجاد سطح بیشتر خواهند داشت. این حالت در واقع فرآیند شروع و گسترش ترک (خرابی) است [Shen and Carpenter, 2007]. معمولاً انرژی سطح برای مصالح ثابت است و انرژی تلف شده علاوه بر مشخصات مواد به شرایط بارگذاری نیز بستگی دارد.

اگر انرژی تلف شده در اثر بارگذاری افزایش یابد، پتانسیل خودترمیمی کاهش می‌یابد و بالعکس [Shen and Carpenter, 2007]. در آزمایش خستگی با کاهش سطح کرنش، مقدار انرژی تلف شده، کاهش و پتانسیل خودترمیمی افزایش می‌یابد. این

[NCHRP, 2010]. در سال ۲۰۱۳، Zeiada و همکارانش با تأیید وجود حد تحمل در مخلوطهای آسفالتی، تأثیر پدیده خودترمیمی بر مقدار آن و نیز نحوه در نظر گرفتن مقدار حد تحمل در طراحی روسازیهای با عمر طولانی را بررسی کردند [Zeiada et al, 2013].

در تمامی مطالعات بررسی شده، برای تعیین حد تحمل، آزمایش خستگی در کرنشهای کم انجام شده است. مهم‌ترین آزمایش استفاده شده در این تحقیقات، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای است که بر اساس استاندارد AASHTO T321 در دمای ۲۰ درجه و بارگذاری دینامیکی با فرکانس ۱۰ هرتز انجام می‌شود. این آزمایش برای روسازیهای متداول معمولاً در دامنه کرنش ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ میکرواسترین که دامنه کرنش نرمال نامیده می‌شوند، انجام می‌شود. معیار خستگی در این آزمایش کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰ درصد است که تعداد تکرار بار متناظر با این نقطه را عمر خستگی می‌گویند [AASHTO, 2007]. اغلب پژوهشگران برای تعیین حد تحمل مخلوطهای آسفالتی از این آزمایش در کرنشهای کم (کمتر از ۲۵۰ میکرواسترین) استفاده کردند، ولی در انجام آزمایش در این سطوح کرنش به ویژه کرنشهای نزدیک به حد تحمل با مشکلات ذیل مواجه شدند:

* نیاز به زمان بیشتر برای انجام آزمایش در سطح کرنش کم

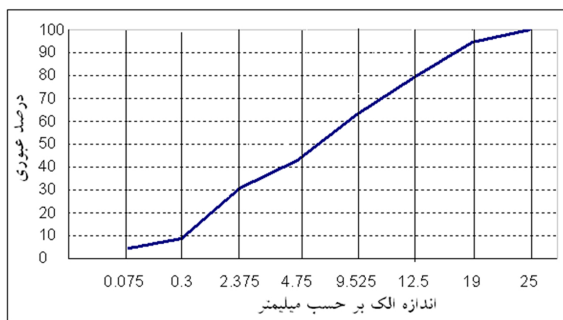
برای تعیین مستقیم عمر خستگی از طریق انجام آزمایش به مدت زمان طولانی نیاز است [NCHRP, 2010]. به عنوان مثال برای رسیدن به تعداد تکرار بار ۵۰ میلیون با فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز، تقریباً ۵۸ روز نیاز است

[Prowell and Brown, 2006]. Shen و همکاران وی برای تعیین دقیق عمر خستگی با استفاده از روشهای برون‌یابی پیشنهاد کردند تا آزمایش خستگی حداقل تا ۸ میلیون تکرار بار انجام شود. برای این تعداد تکرار بار، زمانی برابر با ۱۰ روز مورد نیاز است [Shen and Carpenter, 2005]. این موضوع نشان می‌دهد

ضخامت ۵ سانتیمتر در ابعاد 40×30 سانتیمتر با استفاده از غلطک مالشی تهیه و سپس با برش این دال نمونه‌هایی با ابعاد $38 \times 6 \times 5/5$ سانتیمتر مطابق با استاندارد AASHTO T321 به دست آمد. از هر دال متراکم شده، ۴ نمونه آزمایشگاهی تهیه شد.

۲-۲ روش آزمایش

برای انجام آزمایش خستگی از دستگاه خمش چهار نقطه‌ای ساخت شرکت IPC استفاده شد. کلیه آزمایشها مطابق با استاندارد AASHTO T321 در فرکانس ۱۰ Hz در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد با بارگذاری نیمه‌سینوسی و در سطوح کرنشهای ۷۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۴۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرواسترین انجام شد. البته علاوه بر فرکانس ۱۰ هرتز، از فرکانس ۲۵ هرتز نیز در این تحقیق استفاده شد.



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های مخلوط آسفالتی

نام نمونه	نوع قیر (درجه نفوذ)	درصد فضای خالی (Va)	درصد وزنی قیر (Wb)
۱	۶۰-۷۰	۵/۱	۴/۳
۲	۶۰-۷۰	۴	۴/۸

۳. نتایج و تحلیل آن

۳-۱ تحلیل روند کاهش سختی و انرژی تلف شده

تعداد تکرار بار وارده به نمونه‌ها در حین انجام آزمایش و سختی اولیه به عنوان خروجیهای نرم افزار برای نمونه‌های ۱ و ۲ در سطوح کرنش مختلف در جدول ۲ آورده شده است. همان گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود سختی اولیه برای هر دو نمونه

موضوع باعث افزایش زمان آزمایش، کند شدن روند کاهش سختی (انرژی تلف شده) و یا حتی عدم کاهش سختی (انرژی تلف شده) و در نتیجه مشکل شدن برون‌یابی می‌شود. بر همین اساس در برخی مراجع اجازه داده شده که بخش ثابت یا افزایش یافته‌ی منحنی انرژی تلف شده - تعداد تکرار بار حذف شود تا بتوان برای باقیمانده منحنی، یک رابطه کاهشی با ضریب همبستگی مناسب برازش کرد [NCHRP, 2010].

بررسی‌ها نشان می‌دهند یکی از مهم‌ترین پارامترها در افزایش یا کاهش پدیده خود ترمیمی به ترتیب دوره استراحت در بارگذاری یا افزایش فرکانس بارگذاری است [Zeida et al, 2013]. بنابراین در این پژوهش سعی شد تا با افزایش فرکانس بارگذاری هم مدت زمان آزمایش کاهش و هم اثر پدیده خود ترمیمی حذف شود تا برون‌یابی با دقت مناسب انجام شود. در این پژوهش، آزمایشهایی با فرکانس ۲۵ هرتز (حداکثر فرکانس قابل تنظیم در دستگاه تیر خمشی) انجام و رابطه‌ای بین فرکانس بارگذاری متداول (۱۰ هرتز) تعیین شد تا علاوه بر مسأله خود ترمیمی، زمان آزمایش نیز کاهش پیدا کند.

۲. تجربیات آزمایشگاهی

۲-۱ مشخصات مصالح و نمونه‌های آسفالتی

در این پژوهش، مصالح سنگی شکسته مورد استفاده برای تمامی نمونه‌ها، از جنس آهک بود که دانه‌بندی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است. در تهیه نمونه‌ها از قیر ۶۰-۷۰ پالایشگاه تهران استفاده شد.

درصد قیر بهینه برای طرح مخلوطهای آسفالتی منطبق بر روش مارشال (ASTM D1559) بود. نمونه‌های آزمایشگاهی در درصد قیر بهینه و نیم درصد بالای درصد قیر بهینه تهیه شدند. در جدول ۱ مشخصات نمونه‌های آسفالتی آورده شده است.

برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، ابتدا یک دال آسفالتی به

تعیین عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی در کرنشهای کم با استفاده از آزمایش تیر خمشی با فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز

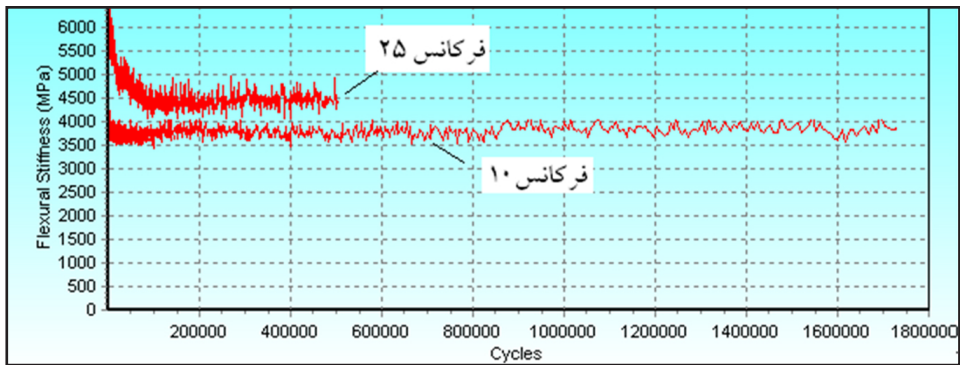
با تغییر سطح کرنش آزمایش، تغییر می‌کند. این تغییر می‌تواند ناشی از وابستگی به شرایط بارگذاری باشد. بررسی نمودارهای سختی-تعداد تکرار بار برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش نیز نشان می‌دهد که نرخ کاهش سختی در بارگذاری با فرکانس ۲۵ هرتز از فرکانس ۱۰ هرتز بیشتر است. به عنوان مثال نمودار کاهش سختی در کرنش ۷۰ میکرواسترین برای نمونه‌های ۱ و ۲ در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، مقدار سختی در نمونه ۲ در کرنش ۷۰ برای فرکانس ۱۰ هرتز در تعداد تکرار بارگذاری انجام شده در آزمایش، در ابتدا افزایش جزئی و سپس ثابت می‌ماند که این موضوع باعث عدم امکان تعیین عمر خستگی بر اساس برونیابی در این مرحله از بارگذاری می‌شود و حتی قسمتی که افزایش یافته، باید حذف شود. در حالی که در فرکانس ۲۵ هرتز، با افزایش تعداد تکرار

بار، سختی کاهش می‌یابد.

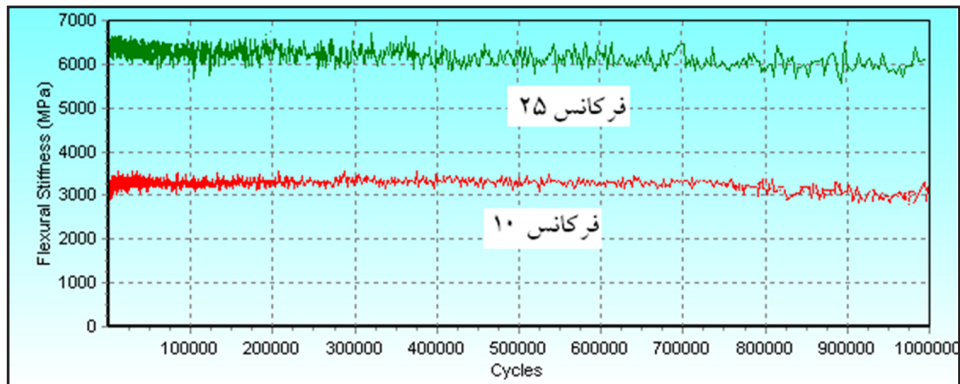
بررسی نمودارهای انرژی تلف شده بر حسب تکرار بار نشان می‌دهد که افزایش فرکانس بارگذاری در انرژی تلف شده نیز تأثیر دارد. شکل‌های ۴ و ۵، روند کاهش انرژی تلف شده برای نمونه‌های ۱ و ۲ در کرنش ۷۰ میکرواسترین را در فرکانس بارگذاری ۱۰ و ۲۵ هرتز نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در هر سیکل بارگذاری، مقدار انرژی تلف شده در فرکانس ۲۵ هرتز بیشتر از فرکانس ۱۰ هرتز است. در هیچ یک از نمونه‌های ۱ و ۲ آزمایش شده در فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز در کرنشهای کم، اثر خود ترمیمی مشاهده نشد. به عبارت دیگر هیچ گونه عدم تغییر یا افزایش در منحنی‌های سختی-تکرار بار یا انرژی تلف شده-تکرار بار با افزایش تعداد تکرار بار مشاهده نشد.

جدول ۲. تعداد تکرار بار و سختی اولیه نمونه‌های آزمایش شده در فرکانس ۲۵ و ۱۰ هرتز

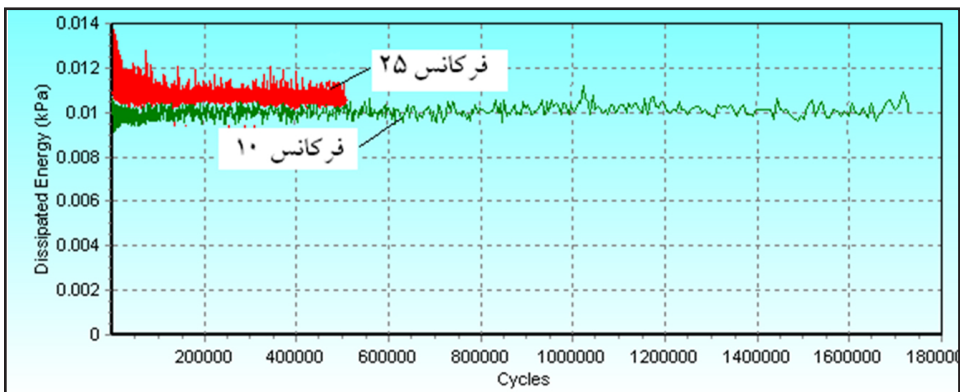
ردیف	نوع نمونه	کرنش (میکرواسترین)	فرکانس ۱۰ هرتز		فرکانس ۲۵ هرتز	
			سختی اولیه (Mpa)	تعداد تکرار بار در آزمایش	سختی اولیه (Mpa)	تعداد تکرار بار در آزمایش
۱	۱	۱۰۰۰	۲۲۷۲	۶۱۰۰۰	۴۶۰۳	۳۸۰۰
۲	۱	۷۰۰	۲۶۹۵	۲۹۷۰۰۰	۴۶۵۵	۱۲۵۰۰۰
۳	۱	۴۰۰	۳۵۵۱	۱۰۰۰۰۰۰	۴۷۸۹	۵۰۰۰۰۰
۴	۱	۲۵۰	۲۶۵۵	۱۰۰۰۰۰۰	۴۹۰۰	۵۰۰۰۰۰
۵	۱	۲۰۰	۲۷۱۰	۱۰۰۰۰۰۰	۵۲۵۷	۵۰۰۰۰۰
۶	۱	۷۰	۴۱۳۹	۱۷۳۰۰۰۰	۵۴۵۳	۵۰۰۰۰۰
۷	۲	۱۰۰۰	۱۸۳۸	۷۰۸۸۰	۴۷۲۹	۴۲۹۰
۸	۲	۷۰۰	۲۳۸۶	۳۳۸۰۰۰	۴۸۹۰	۱۹۸۰۰۰
۹	۲	۴۰۰	۳۰۷۶	۸۹۹۰۰۰	۵۰۴۸	۱۰۰۰۰۰۰
۱۰	۲	۲۵۰	۲۴۸۹	۱۰۰۰۰۰۰	۶۳۰۰	۱۰۰۰۰۰۰
۱۱	۲	۲۰۰	۲۶۱۹	۱۰۰۰۰۰۰	۶۳۱۲	۱۰۰۰۰۰۰
۱۲	۲	۷۰	۳۰۰۹	۱۰۰۰۰۰۰	۶۲۳۳	۱۰۰۰۰۰۰



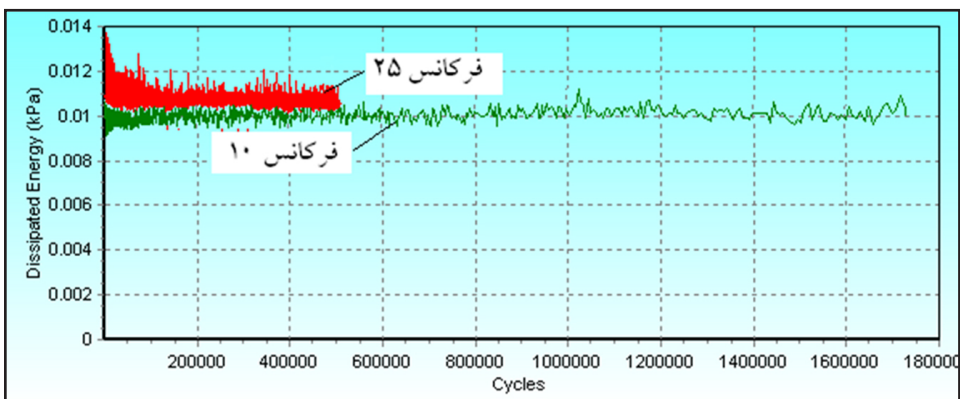
شکل ۲. نمودار کاهش سختی نمونه ۱ در فرکانسهای ۱۰ و ۲۵ هرتز در کرنش ۷۰ میکرواسترین



شکل ۳. نمودار کاهش سختی نمونه ۲ در فرکانسهای ۱۰ و ۲۵ هرتز در کرنش ۷۰ میکرواسترین



شکل ۴. نمودار انرژی تلف شده نمونه ۱ در فرکانسهای ۱۰ و ۲۵ هرتز در کرنش ۷۰ میکرواسترین



شکل ۵. نمودار انرژی تلف شده نمونه ۲ در فرکانسهای ۱۰ و ۲۵ هرتز در کرنش ۷۰ میکرواسترین

تعیین عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی در کرنشهای کم با استفاده از آزمایش تیر خمشی با فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز

نتایج نشان می‌دهند که افزایش فرکانس مشکلات را حل می‌کند، ولی مقدار حد تحمل در این فرکانس‌ها با یکدیگر متفاوت است، از طرفی بر اساس استانداردهای موجود نتایج باید در فرکانس ۱۰ هرتز تعیین شود، بنابراین رابطه‌ای بین عمر خستگی در فرکانس ۲۵ هرتز با عمر خستگی در فرکانس ۱۰ هرتز تعیین شد. برای تعیین رابطه از نتایج نمونه ۲ و برای اعتبارسنجی از نتایج نمونه ۱ استفاده شد. برای افزایش دقت روابط، روابط پیشنهادی برای دو سطح کرنش بیشتر از ۲۵۰ میکرواسترین (کرنش نرمال) و برابر و کمتر از آن ارایه شدند. روابط ۲ و ۳، با استفاده از رگرسیون بین نتایج نمونه ۲ در فرکانس‌های ۱۰ و ۲۵ هرتز در دو سطح کرنش بیشتر از ۲۵۰ میکرواسترین و کمتر از آن، به دست آمده است.

کرنش بیشتر از ۲۵۰ میکرواسترین:

$$N_{F_{10}} = 48.18(N_{F_{25}})^{0.778} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.89$$

کرنش برابر یا کمتر از ۲۵۰ میکرواسترین:

$$N_{F_{10}} = 2E - 6(N_{F_{25}})^{1.831} \quad (3)$$

$$R^2 = 0.92$$

شکل ۷، نحوه تعیین روابط (۲) و (۳) را نشان می‌دهد.

مورد دیگری که در این آزمایشها مشاهده شد، تغییر مقدار سختی اولیه نمونه‌ها در فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز بود. در این فرکانس، سختی اولیه تمامی نمونه‌ها افزایش یافت. البته هیچ رابطه منطقی و ریاضی بین این افزایش سختیها مشاهده نشد. شکل ۶ ارتباط بین سختی اولیه نمونه‌های ۱ و ۲ را در فرکانس‌های ۱۰ و ۲۵ هرتز نشان می‌دهد. پایین بودن ضریب رگرسیون نشان‌دهنده عدم همبستگی نتایج است.

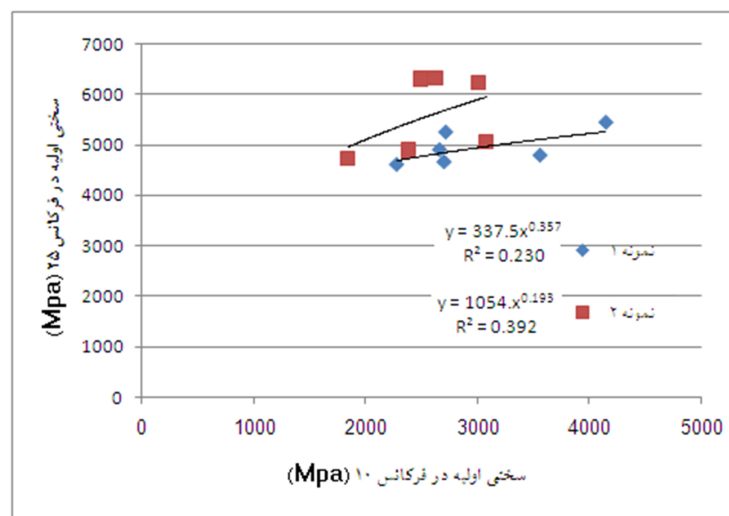
۲-۳ عمر خستگی

عمر خستگی نمونه‌ها در فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز همانند فرکانس ۱۰ هرتز بر اساس معیار کاهش سختی به میزان ۵۰ درصد و به طور مستقیم یا با برون‌یابی به روش لگاریتمی تعیین شد. عمر خستگی نمونه‌ها در فرکانس‌های ۲۵ و ۱۰ هرتز در جدول ۳ آورده شده است.

۱-۲-۳ رابطه بین عمر خستگی در فرکانس بارگذاری ۲۵

هرتز و ۱۰ هرتز

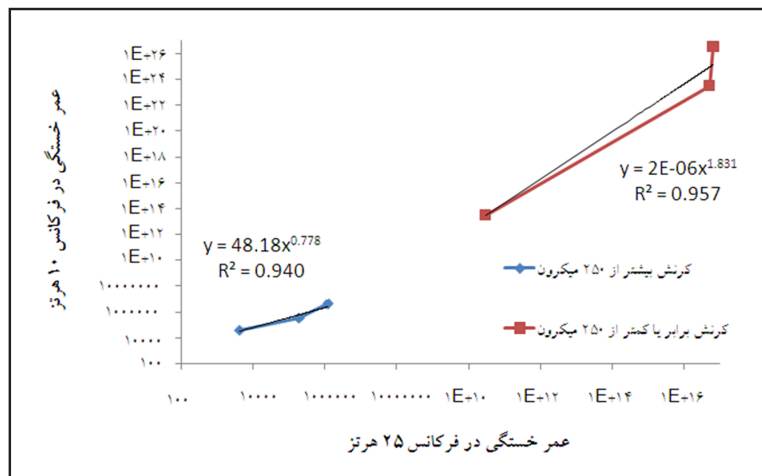
عمرهای خستگی حاصل از آزمایشها نشان می‌دهند که با افزایش فرکانس بارگذاری، عمر خستگی و زمان انجام آزمایشها کاهش یافته است.



شکل ۶. ارتباط بین سختی اولیه در فرکانس ۱۰ هرتز با ۲۵ هرتز

جدول ۳. عمر خستگی نمونه‌ها در فرکانس‌های بارگذاری ۱۰ و ۲۵ هرتز

ردیف	نوع نمونه	کرنش (میکرو)	عمر خستگی بر مبنای کاهش سختی به میزان ۵۰ درصد	
			فرکانس ۱۰ هرتز	فرکانس ۲۵ هرتز
۱	۱	۱۰۰۰	۱۲۹۰۰	۳۸۰۰
۲	۱	۷۰۰	۲۹۷۰۰۰	۱۲۵۰۰۰
۳	۱	۴۰۰	۳۱۰۰۰۰۰	۸۷۰۰۰۰۰
۴	۱	۲۵۰	۹/۱۲E+۱۲	۱۱۱۰۰۰۰۰۰
۵	۱	۲۰۰	۹/۱۲E+۱۵	۹۰۸۰۰۰۰۰۰۰
۶	۱	۷۰	۱/۲۴E+۱۸	۱/۹E+۱۲
۷	۲	۱۰۰۰	۳۹۶۰۰	۴۲۹۰
۸	۲	۷۰۰	۳۳۸۰۰۰	۱۹۸۰۰۰
۹	۲	۴۰۰	۳۹۹۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰
۱۰	۲	۲۵۰	۳/۲۲E+۱۳	۳۰۰۰۰۰۰۰۰
۱۱	۲	۲۰۰	۳/۲۲E+۲۳	۵/۳E+۱۶
۱۲	۲	۷۰	۳/۲۲E+۲۶	۶/۶۷E+۱۶



شکل ۷. ارتباط بین عمر خستگی در فرکانس ۲۵ هرتز با فرکانس ۱۰ هرتز برای نمونه ۲

محاسبه شده در سطح اطمینان ۹۵٪ از آزمون زوجی t روی مقادیر باقیمانده (تفاضل مقادیر حاصل از آزمایش و محاسبه شده) استفاده شد. فرض صفر و فرض مقابل نیز بدین صورت تعریف شد:

فرض صفر: میانگین باقیمانده‌ها برابر صفر است: H_0

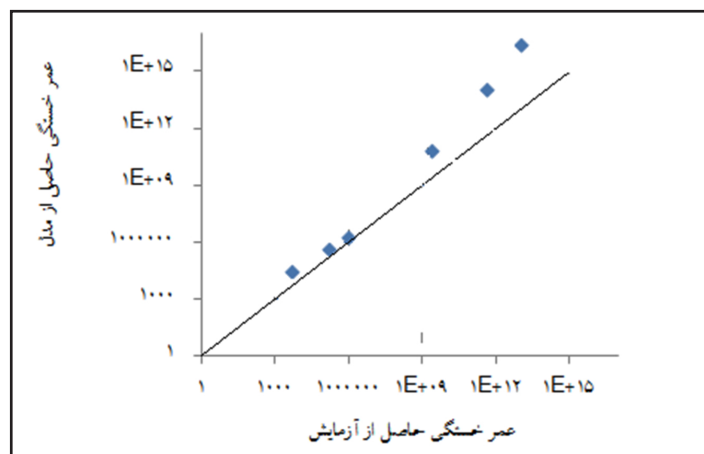
فرض مقابل: میانگین باقیمانده‌ها برابر صفر نیست: H_1

نتایج در جدول ۴ نشان می‌دهد که فرض صفر قابل قبول است. به عبارت دیگر میانگین مقادیر باقیمانده در سطح اطمینان ۹۵٪ برابر صفر است.

در این پژوهش برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی، از نتایج آزمایش خستگی که بر روی نمونه‌های آسفالتی شماره ۱ انجام شده بود، استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و روابط پیشنهادی برای نمونه ۱ در شکل ۸ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در نمونه ۱ نیز نتایج آزمایش خستگی با نتایج حاصل از مدل پیشنهادی در حد قابل قبولی به یکدیگر نزدیک هستند (نتایج آزمایش خستگی و نتایج حاصل از مدل پیشنهادی نزدیک به خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند).

برای اطمینان از تطابق مقادیر به دست آمده از آزمایش با مقادیر

تعیین عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی در کرنشهای کم با استفاده از آزمایش تیر خمشی با فرکانس بارگذاری ۲۵ هرتز



شکل ۸. مقایسه نتایج حاصل از روابط پیشنهادی و آزمایش برای نمونه ۱

جدول ۴. نتایج آزمون t

نتیجه	t بحرانی	t محاسبه شده	واریانس (s^2)	متوسط d	سطح معنی دار (α)	
قابل قبول	۴/۳۰۲۶۵۳	۱/۴۸۵۲۴۴	۳/۳۳E+۱۱	-۴۹۵۲۰۰	۰/۰۵	کرنش بیشتر یا برابر از ۲۵۰ میکرو
قابل قبول	۴/۳۰۲۶۵۳	۱/۰۰۵۷۳۸	۱/۲۲E+۳۳	-۲E+۱۶	۰/۰۵	کرنش کمتر از ۲۵۰ میکرو

بارگذاری با فرکانس ۲۵ هرتز بیشتر از بارگذاری با فرکانس ۱۰ هرتز است.

- روند تغییر عمر خستگی حاصل از بارگذاری با فرکانس ۲۵ هرتز با روند تغییر عمر خستگی حاصل از بارگذاری با فرکانس ۱۰ هرتز مطابقت دارد.

- امکان تعیین نسبتاً دقیق عمر خستگی در فرکانس ۱۰ هرتز بر اساس نتایج آزمایش تیر خمشی در فرکانس ۲۵ هرتز وجود دارد.
- هیچ رابطه منطقی بین سختی اولیه حاصل از بارگذاری ۲۵ هرتز با سختی اولیه حاصل از بارگذاری ۱۰ هرتز وجود ندارد.

۵. پی نوشتها:

- 1- Transportation Research Laboratory
- 2-Perpetual Pavement
- 3- Long Life
- 4- National Center for Asphalt Technology
- 5- Healing Potential
- 6- Surface Energy

این نتایج نشان می‌دهند که نتایج حاصل از آزمایش و رابطه با ضریب اطمینان بالایی با یکدیگر مطابقت دارند. به عبارت دیگر استفاده از نتایج آزمایش فرکانس ۲۵ هرتز برای تعیین عمر خستگی در فرکانس استاندارد (۱۰ هرتز) نسبت به روشهای برون یابی از دقت بیشتری برخوردار بوده و نیز مدت زمان آزمایش را هم کاهش می‌دهد.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش برای کاهش زمان آزمایش تیر خمشی در کرنشهای کم و نزدیک به حد تحمل و نیز حذف اثر پدیده خود ترمیمی برای تسریع و افزایش دقت در برونیابی، فرکانس بارگذاری از ۱۰ هرتز به ۲۵ هرتز افزایش داده شد. نتایج حاصل از این پژوهش عبارت است از:

- در آزمایش تیر خمشی نرخ کاهش سختی در بارگذاری فرکانس ۲۵ هرتز بیشتر از بارگذاری با فرکانس ۱۰ هرتز است.
- در آزمایش تیر خمشی نرخ کاهش انرژی تلف شده در

(2001) "Concepts of perpetual pavements", Perpetual Bituminous Pavements, Transportation Research Circular 503, Transportation Research Board, Washington, DC, 2001, pp. 4-11.

- Pais J. C., Pereira P. A. A., Minhoto, M. J. C., Fontes L. P. T. L., Kumar D.S.N.V.A. and Silva B.T.A. (2009) "Application of plateau value to predict fatigue life", 2nd Workshop on Four Point Bending, University of Minho. pp. 59-68.

- Prowell, B. D and Brown, E. R. (2006) "Methods for determining the endurance limit using beam fatigue tests", National Center for Asphalt Technology, International Conference on Perpetual Pavement, Ohio, September 13-15, 16 pp.

- Shen, S. and Carpenter, S. (2005) "Application of the dissipated energy concept in fatigue endurance limit testing", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Volume 1929, DOI 10.3141/1929-20, pp. 165-173.

- Shen, S. and Carpenter, S. H. (2007) "Dissipated energy concepts for HMA performance: Fatigue and healing", Technical Report of Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, March, 240 pp.

- Zeiada, W., Souliman, M., Kaloush, K. and Mamlouk, M. (2013). "Endurance limit for HMA based on healing concept using uniaxial tension-compression fatigue test". Journal of Materials in Civil Engineering, 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0000917.

- AASHTO T321 (2007) "Method for determining the fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending", AASHTO Standards, 11 pp.

- AUSTRROADS (2009) "Asphalt fatigue endurance limit", AUSTRROADS Technical Report, AP-T131/09, ISBN 978-1-921551-73-4.

- Carpenter, S. H., Ghuzlan, K.A. and Shen, S. (2003) "Fatigue endurance limit for highway and airport pavement", Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board, No. 1832, TRB, National Research Council, Washington D.C, pp.131-138.

- Carpenter, S. H. and Shen, S. (2006) "A dissipated energy approach to study HMA healing in fatigue", In Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board, No.1970, TRB, National Research Council, Washington D. C., pp. 178-185.

- Monismith, C. L., Epps, J. A., Kasianchuk, D. A. and Mclean, D.B (1970) "Asphalt mixture behavior on repeated flexure", Report No. TE 70-5, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, USA.

- NCHRP Report 646 (2010) "Validating the fatigue endurance limit for hot mix asphalt", National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board, Washington, D.C. 139 pp.

- Newcomb D. E., Buncher, M. and Huddleston, I. J.