

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

مطالعه رفتار آسفالت در قسمت‌های تحت اثر خستگی و بدون خستگی در روسازی راه

نگارنده:

علی طاحن چنار

استاد راهنما:

دکتر حسین قاسم زاده طهرانی

استاد مشاور:

دکتر عباس محمدی

دی ۱۳۹۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی عمران

گروه: راه و ترابری

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علی طاحن چنار به شماره دانشجویی ۹۶۰۹۹۴۴

تحت عنوان: مطالعه رفتار آسفالت در قسمت‌های تحت اثر خستگی و بدون خستگی در روسازی راه

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد راهنما	امضاء	استاد مشاور
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:

امضاء	اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:
	نام و نام خانوادگی:		
	نام و نام خانوادگی:		
	نام و نام خانوادگی:		

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

که در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یاری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم

بوده اند،

و تقدیم به

همسر عزیزم

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و

آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است.

استاد کرامی جناب آقای دکتر حسین قاسم زاده طهرانی

باسلام

دلسوزی، تلاش و کوشش حضرتعالی در تعلیم و تربیت و انتقال معلومات و تجربیات

ارزشمند دکنار برقراری رابطه صمیمی و دوستانه با دانشجویان و ایجاد فضایی دلنشین برای کسب علم

و دانش و درک شرایط دانشجویان حقیقتاً قابل ستایش است. اینجانب بر خود وظیفه میدانم در

کسوت ساگر دی از زحمات و خدمات ارزشمند شما استاد کرامتقدر تقدیر و تشکر نمایم.

از خداوند متعال برایتان سلامتی، موفقیت و همواره یاد دادن را مسئلت دارم.

تعمدنامه

اینجانب **علی طاحن چنار**..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **راه و ترابری**..... دانشکده **مهندسی عمران**..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مطالعه رفتار آسفالت در قسمت های تحت اثر خستگی و بدون خستگی در روسازی راه**..... تحت راهنمایی...**دکتر حسین قاسم زاده طهرانی**.... متعهد می شوم.

- ♦ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ♦ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- ♦ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- ♦ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

خستگی یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد خرابی در روسازی آسفالتی به شمار می‌رود. برای تعیین خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی می‌توان از آزمایش خستگی تیر چهار نقطه‌ای که از آزمایش‌های مخرب محسوب می‌شود، استفاده کرد. آزمایش‌های مخرب همواره هزینه‌های قابل توجهی به همراه خواهند داشت. از طرفی آزمایش‌های مخرب باعث آسیب رساندن به سازه مورد نظر می‌شود که در نتیجه، تکرار دوباره‌ی آزمایش برای آن امکان‌پذیر نخواهد بود.

این پژوهش در نظر دارد با بررسی همبستگی بین دو آزمایش مخرب خستگی تیر چهار نقطه و خمش سه نقطه با دستگاه PFWD که یک آزمایش غیرمخرب محسوب می‌شود، نیاز به انجام آزمایش‌های مخرب را به حداقل برساند. برای این منظور در ۲۵ ایستگاه مختلف برداشت‌هایی با استفاده از دستگاه PFWD انجام شده است و در ادامه در ۷ ایستگاه از آن، آسفالت سطح جاده برش داده شده و نمونه‌های تیرچه برای انجام دو آزمایش خستگی و خمش در ابعاد استاندارد آماده شده و تحت آزمایش قرار می‌گیرند. داده‌ها در دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. گروهی از داده‌ها و نمونه‌ها از مسیر چرخ و گروهی از خارج از مسیر چرخ برداشت شده‌اند. با استفاده از آزمایش خستگی در حالت کرنش ثابت برابر $500 \mu\epsilon$ و در دو دمای ۲۵ و صفر درجه مشخصات خستگی نمونه‌ها تعیین شده و نتیجه می‌شود که عمر خستگی در خارج از مسیر چرخ بیشتر بوده و با کاهش دما عمر خستگی نیز کاهش می‌یابد.

در ادامه با تحلیل داده‌های دستگاه PFWD و آزمایش‌های خستگی و خمش مشخص شد که افت و خیز بیشتر تحت بار ضربه‌ای دستگاه PFWD در مسیر چرخ به دلیل خستگی و ترک‌های ناشی از آن بوده است. در نهایت رابطه و همبستگی بالایی بین نتایج دستگاه PFWD و آزمایش خستگی گزارش شد. به طوری که با افزایش افت و خیز برداشت شده به وسیله دستگاه PFWD، عمر خستگی کاهش می‌یابد. همچنین مدلی با استفاده از روش رگرسیون خطی برای عمر خستگی نمونه‌ها در دو دمای ۲۵ و صفر درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: دستگاه افت و خیز دستی (PFWD)، آزمایش خستگی تیر چهار نقطه، آزمایش خمش سه نقطه، خستگی، آزمایش‌های مخرب، آزمایش‌های غیرمخرب، روسازی آسفالتی.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه و کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- ترک‌های خستگی یا پوست سوسماری	۳
۲-۲-۱- مفهوم خستگی و گسیختگی ناشی از خستگی	۵
۳-۱- روش‌های تعمیر خرابی خستگی	۷
۴-۱- ارزیابی روسازی با PFWD	۸
۵-۱- معرفی موضوع تحقیق	۹
۶-۱- نوآوری تحقیق	۱۱
۷-۱- فرض‌های تحقیق	۱۲
۸-۱- فرضیه‌های تحقیق	۱۲
۹-۱- معرفی فصول پایان‌نامه	۱۳
فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته	۱۵
۱-۲- مقدمه	۱۶
۲-۲- دستگاه آزمایش PFWD و مطالعات قبلی پیرامون آن	۱۷
۱-۲-۲- تحقیق قربانی و همکاران	۱۷
۲-۲-۲- تحقیق Suo Zhi و همکاران	۲۰
۳-۲-۲- تحقیق Kimio و همکاران	۲۱
۳-۲- آزمایش خستگی	۲۴
۱-۳-۲- نگرش کلاسیک در تعیین عمر خستگی	۲۵
۲-۳-۲- نگرش مکانیک شکست در تعیین عمر خستگی	۲۷
۳-۳-۲- نگرش انرژی در تعیین عمر خستگی	۲۸
۴-۳-۲- تئوری روش‌های بر پایه انرژی تلف شده	۳۰
۵-۳-۲- روش‌های بر پایه کاهش سختی	۳۳
۴-۲- مطالعات قبلی پیرامون آزمایش خستگی	۳۷
۱-۴-۲- تحقیق U.A Mannan و همکاران	۳۷
۲-۴-۲- تحقیق A.Rasouli و همکاران	۴۲

۴۶.....	تحقیق Z.Dehghan و همکاران	۲-۴-۳
۴۹.....	تحقیق A.Kavussi و همکاران	۲-۴-۴
۵۳.....	مطالعه انجام شده پیرامون آزمایش خمش روی نمونه‌های کرگیری شده از محل روسازی	۲-۵-۵
۵۳.....	تحقیق Saeidi و همکاران	۲-۵-۱
۵۷.....	خلاصه تحقیقات این فصل	۲-۶
فصل ۳: روش کار، مطالعات میدانی، تهیه و جمع‌آوری داده‌ها		
۶۱.....		
۶۲.....	مقدمه	۳-۱
۶۲.....	معرفی ساختار دستگاه PFWD	۳-۲
۶۲.....	اعمال ضربه (وزنه سقوط کننده)	۳-۲-۱
۶۴.....	صفحه‌ی بارگذاری	۳-۲-۲
۶۴.....	ژئوفون‌های اندازه‌گیری بار اعمال شده	۳-۲-۳
۶۴.....	سیستم دریافت کننده‌ی سیگنال، تحلیل و ذخیره سازی داده‌ها	۳-۲-۴
۶۵.....	سایر اجزای جانبی دستگاه PFWD	۳-۲-۵
نحوه‌ی برداشت داده‌ها با استفاده از دستگاه PFWD مطابق با استاندارد ASTM E 2583-07		
۶۵.....		
۶۶.....	معرفی محل مطالعه موردی	۳-۴
۶۷.....	خلاصه‌ای از نحوه‌ی برداشت داده‌ها از محل روسازی	۳-۵
۷۲.....	معرفی دستگاه آزمایش خستگی	۳-۶
۷۵.....	مشخصات نمونه‌ها و روش تهیه آن‌ها	۳-۷
۷۸.....	نحوه‌ی انجام آزمایش خستگی	۳-۸
۸۱.....	معرفی آزمایش خمش سه نقطه	۳-۹
۸۲.....	نحوه‌ی انجام آزمایش خمش سه نقطه	۳-۱۰
فصل ۴: تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده		
۸۷.....		
۸۸.....	مقدمه	۴-۱
۸۸.....	مقایسه نتایج برداشت‌های PFWD در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ	۴-۲
۸۸.....	نمودارهای جعبه‌ای	۴-۲-۱
۹۰.....	آزمون t	۴-۲-۲
۹۱.....	مقایسه‌ی خروجی‌های دستگاه PFWD با آزمایش خستگی	۴-۳
۹۱.....	رابطه‌ی خطی بین افت و خیز و عمر خستگی نمونه‌ها	۴-۳-۱
۹۳.....	تأثیر دما بر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی	۴-۳-۲

۳-۳-۴	بررسی عمر خستگی نمونه‌ها در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ.....	۹۴
۴-۳-۴	رگرسیون خطی بین داده‌های PFWD و عمر خستگی.....	۹۷
۴-۴	مقایسه نتایج و خروجی‌های دستگاه PFWD با آزمایش خمش.....	۱۰۱
۱-۴-۴	بررسی پیوستگی بین افت و خیز حاصل از PFWD و حداکثر نیرو تحمل در آزمایش خمش.....	۱۰۱
۲-۴-۴	بررسی پیوستگی بین افت و خیز حاصل از PFWD و انرژی جذب شده در آزمایش خمش.....	۱۰۳
۵-۴	تأثیر خستگی بر حداکثر بار تحمل شده در آزمایش خمش.....	۱۰۵

فصل ۵: نتایج این تحقیق و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده..... ۱۰۷

۱-۵	مقدمه.....	۱۰۸
۲-۵	نتیجه گیری.....	۱۰۸
۳-۵	پیشنهادهات.....	۱۱۰
منابع.....		۱۱۱
پیوست.....		۱۱۵

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) تنش کششی در زیر لایه آسفالتی در اثر نیروی فشاری چرخ ۴
- شکل (۲-۱) گسترش ترک‌های خستگی از زیر لایه آسفالتی ۵
- شکل (۳-۱) ترک‌های پوست سوسماری با شدت‌های مختلف ۸
- شکل (۴-۱) تقسیم بندی روسازی در مسیر و خارج از مسیر چرخ ۱۰
- شکل (۱-۲) پارامترهای کاسه انحنای [۱۱] ۱۸
- شکل (۲-۲) نمودار پارامتر SCI و افت و خیز ژئوفون مرکزی [۱۲] ۱۹
- شکل (۳-۲) نمودار پارامتر BDI و افت و خیز ژئوفون مرکزی [۱۲] ۲۰
- شکل (۴-۲) تأثیر سرعت بارگذاری بر افت و خیز روسازی [۱۶] ۲۱
- شکل (۵-۲) روش محاسبه‌ی کار تلف شده [۱۹] ۲۲
- شکل (۶-۲) ساختار روسازی استفاده شده در تحقیق [۱۹] ۲۳
- شکل (۷-۲) رابطه‌ی بین کار تلف شده FWD و ضخامت لایه آسفالتی [۱۹] ۲۳
- شکل (۸-۲) رگرسیون خطی بین کار تلف شده FWD و تعداد بار منجر به شکست خستگی [۱۹] ۲۴
- شکل (۹-۲) نمودار تنش در مقابل کرنش آزمایش خستگی خمشی [۲۳] ۲۹
- شکل (۱۰-۲) نمودار نسبت انرژی در برابر سیکل بارگذاری در آزمایش خستگی ۳۱
- شکل (۱۱-۲) منحنی تغییر انرژی تلف شده در برابر سیکل بارگذاری ۳۳
- شکل (۱۲-۲) نمودار نسبت سختی خمشی در برابر تعداد سیکل بارگذاری ۳۴
- شکل (۱۳-۲) تعیین نقطه گسیختگی با روش ASU ۳۵
- شکل (۱۴-۲) نمودار سختی خمشی بر حسب سیکل بارگذاری ۳۶
- شکل (۱۵-۲) نتایج عمر خستگی برای مخلوط حاوی ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی [۲۹] ۳۸
- شکل (۱۶-۲) مقایسه‌ی عمر خستگی مخلوط‌های دارای آسفالت بازیافتی و بدون آسفالت بازیافتی [۲۹] ۳۹
- شکل (۱۷-۲) عمر خستگی نمونه‌های قیر استخراج شده از مخلوط‌های آسفالتی [۲۹] ۴۰
- شکل (۱۸-۲) عمر خستگی نمونه‌ی قیری استخراج شده از مخلوط‌های آسفالتی [۲۹] ۴۱
- شکل (۱۹-۲) رابطه بین عمر خستگی مخلوط آسفالتی و قیر خارج شده از آن [۲۹] ۴۱
- شکل (۲۰-۲) سختی خمشی اولیه مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف آهک هیدراته [۳۱] ۴۳
- شکل (۲۱-۲) زاویه فازی نمونه‌های پیر نشده برای درصد‌های مختلف آهک هیدراته [۳۱] ۴۴
- شکل (۲۲-۲) زاویه فازی نمونه‌های پیر شده برای درصد‌های مختلف آهک هیدراته [۳۱] ۴۴

- شکل (۲-۲۳) نتایج عمر خستگی برای نمونه‌های پیر نشده [۳۱]..... ۴۵
- شکل (۲-۲۴) نتایج عمر خستگی برای نمونه‌های پیر شده [۳۱]..... ۴۶
- شکل (۲-۲۵) مقایسه‌ی نمودار سختی خمشی مخلوط داری فیبر با نمونه‌ی کنترلی [۳۴]..... ۴۷
- شکل (۲-۲۶) سختی خمشی اولیه نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف فیبر با طول یک و ۲ سانتی متر [۳۴]..... ۴۸
- شکل (۲-۲۷) عمر خستگی مخلوط آسفالتی با درصد‌های مختلف فیبر با طول یک و ۲ سانتی متر [۳۴]..... ۴۹
- شکل (۲-۲۸) سختی خمشی اولیه در نمونه‌های دارای سرباره [۳۸]..... ۵۰
- شکل (۲-۲۹) زاویه فازی در نمونه‌های دارای سرباره [۳۸]..... ۵۱
- شکل (۲-۳۰) عمر خستگی در نمونه‌های پیر شده با درصد‌های مختلف سرباره [۳۸]..... ۵۲
- شکل (۲-۳۱) عمر خستگی در نمونه‌های پیر نشده با درصد‌های مختلف سرباره [۳۸]..... ۵۳
- شکل (۲-۳۲) نمونه تحت آزمایش خمش نیم‌دایره [۴۰]..... ۵۴
- شکل (۲-۳۳) تاثیر عمر روسازی بر تغییر شکل ایجاد شده در لحظه شکست [۴۰]..... ۵۵
- شکل (۲-۳۴) تاثیر طول ترک بر انرژی شکست [۴۰]..... ۵۵
- شکل (۳-۱) ساختار کلی دستگاه PFWD [۴۱]..... ۶۳
- شکل (۳-۲) جاده قدیم شاهرود به میامی..... ۶۶
- شکل (۳-۳) روسازی در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ..... ۶۷
- شکل (۳-۴) دستگاه PFWD ساخت شرکت TML ژاپن..... ۶۹
- شکل (۳-۵) اجزای دستگاه خستگی چهار نقطه‌ای..... ۷۲
- شکل (۳-۶) دستگاه کاتر مخصوص برش آسفالت..... ۷۶
- شکل (۳-۷) خارج کردن دال‌های آسفالتی از سطح روسازی..... ۷۷
- شکل (۳-۸) برش نمونه‌های تیری شکل در ابعاد استاندارد با دستگاه برش سنگ..... ۷۸
- شکل (۳-۹) نمونه‌های تیری شکل در ابعاد استاندارد آزمایش خستگی..... ۷۹
- شکل (۳-۱۰) دستگاه آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای..... ۸۰
- شکل (۳-۱۱) نحوه‌ی وارد شدن نیرو در آزمایش خمش سه نقطه..... ۸۲
- شکل (۳-۱۲) نحوه‌ی قرار گیری نمونه‌ی تیری شکل در آزمایش خمش سه نقطه..... ۸۳
- شکل (۳-۱۳) ایجاد ترک در نمونه‌ی آسفالتی تحت آزمایش خمش..... ۸۴
- شکل (۳-۱۴) نمودار نیرو در برابر تغییر شکل نمونه‌های تیری شکل تحت آزمایش خمش..... ۸۵
- شکل (۴-۱) نمودار جعبه‌ای مربوط به افت و خیزها در مسیر چرخ (DD0) و خارج از مسیر چرخ (D0)..... ۸۹
- شکل (۴-۲) خروجی آزمون t در نرم افزار SPSS..... ۹۰
- شکل (۴-۳) رابطه‌ی بین افت و خیز و عمر خستگی..... ۹۳

شکل (۴-۴) مقایسه‌ی عمر خستگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ	۹۴
شکل (۵-۴) مقایسه‌ی عمر خستگی در دمای صفر درجه سانتی‌گراد در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ	۹۵
شکل (۶-۴) توزیع بار ناشی از چرخ در روسازی سالم	۹۶
شکل (۷-۴) توزیع بار ناشی از چرخ در روسازی دارای ترک	۹۷
شکل (۸-۴) ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته در دمای ۲۵ درجه	۱۰۰
شکل (۹-۴) ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته در دمای صفر درجه	۱۰۰
شکل (۱۰-۴) رابطه‌ی بین افت و خیز و حداکثر نیروی آزمایش خمش سه نقطه	۱۰۳
شکل (۱۱-۴) رابطه‌ی بین افت و خیز و انرژی جذب شده در آزمایش خمش سه نقطه	۱۰۴
شکل (۱۲-۴) مقایسه حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌هایی که به صورت ترد شکسته اند	۱۰۶
شکل (۱۳-۴) مقایسه حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌هایی که به صورت نرم شکسته اند	۱۰۶
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A1 در دما صفر درجه سانتی‌گراد	۱۱۵
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A1 در دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۱۵
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A1 در دما صفر درجه سانتی‌گراد	۱۱۶
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A1 در دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۱۶
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A18 در دما صفر درجه سانتی‌گراد	۱۱۷
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A18 در دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۱۷
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A18 در دما صفر درجه سانتی‌گراد	۱۱۸
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A18 در دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۱۸
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A24 در دما صفر درجه سانتی‌گراد	۱۱۹
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A24 در دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۱۹
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A24 در دما صفر درجه سانتی‌گراد	۱۲۰
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A24 در دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۲۰

فهرست جداول

جدول (۱-۲) مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی در مخلوط‌های آسفالتی.....	۲۶
جدول (۲-۲) خلاصه تحقیقات پیشین.....	۵۷
ادامه جدول (۲-۲) خلاصه تحقیقات پیشین.....	۵۸
ادامه جدول (۲-۲) خلاصه تحقیقات پیشین.....	۵۹
ادامه جدول (۲-۲) خلاصه تحقیقات پیشین.....	۶۰
جدول (۱-۳) مشخصات دستگاه PFWD.....	۶۸
جدول (۲-۳) خروجی‌های دستگاه PFWD در مسیر چرخ.....	۷۰
جدول (۳-۳) خروجی‌های دستگاه PFWD خارج از مسیر چرخ.....	۷۱
جدول (۴-۳) واحدهای پارامترهای خروجی از دستگاه PFWD.....	۷۱
جدول (۵-۳) نتایج عمر خستگی در دمای ۲۵ درجه.....	۸۱
جدول (۶-۳) نتایج عمر خستگی در دمای صفر درجه.....	۸۱
جدول (۷-۳) حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌های آزمایش خمش.....	۸۵
جدول (۱-۴) مقایسه‌ی نتایج عمر خستگی در دمای ۲۵ درجه و افت و خیز حاصل از ضربه PFWD.....	۹۲
جدول (۲-۴) مقایسه‌ی نتایج عمر خستگی در دمای صفر درجه و افت و خیز حاصل از ضربه PFWD.....	۹۲
جدول (۳-۴) متغیرهای خروجی دستگاه PFWD در دمای محیط و خستگی در دمای ۲۵ درجه.....	۹۸
جدول (۴-۴) متغیرهای خروجی دستگاه PFWD در دمای محیط و خستگی در دمای صفر درجه.....	۹۸
جدول (۵-۴) مقایسه حداکثر نیروی تحمل شده در آزمایش خمش با افت و خیز FWD.....	۱۰۱
جدول (۶-۴) مقایسه انرژی جذب شده در آزمایش خمش با افت و خیز FWD.....	۱۰۴
جدول (۷-۴) حداکثر نیروی تحمل شده در نمونه‌های با شکست ترد و نرم.....	۱۰۵

فصل ۱: مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

با گسترش شهرها و افزایش تقاضا برای حمل و نقل، بزرگراهها و آزادراهها نیز به راههای شهری افزوده شدند تا ضمن پاسخگویی به نیاز حرکتی شهر، امکان حرکت پر سرعت خودروها در شهرها و بین شهرها را نیز فراهم نمایند. از آنجا که کیفیت روسازی معابر شهری و برون شهری یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در کیفیت سیستم حمل و نقل است، ساخت روسازی‌های با کیفیت به همراه تعمیر و نگهداری صحیح روسازی می‌تواند عاملی مهم در تأمین رضایت استفاده‌کنندگان از راهها باشد.

به طور کلی هدف از احداث روسازی، ایجاد سطح صاف و هموار برای تأمین ایمنی کافی به منظور عبور وسایل نقلیه خواهد بود. انواع مختلف روسازی شامل روسازی انعطاف‌پذیر^۱، روسازی صلب^۲ و روسازی مرکب^۳ می‌شود. روسازی راهها به طور دائم در معرض انواع گوناگون تنش‌های ناشی از عوامل مختلف همچون بار ترافیکی، تغییر دما و میزان رطوبت، تغییر شکل لایه‌های زیرین و بستر قرار دارند که این تنش‌ها منجر به پیدایش نقایص و خرابی‌هایی در روسازی، بروز ترک‌ها، چاله‌ها و تغییر شکل‌ها و دیگر انواع خرابی‌ها شده و پیامد آن نیز فرسوده و غیر قابل استفاده شدن روسازی خواهد بود.

امروزه با افزایش روزافزون ترافیک عبوری و بار محوری خودروها، نیروی بیشتری بر سیستم روسازی اعمال می‌شود که باعث کاهش عمر مفید و ایجاد انواع خرابی‌ها در روسازی می‌گردد. عمده خرابی موجود در روسازی آسفالتی، ترک‌های پوست سوسماری یا ترک‌های خستگی می‌باشد که در اثر بارگذاری مکرر ترافیکی به وجود می‌آیند. از این رو عمر خستگی و پیش‌بینی آن می‌تواند کمک شایانی به افزایش کیفیت راه از طریق برنامه‌ریزی صحیح برای عملیات ترمیم و نگهداری کند. از آزمایشات گوناگون برای ارزیابی و متعاقباً تعمیر و نگهداری و بهسازی روسازی‌های مختلف استفاده می‌شود. لازم است آزمایش‌هایی که بر روی روسازی موجود و ساخته شده انجام می‌پذیرد، به صورت غیر مخرب باشد

^۱ Flexible Pavement

^۲ Rigid Pavement

^۳ Composite Pavement

تا هم هزینه‌ی مربوط به انجام آزمایش کاهش یابد و هم صدمات ناشی از آزمایش بر روسازی کمتر شود. یکی از آزمایشات غیر مخربی که می‌توان در کنترل کیفیت و تعمیر و نگهداری روسازی‌های آسفالتی مورد استفاده قرار داد و شرایط روسازی را ارزیابی کرد، دستگاه PFWD^۱ خواهد بود. ارزیابی خرابی‌های روسازی راه و تعیین کیفیت روسازی یکی از اقدامات مهم و اساسی در سیستم‌های مدیریت روسازی است.

۲-۱- ترک‌های خستگی^۲ یا پوست سوسماری^۳

به طور کلی انواع مختلف خرابی‌ها در روسازی آسفالتی را می‌توان به دو گروه خرابی‌های سازه‌ای و خرابی‌های سطحی تقسیم بندی نمود. خرابی‌های سازه‌ای زمانی ایجاد می‌شوند که سیستم روسازی به علت نداشتن قدرت باربری کافی در اثر بارهای وارده صدمه ببیند و دیگر نتواند بدون افزایش خرابی‌ها، بارگذاری بیشتری را تحمل کند. در مقابل ترک‌های سطحی وقتی اتفاق می‌افتند که بدون آن که الزاماً سیستم روسازی از نظر سازه‌ای قدرت باربری خود را از دست داده باشد، به علت ناهمواری بیش از حد سطح روسازی، بهره برداری از آن با اشکال صورت گیرد. [۱]

به طور کلی افت مقاومت مصالح در اثر تکرار بار را خستگی می‌نامند. خستگی ناشی از تکرار بار می‌تواند در هر نوع و هر جنسی از مصالح اتفاق بیفتد.

این ترک‌ها به علت داشتن شباهت به پوست پشت بدن سوسمار، ترک‌های پوست سوسماری یا پوست ماری نیز نامیده می‌شوند. این نوع خرابی با ترک خوردن تمام یا قسمتی از سطح رویه آسفالتی به شکل تکه‌های نسبتاً کوچک چند ضلعی ظاهر شده و معمولاً با تکرار بارگذاری بر وسعت خرابی افزوده خواهد شد. علت به وجود آمدن ترک‌های پوست سوسماری، تغییر شکل بیش از حد لایه‌های روسازی در اثر بارگذاری یا خستگی بیش از حد لایه رویه در اثر بارهای ترافیکی تکراری است. روسازی‌هایی که

^۱ Portable Falling Weight Deflectometer

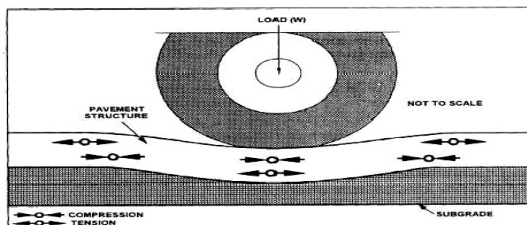
^۲ Fatigue Cracks

^۳ Alligator Cracks

بر روی خاک‌های با مقاومت کم و با قابلیت تغییر شکل زیاد ساخته می‌شوند، معمولاً به این صورت ترک می‌خورند. در مواقعی که ترک‌های سوسماری تمام یا قسمت بزرگی از روسازی آسفالتی را فرا گرفته باشند، علت آن خستگی بیش از حد رویه آسفالتی تحت اثر عبور وسایل نقلیه سنگین خواهد بود.

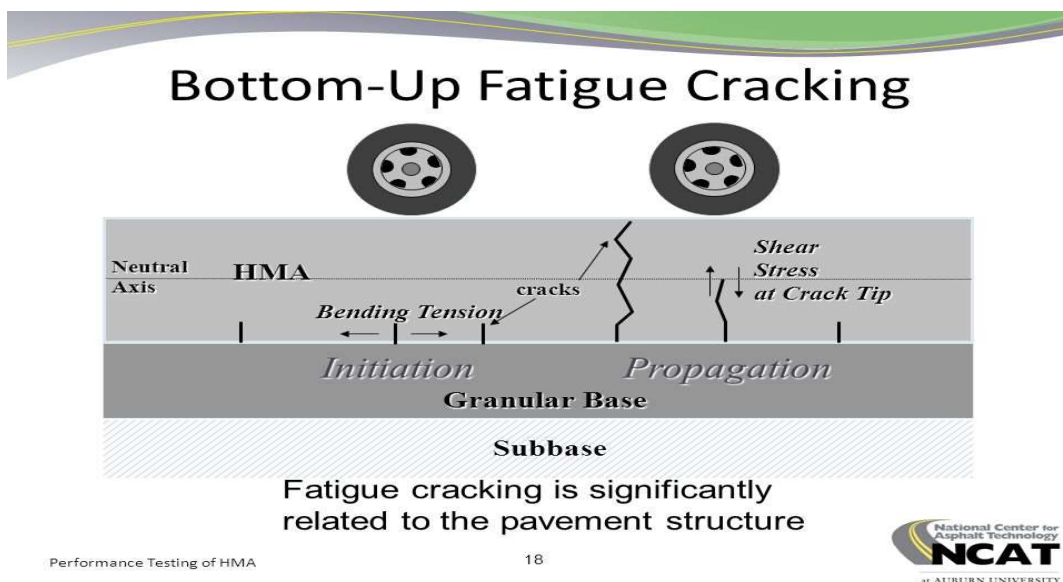
مکانیزم تشکیل ترک‌های خستگی در مخلوط‌های آسفالتی به این صورت است که در اثر تکرار ترافیک و در نتیجه‌ی آن تکرار تنش و کرنش کششی، در نهایت ترک‌هایی در روسازی ظاهر خواهد شد که در واقع مخلوط آسفالتی دچار خستگی شده است.

تنش و کرنش کششی به دلیل رفتار الاستیک روسازی در اثر بارهای ترافیکی ایجاد شده و به دلیل رفتار خستگی که مصالح مخلوط آسفالتی دارند، ترک‌های اولیه در زیر لایه آسفالتی تشکیل می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱-۱) پیداست، در اثر اعمال بار فشاری در سطح لایه آسفالتی، در زیر این لایه تنش و کرنش کششی به وجود می‌آید، به بیان ساده‌تر سطح بالای لایه در فشار و سطح زیرین در کشش قرار می‌گیرد.



شکل (۱-۱) تنش کششی در زیر لایه آسفالتی در اثر نیروی فشاری چرخ

در اثر ضعیف و نازک بودن لایه آسفالتی، بار و فشار زیاد لاستیک وسیله نقلیه، ضعیف بودن خاک بستر یا اساس و زیر اساس و یا وجود رطوبت و تراکم نادرست این لایه‌ها، تنش و کرنش کششی افزایش یافته و در نتیجه‌ی آن ترک‌های خستگی از زیر لایه آسفالتی شروع به شکل‌گیری و گسترش به سمت بالای لایه‌ی آسفالتی می‌کنند. شکل (۲-۱) نحوه‌ی گسترش ترک‌های خستگی از زیر لایه آسفالتی به سمت بالا را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱) گسترش ترک‌های خستگی از زیر لایه آسفالتی

۲-۲-۱- مفهوم خستگی و گسیختگی ناشی از خستگی

به شکست ماده در اثر اعمال نیروهای متناوب کمتر از استحکام نهایی، خستگی گفته می‌شود و تعداد دفعات بارگذاری که باعث می‌شود ماده شکست بخورد، تحت عنوان عمر خستگی تعریف می‌شود. عمر خستگی در روسازی انعطاف‌پذیر تحت تأثیر دو فاکتور مهم قرار می‌گیرد که شامل، بارگذاری (فرکانس بارگذاری، سرعت وسایل نقلیه و بار ناشی از کرنش در زیر لایه آسفالتی) و خصوصیات مواد تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی (خصوصیات HMA و قیر) می‌شود، در عین حال تأثیر دما نیز در این فرآیند نباید نادیده گرفته شود. [۲]

اگر یک تیر آسفالتی از بالا تحت بارگذاری قرار گیرد، تیر میل به تغییرشکل محدب به سمت پایین خواهد داشت. در این حالت در قسمت بالایی تیر تنش و کرنش فشاری و در قسمت پایینی تیر تنش و کرنش کششی به وجود می‌آید.

مواد مختلف از نظر ژئولوژی یا شکل‌پذیری به سه دسته‌ی، مواد ویسکوز، الاستیک و ویسکوالاستیک تقسیم‌بندی می‌شوند. مواد ویسکوز موادی هستند که با اعمال تنش، تغییر شکل داده و با برداشتن تنش به حالت اولیه باز نمی‌گردند و به عبارت دیگر کل انرژی را تلف می‌کنند. مواد با خاصیت الاستیک، موادی هستند که در اثر اعمال تنش، تغییر شکل داده و با برداشتن تنش به حالت اولیه خود باز می‌گردند یا به عبارت ساده‌تر، کل انرژی وارده را جذب می‌کنند. مواد ویسکوالاستیک نیز موادی هستند که رفتاری بین مواد ویسکوز و الاستیک خواهند داشت. به بیان دیگر، با اعمال تنش تغییر شکل داده و با حذف تنش، بخشی از تغییر شکا ایجاد شده همچنان باقی خواهد ماند. مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف رفتار متفاوتی خواهد داشت.

به دلیل وجود رفتار الاستیک در دماهای پایین و رفتار ویسکوالاستیک در دماهای بالاتر در مخلوط آسفالتی، با حذف بار از روی تیر، تیر میل به برگشت به حالت اولیه خود قبل از بارگذاری را خواهد داشت. با بارگذاری و باربرداریهای بعدی این رفتار تیر دوباره تکرار می‌شود. تکرار هر بارگذاری و باربرداری به عنوان یک سیکل بارگذاری تعریف می‌شود. در اثر تکرار تنش و کرنش‌های کششی تیر آسفالتی با افت مقاومت در برابر کشش همراه خواهد بود و یا به بیان دیگر دچار خستگی می‌شود و در نتیجه‌ی آن ترک‌هایی از زیر تیر و محل تمرکز تنش و کرنش کششی شروع به شکل‌گیری و گسترش به سمت بالای تیر می‌کند و در نهایت با رسیدن این ترک‌ها به سطح بالای تیر، دچار شکست شده که آن را شکست ناشی از خستگی می‌نامند.

روسازی آسفالتی نیز رفتاری مشابه تیر از خود نشان می‌دهد و در اثر نیروی فشاری چرخ، تنش و کرنش‌های کششی در زیر لایه آسفالتی به وجود می‌آیند، سپس با عبور چرخ دوباره این تنش و کرنش کششی از بین رفته و به حالت اولیه باز می‌گردد. با تکرار این روند، در لایه آسفالتی ترک‌های خستگی ظاهر می‌شوند. تحت سنگین‌ترین بار ممکن، اگر تنش و کرنش کششی ایجاد شده در روسازی خیلی کوچک باشد، می‌تواند تعداد زیادی سیکل بارگذاری و باربرداری را بدون این که خرابی در آن ایجاد شود، تحمل کند. اگر این تنش و کرنش ایجاد شده متوسط باشد، روسازی می‌تواند تا تعداد معینی از

سیکل بارگذاری را بدون ایجاد خرابی تحمل کند و در نهایت اگر تنش و کرنش کششی خیلی زیاد باشد، در اثر تعداد کمی از سیکل بارگذاری در روسازی خرابی خستگی به وجود خواهد آمد.

عوامل موثر بر ایجاد و گسترش ترک‌های خستگی عبارتند از: منابع قیر، نوع مخلوط آسفالتی،

درصد فضای خالی، نوع سنگدانه، سختی قیر و مخلوط و نوع دانه بندی می‌باشد. [۳]

همان‌طور که اشاره شد، سختی قیر مورد استفاده در مخلوط آسفالتی یکی از فاکتورهای مهم در

شکل‌گیری ترک‌های خستگی به شمار می‌رود. قیر درون مخلوط آسفالتی با گذشت زمان سفت می‌شود

و در نتیجه باعث افزایش سختی مخلوط آسفالتی خواهد شد. سفت شدن قیر ابتدا وابسته به بخار شدن

روغن‌های موجود در آن هنگام ساخت مخلوط آسفالتی و در مرحله دوم وابسته به اکسیداسیون قیر بعد

از ساخت و در محل روسازی خواهد بود. [۴]

خستگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر تحت بارگذاری تکراری است.

روسازی‌های آسفالتی معمولاً در معرض بارها و تنش‌های تکراری ناشی از عبور ترافیک قرار می‌گیرند

که در این حالت پاسخ مصالح در کشش و فشار شامل سه جزء کرنش اصلی می‌شود که عبارتند از :

الاستیک، ویسکوالاستیک و پلاستیک. کرنش پلاستیک کششی منجر به خرابی خستگی در روسازی

آسفالتی خواهد شد. بنابراین مصالح الاستیک کامل هیچ وقت دچار خرابی خستگی نخواهند شد. [۵]

۱-۳- روش‌های تعمیر خرابی خستگی

میزان و شدت ترک‌های خستگی بر حسب متر مربع سطح رویه روسازی اندازه‌گیری می‌شوند.

ترک‌های خستگی بر اساس میزان شدت خرابی با روش‌های متفاوتی تعمیر خواهند شد. ترک‌های پوست

سوسماری در سه سطح با شدت کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی می‌شوند. ترک‌های پوست سوسماری با

شدت‌های مختلف در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در صورتی که ترک‌های طولی ریز مویی به

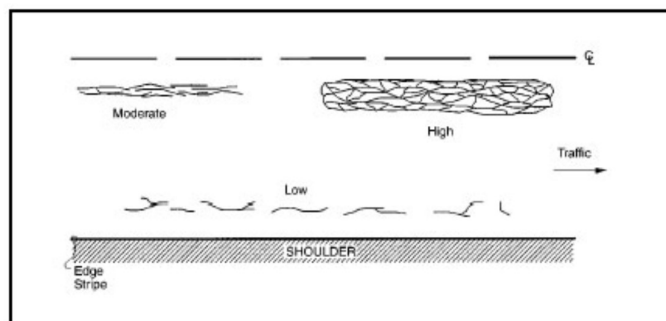
موازات یکدیگر ظاهر شده و تعداد کمی از آن‌ها به یکدیگر متصل شده باشند و پکیدگی در لبه ترک‌ها

مشاهده نشود، در گروه ترک‌های خستگی با شدت کم دسته‌بندی خواهند شد. ترک‌های خستگی با

شدت کم را می‌توان بدون هیچ‌گونه اقدامی برای تعمیر رها کرد و هم می‌توان با استفاده از اندود آب‌بند سطحی این ترک‌ها را پر کرده و شرایط روسازی را بهبود داد.

در دسته دوم ترک‌های خستگی با شدت متوسط قرار می‌گیرند. در این دسته ترک‌ها بیشتر به هم پیوسته و تشکیل الگو یا شبکه‌ای از ترک‌ها را می‌دهند. همچنین در محل ترک‌ها پکیدگی خفیف مشاهده می‌شوند. در این سطح از شدت می‌توان با استفاده از وصله‌های نیمه عمیق یا عمیق، روکش کردن و بازسازی، شرایط روسازی را بهتر کرد.

در سطح شدت زیاد ترک‌های پوست سوسماری به صورت الگودار یا شبکه‌ای در آمده و به اندازه ای گسترش پیدا کرده که تکه‌ها به خوبی قابل تعریف بوده و لبه‌های ترک‌ها دارای پکیدگی می‌باشند. همچنین برخی از تکه‌های روسازی ممکن است در اثر عبور بار ترافیکی از جای خود تکان بخورند. در این شدت از خرابی نیز می‌توان با استفاده از وصله‌های عمیق، روکش کردن و بازسازی، می‌توان شرایط روسازی را بهتر و تقویت کرد.



شکل (۳-۱) ترک‌های پوست سوسماری با شدت‌های مختلف

۴-۱- ارزیابی روسازی با PFWD

دستگاه FWD در طول سالیان اخیر در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است و به عنوان یک دستگاه قابل اعتماد و شناخته شده در نظر گرفته می‌شود و همچنین می‌توان از آن به عنوان یک آزمایش استاندارد نام برد. از لحاظ ساختاری دستگاه PFWD کاملاً مشابه دستگاه FWD است، با این

تفاوت که خیلی ساده‌تر بوده و زمان بارگذاری و حداکثر نیروی اعمالی آن نسبت به FWD کمتر خواهد بود. به دلیل همین سادگی و قابل حمل بودن دستگاه PFWD می‌توان به راحتی و در تعدادهای زیاد برداشت‌هایی در محل روسازی آسفالتی یا مصالح غیر چسپنده انجام داد. در مطالعاتی که V.George و همکارانش در سال ۲۰۰۸ و Steinert و همکارانش در سال ۲۰۰۵ انجام داده اند، به بررسی پیوستگی و ارتباط پارامترهای آزمایش PFWD با پارامترهای دو آزمایش CBR و FWD بر روی لایه‌های غیر چسپنده روسازی و روسازی آسفالتی با لایه آسفالتی نازک پرداختند. طبق نتایج این مطالعات پیوستگی قابل قبولی گزارش شده است. بنابراین استفاده از PFWD در روسازی های آسفالتی نیز امکان‌پذیر خواهد بود. [۶ و ۷]

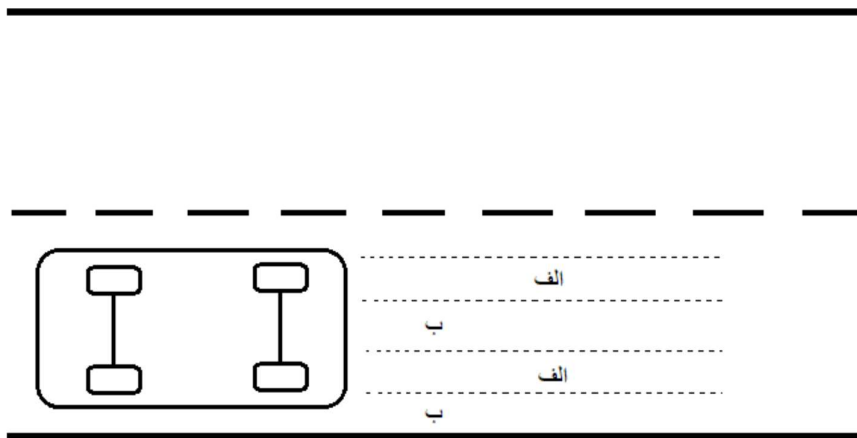
در مطالعات زیادی محققین همبستگی نتایج FWD و PFWD را مورد بررسی قرار داده و آن را تأیید کرده‌اند. دستگاه PFWD قادر به تولید تنش‌های نسبتاً کوچک می‌باشد، به همین دلیل کاربرد اصلی آن بیشتر در مصالح غیر چسپنده محدود می‌شود. با این حال در تحقیقات بسیاری در لایه‌های آسفالتی روسازی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. [۸]

روش آزمایش PFWD از نوع آزمایش‌های ضربه‌ای خواهد بود. بارگذاری توسط یک وزنه و یک سیستم ضربه‌گیر به صفحه بارگذاری واقع بر روی سطح روسازی صورت می‌گیرد. آزمایش با دستگاه PFWD مطابق استاندارد ASTM E 2583-07 انجام می‌پذیرد. توضیحات بیشتر و نحوه‌ی انجام آزمایش در فصل سوم ارائه می‌گردد.

۱-۵- معرفی موضوع تحقیق

ارزیابی خرابی‌های روسازی راه و تعیین کیفیت روسازی یکی از اقدامات مهم و اساسی در سیستم های مدیریت روسازی است. بنابراین شناخت انواع خرابی‌های موجود در روسازی و عوامل به وجود آورنده و همچنین راه‌های مقابله و پیشگیری از به وجود آمدن آنها امری ضروری در مهندسی راه و ترابری محسوب می‌شود.

این پژوهش در نظر دارد آسفالت موجود در یک روسازی که تحت تأثیر بار ترافیکی قرار گرفته است را در دو قسمت متفاوت از نظر بارگذاری با استفاده از آزمایش‌های عمر خستگی، خمش سه نقطه و دستگاه PFWD مورد بررسی قرار دهد. قسمتی از روسازی که در مسیر چرخ‌های وسایل نقلیه قرار می‌گیرد، نسبت به قسمت‌های دیگر بیشتر تحت تأثیر بارگذاری قرار می‌گیرد. بنابراین روسازی راه را همانند شکل ۴-۱ به دو قسمت تقسیم بندی کرده که مسیر الف در زیر چرخ خودروها قرار گرفته و قسمت های ب در مسیر چرخ قرار نمی‌گیرد.



شکل (۴-۱) تقسیم بندی روسازی در مسیر و خارج از مسیر چرخ

در این مطالعه نتایج آزمایش‌های PFWD و خستگی در دو قسمت روسازی مقایسه می‌شود. در نهایت نتایج و خروجی‌های آزمایش‌های خستگی و خمش را با دستگاه PFWD مقایسه کرده و همبستگی نتایج دو آزمایش را با دستگاه PFWD بررسی می‌کند. در ابتدای کار برداشت‌ها توسط دستگاه PFWD در نقاط مختلف انجام شده و با استفاده از کاتر مخصوص برش آسفالت، نمونه‌های تیرچه از سطح روسازی خارج شده و آزمایش‌های خستگی و خمش روی آن‌ها انجام می‌پذیرد.

۱-۶- نوآوری تحقیق

پس از ساخت انواع راه‌ها اعم از آزادراه، راه اصلی، راه فرعی و یا هر نوع راه دیگر، لازم است حین بهره برداری، روسازی آن‌ها تحت کنترل قرار گرفته و وضعیت روسازی‌ها به طور مستمر مورد ارزیابی قرار گیرد. از آزمایشات غیرمخرب در سطوح گوناگون برای ارزیابی و متعاقباً تعمیر و نگهداری و بهسازی روسازی‌های مختلف استفاده می‌شود. یکی از قابل اعتمادترین روش‌هایی که برای تعیین وضعیت سازه ای^۱ و وظیفه‌ای^۲ یک روسازی وجود دارد، استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب (NDT)^۳ است. [۹]

آزمایش‌های غیرمخرب دارای دو مزیت عمده می‌باشد :

۱. در آزمایش‌های مخرب بنابر ماهیت آن‌ها لایه‌های روی هم قرار گرفته روسازی دچار دست خوردگی می‌گردند و برداشتن و حمل مصالح روسازی به آزمایشگاه جهت انجام آزمایش ضروری می‌گردد، در حالی که در آزمایش‌های غیرمخرب که در حقیقت یک آزمایش درجاست، روسازی بدون هرگونه دست زدن یا تغییر دادن شرایط مصالح ارزیابی می‌شود.
 ۲. آزمایش‌های غیرمخرب نسبتاً سریع و کم هزینه بوده و اغلب به خاطر آن‌که در روند ترافیک کمتر اختلال ایجاد می‌کند، انجام آزمایش به سهولت امکان‌پذیر است. [۹]
- این پژوهش در نظر دارد با پیدا کردن همبستگی بین دو آزمایش مخرب خستگی و خمش سه نقطه با دستگاه آزمایش غیرمخرب PFWD نیاز به انجام آزمایش غیرمخرب را مرتفع ساخته و با انجام آزمایش غیرمخرب به جای آزمایش مخرب، هم هزینه انجام آزمایش را کاهش داده و هم روند کار را ساده‌تر کند. همچنین با مقایسه‌ی رفتار روسازی در دو قسمت با و بدون اثر خستگی (مسیر چرخ در معرض اثر خستگی بوده و خارج از مسیر چرخ بدون اثر خستگی خواهد بود)، ارائه برنامه ریزی مناسب برای تعمیر خرابی‌های خستگی خواهد بود.

¹ Structural

² Functional

³ Non Destructive Tests

۷-۱- فرض‌های تحقیق

قسمتی از روسازی که در مسیر چرخ‌ها قرار می‌گیرد نسبت به مسیر کناری خود، بیشتر تحت تاثیر بار ترافیکی بوده است و در نتیجه آن بیشتر دچار خستگی شده است و همچنین شرایط به گونه‌ای است که اگر از هر یک از قسمت‌های روسازی نمونه برداری شود، این نمونه‌ها همه از لحاظ شرایط فرسودگی، آب و هوا، طرح اختلاط، زیرسازی و روسازی کاملاً مشابه یکدیگر هستند و تنها تفاوت آن‌ها اثر ترافیک و در نتیجه‌ی آن اثر بارگذاری است. یعنی به بیان دیگر نمونه‌های مسیر الف در شکل (۴-۱)، تحت بار ترافیکی قرار می‌گیرند و نمونه‌های مسیر ب، خیلی کمتر تحت این بار هستند.

۸-۱- فرضیه‌های تحقیق

از جمله کاربردهای دستگاه PFWD می‌توان به ارزیابی سازه‌ای روسازی، تعیین افت و خیز و حوضچه افت و خیز، تعیین عمر باقی‌مانده روسازی، تعیین مدول الاستیسته لایه‌ها و کاربردهای تحقیقاتی دیگر اشاره نمود. اولین سوالی که در روند این تحقیق مطرح می‌شود این خواهد بود که نتایج و خروجی‌های آزمایش‌های PFWD، خستگی و خمش سه نقطه، در مسیری که زیر چرخ خودروها قرار می‌گیرد، چگونه تغییر می‌کند؟ آیا در اثر تراکم تدریجی آسفالت موجود در مسیر الف نسبت به مسیر ب که در شکل (۴-۱) نشان داده شده اند، مقادیر بهبود پیدا می‌کنند؟ به این صورت که عمر و پارامترهای خمشی نمونه‌های آسفالتی افزایش و افت و خیزها کاهش می‌یابند، یا این که در اثر خستگی و ترک‌های ریزی که بوجود می‌آید شرایط بدتر می‌شود؟ سوال دومی که مطرح می‌شود این خواهد بود که آیا می‌توان با مقایسه و تحلیل خروجی‌های دو آزمایش خمش و خستگی، همبستگی و ارتباط معناداری بین این دو آزمایش و PFWD پیدا کرد؟

۹-۱- معرفی فصول پایان نامه

در فصل اول این پژوهش به بیان مقدمه‌ای از موضوع و همچنین کلیات انجام این پایان نامه پرداخته شده است. فصل دوم مروری بر کارهای قبلی را در بر گرفته است. در فصل سوم اطلاعاتی در مورد روش انجام کار، معرفی آزمایش‌ها و همچنین نحوه‌ی جمع‌آوری داده‌ها ارائه شده است. در فصل چهارم نیز به بررسی نتایج آزمایش‌ها و همچنین بحث در مورد این نتایج پرداخته شده است و در نهایت در فصل پنجم نتایج این پژوهش و پیشنهاداتی برای ادامه کار را مورد بررسی قرار می‌دهد.

فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مقدمه

تغییر شکل و افت و خیزی که در سطح روسازی و تحت اثر بار چرخ وسیله نقلیه ایجاد می‌شود، باعث به وجود آمدن تنش‌ها و کرنش‌های کششی در زیر لایه‌ی آسفالتی خواهد شد. در صورتی که تنش‌ها و کرنش‌های کششی ناشی از تکرار بارگذاری در اثر عبور وسایل نقلیه، از تنش‌ها و کرنش‌های مجاز کششی در روسازی آسفالتی بیشتر شود، منجر به ایجاد ترک‌هایی در زیر لایه‌ی آسفالتی شده و در نهایت این ترک‌ها به سمت بالا حرکت کرده و در سطح روسازی نمایان خواهند شد. به عبارت دیگر، هنگامی که وسایل نقلیه از روی سازه‌ی روسازی عبور می‌کنند، بار ناشی از این عبور، تنش‌های به وجود آمده در بالا و پایین لایه روسازی به سرعت از حالت کشش به فشار و برعکس تغییر خواهند کرد. [۸] در نهایت این تکرار و تغییرات متوالی تنش‌های کششی و فشاری باعث ایجاد ترک‌های خستگی خواهند شد.

دستگاه سنجش فرو رفتگی ناشی از ضربه در سال ۱۹۶۳ توسط Bretonniere فرانسوی ساخته شد و در نهایت توسط مهندسان دانمارکی و سوئدی تکامل یافته است. امروزه استفاده از این روش گسترش پیدا کرده و به عنوان یک روش استاندارد استفاده می‌شود. [۱۱]

اولین دستگاه FWD توسط وزارت راه و ترابری در سال ۱۳۸۲ وارد ایران شد و به عنوان ابزاری غیرمخرب در جهت ارزیابی سازه‌های روسازی راه و فرودگاه‌ها به کار گرفته شد. [۸] امروزه استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب روسازی در جهان رو به گسترش است، سرعت بالا و دقت زیاد از جمله دلایل و نقاط قوت آزمایش‌های غیرمخرب می‌باشد. مکانیزم کار دستگاه LWD که نام دیگر آن PFWD است، شبیه به دستگاه FWD می‌باشد. [۱۲]

در ادامه این فصل به بررسی کارهایی که پیرامون دستگاه PFWD، آزمایش‌های خستگی سه نقطه انجام شده پرداخته می‌شود.

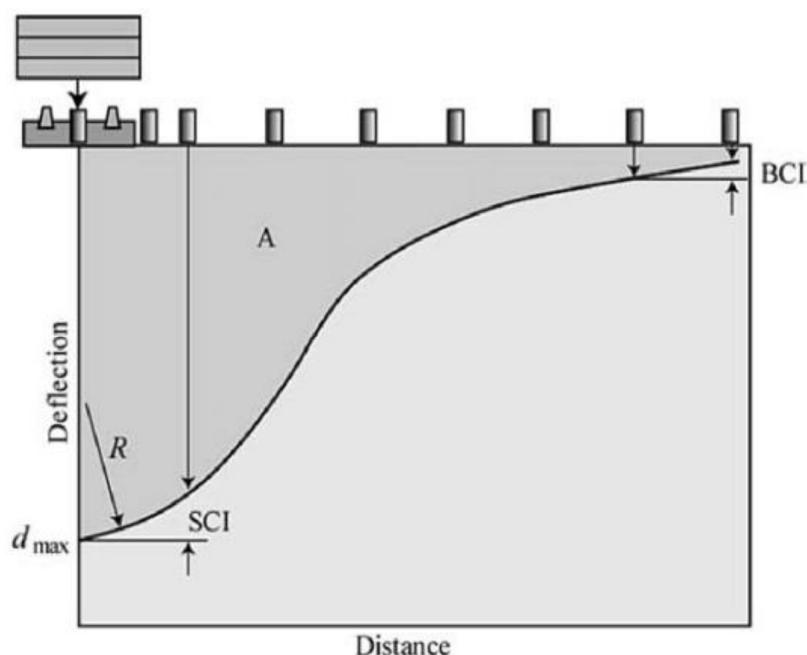
۲-۲- دستگاه آزمایش PFWD و مطالعات قبلی پیرامون آن

در گذشته و در مدت زیادی، ظرفیت باربری روسازی‌ها توسط تیر بنکلمن تعیین می‌شد. این روش بسیار زمان‌بر و دقت کمی داشته است. سرانجام در سال ۱۹۶۸ میلادی اولین دستگاه FWD به بازار عرضه شد. این دستگاه توسط S.Bretonniere اختراع شد و به منظور تعیین ظرفیت سازه‌ای روسازی‌ها، توسط محققین دانمارکی و سوئدی به کار گرفته شد. امروزه با بهره‌گیری از مدل‌های متنوع دستگاه‌های FWD، بارگذاری‌های مختلف با طول موج‌های متغیر را می‌توان ایجاد و به سازه‌ی روسازی اعمال نمود. ساختار این دستگاه به گونه‌ای است که سیستم ضربه‌گیری که وزنه با آن برخورد می‌کند، بر اساس اندازه‌ی وزنه تغییر می‌کند، تا این که ضربه با بار با موج سینوسی یا نیمه سینوسی تولید شود. این ضربه با یک صفحه بارگذاری منتقل شده و با استفاده از یک تبدیل کننده‌ی کرنشی مقدار بار وارده را اندازه‌گیری خواهد کرد. افت و خیزها با استفاده از تعدادی تبدیل کننده‌ی سرعت^۱ اندازه‌گیری می‌شوند. یکی از تبدیل کننده‌ها در مرکز صفحه بارگذاری قرار داده شده است و سایر آن‌ها معمولاً در فواصل مختلف از یکدیگر قرار می‌گیرند.

۲-۲-۱- تحقیق قربانی و همکاران

در این تحقیق سازه روسازی با استفاده از پارامترهای حاصل از کاسه انحنای افت و خیز ارزیابی شده است. با استفاده از دستگاه FWD تنش‌ی معادل بار محور استاندارد به روسازی اعمال شده و افت و خیز ناشی از آن در امتداد محور راه اندازه‌گیری می‌شود. داده‌های افت و خیز به دست آمده از دستگاه FWD را می‌توان برای ارزیابی اولیه سازه‌ی روسازی و لایه‌های آن مورد استفاده قرار داد. با توجه به شکل (۱-۲) می‌توان پارامترهای مختلفی از قبیل D, SCI, BDI, BCI و AREA را از کاسه انحنا استخراج کرد.

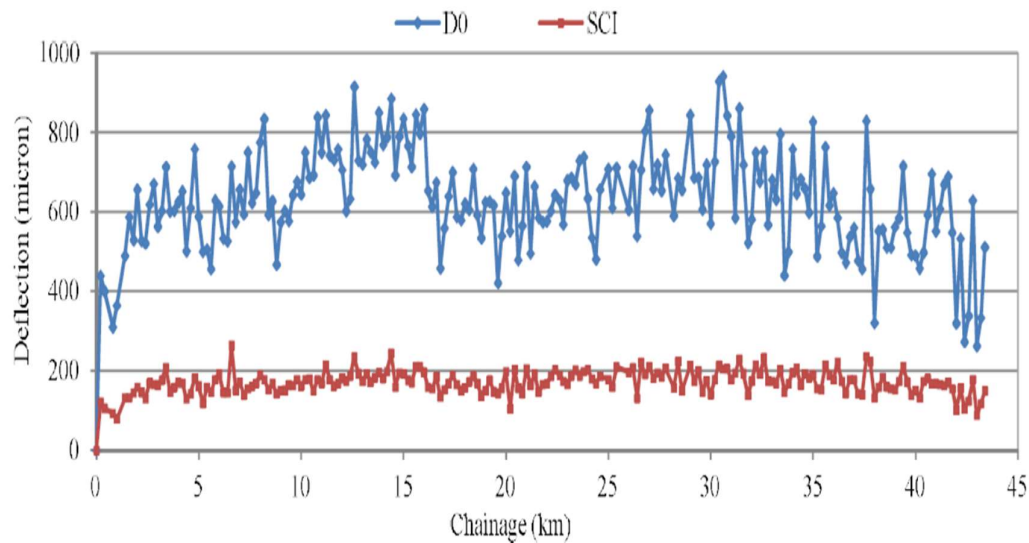
¹ Velocity Transducer (Geophone)



شکل (۲-۱) پارامترهای کاسه انحنای [۱۱]

پارامتر SCI، افت و خیز در بخش ابتدایی کاسه انحنای را نشان می‌دهد. این پارامتر سختی لایه‌های بالای روسازی تا ضخامت ۲۰ سانتی متر را بیان می‌کند. این پارامتر از تفاضل افت و خیز ژئوفون مرکزی و ژئوفون واقع در ۲۰۰ میلی‌متری از مرکز بارگذاری به دست خواهد آمد. با رسم نمودار SCI در طول مسیر می‌توان وضعیت سازه‌ای لایه آسفالتی را مورد ارزیابی قرار داد. مقدار زیاد این پارامتر در مقایسه با افت و خیز ژئوفون مرکزی، ضعف لایه آسفالتی را نشان می‌دهد.

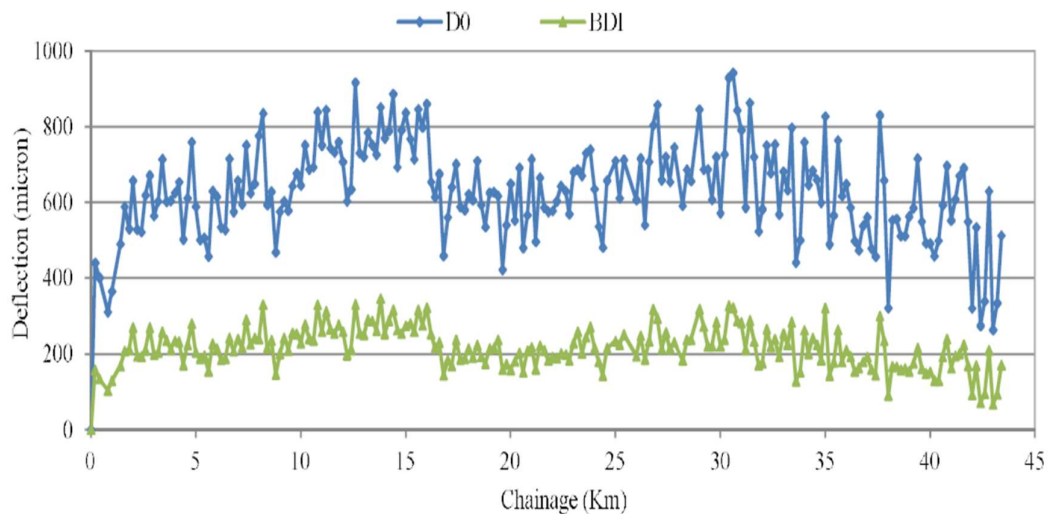
شکل (۲-۲) نمودار افت و خیز ژئوفون مرکزی به همراه پارامتر SCI را ارائه می‌کند. با توجه به مقادیر افت و خیز ژئوفون مرکزی میانگین افت و خیز ۶۳ میکرون خواهد بود، بنابراین این روسازی از نظر سازه‌ای ضعیف در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که از نمودارهای شکل (۲-۲) مشخص است، رفتار نمودار SCI شباهتی به نمودار افت و خیز ژئوفون مرکزی ندارد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که لایه آسفالتی دلیل ضعف سازه‌ای روسازی نخواهد بود.



شکل (۲-۲) نمودار پارامتر SCI و افت و خیز ژئوفون مرکزی [۱۲]

پارامتر BDI، وضعیت سازه‌ای لایه اساس را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این پارامتر از اختلاف افت و خیزهای ایجاد شده در زیر ژئوفون‌های واقع در ۳۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متری از ژئوفون واقع در مرکز بارگذاری تعیین می‌شود. بنابراین با رسم نمودار BDI در طول مسیر و مقایسه آن با افت و خیز ژئوفون مرکزی می‌توان لایه اساس را از نظر سازه‌ای مورد ارزیابی قرار داد.

شکل (۳-۲) نمودارهای افت و خیز ژئوفون مرکزی و پارامتر BDI را ارائه می‌کند. با توجه به این که نمودار BDI مطابقت بیشتری با نمودار افت و خیز ژئوفون مرکزی دارد، می‌توان دلیل ضعف سازه‌ی روسازی را در لایه اساس و غیر چسپنده جستجو کرد. طبق نتایج فوق می‌توان دریافت که با تحلیل درست پارامترهای حاصل از کاسه انحنای دستگاه FWD، اطلاعات مفیدی از وضعیت سازه‌ی روسازی به دست آورد. بنابر نتایج فوق می‌توان با استفاده از یک آزمایش غیر مخرب، متوجه وجود خرابی در لایه‌های روسازی شد و همچنین این که عامل این خرابی را در کدام یک از لایه‌ها می‌توان جستجو کرد و در نهایت برنامه‌ریزی مناسبی برای تعمیر و نگهداری روسازی راه ارائه کرد.



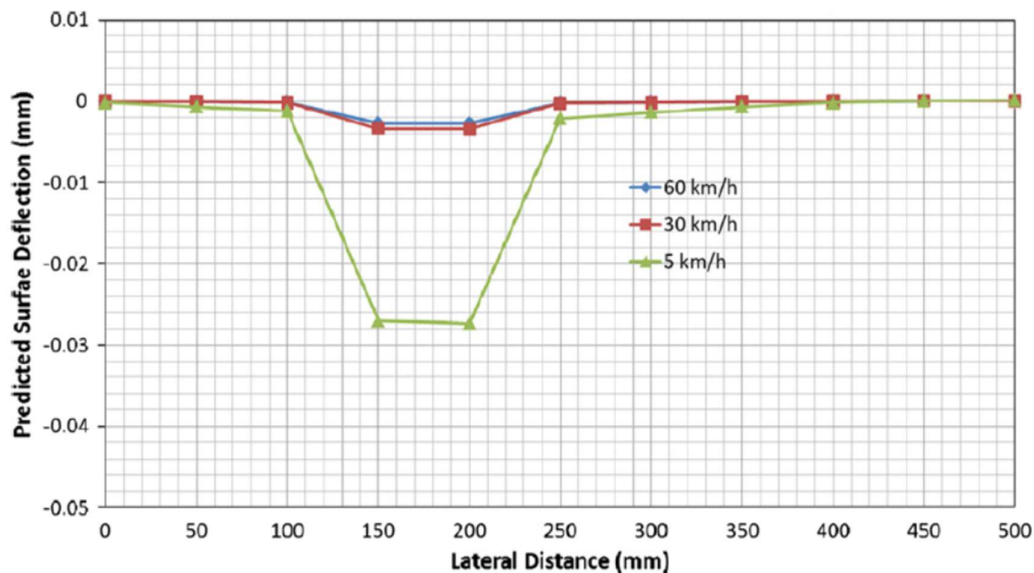
شکل (۳-۲) نمودار پارامتر BDI و افت و خیز ژئوفون مرکزی [۱۲]

۲-۲-۲- تحقیق Suo Zhi و همکاران

این مطالعه به بررسی تغییر شکل‌های افقی یا افت و خیز روسازی تحت عوامل مختلف با استفاده از شبیه سازی سازه روسازی در نرم افزار المان محدود می‌پردازد. با توجه به مدل‌های خرابی خستگی و آنالیزهای المان محدود مقاومت در برابر ترک‌های خستگی در لایه رویه روسازی مورد بررسی قرار گرفت. در حالت کلی اگر ابعاد مش‌بندی المان محدود به اندازه کافی کوچک باشد، اجازه می‌دهد تا جزئیات بیشتری از روسازی آنالیز شود، از طرفی کوچک‌تر بودن ابعاد مش‌بندی تعداد المان‌ها را افزایش داده و در نتیجه باعث افزایش زمان ذخیره اطلاعات و محاسبات خواهد شد. شرایط مرزی در مدل المان محدود تأثیر قابل توجهی در پیش‌بینی پاسخ سازه روسازی خواهد داشت، بنابراین لازم است تا شرایط مرزی برای روسازی در نظر گرفته شود. قیر، لایه رویه در دما و سطح بارهای متفاوت به عنوان مواد با ویسکوالاستیک غیر خطی مدل شده و سنگدانه‌ها، زیر اساس و خاک بستر به عنوان مواد الاستیک خطی مدل سازی شده‌اند. با کمک آنالیز المان محدود می‌توان بارهای ترافیکی را در سرعت‌های مختلف برای وسیله نقلیه شبیه سازی کرد. مطالعات نشان می‌دهند که بارهای استاتیکی خرابی بیشتری نسبت

به بارهای متحرک در روسازی ایجاد می‌کنند. [۱۵]

شکل (۴-۲) پاسخ روسازی شبیه سازی شده با استفاده از آنالیز المان محدود تحت بارگذاری با سرعت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده در شکل مشخص می‌شود، بیشترین افت و خیز روسازی تحت بار با سرعت کمتر اتفاق افتاده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین خرابی نیز تحت اثر این افت و خیز اتفاق می‌افتد.



شکل (۴-۲) تأثیر سرعت بارگذاری بر افت و خیز روسازی [۱۶]

۳-۲-۲- تحقیق Kimio و همکاران

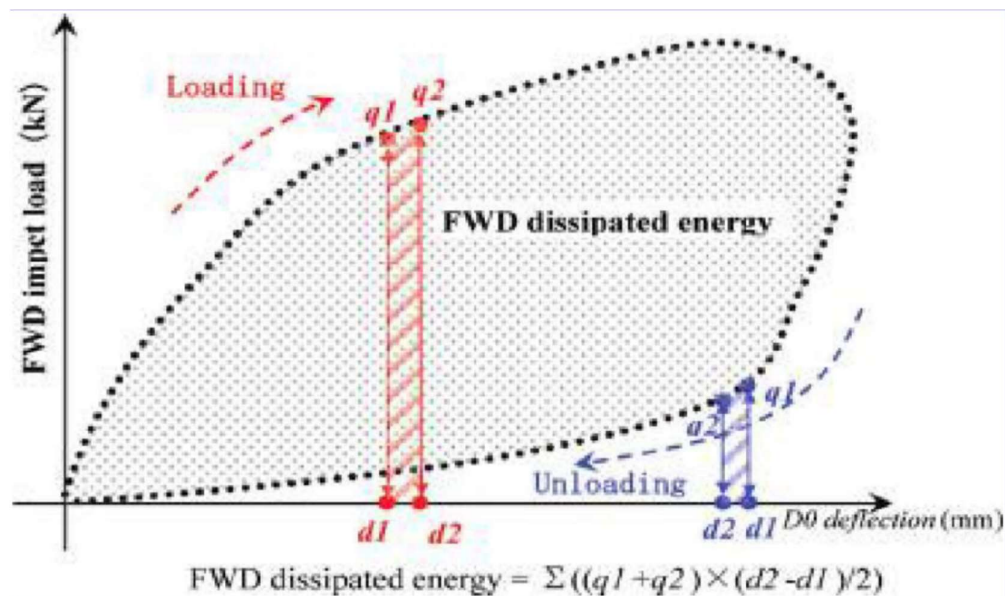
هدف این مطالعه تعیین رابطه‌ی بین تغییرات کار تلف شده^۱ FWD و خرابی خستگی، برای زمان سنجی ایجاد ترک‌های خستگی است. کار تلف شده FWD با استفاده از نمودار حلقه‌ی پسماند^۲ نیرو-تغییر شکل و با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده در شکل (۵-۲) محاسبه می‌شود.

¹ Dissipated Work

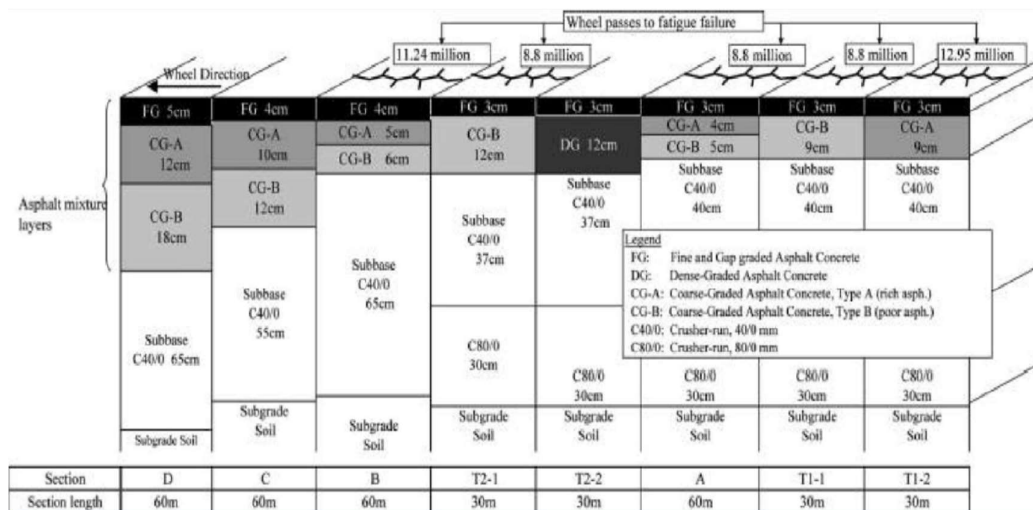
² Hysteresis Loop

بر اساس تحقیقات انجام شده، ارتباط نزدیکی بین خرابی روسازی و شکست خستگی روسازی وجود دارد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که کار تلف شده نیز رابطه‌ی نزدیکی با خرابی خستگی در روسازی داشته باشد. [۱۷ و ۱۸]

در این تحقیق از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷ به طور پیوسته با استفاده از دستگاه FWD، افت و خیز در روسازی یک بزرگراه مخصوص که با هشت نوع لایه‌ی روسازی با شرایط مختلف ساخته شده، اندازه‌گیری و ثبت شده است. ساختار و نوع لایه‌های استفاده شده در قطعات مختلف در روسازی این مسیر در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص شده است، در ۵ عدد از روسازی‌ها در طول فرآیند تحقیق، ترک‌های خستگی ظاهر شده که هر کدام پس از عبور تعداد معینی بار وسایل نقلیه اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که تعداد وسایل نقلیه عبوری از روی روسازی نیز در این مدت برداشت و ثبت شده است.



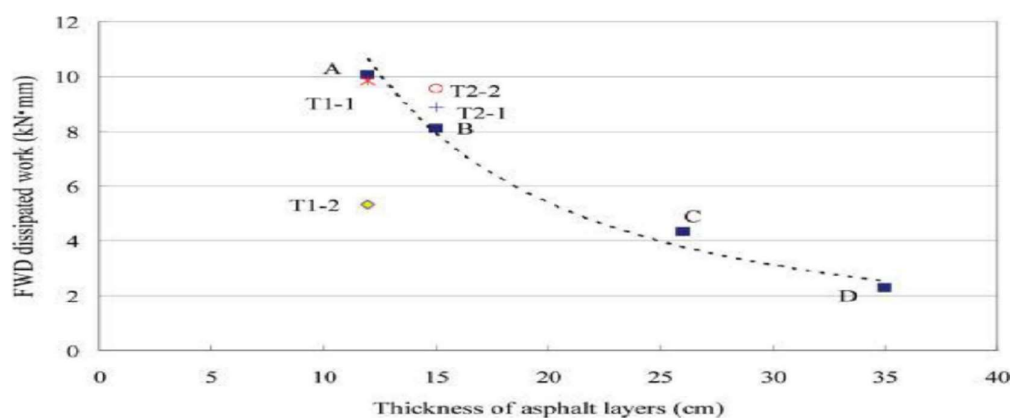
شکل (۲-۵) روش محاسبه‌ی کار تلف شده [۱۹]



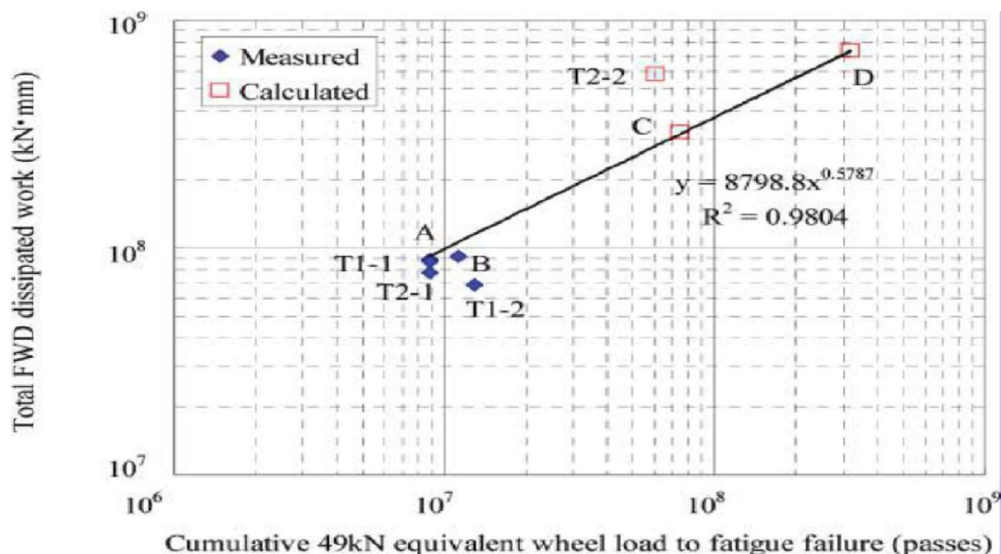
شکل (۲-۶) ساختار روسازی استفاده شده در تحقیق [۱۹]

شکل (۲-۷) رابطه‌ی بین کار تلف شده FWD و ضخامت لایه روسازی را نشان می‌دهد. طبق نمودار ارائه شده در این شکل، با افزایش ضخامت لایه آسفالتی، کار تلف شده کاهش می‌یابد.

شکل (۲-۸) نتیجه رگرسیون خطی بین کل کار تلف شده و تعداد باری که باعث ایجاد ترک‌های خستگی می‌شود را نشان می‌دهد. طبق نتایج این رگرسیون، می‌توان نتیجه گرفت که کار تلف شده FWD می‌تواند شاخص مفیدی برای پیش‌بینی خرابی خستگی در روسازی باشد.



شکل (۲-۷) رابطه‌ی بین کار تلف شده FWD و ضخامت لایه آسفالتی [۱۹]



شکل (۸-۲) رگرسیون خطی بین کار تلف شده FWD و تعداد بار منجر به شکست خستگی [۱۹]

۳-۲- آزمایش خستگی

عمر خستگی در روسازی‌های آسفالتی مستقیماً با خواص مختلف مخلوط آسفالتی ارتباط دارد. پیچیدگی ریزساختار^۱ در مخلوط آسفالتی به خصوصیات قیر و مصالح سنگی، دانه‌بندی، چسپندگی بین بین قیر و مصالح سنگی، توزیع فضاهای خالی و اتصال بین این فضاها مرتبط است. بنابراین خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی بسیار پیچیده و به سختی قابل پیش‌بینی است.

در مطالعه‌ی رفتار خستگی و تعیین عمر خستگی نمونه‌های آزمایشگاهی سه نگرش به طور معمول مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از: نگرش کلاسیک، نگرش بر پایه مکانیک شکست و نگرش انرژی. در ادامه هر یک از این نگرش‌های تعیین رفتار خستگی و نحوه‌ی تعیین معیار گسیختگی در روش‌های مختلف، به طور خلاصه تعریف می‌شوند.

¹ Micro Structure

۲-۳-۱- نگرش کلاسیک در تعیین عمر خستگی

در این نگرش، تنش‌ها و کرنش‌ها در زیر لایه آسفالتی را با عمر خستگی مرتبط می‌سازند. این نگرش به دلیل سادگی، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نقطه ضعف‌های مربوط به این نگرش این است که هیچ ابزاری برای شناسایی و درک مکانیزم و نحوه‌ی شکل‌گیری خرابی‌های تجمعی ناشی از تکرار بارگذاری وجود ندارد. برای رفع این نقطه ضعف‌ها، این روش اصلاحاتی در این رابطه مثل در نظر گرفتن سختی مخلوط آسفالتی جهت در نظر گرفتن دما و فرکانس بارگذاری اعمال شده است. در ادامه به متداول‌ترین مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی با استفاده از نگرش کلاسیک اشاره خواهد شد. یکی از متداول‌ترین مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی از طریق مرتبط کردن عمر خستگی با تنش و کرنش اولیه اعمال شده در آزمایش خستگی به دست می‌آید. نقطه ضعف این مدل‌ها در نظر نگرفتن تکامل تدریجی و نحوه‌ی تشکیل خرابی‌ها است. بنابراین تنها تحت شرایط خاص بارگذاری، قابل استفاده می‌باشند. [۱۲۰]

$$N_f = K_1 \varepsilon^{-K_2} \quad (1-2)$$

N_f : عمر خستگی

K_1 و K_2 : ضرایبی که به وسیله‌ی آزمایش تعیین می‌شوند

ε : کرنش کششی اولیه

رابطه‌ی (۱-۲) یکی از مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی با نگرش کلاسیک می‌باشد. با این وجود ضرایب K_1 و K_2 وابسته به نوع مخلوط آسفالتی، مشخصات اجزای تشکیل‌دهنده و نوع مواد چسپاننده ی آن است و تنها برای یک مخلوط آسفالتی مشخص قابل استفاده است. روابط پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌ی آزمایشی باید تأثیر خصوصیات حجمی مخلوط، دما، زمان بارگذاری، پیرشدگی و خودترمیمی را بر عمر خستگی در نظر بگیرد. به این دلیل که بتن آسفالتی یک ماده ویسکوالاستیک تحت دمای متوسط و فرکانس‌های بارگذاری است، در نظر گرفتن سختی مخلوط آسفالتی در مدل پیش‌بینی عمر

خستگی، حداقل به در نظر گرفتن جزئی تأثیر دما و فرکانس بارگذاری کمک می‌کند. بنابراین پاسخ خستگی یک مخلوط آسفالتی به وارد آمدن بارهای سیکلی و تکراری در تست‌های آزمایشگاهی، ممکن است با در نظر گرفتن یک فرم عمومی‌تر مناسب‌تر باشد، همان‌گونه که به وسیله‌ی Monismith et al در سال ۱۹۹۵، این رابطه‌ی (۱-۲) به صورت رابطه‌ی زیر اصلاح شد. [۲۱]

$$N_f = a \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \left(\frac{1}{S_0} \right)^c \quad \text{یا} \quad N_f = a \left(\frac{1}{\sigma_0} \right)^b \left(\frac{1}{S_0} \right)^c \quad (۲-۲)$$

N_f : تعداد سیکل بارگذاری تا لحظه شروع ترک

a ، b و c : ضرایبی که از آزمایش به دست می‌آید

σ_0 و ε_0 : تنش و کرنش کششی اولیه

S_0 : سختی خمشی اولیه

بزرگ‌ترین مؤسساتی که مدل‌های خستگی را ارائه و توسعه داده‌اند شامل مؤسسه‌ی آسفالت، شل و دانشگاه کالیفرنیا در برکلی می‌باشد. در جدول (۱-۲) این مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی به طور خلاصه ارائه شده است.

جدول (۱-۲) مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی در مخلوط‌های آسفالتی

مدل‌ها	a	b	c
مؤسسه آسفالت	۰,۰۷۹۶	۳,۲۹۱	۰,۸۵۴
مدل شل	۰,۰۶۸۵	۵,۶۷۱	۲,۳۶۳
مدل ایندیانا	۰,۱۰۰۱	۳,۵۶۵	۱,۴۷۴۷

تأثیر همزمان درصد قیر و فضای خالی در مخلوط آسفالتی به صورت درصد فضای خالی که با قیر پر می‌شود، همچنین به عنوان یک پارامتر مهم برای پیش‌بینی عمر خستگی در نظر گرفته می‌شود. مدل اصلاح شده‌ی مؤسسه‌ی آسفالت، همان‌گونه که در رابطه‌ی (۲-۳) نشان داده شده است، تأثیر درصد قیر و مقدار فضای خالی را در نظر می‌گیرد.

$$N_f = 0.07958 \times 10^M (\varepsilon_0)^{-3.291} |E^*|^{-0.854} \quad (3-2)$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_b + V_a} - 0.69 \right) \quad (4-2)$$

V_b : حجم قیر

V_a : حجم فضای خالی

$|E^*|$: مدول دینامیکی

در نهایت برنامه‌ی تحقیقات استراتژیک بزرگ راه‌های آمریکا (SHRP)، مدل عمومی آزمایشگاهی پیش‌بینی خستگی را به صورت رابطه‌ی (۵-۲) ارائه نمود.

$$N_f = 2.738 \times 10^5 e^{(0.077 \times VFB)} (\varepsilon_0)^{-3.624} S_0''^{-2.72} \quad (5-2)$$

VFB : فضایی که به وسیله قیر پر شده است

S_0'' : سختی خمشی اولیه در ۵۰ امین چرخه بارگذاری

۲-۳-۲- نگرش مکانیک شکست در تعیین عمر خستگی

در این نگرش، عمر خستگی بر اساس مطالعه‌ی سه مرحله‌ی شروع ترک، پیشرفت ترک و در نهایت شکست نمونه بیان می‌شود. در نگرش مکانیک شکست، خستگی به صورت یک فرآیند خرابی در نظر گرفته می‌شود که به صورت متناوب به وقوع می‌پیوندد. تجمع خرابی از قانون انتشار ترک، یعنی رشد ترک‌ها از سطح اولیه تا رسیدن ترک‌ها به میزان بحرانی از رابطه‌ی (۶-۲) پیروی می‌کند. [۲۲]

$$\frac{d_c}{d_n} = A K_C^n \quad (6-2)$$

$\frac{d_c}{d_n}$: نرخ انتشار ترک

K_C : ضریب شدت تنش بر حسب $\frac{N}{mm^{1.5}}$

A و n : ضرایب ثابت مربوط به ماده

با استفاده از قانون انتشار ترک و با دانستن مقادیر طول اولیه ترک (C_0)، طول بحرانی ترک

(C_f) و همچنین پارامترهای A، n و K_c عمر خستگی بر اساس رابطه‌ی (۷-۲) به دست می‌آید.

$$N_f = \int_{C_0}^{C_f} \frac{dC}{A K_c^n} \quad (7-2)$$

۲-۳-۳- نگرش انرژی در تعیین عمر خستگی

در این نگرش انرژی تلف شده به عنوان شاخص خرابی در لایه آسفالتی در نظر گرفته می‌شود.

در واقع به عنوان یک تفسیر نو، نگرش اتلاف انرژی برای بیان رفتار خستگی آسفالت به ویژه تعریف شکست به کار می‌رود. در این روش از نسبت تغییرات اتلاف انرژی جهت تعریف لحظه‌ی شکست نمونه استفاده می‌شود. برای مصالح الاستیک در حالتی که هیچ آسیبی ندیده است، در لحظه‌ای که بار برداشته می‌شود، سریعاً تمام کرنش ایجاد شده بر می‌گردد و نمودارهای تنش در برابر کرنش برای دو حالت بارگذاری و باربرداری بر هم منطبق خواهد شد و کل انرژی ورودی بر می‌گردد. بنابراین مصالح الاستیک کامل، دچار خرابی خستگی نخواهند شد. [۵]

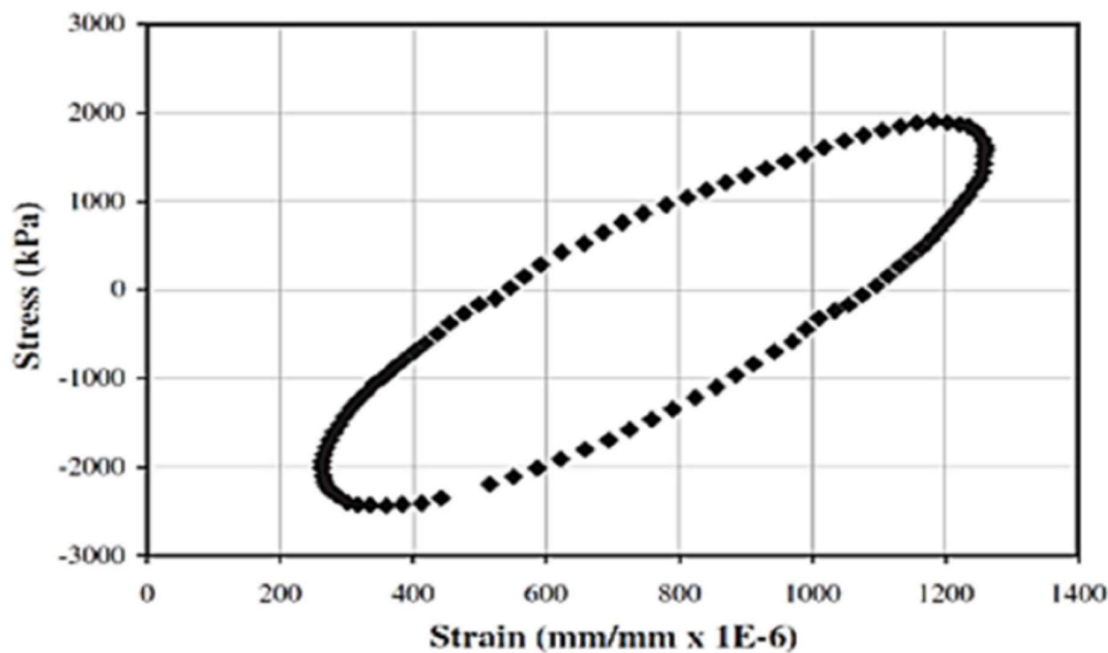
در صورتی که وقتی منحنی‌های تنش بر حسب کرنش برای بارگذاری و باربرداری بر هم منطبق

نباشند، اتلاف انرژی در مصالح ویسکوالاستیک به علت تأخیر زمانی ناشی از اختلاف زاویه فازی^۱ بین تنش و کرنش و نیز تولید گرما و خرابی در مصالح اتفاق می‌افتد. اختلاف بین انرژی ورودی به سیستم (مساحت زیر نمودار بارگذاری) و مقدار انرژی برگشتی (مساحت زیر نمودار باربرداری) به عنوان انرژی تلف شده در آن سیکل تعریف می‌شود. به عبارت ساده‌تر مساحت درون منحنی بسته^۲ تنش و کرنش مقدار انرژی تلف شده می‌باشد. شکل (۲-۹) نمودار تنش بر حسب کرنش را در بارگذاری و باربرداری نشان می‌دهد.

¹ Phase Angle

² Hysteresis Loop

کاربرد انرژی تلف شده برای بیان رفتار خستگی است. استفاده از انرژی تلف شده به طور غیر مستقیم پذیرفتن این اصل است که تمام انرژی ورودی به نمونه سبب خرابی نمی شود، بلکه تنها بخشی از کل انرژی تلف شده است که سبب خرابی در مصالح می گردد.



شکل (۹-۲) نمودار تنش در مقابل کرنش آزمایش خستگی خمشی [۲۳]

انرژی تلف شده در واحد حجم هر سیکل از طریق محاسبه‌ی سطح نمودار به دست می آید. انرژی تلف شده در واحد حجم هر سیکل از موج‌های تنش و کرنش که سینوسی است با رابطه‌ی (۸-۲) تعیین می گردد.

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \varphi_i \quad (۸-۲)$$

W_i : انرژی تلف شده در سیکل بارگذاری i ام

σ_i و ε_i : تنش و کرنش در سیکل بارگذاری i ام

φ_i : زاویه فاز بین تنش و کرنش در سیکل بارگذاری i ام

۲-۳-۴- تئوری روش‌های بر پایه انرژی تلف شده

آزمایش خستگی تیر خمشی توسط محققان زیادی برای بررسی عملکرد خستگی روسازی‌های آسفالتی استفاده شده است. روش‌های متعددی برای تحلیل گسیختگی خستگی و تعیین نقطه گسیختگی بر پایه‌ی معیار سختی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد. این روش‌ها معمولاً نتایج یکسانی به دست نمی‌دهد و بسته به معیار تعیین نقطه‌ی گسیختگی، متغیر است. [۲۴]

محققان زیادی در سراسر جهان از مفهوم انرژی تلف شده برای تعریف گسیختگی بهره می‌برند. رویکرد انرژی در سال ۱۹۷۲ توسط Van Dijk et al پیشنهاد شده است. به این ترتیب در این مطالعات به رابطه‌ای بین عمر خستگی و انرژی تلف شده تجمعی پی بردند. در مطالعه‌ی Van Dijk فرض کرد که اگر بارگذاری سینوسی در هر سیکل اعمال شود، در این صورت انرژی تلف شده می‌تواند به صورت رابطه‌ی زیر ارائه شود. بنابراین انرژی تلف شده تجمعی به صورت رابطه‌ی (۲-۹) بیان می‌شود. [۲۵]

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \varphi_i \quad (۲-۹)$$

$$W_n = \sum W_i \quad (۲-۱۰)$$

$$W_n = A(N_f)^z \quad (۲-۱۱)$$

N_f : عمر خستگی

W_n : انرژی تلف شده تجمعی برای گسیختگی

z و A : ضرایبی هستند که از رگرسیون به دست می‌آیند.

بنابراین از رابطه‌ی (۲-۱۱) می‌توان عمر خستگی را بر اساس کل انرژی تلف شده پیش‌بینی نمود. اهمیت این رابطه که توسط Van Dijk et al ارائه شده در این است که وابسته به نوع بارگذاری، دما و فرکانس بارگذاری نمی‌باشد و تنها به خواص مواد بستگی دارد.

مطالعات بعدی انجام شده روی خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نگرش انرژی به صورت

نسبت انرژی طبق رابطه‌ی (۱۲-۲) می‌باشد.

$$ER_n = n \frac{W_0}{W_n} \quad (12-2)$$

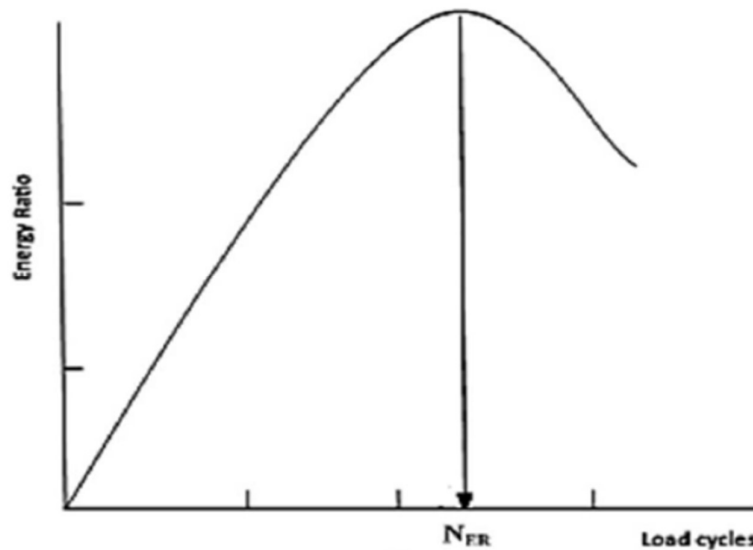
که در آن W_0 انرژی تلف شده اولیه و W_n انرژی تلف شده در سیکل n می‌باشد. در این مطالعه

استفاده از نسبت انرژی را برای تعیین عمر خستگی پیشنهاد کردند. در حالت تنش ثابت، میزان نیروی

وارد ثابت بوده و پس از شروع ترک، تنش در رأس ترک به سرعت افزایش می‌یابد. در این روش نمودار

نسبت انرژی بر حسب سیکل بارگذاری مانند شکل (۱۰-۲) رسم شده و نقطه‌ی ماکزیمم نسبت انرژی

به عنوان N_{ER} تعریف می‌شود.



شکل (۱۰-۲) نمودار نسبت انرژی در برابر سیکل بارگذاری در آزمایش خستگی

کاربردهای اخیر انرژی تلف شده در توضیح رفتار خستگی بر این فرض استوار است که تمام

انرژی تلف شده منجر به خرابی مصالح می‌گردد. ولی در واقعیت این چنین نیست و مقدار زیادی از

انرژی تلف شده در مصالح ویسکوالاستیک صرف گرما و کار مکانیکی روی مصالح می‌شود. برای مصالح

ویسکوالاستیک مانند آسفالت حتی اگر در مصالح هیچ خرابی ایجاد نشود، منحنی بسته تنش و کرنش تشکیل خواهد شد. بنابراین فقط قسمتی از کل انرژی تلف شده صرف ایجاد خرابی در مصالح خواهد شد و مابقی کل انرژی تلف شده مربوط به خاصیت ویسکوالاستیک مصالح و یا سایر عوامل مثل رفتار غیر خطی و تولید گرما می‌باشد. به منظور کمی‌سازی آسیب وارده به مصالح یا تغییر در پاسخ مصالح از یک سیکل به سیکل بعدی، بایستی تغییر در انرژی تلف شده در نظر گرفته شود، بنابراین این رویکرد توسط Carpenter et al اصلاح شده و نسبت انرژی تلف شده (DER^1) به صورت رابطه‌ی (۲-۱۳) تعریف شد. [۲۶]

$$DER_n = \frac{W_{n+1} - W_n}{W_n} \quad (۲-۱۳)$$

W_{n+1} : انرژی تلف شده در سیکل $n+1$

W_n : انرژی تلف شده در سیکل n

در نهایت این رابطه توسط Shen et al توسعه داده شد و نسبت تغییر انرژی تلف شده ($RDEC^2$) تعریف گردید. به این طریق انرژی تلف شده در اشکال دیگر نظیر گرما و خاصیت ویسکوالاستیک مصالح کنار گذاشته شد. نسبت تغییر انرژی تلف شده به صورت رابطه‌ی (۲-۱۴) محاسبه می‌شود. [۲۵]

$$RDEC_a = \frac{|W_b - W_a|}{(b - a) \cdot W_a} \quad (۲-۱۴)$$

$RDEC_a$: متوسط نسبت تغییر انرژی تلف شده در سیکل a در مقایسه با سیکل b

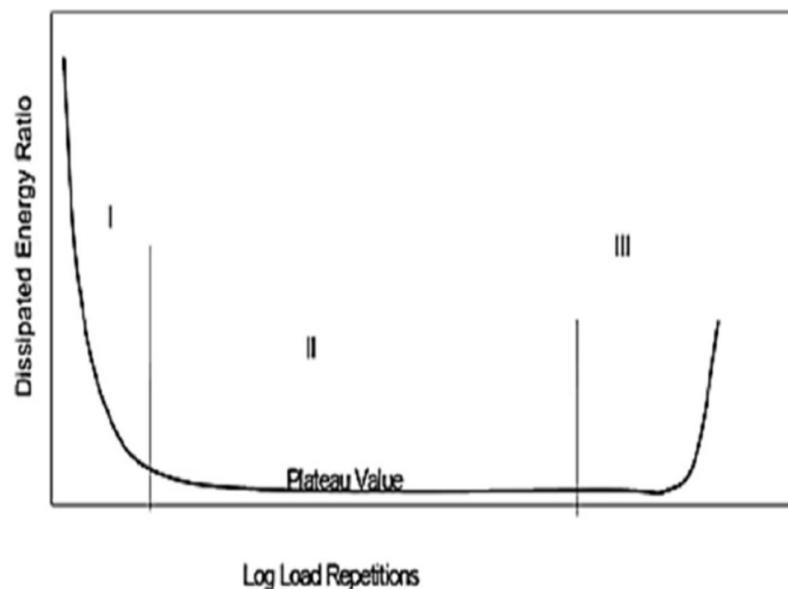
a و b : سیکل بارگذاری

W_b و W_a : انرژی تلف شده در سیکل a و b

¹ Dissipated Energy Ratio

² Ratio of Dissipated Energy Change

منحنی نسبت تغییر انرژی تلف شده در مقابل سیکل بارگذاری در شکل (۲-۱۱) ارائه شده است. این نمودار از سه مرحله تشکیل شده است. مرحله اول نشان دهنده‌ی جهت‌گیری مصالح نسبت به مقاومت در برابر اعمال بار وارده می‌باشد. مرحله دوم یا مرحله مقاومت در برابر خرابی، نشان دهنده‌ی دوره‌ی در برگیرنده درصد نسبتاً ثابتی از انرژی ورودی تبدیل شده به خرابی است. در مرحله سوم *RDEC* افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر نمونه توانایی مقاومت در برابر خرابی را از دست می‌دهد. نقطه گسیختگی (N_f) به عنوان تعداد سیکل بارگذاری که تغییر نسبت انرژی تلف شده به سرعت شروع به افزایش می‌کند، تعریف می‌شود.



شکل (۲-۱۱) منحنی تغییر انرژی تلف شده در برابر سیکل بارگذاری

۲-۳-۵- روش‌های بر پایه کاهش سختی

این مفهوم کاهش نرخ سختی را در طول زمان بارگذاری به عنوان مشخصه بارز گسیختگی خستگی به کار می‌برد. در ادامه دو روش پر کاربردتر این مفهوم شرح داده می‌شود.

۲-۳-۵-۱- روش کاهش نرخ سختی خمشی Rowe and Bouldin

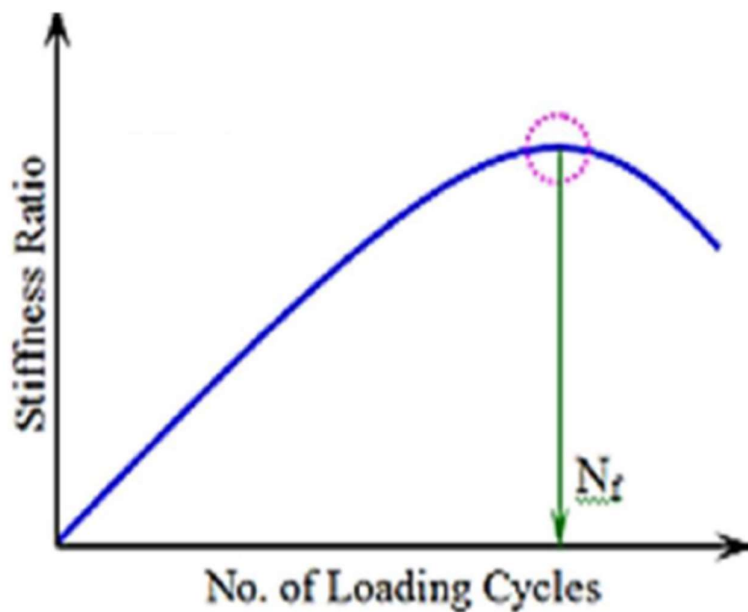
در این روش مطابق شکل (۲-۱۲) تعداد سیکل متناظر با حداکثر مقدار نسبت سختی تعریف شده طبق رابطه ی (۲-۱۵)، نقطه گسیختگی خواهد بود. به عبارت دیگر با تکرار هر سیکل بارگذاری سختی خمشی نمونه کم شده و این کاهش تا آنجا ادامه پیدا می کند که نمونه بعد از آن قادر به مقاومت در برابر تنش های کششی و تغییر شکل های خمشی نیست. این نقطه همان نقطه ی ماکزیمم نمودار شکل (۲-۱۲) خواهد بود.

$$SR = N_i \times S_i \quad (2-15)$$

SR : نسبت سختی

N_i : i امین سیکل بارگذاری

S_i : سختی خمشی در سیکل i ام



شکل (۲-۱۲) نمودار نسبت سختی خمشی در برابر تعداد سیکل بارگذاری

این روش، تکامل یافته روش Rowe and Bouldin می‌باشد. نسبت سختی در روش Rowe and Bouldin با تقسیم بر S_0 به صورت نرمال در می‌آید. بدین ترتیب یک نسب سختی جدید طبق رابطه‌ی (۱۶-۲) حاصل می‌شود :

$$SR = \frac{N_i \times S_i}{S_0} \quad (۱۶-۲)$$

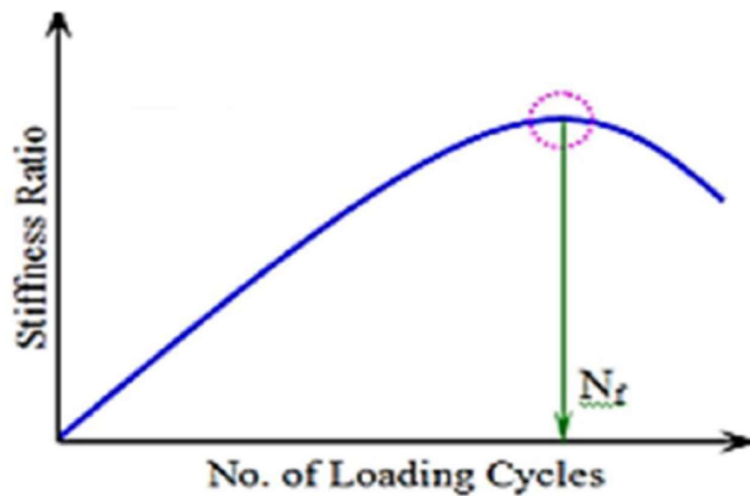
R : نسبت انرژی

N_i : سیکل بارگذاری

S_i : سختی در سیکل i ام

S_0 : سختی خمشی اولیه در ۵۰ امین سیکل بارگذاری

با رسم نمودار سختی نرمال شده در مقابل تعداد سیکل بارگذاری، تعداد سیکل متناظر با نقطه حداکثر منحنی حاصل عمر خستگی می‌باشد. شکل (۱۳-۲) نحوه‌ی تعیین نقطه‌ی گسیختگی با این روش را نشان می‌دهد.

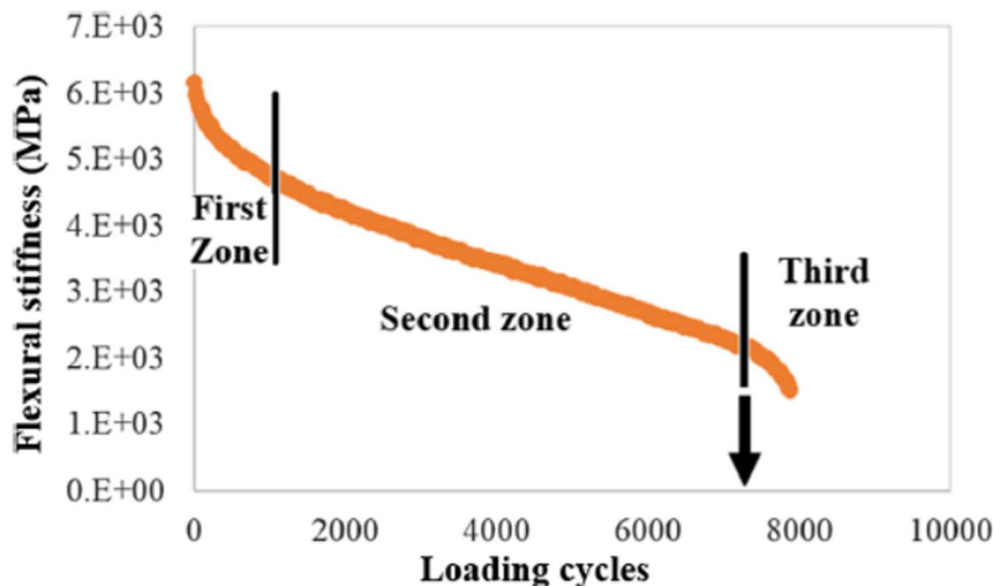


شکل (۱۳-۲) تعیین نقطه گسیختگی با روش ASU

¹ Arizona State University

۳-۵-۳-۲- روش کاهش ۵۰ درصدی سختی نسبت به سختی اولیه

در این روش نمودار سختی بر حسب سیکل بارگذاری در آزمایش خستگی مطابق شکل (۲-۱۴) رسم شده و سختی در ۵۰ امین سیکل بارگذاری به عنوان منحنی اولیه تعریف می‌شود و در نهایت سیکل بارگذاری که به ازای آن سختی نمونه به ۵۰ درصد سختی اولیه رسیده باشد، به عنوان عمر خستگی نمونه N_f در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲-۱۴) مشخص شده است نمودار سختی خمشی به سه ناحیه تقسیم بندی می‌شود. در ناحیه اول کاهش سریع سختی خمشی اتفاق افتاده و نمونه ده درصد عمر خستگی خود را تجربه می‌کند، در ناحیه دوم کاهش سختی خمشی به صورت خطی بوده و ترک‌های مویی در حال تشکیل هستند و در نهایت در ناحیه سوم کاهش سریع سختی خمشی اتفاق افتاده و نمونه به ۹۰ درصد عمر خستگی خود خواهد رسید و ترک‌های مویی به ترک‌های بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند. [۲۸]



شکل (۲-۱۴) نمودار سختی خمشی بر حسب سیکل بارگذاری

۲-۴- مطالعات قبلی پیرامون آزمایش خستگی

۲-۴-۱- تحقیق U.A Mannan و همکاران

این مطالعه در سال ۲۰۱۵ میلادی انجام شد. در این مطالعه تأثیر آسفالت بازیافتی^۱، فرکانس بارگذاری و سطح کرنش را بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی و قیر استخراج شده از آن را ارزیابی قرار کرده است. همچنین رابطه‌ای برای عمر خستگی مخلوط آسفالتی و قیر استخراج شده از آن را ارائه می‌کند. اهداف اصلی این تحقیق عبارت‌اند از:

۱- ارزیابی تأثیر آسفالت بازیافتی بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی و قیر حاصل از آن

۲- آزمایش و بررسی تأثیر تغییرات فرکانس بارگذاری روی عمر خستگی مخلوط آسفالتی و قیر خارج شده از آن

۳- بررسی تأثیر سطح کرنش بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی دارای آسفالت بازیافتی و قیر خارج شده از آن

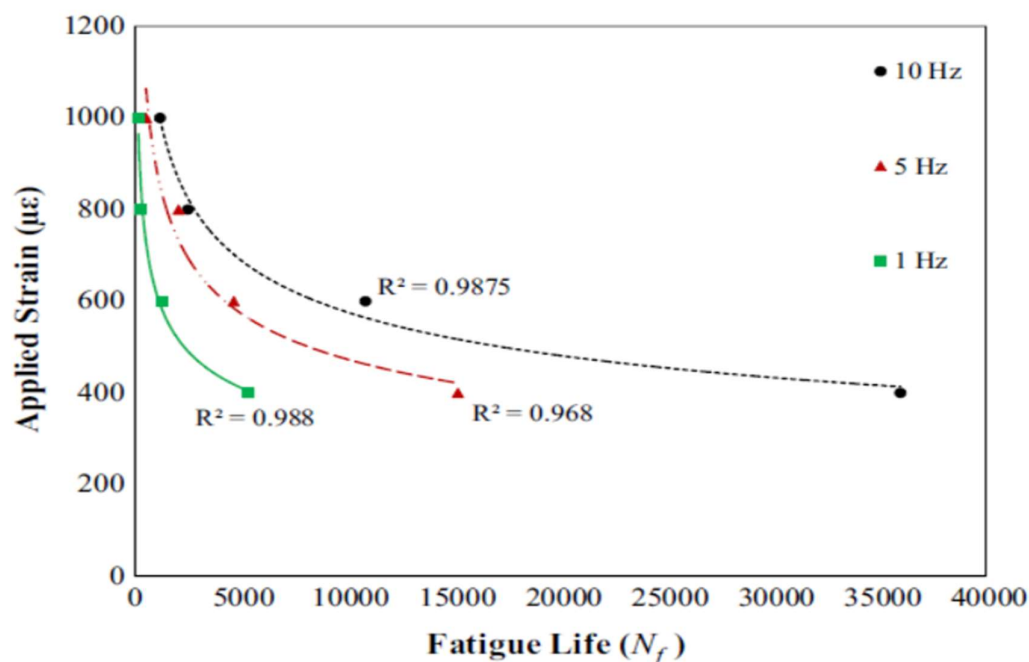
۴- ارائه رابطه‌ی بین عمر خستگی مخلوط آسفالتی و قیر خارج شده از آن

به منظور برآورده کردن اهداف فوق، نتایج آزمایش جاروب زمانی^۲ برای دو نوع قیر خارج شده از مخلوط‌های آسفالتی با نتایج آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای که بر روی نمونه‌های تیری شکل مخلوط آسفالتی، در فرکانس‌های بارگذاری و سطوح کرنش مختلف بررسی و مقایسه می‌شود. همه‌ی آزمایش‌ها در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده تا تأثیر تغییرات دما بر نتایج عمر خستگی حذف شود. دو نوع مخلوط آسفالتی، یکی شامل ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی و دیگری بدون آسفالت بازیافتی آماده شده است. در این تحقیق قیر با استفاده از استاندارد ASTM D2172 از مخلوط آسفالتی بیرون کشیده شده است.

¹ Recycle Asphalt Pavement (RAP)

² Time Sweep Test

آزمایش خستگی در شرایط کنترل کرنش و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده و معیار تعیین نقطه‌ی شکست نمونه نیز بر اساس روش کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی نسبت به سختی خمشی اولیه خواهد بود. نمونه‌ها تحت چهار سطح کرنش $400\mu\epsilon$ ، $600\mu\epsilon$ ، $800\mu\epsilon$ و $1000\mu\epsilon$ و سه فرکانس ۱، ۵ و ۱۰ هرتز قرار گرفته‌اند. شکل (۲-۱۵) در این تحقیق، نتایج عمر خستگی مخلوط‌های دارای ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی را در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. طبق نمودار ارائه شده در شکل (۲-۱۵)، افزایش فرکانس بارگذاری برای هر چهار سطح کرنش باعث افزایش عمر خستگی خواهد شد. برای مثال در سطح کرنش $400\mu\epsilon$ با کاهش فرکانس بارگذاری از ۱۰ به ۱ هرتز، عمر خستگی از ۳۶۰۰۱ به ۵۳۵۰ کاهش یافته است. [۲۹]

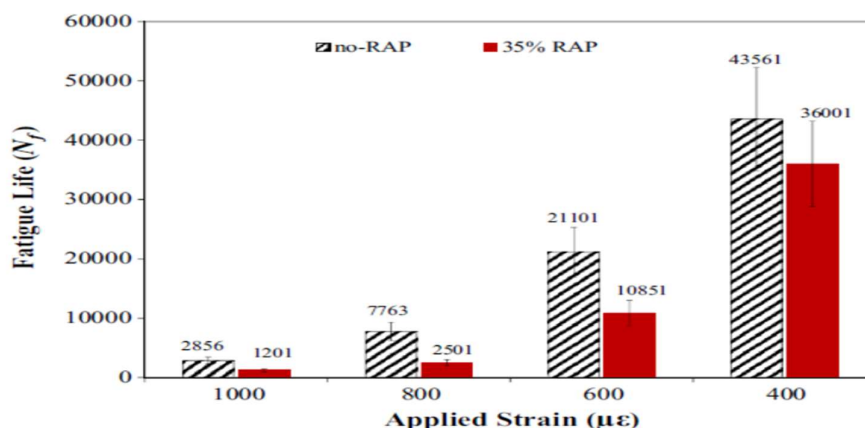


شکل (۲-۱۵) نتایج عمر خستگی برای مخلوط حاوی ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی [۲۹]

فرکانس بارگذاری بالا همانند سرعت بالاتر وسایل نقلیه در واقعیت است که منجر به افزایش سختی دینامیکی در سازه‌ی روسازی خواهد شد. افزایش سختی دینامیکی باعث کاهش کرنش کششی در روسازی شده و در نتیجه‌ی آن عمر خستگی افزایش پیدا می‌کند. با این وجود در سطوح کرنش

پایین تر این افزایش در عمر خستگی در مقایسه با سطوح کرنش بالا، کمتر خواهد بود. [۳۰]

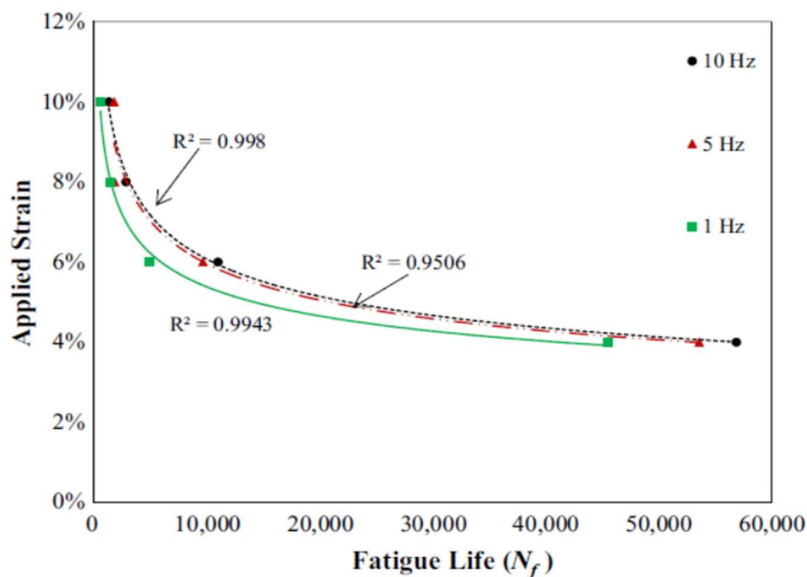
نمودار شکل (۲-۱۵) همچنین نشان می‌دهد که با افزایش سطح کرنش، عمر خستگی کاهش پیدا می‌کند. شکل (۲-۱۶) رفتار خستگی دو مخلوط آسفالتی که یکی دارای ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی و دیگری بدون آسفالت بازیافتی است را تحت بارگذاری خمشی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ۱۰ هرتز نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مخلوط‌های دارای ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی در سطح کرنش‌های مختلف دارای عمر خستگی کمتری نسبت به مخلوط‌های بدون آسفالت بازیافتی هستند. بنابراین مخلوط‌های دارای آسفالت بازیافتی مقاومت کمتری نسبت به مخلوط‌های بدون آسفالت بازیافتی، در برابر ترک‌های خستگی خواهند داشت.



شکل (۲-۱۶) مقایسه‌ی عمر خستگی مخلوط‌های دارای آسفالت بازیافتی و بدون آسفالت بازیافتی [۲۹]

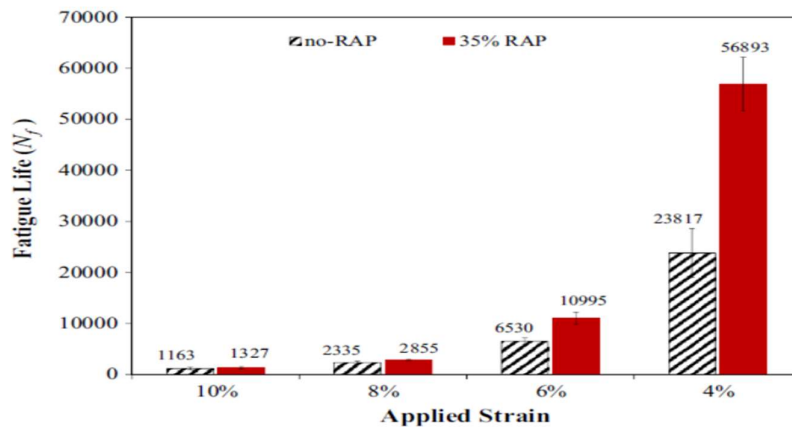
شکل (۲-۱۷) نتایج عمر خستگی قیر خارج شده از مخلوط‌های آسفالتی دارای ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی را نشان می‌دهد. طبق نمودارهای ارائه شده در شکل (۲-۹)، فرکانس بارگذاری بالاتر باعث افزایش عمر خستگی نمونه‌ی قیر خواهد شد. این به معنای کاهش خرابی‌های خستگی در اثر افزایش سرعت ترافیک خواهد بود. این شکل همچنین نشان می‌دهد که با افزایش سطح کرنش عمر خستگی قیر نیز همانند عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌یابد.

شکل (۲-۱۸) رفتار خستگی قیر خارج شده از مخلوط دارای آسفالت بازیافتی و مخلوط بدون آسفالت بازیافتی که با استفاده از آزمایش جاروب زمانی تعیین شده است، را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که عمر خستگی قیر استخراج شده از مخلوط آسفالتی دارای ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی، بیشتر از عمر خستگی قیر حاصل از مخلوط آسفالتی بدون آسفالت بازیافتی خواهد بود. طبق نتایج فوق عمر خستگی قیر با اضافه کردن آسفالت بازیافتی به مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد، در حالی که عمر خستگی خود مخلوط آسفالتی که با آزمایش تیر خستگی چهار نقطه‌ای تعیین شده، کاهش یافته است که دلیل آن می‌تواند پیوستگی ضعیف بین سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی و قیر تازه باشد، زیرا ترک‌های خستگی معمولاً در محل اتصال یا سطح مشترک^۱ قیر و سنگدانه‌ها به وجود می‌آیند.



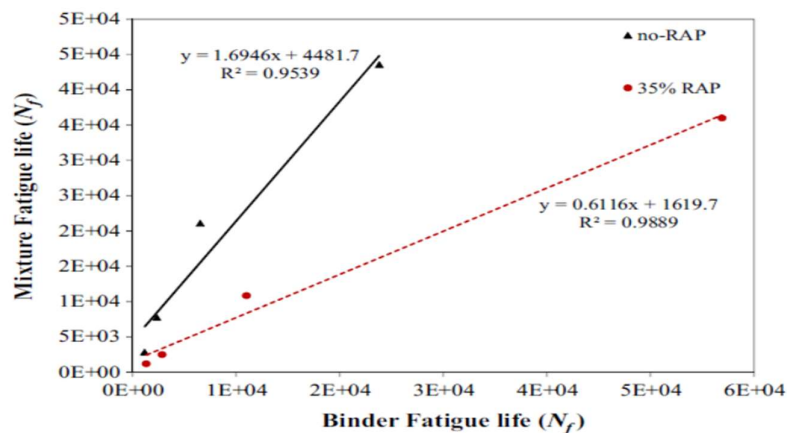
شکل (۲-۱۷) عمر خستگی نمونه های قیر استخراج شده از مخلوط های آسفالتی [۲۹]

¹ Aggregat-binder interface



شکل (۲-۱۸) عمر خستگی نمونه‌ی قیری استخراج شده از مخلوط‌های آسفالتی [۲۹]

شکل (۲-۱۹) رابطه‌ی بین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی دارای آسفالت بازیافتی و بدون آسفالت بازیافتی با عمر خستگی قیر استخراج شده از آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده در شکل پیداست، نمودار مربوط به مخلوط دارای ۳۵ درصد آسفالت بازیافتی ضریب همبستگی (R^2) بالاتری نسبت به نمودار مربوط به مخلوط آسفالتی بدون آسفالت بازیافتی خواهد داشت. علاوه بر آن مخلوط آسفالتی دارای آسفالت بازیافتی عمر خستگی کمتری نسبت به مخلوط آسفالتی بدون آسفالت بازیافتی است.



شکل (۲-۱۹) رابطه بین عمر خستگی مخلوط آسفالتی و قیر خارج شده از آن [۲۹]

۲-۴-۲- تحقیق A.Rasouli و همکاران

این مطالعه که در سال ۲۰۱۸ میلادی انجام شده است، به بررسی تأثیر پیرشدگی بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی حاوی آهک هیدراته می‌پردازد. آهک هیدراته به عنوان یک افزودنی در مخلوط آسفالتی به منظور افزایش مقاومت مخلوط در برابر عریان شدگی^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه تأثیر مقادیر مختلف آهک هیدراته بر خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده که برای این منظور آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای بر روی دو نوع نمونه‌ی مختلف پیرشده^۲ و پیر نشده^۳ انجام خواهد شد. لازم به ذکر است که آهک هیدراته جایگزین فیلر در مخلوط آسفالتی شده است. برای ساختن نمونه‌های پیر نشده قبل از متراکم کردن به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و متراکم می‌کنند. همچنین برای ساختن نمونه‌های پیر شده به مدت ۱۲۰ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد متراکم و عمل‌آوری شده‌اند. در این مطالعه رفتار خستگی نمونه‌ها با استفاده از دو روش کاهش سختی و اتلاف انرژی آنالیز شده است. [۳۱]

سختی خمشی و تعیین آن یکی از مهم‌ترین فاکتورهای بررسی خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی خواهد بود. سختی خمشی اولیه به عنوان سختی خمشی در ۵۰ امین سیکل بارگذاری آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای تعریف می‌شود. شکل (۲-۲۰) مقادیر سختی خمشی اولیه در نمونه‌های پیر شده و پیر نشده حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته را در سطوح مختلف کرنش نشان می‌دهد.

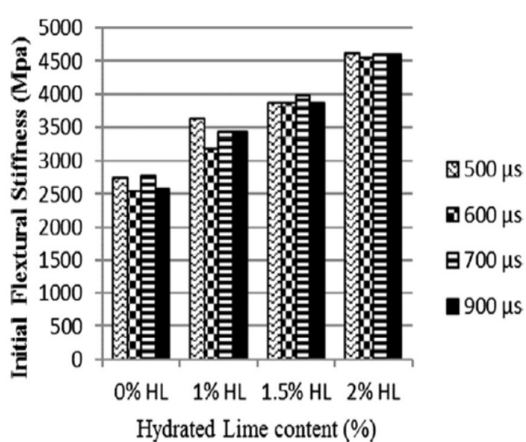
طبق نمودارهای ارائه شده در شکل (۲-۲۰)، در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی آهک هیدراته به جای فیلر باعث افزایش سختی خمشی اولیه در مخلوط آسفالتی شده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که برای اکثر مخلوط‌ها با درصد ثابت آهک هیدراته، سختی خمشی اولیه در سطح کرنش‌های مختلف تغییر چشمگیری نخواهد داشت، زیرا سختی خمشی اولیه بیشتر به خصوصیات

¹ Striping

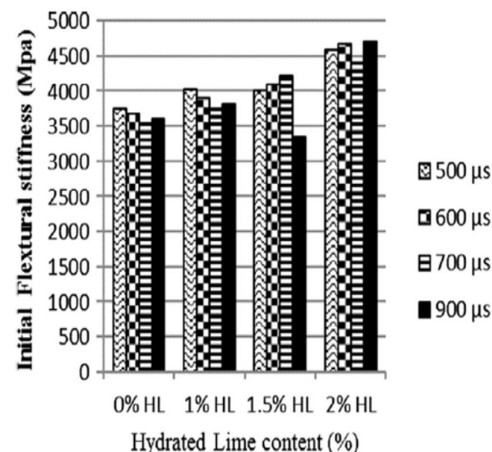
² Aged

³ Unaged

درونی مخلوط آسفالتی وابسته بوده و تحت تأثیر شرایط بارگذاری قرار نمی‌گیرد. به عبارت دیگر سختی خمشی با فاکتورهایی از قبیل نوع دانه بندی، جنس سنگدانه، تراکم، درصد هوا و فضای خالی، درصد قیر، دما و نرخ بارگذاری رابطه دارد.



(ب) نمونه های پیر نشده

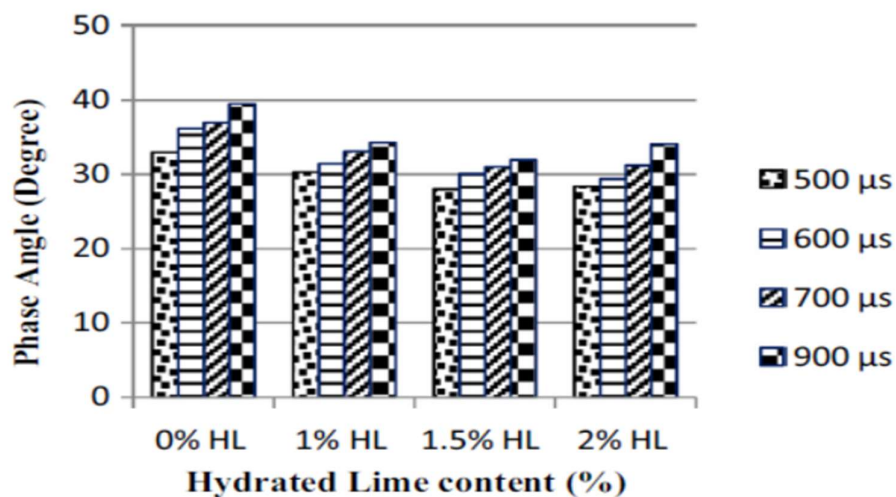


(الف) نمونه های پیر شده

شکل (۲-۲) سختی خمشی اولیه مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف آهک هیدراته [۳۱]

زاویه فازی^۱ به عنوان اختلاف زمانی بین اعمال نیرو و ایجاد تغییر شکل در نمونه‌ی تیری شکل تحت آزمایش خستگی تعریف می‌شود. از پارامتر زاویه فازی که یکی از خروجی‌های آزمایش خمش چهار نقطه‌ای است نیز برای آنالیز رفتار خستگی مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. در شکل (۲-۲۱) زاویه فازی در مخلوط‌های آسفالتی پیر نشده برای درصد‌های مختلف آهک هیدراته ارائه شده است. به صورت میانگین می‌توان نتیجه گرفت که زاویه فازی در نمونه‌های دارای آهک هیدراته کمتر از نمونه‌ی کنترلی بوده است. افزایش زاویه فازی منجر به کاهش عمر خستگی در آزمایش خستگی خواهد شد.

¹ Phase Angle

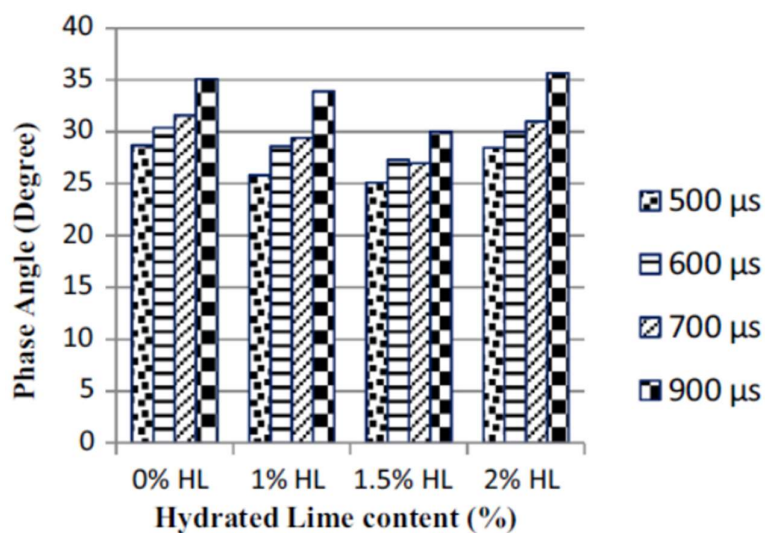


شکل (۲-۲۱) زاویه فازی نمونه‌های پیر نشده برای درصد‌های مختلف آهک هیدراته [۳۱]

زاویه فازی برای مخلوط‌های پیر شده نیز در شکل (۲-۲۲) ارائه شده است. نمودارهای ارائه شده

در این شکل نشان می‌دهند که در سطح کرنش ثابت، با افزایش درصد آهک هیدراته زاویه فازی ابتدا

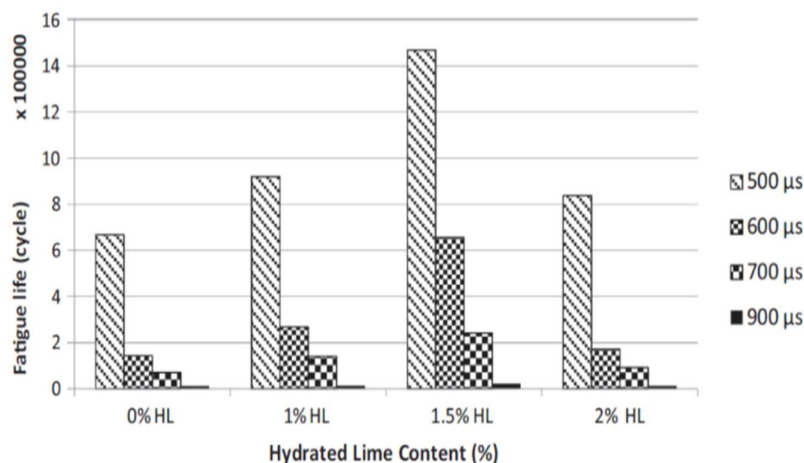
کاهش یافته و پس از رسیدن درصد آن به ۲، زاویه فازی افزایش می‌یابد.



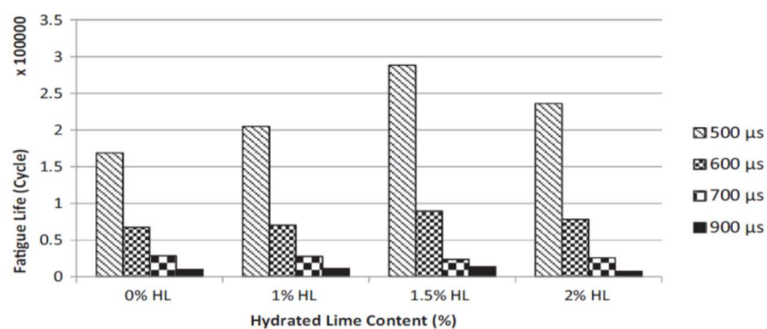
شکل (۲-۲۲) زاویه فازی نمونه‌های پیر شده برای درصد‌های مختلف آهک هیدراته [۳۱]

با در نظر گرفتن نتایج فوق می‌توان استدلال کرد که با افزایش درصد آهک هیدراته از ۱/۵، سخت شدگی سبب کاهش انعطاف‌پذیری و در نتیجه افزایش شکنندگی مخلوط آسفالتی خواهد شد. همچنین با مقایسه‌ی دو شکل (۲۱-۲) و (۲۲-۲) و بدون در نظر گرفتن سطح کرنش می‌توان مشاهده کرد که زاویه فازی در نمونه‌های پیر شده کمتر از نمونه‌های پیر نشده است که می‌توان دلیل این اختلاف را اکسیداسیون مولکول‌های قیر و بخار شدن آن دانست.

نتایج عمر خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با درصدهای مختلف آهک هیدراته در سطح کرنش‌های مختلف در شکل (۲۳-۲) و (۲۴-۲) نشان داده شده است. طبق نتایج ارائه شده در این دو شکل می‌توان مشاهده کرد که بیشترین عمر خستگی در سطح‌های مختلف برای نمونه‌های دارای ۱/۵ درصد آهک هیدراته اتفاق افتاده است. همچنین عمر خستگی نمونه‌ی دارای ۲ درصد آهک هیدراته از نمونه‌ی کنترلی بیشتر است، اما از نمونه‌ی دارای ۱ درصد آهک هیدراته عمر خستگی کمتری خواهد داشت.



شکل (۲۳-۲) نتایج عمر خستگی برای نمونه‌های پیر نشده [۳۱]



شکل (۲-۲۴) نتایج عمر خستگی برای نمونه‌های پیر شده [۳۱]

۲-۴-۳- تحقیق Z.Dehghan و همکاران

این مطالعه در سال ۲۰۱۷ انجام شده و به بررسی خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با فیبرهای پلی اتیلن^۱ با استفاده از آزمایش چهار نقطه‌ای می‌پردازد. اصلاح مخلوط آسفالتی با استفاده از فیبرها یکی از راه‌های موثر در تقویت مقاومت خستگی و تکرار بارگذاری ترافیکی خواهد بود. اضافه کردن فیبرها به مخلوط آسفالتی معمولاً با دو روش انجام می‌شود. در روش اول فیبرهای شبکه‌ای که دارای فرم منظمی هستند، تحت عنوان ژئوسنسیتیک‌ها^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش دوم رشته‌های فیبری به صورت تصادفی درون مخلوط آسفالتی پخش می‌شوند. [۳۲ و ۳۳]

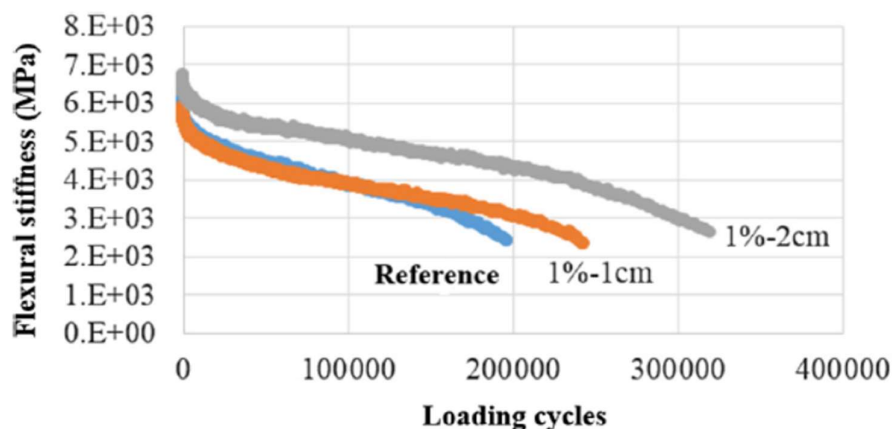
این مطالعه در نظر دارد تأثیر فیبرهای پلی اتیلن را در مخلوط آسفالتی داغ مورد بررسی قرار دهد که برای این منظور از آزمایش خستگی طبق استانداردهای UTM-14 و EN12697-24 انجام شده است. بر اساس این استاندارد همه‌ی نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد تحت آزمایش قرار گرفته و قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در اتاق کنترل دما قرار داده می‌شوند. در این تحقیق یک بارگذاری هاورساین با فرکانس ۱۰ هرتز و درحالت کرنش ثابت آزمایش انجام شده و سطوح کرنش $300 \mu\epsilon$ ، $500 \mu\epsilon$ و $700 \mu\epsilon$ انتخاب شده است.

¹ Poly Ethylene Terephthalat (PET)

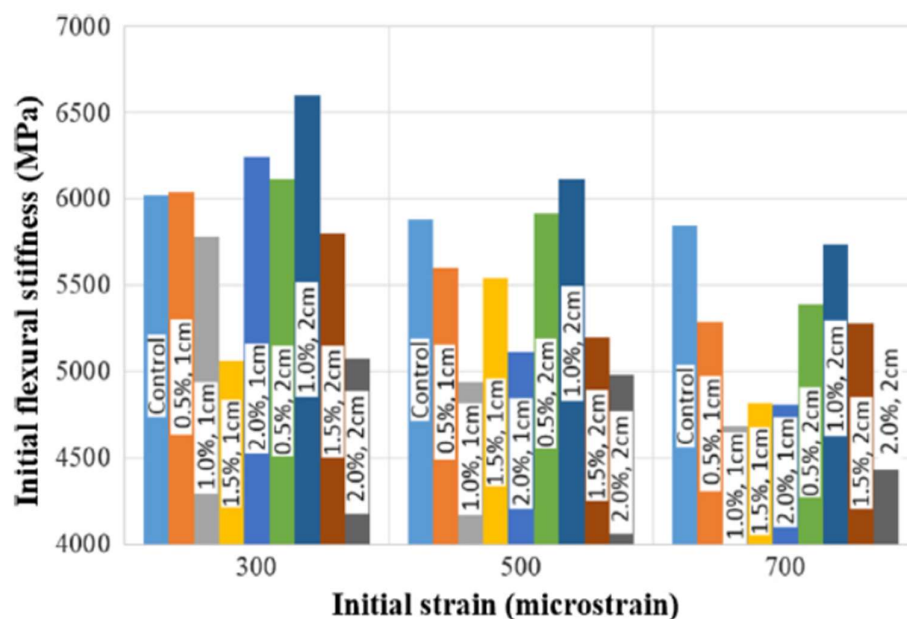
² Geosynthetics

شکل (۲-۲۵) تغییرات سختی خمشی برای دو نمونه‌ی دارای یک درصد فیبر با طول‌های ۱ و ۲ سانتی متر را با نمونه‌ی کنترلی مقایسه می‌کند. همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده در این شکل پیداست، نمودار سختی در مقابل سیکل بارگذاری را می‌توان به سه ناحیه تقسیم‌بندی نمود. در ناحیه‌ی اول مدول سختی به سرعت کاهش می‌یابد. بر اساس مطالعات قبلی این ناحیه حدود ۱۰ درصد از عمر خستگی نمونه را شامل می‌شود و در ناحیه‌ی دوم که ترک‌های میکروسکوپی شکل می‌گیرند، سختی خمشی به صورت خطی کاهش می‌یابد. در ناحیه‌ی سوم نمونه به ۹۰ درصد عمر خستگی خود خواهد رسید. در این ناحیه یک کاهش ناگهانی در سختی خمشی اتفاق افتاده و ترک‌های ابتدایی تشکیل خواهند شد. [۲۸]

همان‌طور که از شکل (۲-۲۵) پیداست، نمونه‌های دارای یک درصد فیبر با طول ۲ سانتی‌متر، مقاومت بالاتری نسبت به دو نمونه‌ی دیگر از خود نشان می‌دهد. همچنین نمونه کنترلی در سیکل‌های بارگذاری اولیه عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌ی یک درصد فیبر با طول یک سانتی‌متر دارد اما با افزایش سیکل بارگذاری و تقریباً بعد از ۱۰۰۰۰۰ سیکل، عملکرد نمونه‌های حاوی یک درصد فیبر با طول یک سانتی‌متر بهتر از نمونه‌ی کنترلی خواهد شد.



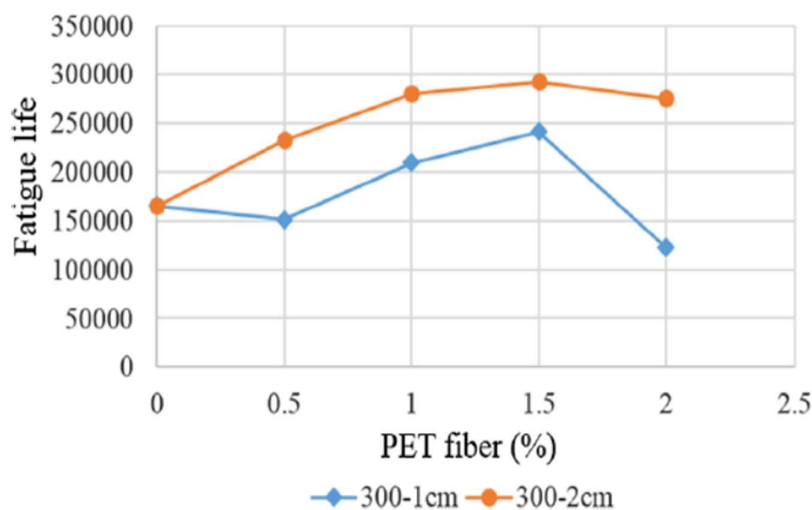
شکل (۲-۲۵) مقایسه‌ی نمودار سختی خمشی مخلوط داری فیبر با نمونه‌ی کنترلی [۲۴]



شکل (۲-۲۶) سختی خمشی اولیه نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف فیبر با طول یک و ۲ سانتی متر [۳۴]

شکل (۲-۲۶) تأثیر سطح کرنش را بر سختی خمشی اولیه مخلوط‌های دارای درصد‌های مختلف فیبر را نشان می‌دهد. به جز دو استثنای موجود، در سایر موارد با افزایش مقدار و درصد فیبر، سختی خمشی اولیه نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی کنترلی کاهش می‌یابد. کاهش سختی تا حد قابل قبول می‌تواند باعث افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی شده و در نهایت با تقویت مقاومت در برابر خرابی‌های تحت تأثیر تکرار بار، عمر خستگی را افزایش می‌دهد. [۳۵ و ۳۶]

نمودار ارائه شده در شکل (۲-۲۷) تأثیر فیبرهای یک و ۲ سانتی‌متری را در سطح کرنش $300 \mu\epsilon$ بر عمر خستگی نشان می‌دهد. طبق شکل (۲-۱۹) می‌توان دریافت که برای هر دو طول فیبر اضافه شده، بیشترین عمر خستگی در نمونه‌ی دارای ۱/۵ درصد فیبر اتفاق می‌افتد و با افزایش این درصد به ۲، تأثیر عکس خواهد داشت و عمر خستگی را کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که درصد بهینه فیبر در مخلوط آسفالتی، ۱/۵ درصد خواهد بود.



شکل (۲-۲۷) عمر خستگی مخلوط آسفالتی با درصدهای مختلف فیبر با طول یک و ۲ سانتی‌متر [۳۴]

۲-۴-۴- تحقیق A.Kavussi و همکاران

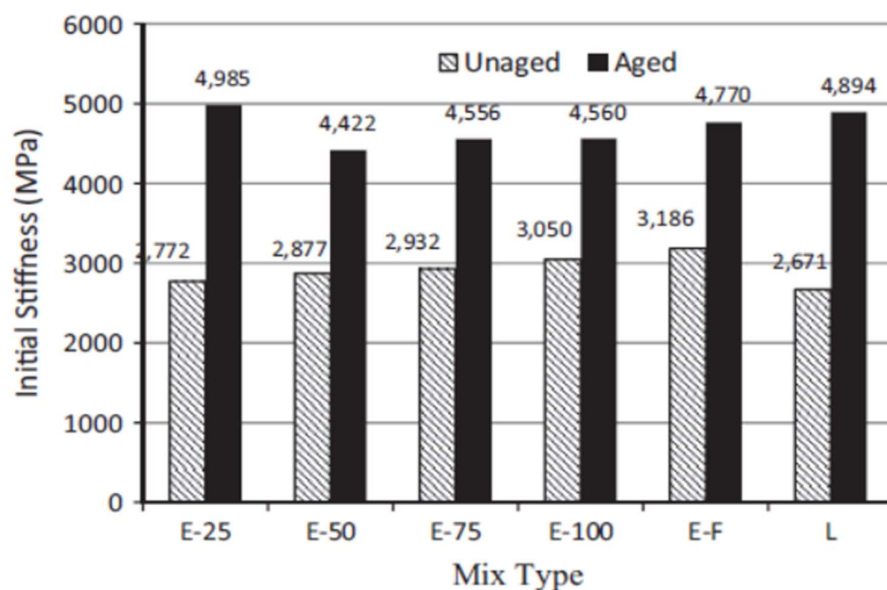
در این مطالعه به بررسی خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره‌ی کوره‌ی الکتریکی^۱ در شرایط پیر شده و پیر نشده پرداخته شده است. به منظور تعیین خصوصیات خستگی نمونه‌های آسفالتی از آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای در شرایط کنترل تنش استفاده شده است. برخی از خواص فیزیکی مثبتی که باعث استفاده از سرباره در مخلوط آسفالتی می‌شود می‌توان به وزن مخصوص بالا، شکل گوشه دار و بافت سطحی زبر آن‌ها اشاره کرد. از طرفی اصلی‌ترین مشکل آن‌ها نیز انبساط حجمی سرباره درون لایه‌های روسازی خواهد بود. [۳۷]

نمونه‌های مورد استفاده در این مطالعه در ابعاد $380 \times 63 \times 50$ میلی‌متر به دو گروه پیر شده و پیر نشده تقسیم می‌شوند. نمونه‌های پیر شده بر اساس استاندارد AASHTO PP2 در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲۰ ساعت متراکم می‌شوند. آزمایش خستگی در حالت تنش ثابت، تحت فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. همچنین نمونه‌ها قبل از شروع

¹ Electric Arc Furnace (EAF) steel slag

بارگذاری به مدت ۶ ساعت در اتاقک کنترل دما، در دمای آزمایش قرار می‌گیرند. سه سطح تنش ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکل برای نمونه‌های پیر نشده و ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۴۰۰ کیلوپاسکل نیز برای نمونه‌های پیر شده اعمال خواهد شد. برای هر سطح تنش سه نمونه آماده شده که نتایج آن به صورت میانگین گزارش می‌شود.

نمودارهای ارائه شده در شکل (۲-۲۸) سختی خمشی اولیه نمونه‌های پیر شده و پیر نشده را که دارای درصد‌های مختلف سرباره است، نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، با اضافه کردن سرباره به مخلوط‌های آسفالتی در حالت پیر شده و پیر نشده تغییر چندانی در مقادیر سختی خمشی اولیه نسبت به نمونه‌ی کنترلی ایجاد نمی‌شود. همچنین بیشترین سختی خمشی اولیه در دو نمونه‌ی کنترلی و نمونه‌ی حاوی ۲۵ درصد سرباره اتفاق می‌افتد.

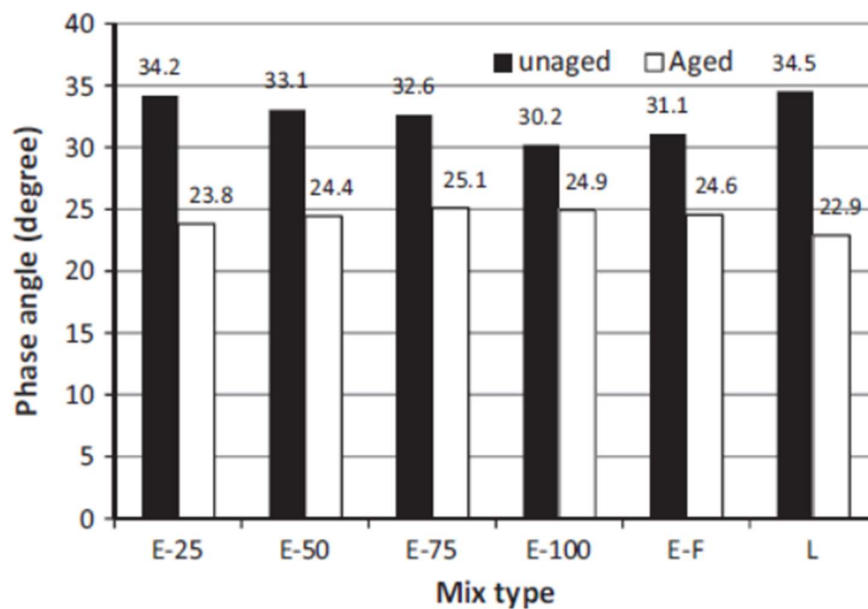


شکل (۲-۲۸) سختی خمشی اولیه در نمونه‌های دارای سرباره [۳۸]

زاویه فازی شاخصی است که میزان ویسکوالاستیسیته مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد و بیشتر

انرژی تلف شده در هر سیکل بارگذاری در آزمایش خستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. [۳۹]

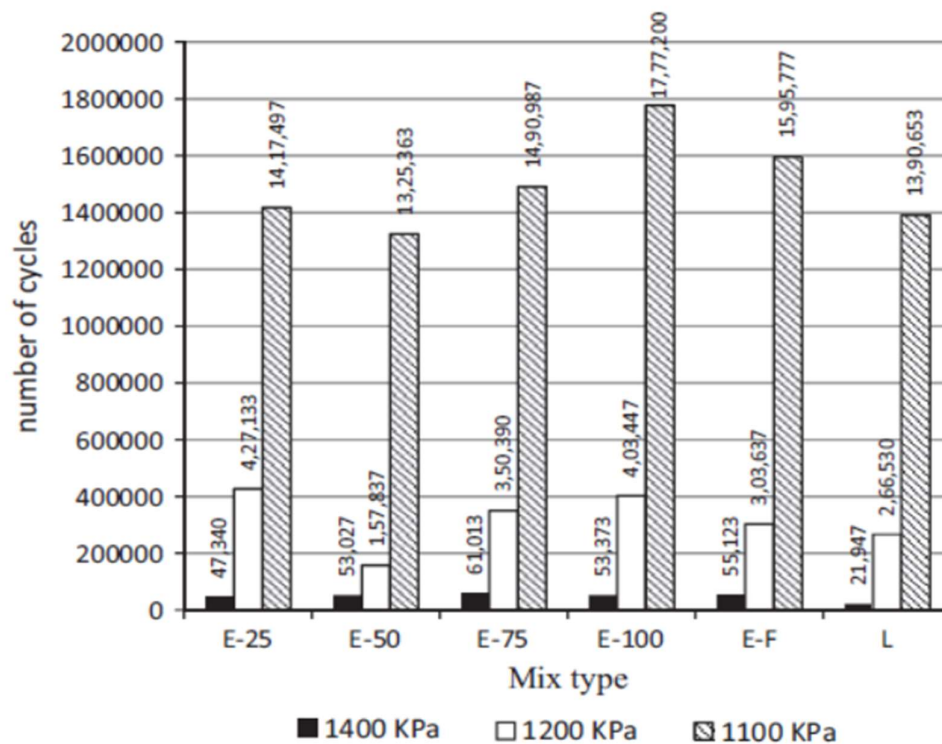
شکل (۲-۲۹) میانگین زاویه فازی در نمونه‌های پیر شده و پیر نشده حاوی درصد‌های مختلف سرباره را به همراه نمونه‌ی کنترلی نشان می‌دهد. نمودارهای ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که نمونه‌های پیر نشده در درصد‌های بالاتر سرباره، زاویه فازی کمتری نسبت به نمونه‌ی کنترلی خواهد داشت و بیشترین زاویه فازی متعلق به نمونه‌های کنترلی خواهد بود. در حالی که در نمونه‌های پیر شده کمترین مقدار زاویه فازی برای نمونه‌ی کنترلی به دست می‌آید. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که طول عمر باعث کاهش زاویه فازی خواهد شد. در حقیقت در طی روند گذر عمر، بخش بخار شدنی قیر آزاد شده و باعث سخت‌تر شدن آن می‌شود. از این رو مدول برشی در مخلوط آسفالتی افزایش یافته و در نتیجه زاویه فازی کاهش می‌یابد.



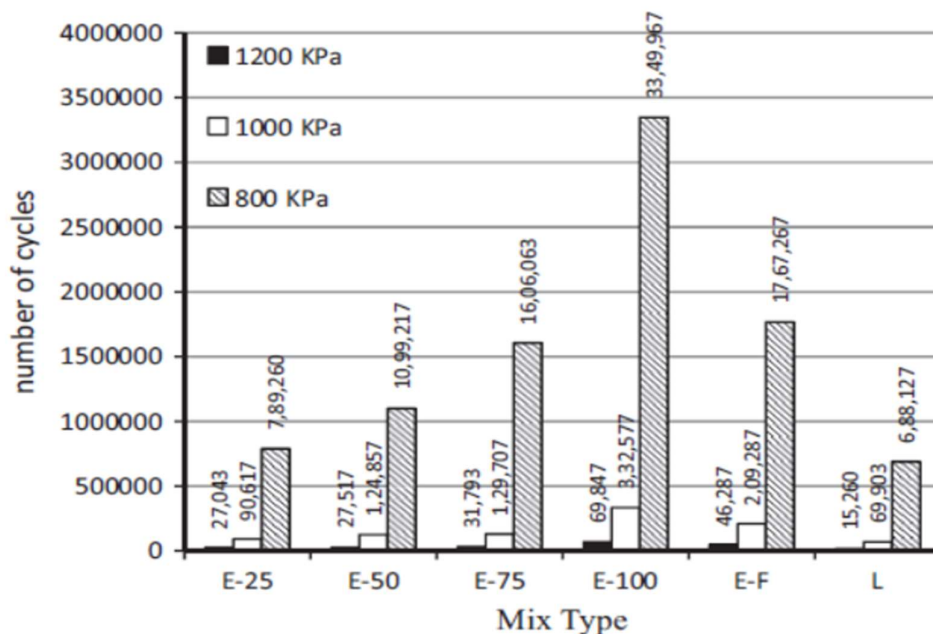
شکل (۲-۲۹) زاویه فازی در نمونه‌های دارای سرباره [۳۸]

شکل‌های (۲-۳۰) و (۲-۳۱) به ترتیب عمر خستگی در نمونه‌های پیر شده و پیر نشده، در سطح کرنش‌های مختلف را نشان می‌دهد. طبق نتایج ارائه شده در این دو شکل، عمر خستگی مخلوط‌های

آسفالتی با افزایش مقدار سرباره افزایش یافته و بیشترین عمر خستگی در مخلوط آسفالتی دارای ۱۰۰ درصد سرباره اتفاق می‌افتد. افزایش عمر خستگی در مخلوط‌های حاوی سرباره می‌تواند به دلیل چسپندگی و پیوستگی خوب و مناسب در سطح مشترک قیر و دانه‌های سرباره باشد. طبق مطالعات مناسب‌ترین محل برای ایجاد ترک، سطح مشترک بین قیر و سنگدانه‌ها است. تحت بار ترافیکی تمرکز تنش در محل سطح مشترک یا اتصال قیر و سنگدانه اتفاق می‌افتد به همین دلیل این سطح مشترک قیر و سنگدانه مناسب‌ترین محل برای تشکیل ترک‌های خستگی خواهد بود.



شکل (۲-۳) عمر خستگی در نمونه‌های پیرشده با درصد‌های مختلف سرباره [۳۸]



شکل (۲-۳۱) عمر خستگی در نمونه‌های پیرنشده با درصد‌های مختلف سرباره [۳۸]

۲-۵- مطالعه انجام شده پیرامون آزمایش خمش روی نمونه‌های کرگیری شده از محل روسازی

۲-۵-۱- تحقیق Saeidi و همکاران

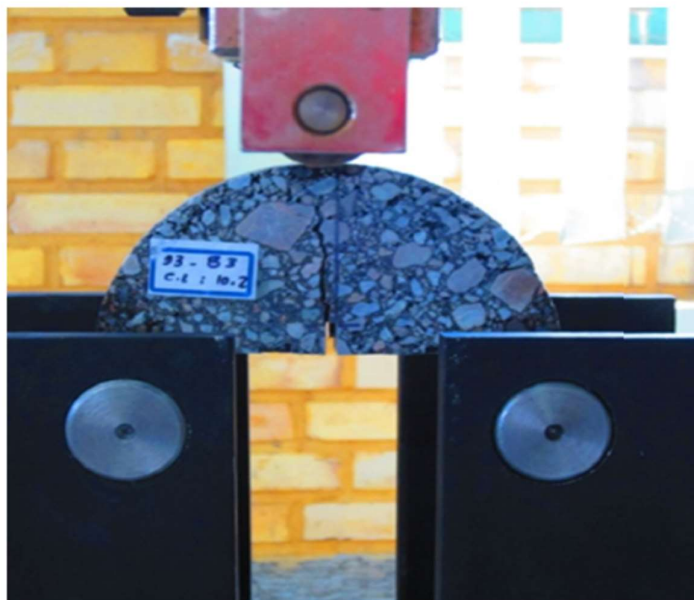
در این مطالعه تاثیر عمر روسازی بر مقاومت آسفالت در برابر ترک خوردگی با استفاده از آزمایش خمش نیم دایره^۱ روی نمونه‌های کرگیری شده از سطح روسازی مورد بررسی قرار گرفته است. کرگیری از چند روسازی با عمرهای تحت خدمت متفاوت، انجام شده و به طوری که شرایط طرح اختلاط، ترافیک عبوری و آب و هوا برای روسازی‌ها یکسان بوده است. به منظور بررسی تاثیر عمر تحت خدمت قرار گرفته روسازی بر مقاومت در برابر ترک خوردگی، از دو روسازی با عمر خدمت ۲ و ۶ سال و همچنین روسازی که هنوز زیر بار ترافیک قرار نگرفته نمونه‌های استوانه‌ای برش داده و از سطح روسازی خارج

^۱ semi-circular bending test

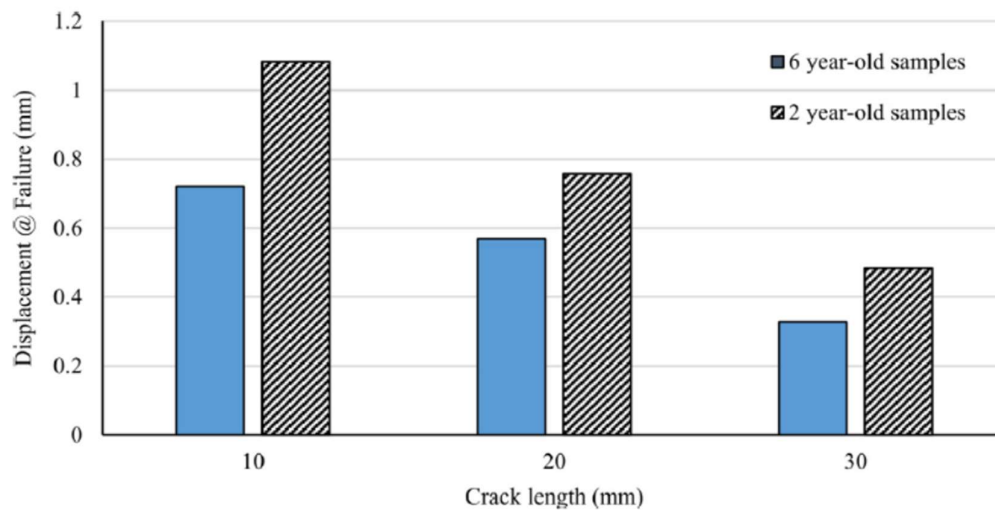
می‌شود و تحت آزمایش خمش نیم‌دایره قرار می‌گیرد.

همان‌طور که در شکل (۳۲-۲) نشان داده شده است، آزمایش خمش نیم‌دایره بر اساس استاندارد AASHTO TP 105-13 در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد و با نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. قبل از این که نمونه‌ها تحت آزمایش خمش قرار گیرند، در قسمت پایین نمونه ترک‌هایی با طول‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر نیز ایجاد شده تا تاثیر طول ترک بر مقاومت خمشی نمونه‌ها را هم مورد بررسی قرار دهند.

شکل (۳۳-۲) تاثیر عمر خدمت روسازی را بر تغییرشکل در لحظه شکست نشان داده است. همان‌طور که از شکل پیداست، با افزایش عمر تحت خدمت روسازی از ۲ به ۶ سال، تغییرشکل در لحظه شکست نمونه، کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین از این شکل می‌توان تاثیر طول ترک را بر تغییرشکل در لحظه شکست را نیز بررسی کرد. همان‌طور که از شکل مشخص است با افزایش طول ترک، تغییرشکل ایجاد شده در لحظه شکست کاهش پیدا می‌کند.

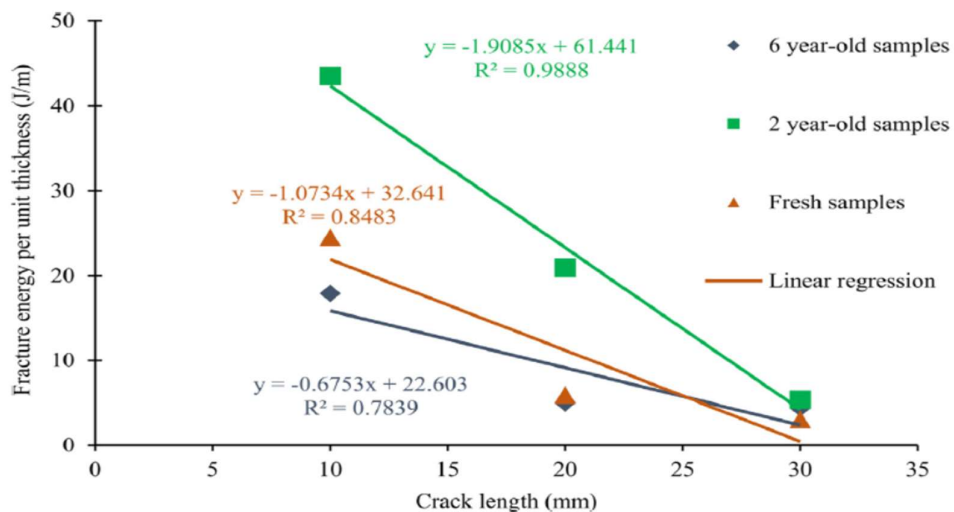


شکل (۳۲-۲) نمونه تحت آزمایش خمش نیم‌دایره [۴۰]



شکل (۲-۳۳) تاثیر عمر روسازی بر تغییر شکل ایجاد شده در لحظه شکست [۴۰]

در مرحله بعد به بررسی اثر طول ترک بر انرژی شکست نمونه پرداخته می‌شود. انرژی شکست تحت آزمایش خمش نیم دایره با طول ترک‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر برای روسازی‌های با عمرهای تحت خدمت متفاوت، محاسبه شده و نتایج آن در شکل (۲-۳۴) ارائه شده است.



شکل (۲-۳۴) تاثیر طول ترک بر انرژی شکست [۴۰]

طبق نمودارهای ارائه شده در شکل (۲-۳۴)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول ترک‌های ایجاد شده در نمونه، انرژی شکست در لحظه شکست کاهش می‌یابد. با برآزش خطی بر داده‌های انرژی شکست و طول ترک، می‌توان مشاهده کرد که رابطه‌ی خطی با ضرایب همبستگی بالایی بین این دو پارامتر برقرار شده است. به طوری که بیشترین ضریب همبستگی مربوط به روسازی با ۲ سال عمر خدمت دهی خواهد بود.

۲-۶- خلاصه تحقیقات این فصل

جدول (۲-۲) خلاصه تحقیقات پیشین

ردیف	نویسنده	سال	مجله	عنوان مقاله	خلاصه مقاله
۱	قربانی و همکاران	۱۳۹۱ شمسی	کنفرانس ملی زیرساخت‌های حمل و نقل	ارزیابی سازه‌ای روسازی با استفاده از پارامترهای کاسه انحنای افت و خیز	با استفاده از دستگاه FWD، تنشی معادل بار محور استاندارد به روسازی اعمال شده و افت و خیز ناشی از آن در امتداد راه اندازه‌گیری شده است و در نهایت با استفاده از تحلیل پارامترهای کاسه انحناء، علت و مقدار ضعف سازه‌ای روسازی مشخص می‌شود.
۲	Suo Zhi و همکاران	۲۰۱۲ میلادی	Construction and Building Material	ارزیابی رفتار ترک‌های خستگی در روسازی آسفالتی اصلاح شده با پلی‌مرهای مختلف	در این مطالعه روسازی با استفاده از روش المان محدود مدل شده و افت و خیز روسازی تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نتیجه گرفته شد که تحت بار با سرعت کمتر افت و خیز بیشتری در روسازی به وجود خواهد آمد. از طرفی خرابی بیشتر نیز در اثر افت و خیز بیشتر روسازی به وجود می‌آید.

ادامه جدول (۲-۲) خلاصه تحقیقات پیشین

ردیف	نویسنده	سال	مجله	عنوان مقاله	خلاصه مقاله
۳	Kimio و همکاران	۲۰۱۴ میلادی	Taylor and Francis Group	بررسی خرابی های خستگی در روسازی آسفالتی با استفاده از کار تلف شده در دستگاه FWD	در این مطالعه در طی چندین سال با استفاده از دستگاه FWD داده های یک روسازی که در مقاطع مختلف با انواع لایه های متفاوتی ساخته شده است، ثبت شده و با رگرسیون خطی رابطه ی بین پارامترهای خروجی از FWD و ضخامت لایه ها و همچنین تعداد بار منجر به ترک های خستگی تعیین شده است.
۴	U.A Mannan	۲۰۱۵ میلادی	International Journal of Fatigue	تأثیرات آسفالت بازیافتی بر عمر خستگی آسفالت تحت سطح کرنش و فرکانس های بارگذاری مختلف	آزمایش خستگی چهار نقطه ای در سطح کرنش و فرکانس بارگذاری های مختلف انجام شده و در نتیجه مشاهده شده که در یک کرنش ثابت با کاهش فرکانس بارگذاری، عمر خستگی نیز کاهش می یابد. همچنین مشخص شد که مخلوط های دارای آسفالت بازیافتی عمر خستگی کمتری نسبت به مخلوط بدون آسفالت بازیافتی خواهد داشت.

ادامه جدول (۲-۲) خلاصه تحقیقات پیشین

ردیف	نویسنده	سال	مجله	عنوان مقاله	خلاصه مقاله
۵	A.Rasouli و همکاران	۲۰۱۸ میلادی	Construction and Building Material	بررسی تأثیر پیرشدگی بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی دارای آهک هیدراته	با استفاده از آزمایش خستگی تیر چهار نقطه‌ای خصوصیات نمونه‌ها تعیین شده و نتیجه می‌شود که افزایش آهک هیدراته تا ۱/۵ درصد باعث بهبود خصوصیات خستگی در نمونه‌های پیرشده و پیرنشده خواهد شد.
۶	Z.Dehghan و همکاران	۲۰۱۷ میلادی	Construction and Building Material	تعیین خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی داغ اصلاح شده با فیبرهای PET با استفاده از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای	با استفاده از آزمایش خستگی تیر چهار نقطه‌ای خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی تعیین شده و در نتیجه مشخص شد که در سیکل‌های بارگذاری بالا عملکرد نمونه‌های حاوی یک درصد فیبر با طول یک سانتی‌متر بهتر از نمونه‌ی کنترلی خواهد بود.

ادامه جدول (۲-۲) خلاصه تحقیقات پیشین

ردیف	نویسنده	سال	مجله	عنوان مقاله	خلاصه مقاله
۷	A.Kavussi و همکاران	۲۰۱۴ میلادی	Construction and Building Material	تعیین خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره‌ی کوره ی الکتریکی در حالت پیرشدگی بلند مدت	با تعیین خصوصیات خستگی نمونه‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش خستگی تیر چهار نقطه‌ای مشخص شد که در مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره عمر خستگی با افزایش درصد سرباره افزایش پیدا می کند و این افزایش به دلیل چسپندگی و پیوستگی مناسب در سطح مشترک بین دانه‌های سرباره و قیر اتفاق می‌افتد.
۸	H.Saeidi و همکاران	۲۰۱۶ میلادی	Construction and Building Material	بررسی تاثیر عمر روسازی بر ترک‌های درجه حرارت پایین با استفاده از آزمایش خمش نیم دایره	با انجام آزمایش خمش نیم دایره و تعیین خصوصیات خمش نمونه‌ها مشخص شد که با افزایش عمر تحت خدمت روسازی مقاومت خمش کاهش می‌یابد. همچنین رابطه خطی با ضریب همبستگی بالا بین دو پارامتر طول ترک و انرژی شکست نمونه گزارش شد.

فصل ۳: روش کار، مطالعات میدانی، تهیه و جمع آوری داده‌ها

۳-۱- مقدمه

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار روسازی در دو قسمت تحت بار چرخ و قسمتی که کمتر زیر بار چرخ قرار گرفته و در مسیر چرخ وسایل نقلیه قرار ندارد، با استفاده از دستگاه PFWD اقدام به برداشت افت و خیزها و همچنین مدول سختی (K) و مدول مرکب لایه‌ها (E) در محل جاده قدیم شاهرود به میامی شده است. در مرحله دوم به منظور بررسی رفتار خستگی و همچنین رفتار خمشی روسازی آسفالتی در این دو قسمت، نمونه‌هایی از سطح روسازی خارج شده و با استفاده از آزمایش خستگی تیر خمشی چهار نقطه‌ای و آزمایش خمش سه نقطه، خصوصیات خستگی و خمشی نمونه‌ها تعیین می‌گردد. در این فصل ابتدا مشخصات دستگاه‌های PFWD، آزمایش خستگی و خمش سه نقطه معرفی شده و سپس به بیان روش کار و نحوه برداشت داده‌ها به وسیله هر کدام از این آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۲- معرفی ساختار دستگاه PFWD

ساختار کلی دستگاه PFWD و اجزای تشکیل دهنده‌ی آن در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است. در ادامه به بررسی و معرفی بخش‌های مختلف این دستگاه پرداخته خواهد شد.

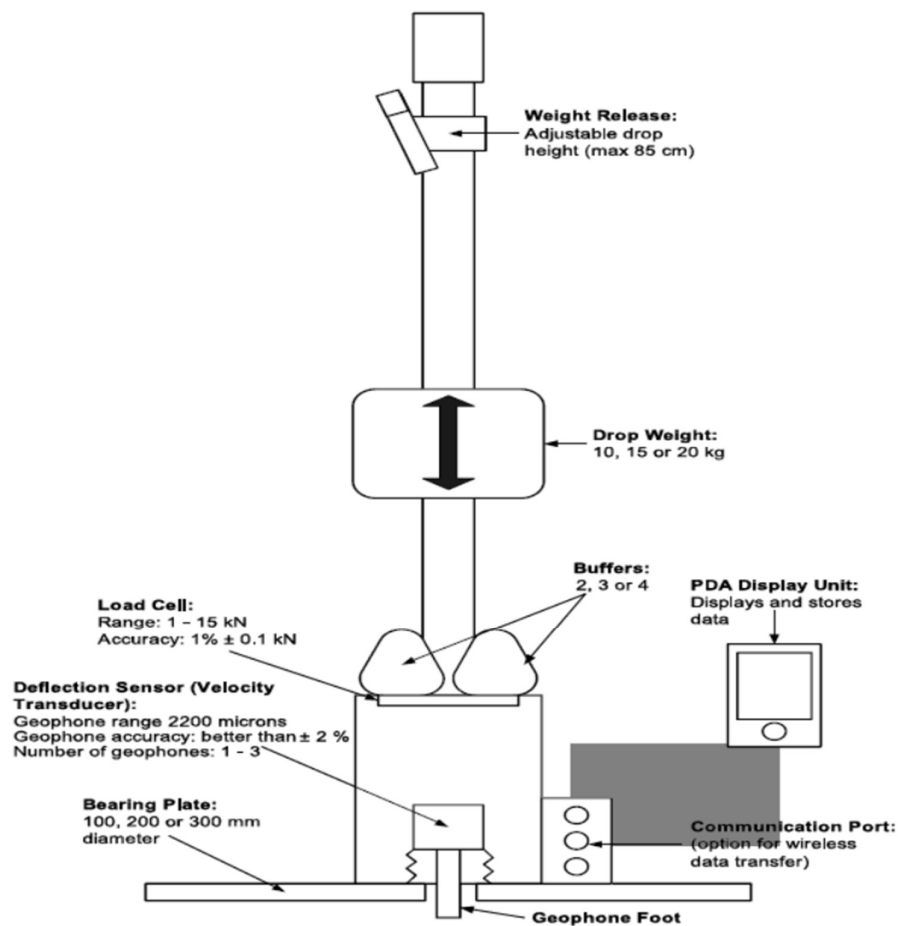
۳-۲-۱- اعمال ضربه (وزنه سقوط کننده)^۱

در ابتدای کار و قبل از هر اقدامی باید دقت شود که دستگاه در حالت تراز و صاف روی روسازی قرار بگیرد، زیرا در غیر این صورت سطح تماس کامل بین صفحه بارگذاری و سطح رویه روسازی برقرار نمی‌شود و منجر به بروز خطا در نتایج حاصل از دستگاه خواهد شد. در قسمت بالای دستگاه گیره‌ای^۲ قرار دارد که با آن می‌توان ارتفاع سقوط وزنه را تنظیم نمود. همچنین این گیره وظیفه نگه داشتن وزنه

¹ Drop Weight

² Weight Release

را نیز بر عهده دارد. با آزاد کردن گیره، وزنه سقوط کرده و به بافر^۱های دستگاه اصابت می‌کند. این وزنه و مسیر سقوط آن به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند با کمترین مقدار اصطکاک و مقاومت، (اصطکاک صفر در نظر گرفته می‌شود) سقوط کند. شکل نیروی حاصله که به روسازی وارد می‌شود به شکل نیمه سینوسی و در بازه زمان بارگذاری در حدود ۲ تا ۲۰ میلی ثانیه صورت می‌گیرد. [۳۴]



شکل (۱-۳) ساختار کلی دستگاه PFWD [۴۱]

¹ Buffer

۳-۲-۲- صفحه‌ی بارگذاری^۱

بار اعمال شده توسط وزنه‌ی سقوط کننده، از طریق صفحه‌ی بارگذاری، به سطح روسازی منتقل می‌شود. با توجه به نوع محل داده برداری و همچنین شدت تنش مورد نیاز و نوع مصالح استفاده شده در سازه‌ی روسازی، می‌توان از صفحات بارگذاری با قطرهای ۱۰۰، ۲۰۰ و یا ۳۰۰ میلی‌متری استفاده کرد. [۳۵]

۳-۲-۳- ژئوفون^۲های اندازه‌گیری بار اعمال شده

ژئوفون‌های دستگاه PFWD وظیفه‌ی اندازه‌گیری بار وارد شده توسط وزنه‌ی سقوط را بر عهده خواهند داشت. این ژئوفون‌ها حداکثر بار و همچنین خیز وارده به سازه‌ی روسازی را نیز ثبت خواهند کرد. ژئوفون‌ها نیز همانند صفحه بارگذاری باید تماس کامل با سطح روسازی داشته باشند، که برای این منظور ترازهایی روی آن‌ها تعبیه شده تا بتوان ژئوفون‌ها را به صورت تراز و صاف روی سطح روسازی قرار داد. همچنین باید دقت شود که در هنگام ضربه زدن، ژئوفون‌ها از جای خود تکان نخورند. کوچک ترین حرکت ژئوفون‌ها منجر به ایجاد خطا در ثبت داده‌ها خواهد شد. [۴۲]

۳-۲-۴- سیستم دریافت کننده‌ی سیگنال، تحلیل و ذخیره سازی داده‌ها

با استفاده از این سیستم، کلیه خروجی‌های حاصل از ضربه‌ی وارده به سطح روسازی شامل، مقدار افت و خیز در ژئوفون‌ها، حداکثر بار وارده و ضریب عکس العمل و مدول سختی لایه‌ها ذخیره سازی می‌شوند. این سیستم توانایی نمایش و ذخیره سازی داده‌ها را با دقت یک میکرون را خواهد داشت. [۴۳]

¹ Bearing plate

² Geophone

۳-۲-۵- سایر اجزای جانبی دستگاه PFWD

بافره‌های لاستیکی با میرایی مشخص، گیره نگهدارنده‌ی وزنه جهت تنظیم ارتفاع سقوط، ترازهای موجود روی ژئوفون‌ها، دسته‌ی دستگاه و همچنین کابل‌های اتصال بین ژئوفون‌ها و سیستم دریافت و ذخیره سازی داده‌ها، سایر اجزای دستگاه PFWD را تشکیل می‌دهند.

۳-۳- نحوه‌ی برداشت داده‌ها با استفاده از دستگاه PFWD مطابق با استاندارد ASTM E 2583-07

روش آزمایش PFWD از نوع آزمون‌های بارگذاری ضربه‌ای می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، بارگذاری به وسیله سقوط یک وزنه بر روی یک سیستم ضربه‌گیر واقع بر روی سطح سازه‌ی روسازی صورت می‌گیرد. نحوه‌ی انجام آزمایش مطابق استاندارد ASTM E 2583-07 به شرح زیر است و باید حین انجام آزمایش نکات زیر را مدنظر داشت.

۱- سطح مورد آزمایش می‌بایست تا حد امکان تمیز و صاف بوده و تمامی سنگدانه‌های شل شده و هرگونه مصالح سنگی غیر متعارف از سطح روسازی برداشته شوند.

۲- صفحه بارگذاری و ژئوفون‌ها باید به گونه‌ای روی سطح روسازی قرار بگیرند که دارای وضعیت پایدار بوده و در لحظه‌ی اعمال بار هیچ‌گونه حرکتی نداشته باشند.

۳- وزنه باید به صورت کاملاً آزادانه سقوط کند.

۴- حداقل دو ارتفاع سقوط متفاوت آزمایش شده و نتایج آن با هم مقایسه شود.

محاسبه‌ی مدول دستگاه PFWD بر اساس تئوری بوسینیسک و با فرض بارگذاری ثابت و با در

نظر گرفتن خیز ژئوفون مرکزی مطابق رابطه‌ی زیر خواهد بود.

$$E_0 = \frac{S(1 - \nu^2)P}{\pi * \alpha * D} \quad (1-3)$$

P : حداکثر بار وارده به صفحه‌ی بارگذاری

D : حداکثر خیز ژئوفون مرکزی

v : ضریب پواسون

a : شعاع صفحه‌ی بارگذاری

s : سختی صفحه‌ی بارگذاری، در اغلب مطالعات برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود.

۳-۴- معرفی محل مطالعه موردی

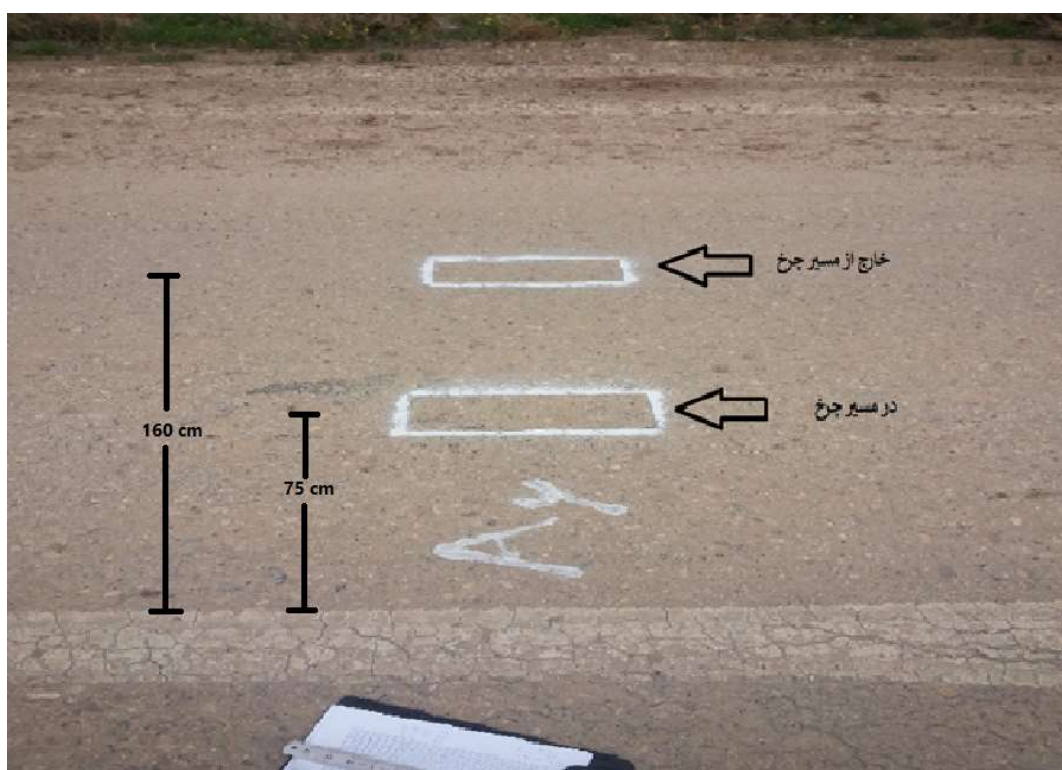
در این مطالعه جاده‌ی قدیم شاهرود به میامی برای برداشت داده‌ها و نمونه برداری انتخاب شده است. روسازی این جاده حدود دوازده تا پانزده سال زیر بار ترافیکی قرار داشته و در حال حاضر چندین سال است که مسدود شده و ترافیکی از روی آن عبور نمی‌کند، بنابراین این جاده و روسازی آن می‌تواند محل مناسبی برای نمونه برداری و انجام آزمایش‌های مربوط به روسازی راه باشد. حدود دو کیلومتر از این جاده و حد فاصل پلیس راه شاهرود به سبزوار تا مقابل ایستگاه هواشناسی برای نمونه برداری انتخاب شده است. در شکل (۳-۲) محل دقیق نمونه برداری نمایش داده شده است.



شکل (۳-۲) جاده قدیم شاهرود به میامی

۳-۵- خلاصه‌ای از نحوه‌ی برداشت داده‌ها از محل روسازی

در مرحله‌ی اول از این پژوهش به بررسی پارامترهای خروجی از دستگاه PFWD بر روی روسازی موجود در جاده‌ی قدیم شاهرود به میامی پرداخته می‌شود. در این مرحله هدف بررسی نحوه‌ی تغییرات افت و خیز ناشی از بار وارده توسط دستگاه PFWD و همچنین ضریب سختی و مدول لایه‌ها در دو قسمت از روسازی که قسمت اول در مسیر چرخ و تحت بار وسایل نقلیه قرار می‌گیرد و قسمت دوم خارج از مسیر چرخ بوده و تحت تأثیر بار وسایل نقلیه قرار ندارد، است. برای این منظور ابتدا همانند شکل (۳-۱) محل‌هایی برای برداشت انتخاب و مشخص شده است. همان‌طور که از شکل (۳-۳) پیداست، در هر ایستگاه، محلی برای مسیر چرخ و محل دیگر برای خارج از مسیر چرخ مشخص شده است. فاصله هر ایستگاه نمونه برداری با ایستگاه قبلی ۳۰ متر است.



شکل (۳-۳) روسازی در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ

دستگاه PFWD و در کل تجهیزات آزمایش‌های ضربه‌ای به گونه‌ای هستند که، یک وزنه با جرم معین از یک ارتفاع مشخص بر روی سطح روسازی سقوط کرده و لایه‌های روسازی را وادار به افت و خیز می‌کند. این افت و خیزها از طریق ژئوفون‌هایی که روی سطح روسازی تعبیه شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شوند. هر چه مقدار افت و خیزهای لایه روسازی بیشتر باشد، یعنی سیستم روسازی ضعیف‌تر خواهد بود. در نهایت ضریب الاستیسیته لایه‌های روسازی از روش‌های محاسبه‌ی معکوس به دست خواهند آمد. بنابراین در این مرحله به بررسی پارامترهای حاصل از دستگاه PFWD در دو قسمت از روسازی پرداخته و مشخص می‌شود که کدام یک از قسمت‌های روسازی که شامل روسازی در مسیر چرخ و روسازی خارج از مسیر چرخ می‌شود، ضعیف‌تر از قسمت کناری خود خواهد بود و یا اینکه اصلاً مقادیر خروجی‌های دستگاه PFWD در این دو قسمت با هم تفاوت معنا داری خواهند داشت یا با هم برابر بوده و از این لحاظ نمی‌توان تفاوتی برای این دو قسمت از روسازی در نظر گرفت.

دستگاه PFWD استفاده شده در این تحقیق ساخت شرکت TML ژاپن است. مشخصات دستگاه

PFWD به شرح جدول (۳-۱) می‌باشد.

جدول (۳-۱) مشخصات دستگاه PFWD

وزنه‌های بارگذاری	۵-۱۰-۱۵ کیلوگرم
قطر صفحه‌ی بارگذاری	۱۰۰-۲۰۰-۳۰۰ میلی‌متر
ارتفاع سقوط وزنه	۵۰ تا ۵۳۰ میلی‌متر
حداقل وزن دستگاه با وزنه‌ی ۵ کیلوگرمی و صفحه با قطر ۱۰۰۰ میلی‌متری	۱۵ کیلوگرم
حداقل وزن دستگاه با وزنه‌ی ۱۵ کیلوگرمی و صفحه با قطر ۳۰۰ میلی‌متری	۳۶ کیلوگرم
حداکثر بارگذاری	۲۵ کیلو نیوتن
حداکثر خیز قابل اندازه‌گیری	۲/۵ میلی‌متر



شکل (۳-۴) دستگاه PFWD ساخت شرکت TML ژاپن

دستگاه PFWD موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود، همان‌طور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است، را به منظور داده برداری به محل جاده منتقل می‌شود و داده برداری انجام می‌گیرد. بعد از انتقال دستگاه به محل و اتصال کابل ژئوفون مرکزی به سیستم ذخیره و تحلیل داده‌ها، شروع به برداشت اطلاعات مربوط به دو قسمت از روسازی که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، خواهد شد. باید توجه داشت که اولاً قبل از وارد کردن ضربه، محل مورد نظر کاملاً تمیز و صاف بوده و همچنین دستگاه به صورت تراز بر روی سطح روسازی قرار بگیرد تا بروز خطا در داده برداری به حداقل برسد. تعداد ۲۵ ایستگاه مختلف در طول مسیر همانند شکل (۳-۳) انتخاب شده و برای هر ایستگاه به صورت جداگانه

برداشت‌ها انجام خواهد شد. خروجی‌های این مرحله شامل، نیروی وارده، افت و خیز (D) زیر ژئوفون مرکزی، مدول الاستیسیته‌ی (E) مرکب لایه‌ها و ضریب سختی (K) خواهد بود. برای هر ایستگاه، سه تکرار برای قسمتی از روسازی که در مسیر چرخ قرار می‌گیرد و سه تکرار نیز برای قسمتی از روسازی که خارج از مسیر چرخ هستند، انجام شده و اطلاعات و خروجی‌های آن در جداول (۲-۳) و (۳-۳) ارائه شده است. جدول (۲-۳) مربوط به مسیر چرخ و جدول (۳-۳) داده‌های دستگاه PFWD در خارج از مسیر چرخ است.

جدول (۲-۳) خروجی‌های دستگاه PFWD در مسیر چرخ

ایستگاه	۱				۲				۳			
	P'_1	D'_{01}	k'_1	E'_1	P'_2	D'_{02}	k'_2	E'_2	P'_3	D'_{03}	k'_3	E'_3
A_1	3728	0.405	391	84	3748	0.371	429	92	3570	0.477	318	68
A_2	3683	0.300	521	112	3798	0.291	599	128	3675	0.262	595	128
A_3	3769	0.403	397	85	3634	0.315	439	94	3632	0.315	489	105
A_4	3688	0.283	553	119	3655	0.292	531	114	3653	0.342	453	97
A_5	3684	0.325	481	103	3746	0.330	482	103	3745	0.306	519	111
A_6	3698	0.319	492	105	3702	0.283	555	119	3659	0.335	464	99
A_7	3669	0.231	660	141	3711	0.345	457	98	3808	0.344	470	101
A_8	3619	0.274	561	120	3707	0.327	481	103	3588	0.300	508	109
A_9	3725	0.353	488	96	3685	0.346	452	97	3695	0.454	345	74
A_{10}	3600	0.316	484	114	3577	0.360	422	90	3631	0.347	444	95
A_{11}	3836	0.387	421	90	3558	0.379	398	85	3598	0.319	479	103
A_{12}	3622	0.197	780	167	3634	0.350	441	94	3643	0.259	597	128
A_{13}	3653	0.420	369	79	3590	0.351	434	93	3619	0.335	458	98
A_{14}	3591	0.347	439	94	3571	0.313	484	104	3648	0.282	549	118
A_{15}	3635	0.304	507	109	3631	0.336	488	105	3619	0.362	424	91
A_{16}	3656	0.293	530	114	3604	0.339	451	97	3653	0.259	599	128
A_{17}	3643	0.238	650	139	3640	0.304	508	109	3543	0.285	528	113
A_{18}	3591	0.324	470	101	3661	0.308	504	108	3615	0.326	471	101
A_{19}	3629	0.340	790	191	3625	0.245	628	135	3633	0.255	605	130
A_{20}	3646	0.247	626	134	3572	0.244	621	133	3630	0.249	619	133
A_{21}	3621	0.312	493	106	3635	0.262	589	126	3619	0.239	643	138
A_{22}	3643	0.235	658	141	3633	0.278	555	119	3631	0.249	619	133
A_{23}	3632	0.387	398	85	3671	0.335	465	100	3649	0.228	679	146
A_{24}	3682	0.250	625	134	3628	0.205	751	161	3621	0.279	551	118
A_{25}	3657	0.282	550	118	3617	0.316	486	104	3648	0.336	461	99

جدول (۳-۳) خروجی‌های دستگاه PFWD خارج از مسیر چرخ

ایستگاه	۱				۲				۳			
	P'_1	D'_{01}	k_1	E_1	P'_2	D'_{02}	k_2	E_2	P'_3	D'_{03}	k_3	E_3
A_1	3843	0.293	682	146	3766	0.298	536	115	3748	0.205	776	166
A_2	3689	0.194	807	173	3655	0.227	683	147	3755	0.228	699	150
A_3	3890	0.198	791	170	3695	0.202	776	166	3727	0.200	791	170
A_4	3714	0.268	588	126	3755	0.239	667	143	3733	0.231	686	147
A_5	3768	0.268	597	128	3684	0.248	630	135	3670	0.256	608	130
A_6	3677	0.274	570	122	3653	0.234	663	142	3670	0.253	616	132
A_7	3759	0.227	703	151	3662	0.224	694	149	3688	0.198	791	169
A_8	3585	0.251	606	130	3700	0.227	692	148	3714	0.220	711	154
A_9	3672	0.166	939	201	3660	0.213	729	156	3681	0.217	720	154
A_{10}	3622	0.210	732	157	3649	0.242	640	137	3695	0.166	945	203
A_{11}	3599	0.262	581	125	3703	0.273	576	123	3712	0.248	635	136
A_{12}	3699	0.281	559	120	3693	0.263	596	128	3683	0.250	625	134
A_{13}	3652	0.184	842	181	3671	0.180	866	186	3655	0.176	881	189
A_{14}	3669	0.169	921	198	3673	0.144	1083	232	3644	0.187	827	177
A_{15}	3635	0.190	812	174	3593	0.184	829	178	3603	0.179	854	183
A_{16}	3568	0.224	676	145	3618	0.121	1269	272	3717	0.246	641	137
A_{17}	3671	0.203	767	165	3635	0.191	808	173	3615	0.222	691	148
A_{18}	3620	0.250	615	132	3610	0.255	601	129	3633	0.290	532	114
A_{19}	3655	0.220	705	151	3631	0.220	677	140	3641	0.227	681	146
A_{20}	3622	0.217	708	153	3625	0.215	868	197	3618	0.211	728	156
A_{21}	3642	0.212	729	156	3653	0.208	745	160	3676	0.219	712	153
A_{22}	3602	0.228	670	144	3576	0.153	999	213	3609	0.165	928	191
A_{23}	3642	0.184	840	180	3614	0.174	882	189	3664	0.214	727	156
A_{24}	3642	0.165	937	201	3625	0.119	1293	277	3621	0.137	112	241
A_{25}	3630	0.202	763	164	3078	0.240	650	130	3705	0.278	566	121

همچنین واحدهای پارامترهای برداشت شده با دستگاه PFWD به طور خلاصه در جدول (۴-۳)

ارائه شده است.

جدول (۴-۳) واحدهای پارامترهای خروجی از دستگاه PFWD

پارامتر	نیرو (P)	افت و خیز (D)	مدول سختی (K)	مدول الاستیسیته (E)
واحد	نیوتن (N)	میلی‌متر (mm)	$\frac{MN}{m^3}$	$\frac{MN}{m^2}$

۳-۶- معرفی دستگاه آزمایش خستگی

آزمون خستگی به روش خمش ساده در نقاط یک سوم دهانه صورت می‌پذیرد. دستگاه آزمایش خستگی که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است، از قسمت‌های مختلفی شامل، چهار سیستم گرهی، یک سیستم اعمال بار و یک تغییرشکل سنج خارجی (LVDT) تشکیل شده است. چهار نقطه‌ی گرهی کنترلی در دستگاه تعبیه شده که دو گرهی انتهایی آن نقش تکیه‌گاه را برای نمونه‌ی تیری شکل ایفا کرده و از طریق دو گرهی میانی دیگر بارگذاری به صورت پالسی بر نمونه‌ی آسفالتی اعمال می‌گردد.



شکل (۳-۵) اجزای دستگاه خستگی چهار نقطه‌ای

این دستگاه قابلیت بارگذاری در فرکانس‌های بین ۵ تا ۱۰ هرتز را داراست. همچنین امکان انجام آزمایش در دو حالت کنترل کرنش و کنترل تنش را دارد. تمام اطلاعات به دست آمده از آزمایش خستگی از طریق رایانه‌ی متصل به دستگاه به صورت جدول‌بندی و عددی قابل دسترسی خواهد بود.

کل داده‌های خروجی از ابتدا تا انتهای آزمایش خستگی عبارت اند از:

۱- زمان آزمایش

۲- بار اعمال شده

۳- خیز تیر

۴- تنش و کرنش کششی

۵- اختلاف زاویه فازی

۶- تعداد سیکل اعمال بار

۷- سختی خمشی اولیه

۸- سختی خمشی

۹- مدول کشسانی

۱۰- انرژی تلف شده در هر سیکل بارگذاری

۱۱- کل انرژی تلف شده

سیستم اعمال بار دستگاه خستگی یک سیستم بادی یا پنوماتیک است و نیروی لازم جهت فعالیت دستگاه توسط کمپرسور هوا تأمین می‌گردد. کلیه تنظیمات دستگاه از نظر شکل، مقدار بارگذاری و تمامی محاسبات در طی انجام آزمایش توسط سیستم جمع‌آوری و کنترل اطلاعات و یک کامپیوتر صورت می‌پذیرد. [۴۱]

در آزمایش خستگی، نمونه‌ی مکعب مستطیل شکل در ابعاد طولی $۶/۳۵ \pm ۳۸۱$ ، عرض $۶/۳۵$ ± ۶۰ و ارتفاع $۶/۳۵ \pm ۵۰/۸$ میلی‌متر تهیه می‌شود و نمونه از دو طرف روی تکیه‌گاه‌های ساده قرار می‌گیرد. سپس با دو نیروی متمرکز و مساوی $\frac{P}{2}$ که در فاصله‌های یک سوم دهانه اعمال می‌شوند، تحت خمش قرار می‌گیرد و این عمل آنقدر تکرار می‌شود تا نمونه گسیخته شود. معیار گسیختگی و توقف بارگذاری در آزمایش خستگی در روش‌های مختلف متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال در این پژوهش معیار گسیختگی و توقف بارگذاری رسیدن سختی خمشی نمونه به ۵۰ درصد مقدار سختی خمشی

اولیه خواهد بود. روابط مورد استفاده برای محاسبه پارامترهای مختلف به روش آزمون خمش ساده به قرار زیر است.

$$\sigma_t = \frac{300ap}{bh^2} \quad (2-3)$$

در این رابطه پارامترها به شرح زیر می‌باشند :

σ_t : حداکثر تنش کششی (kPa)

L : طول دهانه‌ی تیر (۳۸۱ میلی‌متر)

a : یک سوم دهانه ($\frac{L}{3}$)

P : بار بر حسب کیلو نیوتن

b : عرض تیر بر حسب میلی‌متر

h : ارتفاع تیر بر حسب میلی‌متر

$$\varepsilon_t = \frac{12\Delta h}{3I^2 - 4a^2} \quad (3-3)$$

ε_t : حداکثر کرنش کشش

Δ : خیز حداکثر در وسط تیر به میلی‌متر

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (4-3)$$

S : سختی خمشی (kPa)

$$\varphi = 360f.s \quad (5-3)$$

φ : زاویه اختلاف فاز

s : تأخیر زمانی بین تنش و کرنش حداکثر (ثانیه)

f : فرکانس بارگذاری (هرتز)

$$D = \pi \sigma_t \varepsilon_t \sin \varphi \quad (۶-۳)$$

D: انرژی مستهلک شده در هر چرخه ی بارگذاری

$$W = \sum D_i \quad (۷-۳)$$

W: انرژی مستهلک شده تجمعی (kPa)

D_i : انرژی مستهلک شده در i امین سیکل بارگذاری (kPa)

$$E = \frac{pa}{\Delta b \cdot b} \times \left[\frac{3I^2 - 4a^2}{4h^2 + k(1 + v)} \right] \quad (۸-۳)$$

E: مدول کشسانی (kPa)

K=1.5

نرم افزار مربوط به دستگاه که بر روی کامپیوتر متصل به آن نصب شده است، پس از جمع آوری اطلاعات با توجه به روابط فوق محاسبات مربوط به این آزمایش را انجام داده و این قابلیت را دارد که نمودارهای تغییرات سختی خمشی، مدول کشسانی، زاویه فازی، انرژی مستهلک شده، حداکثر تنش کششی و حداکثر کرنش کششی را در حین انجام آزمایش ترسیم نماید.

۷-۳- مشخصات نمونه ها و روش تهیه آنها

نمونه های تیری شکل برای آزمایش خستگی طبق استاندارد AASHTO T-321 در ابعاد طولی

$۳۸۱ \pm ۶/۳۵$ ، عرض $۶۰ \pm ۶/۳۵$ و ارتفاع $۵۰/۸ \pm ۶/۳۵$ میلی متر خواهد بود.

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، ۲۵ ایستگاه از A1 تا A25 برای آزمایش PFWD مشخص

شد، به طوی که فاصله ایستگاه ها ثابت و برابر ۳۰ متر باشد، برداشتها انجام می شود. در مرحله دوم

هفت ایستگاه انتخاب شده و با استفاده از کاتر مخصوصی که در شکل (۶-۳) نشان داده شده است،

آسفالت برش داده شده و نمونه ها از سطح روسازی خارج می شوند.



شکل (۳-۶) دستگاه کاتر مخصوص برش آسفالت

برای تهیه نمونه‌های آزمایش خستگی در ابتدا همانند شکل (۳-۷) با استفاده از دستگاه برش سطح آسفالت روسازی تا عمق لایه اساس برش داده شده و سپس نمونه‌ها خارج می‌شوند. دال‌های آسفالتی با ابعاد طولی ۴۰ سانتی‌متر، عرض ۷ سانتی‌متر و ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از سطح روسازی خارج شده‌اند. به طور کلی از هفت ایستگاه و از هر ایستگاه چهار دال خارج شده است که دو دال مربوط به قسمتی از روسازی است که در مسیر چرخ قرار گرفته و دو دال دیگر نیز مربوط به قسمتی است که خارج از مسیر چرخ قرار می‌گیرند.



شکل (۷-۳) خارج کردن دال‌های آسفالتی از سطح روسازی

با توجه به این که با این دستگاه نمی‌توان به طور دقیق نمونه‌ها را در ابعاد دقیق برای آزمایش خستگی آماده کرد، بعد از خارج کردن نمونه‌ها، آن‌ها را به سنگ‌بری منتقل کرده (شکل (۸-۳)) و در ابعاد دقیق برش داده می‌شوند.

در نهایت نمونه‌های تیری شکل در ابعاد استاندارد برای آزمایش خستگی برش داده شده و در شکل (۹-۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۸) برش نمونه‌های تیری شکل در ابعاد استاندارد با دستگاه برش سنگ

۳-۸- نحوه‌ی انجام آزمایش خستگی

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و انتقال آن‌ها به محل آزمایشگاه، اقدام به تعیین خصوصیات خستگی نمونه‌های تیری شکل آسفالتی خواهد شد. آزمایش خستگی تیر خمشی چهار نقطه‌ای طبق استاندارد ASHTO T-321 انجام خواهد شد. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در هر ایستگاه نمونه‌برداری، چهار نمونه‌ی تیری شکل از سطح روسازی خارج و در ابعاد استاندارد آزمایش خستگی برش داده شده اند که دو تیر آن مربوط به روسازی در مسیر چرخ و دو تیر دیگر مربوط به روسازی در خارج از مسیر چرخ خواهد بود. در این مرحله از تحقیق هدف بررسی و مقایسه‌ی رفتار خستگی آسفالت در این دو قسمت روسازی خواهد بود.

دستگاه آزمایش خستگی قابلیت انجام آزمایش در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت را دارد. در این تحقیق آزمایش خستگی در حالت کنترل کرنش انجام خواهد شد. کرنش ثابت مورد استفاده برای آزمایش خستگی $500 \mu\epsilon$ انتخاب شده است.



شکل (۳-۹) نمونه‌های تیری شکل در ابعاد استاندارد آزمایش خستگی

در هر نقطه دو نمونه‌ی تیری شکل مشابه آماده شده است، بنابراین می‌توان تأثیر تغییر دما را نیز بر روی خصوصیات خستگی بررسی کرد. برای این منظور آزمایش خستگی در دو دمای بالا و پایین انجام خواهد شد. دستگاه آزمایش خستگی در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه صنعتی شاهرود درون اتاقک^۱ تنظیم دما قرار داده شده تا بتوان دما را نیز حین انجام آزمایش کنترل کرد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها قبل از بارگذاری توسط دستگاه آزمایش خستگی، به مدت دو ساعت در دمای آزمایش قرار داده می‌شوند تا دما در تمام قسمت‌های نمونه‌ی تیری شکل ثابت شود.

¹ Chamber

دو دمای انتخابی برای انجام آزمایش خستگی صفر و ۲۵ درجه سانتی گراد خواهد بود. همان طور که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است، نمونه‌های تیری شکل در دو قسمت از روسازی که یکی در مسیر چرخ و دیگری در خارج از مسیر چرخ بوده، در دمای صفر و ۲۵ درجه انجام شده و نتایج عمر خستگی نمونه‌ها در جداول (۳-۵) و (۳-۶) ارائه شده است. جدول (۳-۵) مربوط به عمرهای خستگی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد بوده و جدول (۳-۶) نیز مربوط به نتایج آزمایش عمرهای خستگی نمونه‌ها در دمای صفر درجه سانتی گراد است. عمرهای خستگی ارائه شده در جداول (۳-۵) و (۳-۶) بر اساس معیار کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی نسبت به سختی خمشی اولیه تعیین شده‌اند. همه‌ی نمودارهای سختی خمشی بر حسب سیکل بارگذاری خروجی از دستگاه آزمایش خستگی، برای تمام نمونه‌ها در پیوست ۱ ارائه شده است.



شکل (۳-۱۰) دستگاه آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای

جدول (۳-۵) نتایج عمر خستگی در دمای ۲۵ درجه

شماره ایستگاه	در مسیر چرخ‌ها	خارج از مسیر چرخ‌ها
	N'_f	N_f
A1	۸۶۹۸	۱۳۰۰۰
A18	۷۱۵۲	۱۶۷۸۱
A24	۱۳۱۶۸	۲۸۸۸۷

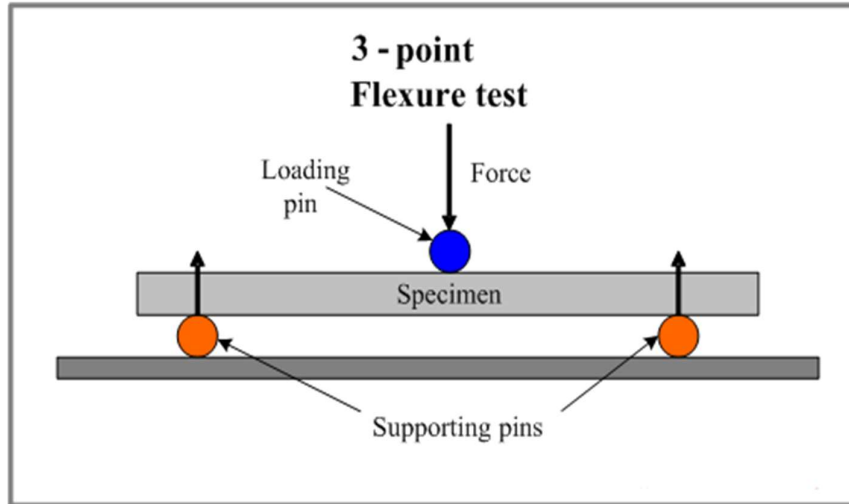
جدول (۳-۶) نتایج عمر خستگی در دمای صفر درجه

شماره ایستگاه	در مسیر چرخ‌ها	خارج از مسیر چرخ‌ها
	N'_f	N_f
A1	۱۱۰۷	۴۴۴۸
A18	۲۱۰۷	۸۳۸۲
A24	۳۵۷۸	۷۹۱۲

۳-۹- معرفی آزمایش خمش سه نقطه

آزمایش خمش برای سنجش مقاومت قطعه مورد نظر در برابر خم شدگی است که توسط دستگاه یونیورسال به دو صورت سه نقطه‌ای و یا چهار نقطه‌ای انجام می‌شود. در این مطالعه آزمایش خمش به صورت سه نقطه‌ای روی نمونه‌ی تیری شکل آسفالتی انجام شده است. در حالت سه نقطه‌ای نمونه تیری شکل همانند شکل (۳-۱۱)، روی پایه‌ای که دارای دو قسمت به عنوان تکیه گاه است قرار گرفته و نیرو از طریق سمبه^۱ به وسط نمونه اعمال می‌گردد.

^۱ Loading Pin



شکل (۱۱-۳) نحوه‌ی وارد شدن نیرو در آزمایش خمش سه نقطه

در آزمایش خمش، نیرو از بالا توسط سمبه به نمونه اعمال می‌شود که این سمبه با سرعت مشخصی بین ۵ تا ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، به سمت نمونه‌ی تیری شکل حرکت می‌کند. بعد از برخورد سمبه به نمونه، نیروی اعمالی به آن افزایش یافته و نمونه به سمت پایین شروع به خم شدن می‌کند. نرم افزار نصب شده روی رایانه‌ی متصل به دستگاه آزمایش خمش، مقدار نیروی اعمالی و خم شدگی تیر آسفالتی را در یک نمودار که محور عمودی آن معرف نیرو و محور افقی آن معرف خم شدگی یا مقدار پایین آمدن وسط نمونه است، نمایش می‌دهد. در حین انجام آزمایش، در سطح بالایی نمونه تنش فشاری و در سطح زیرین آن تنش کششی ایجاد می‌شود و در نتیجه نمونه از ناحیه پایین شروع به ترک خوردن می‌کند.

۳-۱۰- نحوه‌ی انجام آزمایش خمش سه نقطه

نمونه‌های تیری شکل مورد استفاده در آزمایش خمش سه نقطه، همانند نمونه‌های استفاده شده در آزمایش خستگی در این مطالعه، آماده شده است. دال‌های آسفالتی با استفاده از کاتر مخصوص برش آسفالت بریده شده و از سطح جاده خارج می‌شود. سپس دال‌های آسفالتی برای برش در ابعاد دقیق‌تر به

سنگبری منتقل شده و بریده می‌شوند. در این مرحله نمونه‌های چهار ایستگاه تحت آزمایش خمش قرار می‌گیرد، به طوری که از هر ایستگاه یک تیر از مسیر چرخ و یک تیر دیگر از خارج از مسیر چرخ آماده شده است. پس از انتقال نمونه‌ها به محل آزمایشگاه همانند شکل (۳-۱۲) بر روی تکیه گاه قرار می‌گیرد و فاصله‌ی بین تکیه گاه‌ها چهار برابر ارتفاع نمونه تنظیم خواهد شد.



شکل (۳-۱۲) نحوه‌ی قرار گیری نمونه‌ی تیری شکل در آزمایش خمش سه نقطه

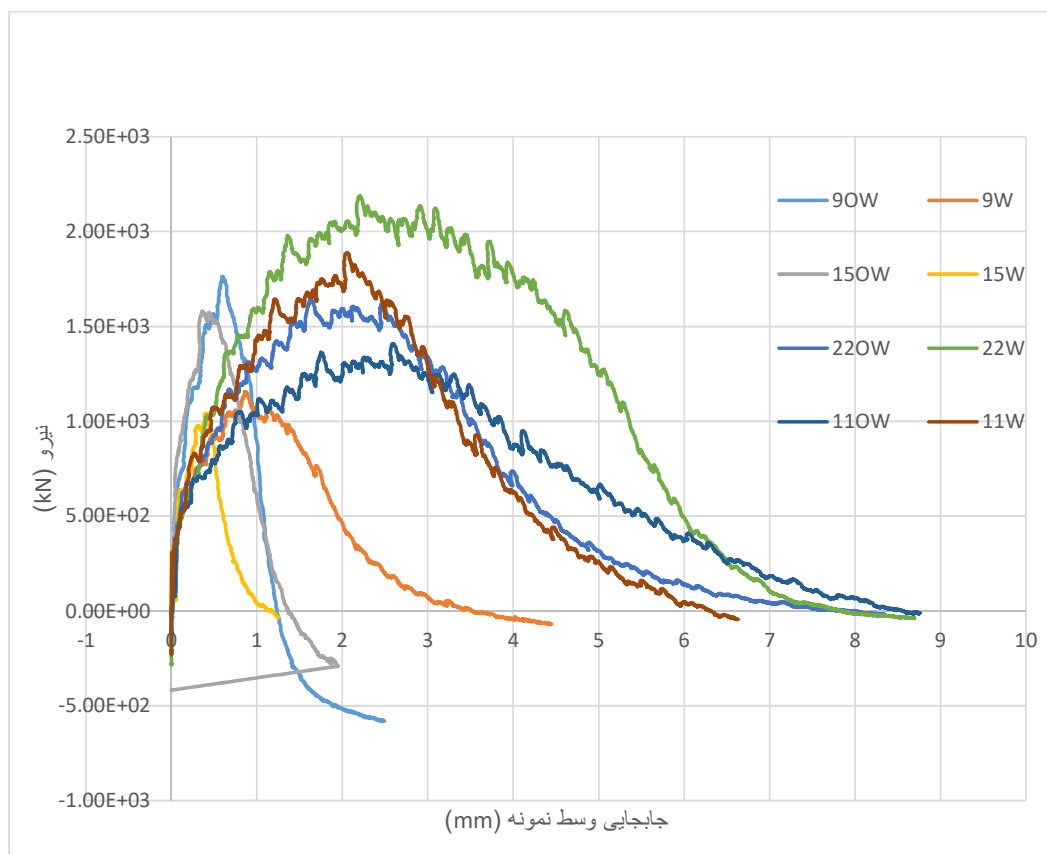
نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش خمش در این تحقیق در ابعاد $380 \times 60 \times 60$ میلی متر بریده شده اند. بنابراین فاصله‌ی بین دو تکیه گاه روی ۲۴۰ میلی‌متر تنظیم شده است. سرعت بارگذاری در این تحقیق ۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است. دستگاه یونیورسال با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه به وسط نمونه‌های تیری شکل نیرو وارد کرده و تا زمانی که همانند شکل (۳-۱۳)، در نمونه ترک ایجاد

نشود، بر مقدار نیرو افزوده می‌شود. به محض این که در سطح زیرین نمونه ترک ایجاد شود، نیرو کاهش یافته و دوباره به صفر خواهد رسید. این آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. لازم است حین انجام و در زمان جایگذاری نمونه‌ها دقت شود که نمونه به درستی روی پایه قرار گرفته تا نیرو دقیقاً به وسط نمونه وارد شود.



شکل (۳-۱۳) ایجاد ترک در نمونه‌ی آسفالتی تحت آزمایش خمش

نتایج و نمودارهای نیرو در برابر جابجایی وسط نمونه‌ی خروجی از آزمایش خمش سه نقطه‌ای در شکل (۳-۱۴) ارائه شده است. در نمودارهای ارائه شده در شکل (۳-۱۴)، نمونه‌هایی که در مسیر چرخ قرار داشته با W و نمونه‌های خارج از مسیر چرخ با OW نام گذاری شده‌اند.



شکل (۳-۱۴) نمودار نیرو در برابر تغییرشکل نمونه‌های تیری شکل تحت آزمایش خمش

با استفاده از نمودارهای نشان داده شده در شکل (۳-۱۳)، حداکثر نیرویی که هر نمونه تحمل کرده است در جدول (۳-۷) ارائه شده است.

جدول (۳-۷) حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌های آزمایش خمش

شماره ایستگاه	در مسیر چرخ‌ها	خارج از مسیر چرخ‌ها
	F'max (kN)	Fmax (kN)
A9	۱/۱۶	۱/۷۶
A15	۱/۰۴	۱/۵۸
A22	۲/۱۹	۱/۶۴
A11	۱/۸۹	۱/۴۱

فصل ۴: تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده

۴-۱- مقدمه

آزمایش‌های مخرب همواره هزینه‌های قابل توجهی به همراه خواهند داشت. از طرفی در برخی موارد انجام آزمایش‌های مخرب منجر به آسیب رساندن به سازه‌ی روسازی خواهد شد. بنابراین اگر بتوان آزمایش‌های غیر مخربی مثل دستگاه PFWD را جایگزین آزمایش‌های مخرب مثل آزمایش خستگی یا خمش سه نقطه کرد یا تعداد آزمایش مورد نیاز برای رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب برای انجام آزمایش‌های مخرب را به حداقل رساند، می‌توان هم هزینه‌ی انجام آزمایش را کاهش داد و در زمان صرفه جویی کرد و هم بدون آسیب رساندن به سازه‌ی روسازی نتایج مفیدی را استخراج کرد.

هدف از این مطالعه در مرحله اول ارزیابی سازه‌ی روسازی در دو قسمت شامل مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ بوده (مقایسه اثر بارگذاری بر خصوصیات مکانیکی آسفالت) و در مرحله دوم مقایسه نتایج و خروجی‌های دستگاه PFWD با آزمایش‌های خستگی و خمش سه نقطه و سرانجام پیدا کردن رابطه‌ای بین این خروجی‌ها خواهد بود.

۴-۲- مقایسه نتایج برداشت‌های PFWD در مسیر چرخ و خارج از

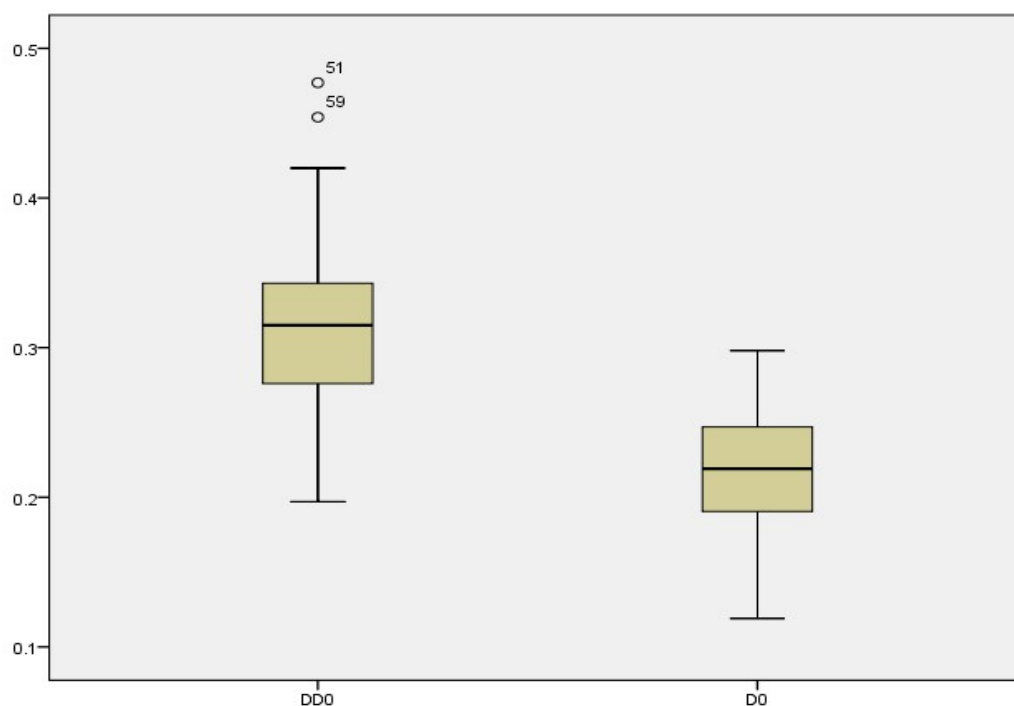
مسیر چرخ

در این مطالعه به منظور بررسی و مقایسه‌ی سازه‌ی روسازی در دو قسمت مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ و بررسی این موضوع که آیا روسازی در دو قسمت مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ با هم تفاوت معناداری دارند، داده‌های حاصل از دستگاه PFWD با استفاده از روش‌های تحلیل آماری از قبیل نمودار جعبه‌ای و آزمون t مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۴-۲-۱- نمودارهای جعبه‌ای

به منظور بررسی و مقایسه افت و خیز برداشت شده توسط دستگاه PFWD در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ، با استفاده از نرم افزار SPSS، نمودار جعبه‌ای برای این دو قسمت از روسازی رسم

شده است و در شکل (۴-۱) ارائه شده است. DD0 مربوط به افت و خیزها در مسیر چرخ و D0 مربوط به افت و خیزها در خارج از مسیر چرخ خواهد بود. با توجه به نمودارهای جعبه‌ای می‌توان مشاهده کرد که افت و خیزها در مسیر چرخ بین ۰/۲۷ تا ۰/۳۵ بوده و در خارج از مسیر چرخ بین ۰/۱۹ تا ۰/۲۴ خواهد بود. بنابراین طبق نمودارهای جعبه‌ای می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت بین افت و خیز در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ قابل توجه خواهد بود.



شکل (۴-۱) نمودار جعبه‌ای مربوط به افت و خیزها در مسیر چرخ (DD0) و خارج از مسیر چرخ (D0)

طبق فرض اولیه این تحقیق، تمام شرایط روسازی و زیرسازی در طول مسیر نمونه برداری کاملاً یکسان است و تنها تفاوت این دو قسمت تعداد وسیله نقلیه عبوری از روی آن است. به عبارت دیگر خستگی بیشتر در مسیر چرخ می‌تواند عاملی برای افت و خیز بیشتر این قسمت نسبت به قسمت خارج از مسیر چرخ باشد. در ادامه در بخش ۴-۳ از همین فصل و با مقایسه عمر خستگی نمونه‌ها در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ می‌توان درست یا غلط بودن این حدس را بررسی کرد.

۲-۲-۴- آزمون t

در این آزمون نمونه‌های دوتایی از اعضای جامعه‌ی آماری در دو مقطع مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. در واقع آزمون t مقدار اطمینان از تفاوت دو متغیر تصادفی را طبق نمونه‌های برداشت شده از آن، اعلام می‌کند. بنابراین به منظور بررسی معنی‌دار بودن اختلاف بین خروجی‌های PFWD در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ، از این آزمون با فرض آماری به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

فرض H_0 و H_1 به ترتیب نشان دهنده‌ی برابری یا عدم برابری دو سری داده‌ی μ_1 و μ_2 که در این تحقیق خروجی‌های دستگاه PFWD در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ هستند را نشان می‌دهد. برای این منظور بر روی افت و خیزهای برداشت شده از این دو قسمت روسازی با استفاده از نرم افزار SPSS آزمون t انجام شده و نتایج آن در شکل (۲-۴) ارائه شده است.

Paired Samples Test								
	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 1 DD0-D0	.09445	.06517	.00752	.07946	.10945	12.552	74	.000

شکل (۲-۴) خروجی آزمون t در نرم افزار SPSS

همان‌طور که در خروجی آزمون t در نرم افزار SPSS مشخص است، مقدار t برابر ۱۲/۵۵۲ به دست آمده است. همچنین مقدار معناداری^۱ (sig) برای دو مقدار افت و خیز در مسیر چرخ و خارج مسیر چرخ برابر صفر به دست آمده است. با توجه به آزمون t چون مقدار معناداری از ۰/۰۵ کمتر است، فرض H_1 پذیرفته می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که دو نمونه‌ی مورد نظر (افت و خیز در مسیر

^۱ Significant

چرخ و خارج از مسیر چرخ) از نظر آماری با یکدیگر اختلاف قابل توجهی خواهند داشت. به عبارت دیگر دو نمونه را می‌توان به صورت جداگانه در دو دسته یا گروه متفاوت قرار داد. یعنی می‌توان نتیجه گرفت که افت و خیز روسازی در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ کاملاً با هم متفاوت خواهد بود.

۳-۴- مقایسه‌ی خروجی‌های دستگاه PFWD با آزمایش خستگی

این مطالعه در نظر دارد رابطه و پیوستگی‌ای بین نتایج دستگاه PFWD و آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای برقرار کرده تا بتوان با استفاده از یک آزمایش غیر مخرب، خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی را که با یک آزمایش مخرب تعیین می‌شود، پیش بینی کرد. از طرفی در این قسمت به بررسی و مقایسه‌ی عمر خستگی در دو قسمت مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ و بررسی این حدس که آیا خستگی باعث افزایش افت و خیز در مسیر چرخ شده، پرداخته می‌شود.

۳-۴-۱- رابطه‌ی خطی بین افت و خیز و عمر خستگی نمونه‌ها

همان‌طور که در فصل سوم توضیح داده شده است، داده‌های مربوط به ۲۵ ایستگاه مختلف با استفاده از دستگاه PFWD برداشت شده است و سپس در ۳ ایستگاه آسفالت روسازی برش داده شده و پس از آماده‌سازی، نمونه‌های تیری‌شکل تحت آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای قرار گرفته است. همان‌طور که از جداول (۲-۳) و (۳-۳) مشخص است در هر ایستگاه و برای هر نقطه ۳ تکرار در برداشت‌های PFWD انجام شده است. برای بررسی نتایج دستگاه PFWD و دستگاه خستگی از ۳ تکرار انجام شده میانگین گرفته و با عمر خستگی حاصل از آزمایش خستگی مقایسه می‌شود. نتایج مقایسه‌ی خروجی‌های دستگاه PFWD که در دمای محیط (به طور متوسط ۲۲ درجه سانتی‌گراد) و عمر خستگی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در جدول (۴-۱) و همچنین برای دمای صفر درجه سانتی‌گراد نیز در جدول (۴-۲) ارائه شده است.

جدول (۱-۴) مقایسه‌ی نتایج عمر خستگی در دمای ۲۵ درجه و افت و خیز حاصل از ضربه PFWD

شماره ایستگاه	در مسیر چرخ ها		خارج از مسیر چرخ ها	
	D ₀	N _f '	D ₀	N _f
A1	۰/۴۱۷	۸۶۹۸	۰/۲۴۷	۱۳۰۰۰
A18	۰/۳۱۹	۷۱۵۲	۰/۱۸۴	۱۶۷۸۱
A24	۰/۲۲۴	۱۳۱۶۸	۰/۱۴۰	۲۸۸۸۷

جدول (۲-۴) مقایسه‌ی نتایج عمر خستگی در دمای صفر درجه و افت و خیز حاصل از ضربه PFWD

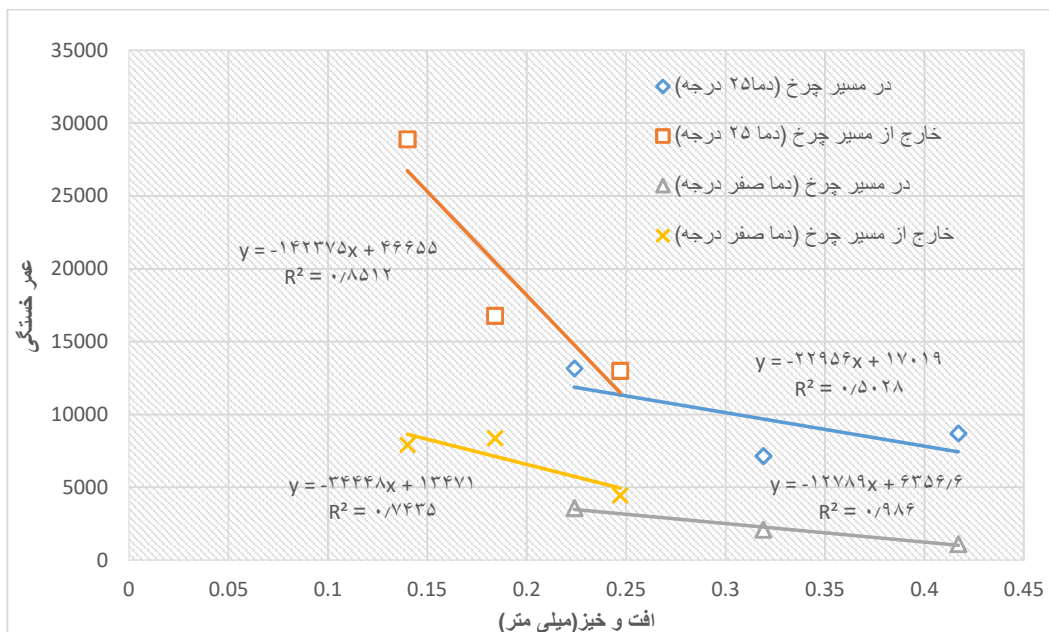
شماره ایستگاه	در مسیر چرخ ها		خارج از مسیر چرخ ها	
	D ₀	N _f '	D ₀	N _f
A1	۰/۴۱۷	۱۱۰۷	۰/۲۴۷	۴۴۴۸
A18	۰/۳۱۹	۲۱۰۷	۰/۱۸۴	۸۳۸۲
A24	۰/۲۲۴	۳۵۷۸	۰/۱۴۰	۷۹۱۲

با استفاده از نتایج ارائه شده در جداول بالا نمودار پراکنش^۱ دو متغیر عمر خستگی و افت و خیز رسم شده و خطی برای آن‌ها برازش داده شده و نتایج آن برای دو دمای ۲۵ و صفر درجه سانتی‌گراد در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است.

همان‌طور که از شکل (۳-۴) پیداست، ضرایب همبستگی^۲ برای خطوط برازش داده شده بالا و قابل قبول خواهد بود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی بالایی بین نتایج افت و خیز برداشت شده به وسیله‌ی دستگاه PFWD و عمر خستگی نمونه‌ها وجود دارد. لازم به ذکر است که از همان نقطه‌هایی که برداشت‌های PFWD انجام شده، آسفالت برش داده شده و نمونه‌برداری شده و عمر خستگی نمونه‌های تیری شکل نیز با استفاده از دستگاه خستگی چهار نقطه‌ای تعیین شده است. از طرفی طبق نمودارها همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش افت و خیز حاصل از ضربه‌ی PFWD، عمر خستگی نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند.

^۱ Scatter Chart

^۲ Correlation Coefficient



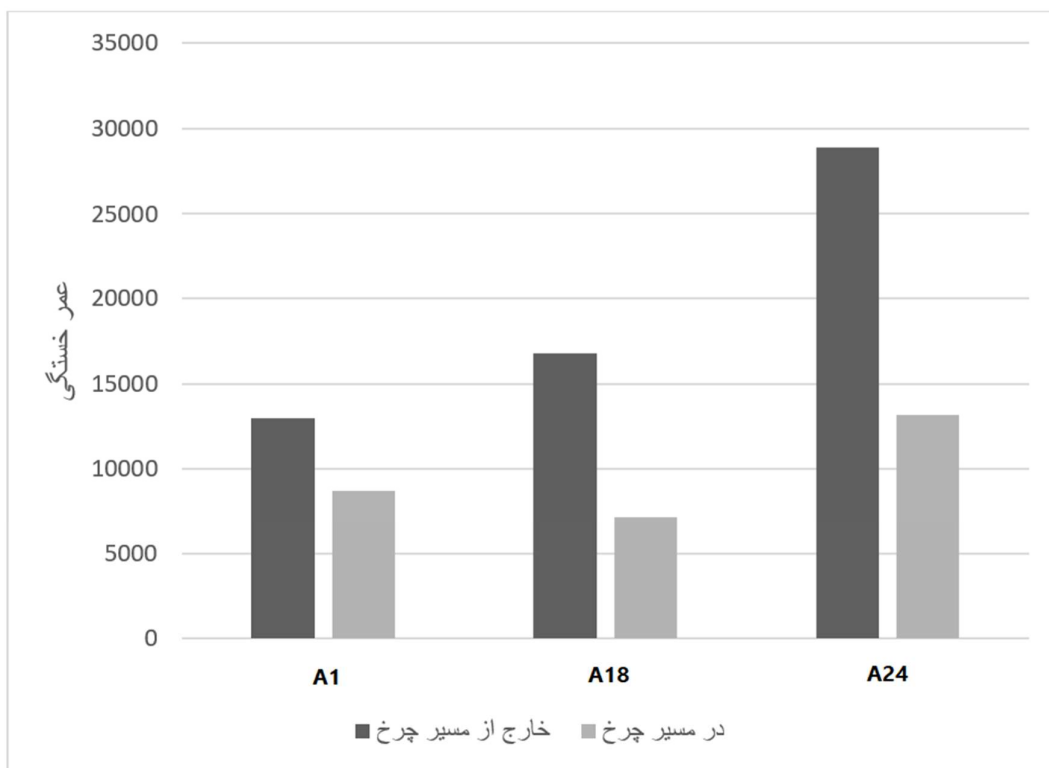
شکل (۳-۴) رابطه ی بین افت و خیز و عمر خستگی

۲-۳-۴- تأثیر دما بر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی

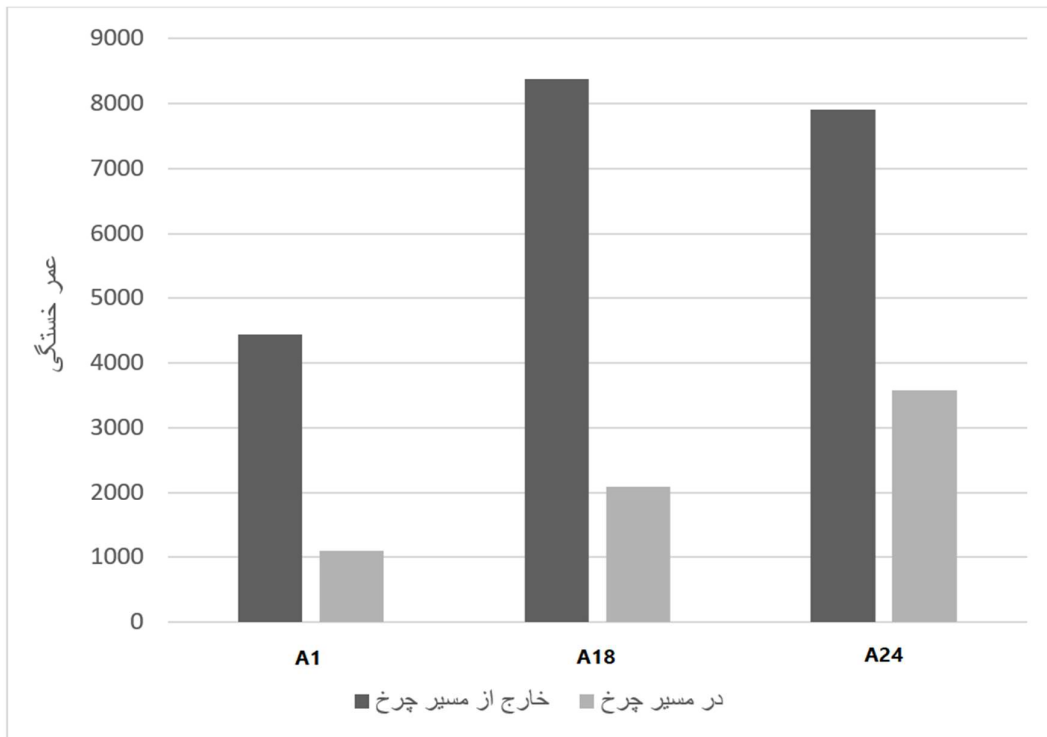
با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل (۳-۴) می‌توان تأثیر دما را نیز بر عمر خستگی نمونه‌ها بررسی کرد. همان‌طور که از شکل هم مشخص است، نمودار مربوط به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر از نمودار مربوط به دمای صفر درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عمر خستگی در نمونه‌ها در اثر کاهش دما کاهش پیدا کرده است. به طور مثال و با توجه به جداول (۱-۴) و (۲-۴) در ایستگاه نمونه برداری A1 و در نمونه‌ای که در مسیر چرخ قرار داشته با کاهش دما از ۲۵ به صفر درجه سانتی‌گراد، عمر خستگی از ۸۶۹۸ به ۱۱۰۷ و در نمونه‌ای که در مسیر چرخ قرار داشته، از ۱۳۰۰۰ به ۴۴۴۸ رسیده است. لازم به یادآوری است که نمونه‌ها قبل از بارگذاری به مدت دو ساعت در دمای آزمایش قرار گرفته تا دما در کل نمونه ثابت شود.

۳-۳-۴- بررسی عمر خستگی نمونه‌ها در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ

نمودارهای دو شکل (۴-۴) و (۵-۴) به ترتیب عمر خستگی نمونه‌ها را در دو دمای ۲۵ و صفر درجه سانتی‌گراد، در دو قسمت مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ با هم مقایسه می‌کند. طبق انتظار قبلی و همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده در این دو شکل مشخص است در هر دو دمای ۲۵ و صفر درجه سانتی‌گراد، عمر خستگی در نمونه‌هایی که در مسیر چرخ قرار داشته‌اند از نمونه‌هایی که در خارج از مسیر چرخ بوده‌اند، کمتر است. همچنین اختلاف عمرهای خستگی در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای صفر درجه سانتی‌گراد است. به عبارت دیگر این اختلاف در دمای بالاتر بیشتر نمایان شده است.



شکل (۴-۴) مقایسه‌ی عمر خستگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ

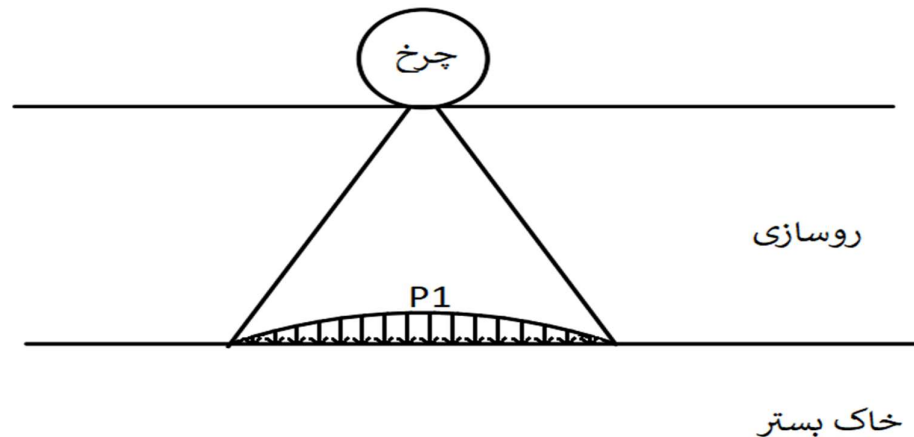


شکل (۴-۵) مقایسه‌ی عمر خستگی در دمای صفر درجه سانتی گراد در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ

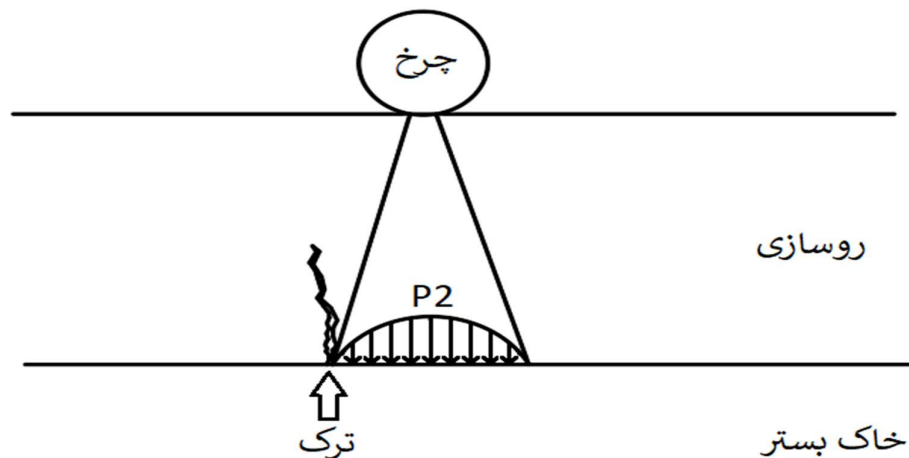
در بخش ۳-۴ از همین فصل مشخص شد که افت و خیز در مسیر چرخ بیشتر از خارج مسیر چرخ است و با توجه به این که تمام شرایط از جمله شرایط روسازی و زیرسازی در یک ایستگاه کاملاً یکسان است، حدس زده شد که خستگی بیشتر در مسیر چرخ باعث بیشتر شدن افت و خیز در این قسمت نسبت به خارج از مسیر چرخ شده است. سپس در این بخش نیز ثابت شد روسازی در مسیر چرخ بیشتر دچار خستگی شده است.

زمین در حالت طبیعی نمی‌تواند بار وارده از چرخ وسایل نقلیه را به خوبی تحمل کند. به همین دلیل سازه‌ی روسازی روی آن ساخته شده تا تنش وارده به خاک را کاهش داده و به اندازه قابل تحمل برای خاک بستر تبدیل کند. همان‌طور که در شکل (۴-۶) مشخص شده، درحالتی که روسازی سالم باشد، بار وارده از چرخ را در سطح مناسبی تقسیم خواهد کرد. [۴۴]

حال اگر به هر دلیلی پیوستگی در لایه روسازی از بین برود، همانند شکل (۷-۴)، فشار بار وارده از چرخ نسبت به حالتی که روسازی سالم است، در سطح کمتری پخش می‌شود، یا به عبارتی برای یک بار چرخ برابر، P_2 بزرگتر از P_1 خواهد بود و در نتیجه باعث می‌شود تنش وارده به خاک بستر افزایش یابد. خستگی آسفالت نیز سبب تشکیل ترک‌های ریز و درشت در زیر لایه آسفالتی خواهد شد و در نتیجه همانند شکل (۷-۴) کارکرد آن دچار اختلال می‌شود. در این بخش ثابت شد که عمر خستگی در مسیر چرخ کمتر از خارج مسیر چرخ است و یا به عبارتی تحت اثر عبور وسایل نقلیه، قسمتی که در زیر بار چرخ قرار می‌گیرد بیشتر دچار خرابی شده است، پس در اثر وارد شدن ضربه دستگاه PFWD تنش بیشتری به خاک بستر منتقل شده و در نتیجه افت و خیز در این قسمت بیشتر از قسمت خارج از مسیر چرخ خواهد شد.



شکل (۶-۴) توزیع بار ناشی از چرخ در روسازی سالم



شکل (۷-۴) توزیع بار ناشی از چرخ در روسازی دارای ترک

۴-۳-۴- رگرسیون خطی بین داده‌های PFWD و عمر خستگی

رگرسیون یک نوع مدل آماری برای پیش‌بینی یک متغیر وابسته از روی یک یا چند متغیر مستقل است. رگرسیون خطی نوعی تابع پیش‌بینی کننده‌ی خطی است که در آن متغیر وابسته (متغیری که قرار است پیش‌بینی شود) به صورت ترکیبی از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌شود. بدین معنی که هر کدام از متغیرهای مستقل در ضریبی که در فرآیند تخمین برای آن متغیر به دست آمده ضرب می‌شود. جواب نهایی مجموع حاصل ضرب‌ها به علاوه‌ی یک مقدار ثابت خواهد بود که آن هم در فرآیند تخمین به دست آمده است.

تحلیل‌های رگرسیونی یکی از انواع تکنیک‌های آماری است که برای مدل‌سازی و ارزیابی ارتباط میان متغیر وابسته و متغیرهای مستقل به کار می‌رود. کاربردهای رگرسیون بسیار زیاد بوده و در علومی همچون مهندسی، شیمی، فیزیک و سایر زمینه‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه از نرم افزار SPSS جهت تحلیل رگرسیونی استفاده شده است. عمر خستگی حاصل از دستگاه چهار نقطه‌ای که بر اساس معیار کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه تعیین شده است، به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای

خروجی از دستگاه PFWD شامل افت و خیز، نیرو، مدول سختی و مدول الاستیسیته ی مرکب لایه‌ها، به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شود. تمامی متغیرها برای سه ایستگاه در دو دمای ۲۵ و صفر درجه سانتی گراد در جداول (۳-۴) و (۴-۴) ارائه شده است.

جدول (۳-۴) متغیرهای خروجی دستگاه PFWD در دمای محیط و خستگی در دمای ۲۵ درجه

	شماره ایستگاه	Nf	D0(mm)	F(N)	K	E
در مسیر چرخ	A1	۸۶۹۸	۰/۴۱۷	۳۶۸۲	۳۷۹	۸۱
	A18	۷۱۵۲	۰/۳۱۹	۳۶۰۸	۴۸۱	۱۰۳
	A24	۱۳۱۶۸	۰/۲۲۴	۳۶۴۳	۶۴۲	۱۳۷
خارج از مسیر چرخ	A1	۱۳۰۰۰	۰/۲۴۷	۳۷۸۵	۶۶۴	۱۴۲
	A18	۱۶۷۸۱	۰/۱۸۴	۳۶۲۱	۵۸۲	۱۲۵
	A24	۲۸۸۸۷	۰/۱۴۰	۳۶۲۹	۱۱۱۴	۲۳۹

جدول (۴-۴) متغیرهای خروجی دستگاه PFWD در دمای محیط و خستگی در دمای صفر درجه

	شماره ایستگاه	Nf	D0(mm)	F(N)	K	E
در مسیر چرخ	A1	۱۱۰۷	۰/۴۱۷	۳۶۸۲	۳۷۹	۸۱
	A18	۲۱۰۷	۰/۳۱۹	۳۶۰۸	۴۸۱	۱۰۳
	A24	۳۵۷۸	۰/۲۲۴	۳۶۴۳	۶۴۲	۱۳۷
خارج از مسیر چرخ	A1	۴۴۴۸	۰/۲۴۷	۳۷۸۵	۶۶۴	۱۴۲
	A18	۸۳۸۲	۰/۱۸۴	۳۶۲۱	۵۸۲	۱۲۵
	A24	۷۹۱۲	۰/۱۴۰	۳۶۲۹	۱۱۱۴	۲۳۹

ابتدا با استفاده از نرم افزار SPSS جدول ضرایب همبستگی متغیرهای مستقل و وابسته را به دست آورده و همبستگی متغیرها بررسی خواهد شد. جدول همبستگی خروجی از نرم افزار SPSS در شکل (۸-۴) ارائه شده است. با توجه به مقادیر ضریب همبستگی می توان نتیجه گرفت که عمر خستگی بیشترین همبستگی را با افت و خیز (D_0)، مدول سختی (K) و مدول الاستیسیته لایه ها (E) خواهد داشت و همچنین کمترین ضریب همبستگی مربوط به نیرو (F) است. بنابراین می توان متغیر نیرو را از مدل رگرسیون حذف کرد. از طرفی با بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل، مشاهده می شود که ضریب همبستگی بین دو متغیر مدول سختی و مدول الاستیسیته لایه ها بالا و برابر یک است به عبارتی این دو متغیر مستقل نبوده و به هم وابسته اند. پس می توان یکی از این متغیرها را نیز از مدل حذف کرد. در نهایت مدل رگرسیون خطی عمر خستگی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد با استفاده از دو متغیر مستقل افت و خیز و مدول الاستیسیته لایه ها توسط نرم افزار SPSS انجام شده و در رابطه (۱-۴) ارائه شده است. همین روند برای نمونه های آزمایش شده در دمای صفر درجه سانتی گراد انجام شده و مدل رگرسیون خطی عمر خستگی در این دما نیز در رابطه (۲-۴) ارائه شده است. همچنین ضرایب همبستگی متغیرها در دمای صفر درجه سانتی گراد در شکل (۹-۴) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که آزمایش PFWD در دمای محیط (به طور متوسط دمای محیط برابر ۲۲ درجه سانتی گراد است) انجام شده و آزمایش خستگی روی همان نمونه ها در دو دمای ۲۵ و صفر درجه انجام گرفته است. به عبارت دیگر متغیرهای مستقل که شامل E و D_0 در دمای محیط برداشت شده اند.

$$N_{f25} = 1011.213 - 10872.388(D_0) + 118.820(E) \quad : \quad R^2 = 0.898 \quad (۱-۴)$$

$$N_{f0} = 12870.847 - 29490.421(D_0) - 5.491(E) \quad : \quad R^2 = 0.814 \quad (۲-۴)$$

Correlations

		NF25	D0	K	F	E
NF25	Pearson Correlation	1	-.817*	.943**	-.174	.944**
	Sig. (2-tailed)		.047	.005	.741	.005
	N	6	6	6	6	6
D0	Pearson Correlation	-.817*	1	-.816*	.186	-.816*
	Sig. (2-tailed)	.047		.048	.724	.048
	N	6	6	6	6	6
K	Pearson Correlation	.943**	-.816*	1	-.084	1.000**
	Sig. (2-tailed)	.005	.048		.875	.000
	N	6	6	6	6	6
F	Pearson Correlation	-.174	.186	-.084	1	-.086
	Sig. (2-tailed)	.741	.724	.875		.871
	N	6	6	6	6	6
E	Pearson Correlation	.944**	-.816*	1.000**	-.086	1
	Sig. (2-tailed)	.005	.048	.000	.871	
	N	6	6	6	6	6

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

شکل (۴-۸) ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته در دمای ۲۵ درجه

Correlations

		NF0	D0	F	K	E
NF0	Pearson Correlation	1	-.900*	-.202	.699	.702
	Sig. (2-tailed)		.014	.700	.122	.120
	N	6	6	6	6	6
D0	Pearson Correlation	-.900*	1	.186	-.816*	-.816*
	Sig. (2-tailed)	.014		.724	.048	.048
	N	6	6	6	6	6
F	Pearson Correlation	-.202	.186	1	-.084	-.086
	Sig. (2-tailed)	.700	.724		.875	.871
	N	6	6	6	6	6
K	Pearson Correlation	.699	-.816*	-.084	1	1.000**
	Sig. (2-tailed)	.122	.048	.875		.000
	N	6	6	6	6	6
E	Pearson Correlation	.702	-.816*	-.086	1.000**	1
	Sig. (2-tailed)	.120	.048	.871	.000	
	N	6	6	6	6	6

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

شکل (۴-۹) ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته در دمای صفر درجه

۴-۴- مقایسه نتایج و خروجی‌های دستگاه PFWD با آزمایش خمش

۴-۴-۱- بررسی پیوستگی بین افت و خیز حاصل از PFWD و حداکثر نیرو تحمل در آزمایش خمش

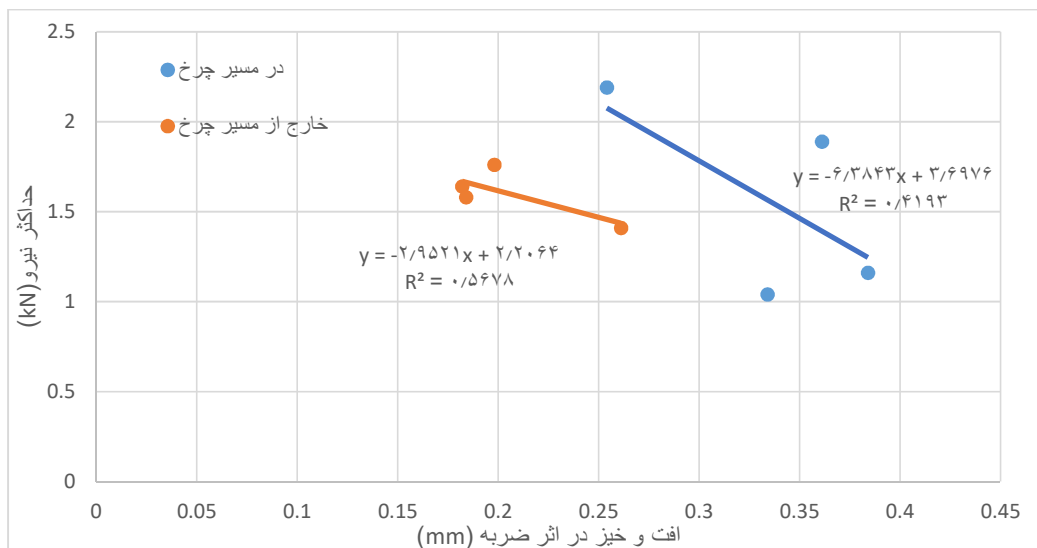
همان‌طور که در فصل سوم توضیح داده شد، داده‌های مربوط به ۲۵ ایستگاه مختلف با استفاده از دستگاه PFWD برداشت شده است و سپس در ۴ ایستگاه آسفالت روسازی برش داده شده و پس از آماده سازی، نمونه‌های تیری شکل تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته است. همان‌طور که از جداول (۲-۳) و (۳-۳) مشخص است در هر ایستگاه و برای هر نقطه ۳ تکرار در برداشت‌های PFWD انجام شده است. برای بررسی نتایج دستگاه PFWD و خروجی‌های خمش سه نقطه از ۳ تکرار انجام شده میانگین گرفته و با حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌ها در آزمایش خمش سه نقطه مقایسه می‌شود. نتایج مقایسه‌ی خروجی‌های دستگاه PFWD و حداکثر نیروهای تحمل شده توسط نمونه‌ها در جدول (۴-۵) ارائه شده است.

جدول (۴-۵) مقایسه حداکثر نیروی تحمل شده در آزمایش خمش با افت و خیز FWD

شماره ایستگاه	در مسیر چرخ		خارج از مسیر چرخ	
	F'max(kN)	D'0(mm)	Fmax(kN)	D0(mm)
A9	۱/۱۶	۰/۳۸۴	۱/۷۶	۰/۱۹۸
A11	۱/۸۹	۰/۳۶۱	۱/۴۱	۰/۲۶۱
A15	۱/۰۴	۰/۳۳۴	۱/۵۸	۰/۱۸۴
A22	۲/۱۹	۰/۲۵۴	۱/۶۴	۰/۱۸۲

با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول (۴-۵) نمودار پراکنش دو متغیر حداکثر نیروی (F_{max}) تحمل شده توسط نمونه‌ی آسفالتی در آزمایش خمش و افت و خیز (D0) ایجاد شده در اثر ضربه‌ی دستگاه PFWD رسم شده و خطی برای آن‌ها برازش داده شده و نتایج آن برای دو سری از داده‌ها که یکی در مسیر چرخ بوده و دیگری خارج از مسیر چرخ بوده است، در شکل (۴-۱۰) نمایش داده شده است.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل (۴-۱۰) که به بررسی همبستگی بین نتایج دستگاه PFWD و آزمایش خمش سه نقطه پرداخته است، در حالت کلی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقدار افت و خیز تحت ضربه‌ی دستگاه PFWD، حداکثر نیروی تحمل شده‌ی نمونه‌ی آسفالتی تحت آزمایش خمش کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی ضرایب همبستگی بین نتایج دستگاه PFWD و آزمایش خمش با ضرایب همبستگی بین نتایج دستگاه PFWD و آزمایش خستگی که در شکل (۴-۳) ارائه شده است، مشخص می‌شود که همبستگی بین نتایج دستگاه PFWD با آزمایش خستگی به مراتب بالاتر از همبستگی بین نتایج این دستگاه با آزمایش خمش بوده است. با این حال با توجه به ضرایب همبستگی می‌توان نتیجه گرفت که بین داده‌های آزمایش خمش و دستگاه PFWD همبستگی قابل قبولی وجود ندارد. لازم به یادآوری است در آزمایش خمش هم همانند آزمایش خستگی، از همان نقاطی که افت و خیز تحت ضربه‌ی دستگاه PFWD برداشت شده، نمونه برداری شده و آزمایش خمش سه نقطه روی آن‌ها انجام شده است.



شکل (۴-۱۰) رابطه‌ی بین افت و خیز و حداکثر نیروی آزمایش خمش سه نقطه

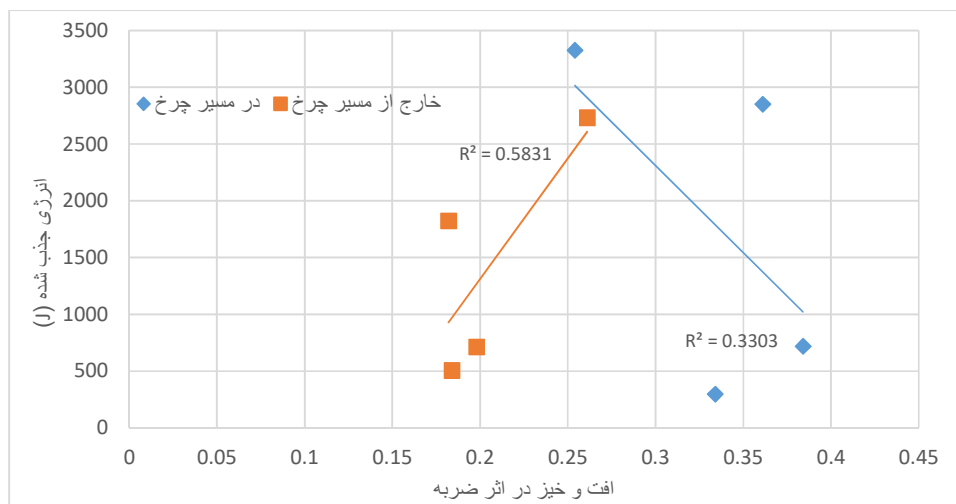
۴-۴-۲- بررسی پیوستگی بین افت و خیز حاصل از PFWD و انرژی جذب شده در آزمایش خمش

انرژی جذب شده در آزمایش خمش برابر با مساحت زیر نمودار نیرو در مقابل جا به جایی خواهد بود. برای بررسی پیوستگی این نتایج با افت و خیز حاصل از دستگاه PFWD، مقادیر انرژی جذب شده نمونه‌ها به همراه افت و خیز برداشت شده در جدول (۴-۶) ارائه شده است. نمودار پراکنش دو متغیر انرژی جذب شده و افت و خیز برداشت شده با استفاده از دستگاه PFWD در شکل (۴-۱۱) رسم شده و خطی بر آن برازش داده می‌شود تا میزان همبستگی این دو متغیر مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر است که آزمایش PFWD در دمای محیط و در محل جاده انجام شده که دما به طور متوسط ۲۲ درجه بوده و همچنین آزمایش خمش نیز در دمای محل آزمایشگاه که برابر ۲۲ درجه سانتی گراد بوده است، انجام گرفته است. طبق نمودار ارائه شده در این شکل می‌توان مشاهده کرد که ضرایب همبستگی در هر دو گروه نمونه‌های واقع در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ پایین هستند، علاوه بر این در نمونه‌هایی که در خارج از مسیر چرخ واقع شده‌اند، با افزایش افت و خیز، نیروی جذب شده تا لحظه

گسیختگی افزایش یافته و در نمونه‌هایی که در مسیر چرخ قرار داشته‌اند، با افزایش افت و خیز انرژی جذب شده توسط نمونه کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بین این دو پارامتر همبستگی وجود ندارد. به عبارت دیگر از روی مقدار افت و خیز حاصل از دستگاه PFWD نمی‌توان روند افزایش یا کاهش انرژی جذب شده در آزمایش خمش را پیش‌بینی کرد.

جدول (۴-۶) مقایسه انرژی جذب شده در آزمایش خمش با افت و خیز FWD

شماره ایستگاه	در مسیر چرخ		خارج از مسیر چرخ	
	D'0(mm)	E'f(J)	D0(mm)	Ef(J)
A9	۰/۳۸۴	۷۲۰/۳۰۷	۰/۱۹۸	۷۱۴/۰۱
A15	۰/۳۳۴	۲۹۷/۰۷۲	۰/۱۸۴	۵۰۸/۴۲۹
A22	۰/۲۵۴	۳۳۲۶/۱۲۶	۰/۱۸۲	۱۸۲۵/۲۷۲
A11	۰/۳۶۱	۲۸۵۱/۴۰۴	۰/۲۶۱	۲۷۳۴/۱۵۷



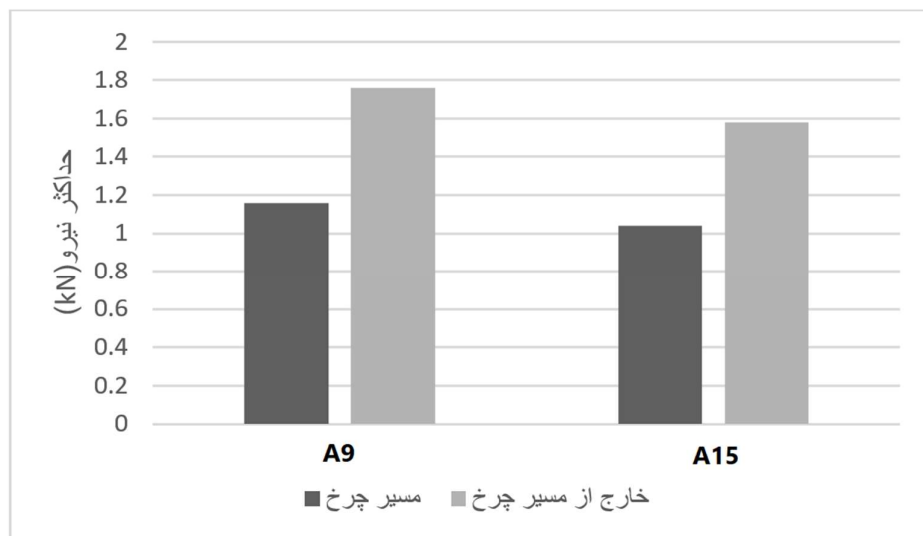
شکل (۴-۱۱) رابطه‌ی بین افت و خیز و انرژی جذب شده در آزمایش خمش سه نقطه

۴-۵- تأثیر خستگی بر حداکثر بار تحمل شده در آزمایش خمش

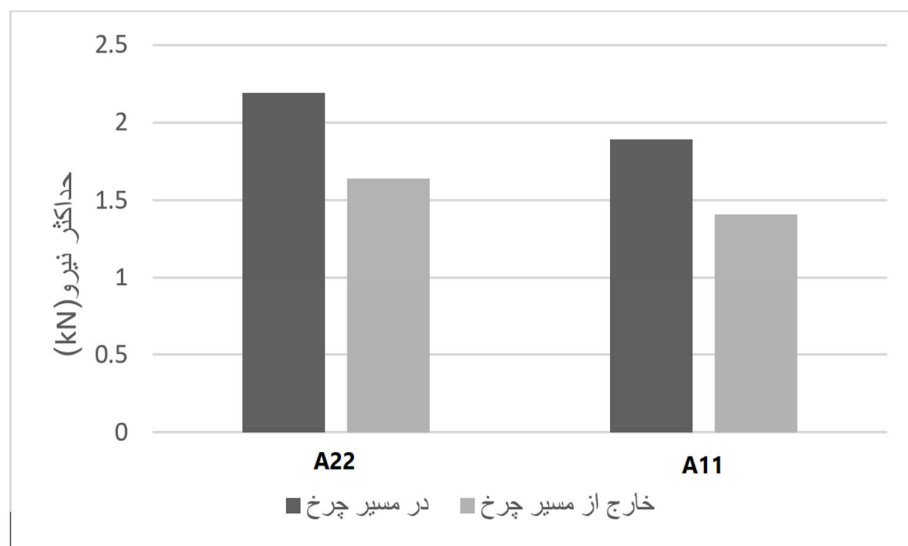
همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده در شکل (۳-۱۴) مشخص است، نمونه‌هایی که تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار گرفته‌اند، به دو شکل متفاوت به نقطه‌ی گسیختگی رسیده‌اند. دو نمونه به طور ناگهانی و در زمان کم و دو نمونه دیگر با شیب کمتر و زمان بیشتری طول کشیده تا به نقطه گسیختگی رسیده‌اند. به عبارت دیگر در نمونه‌هایی که شیب نمودار نیرو در مقابل جا به جایی زیاد است، شکست ترد اتفاق افتاده و در نمونه‌هایی که شیب کمتری دارند شکست نرم اتفاق افتاده است. مقادیر حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌ها و نوع شکست آن‌ها در جدول (۴-۶) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل (۴-۱۲) مشخص شد که در نمونه‌هایی که به صورت ترد شکسته‌اند، حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه در خارج از مسیر چرخ بیشتر از نمونه‌های واقع در مسیر چرخ بوده‌اند. به عبارت دیگر در نمونه‌های با شکست ترد، خستگی ایجاد شده در مسیر چرخ سبب کاهش حداکثر نیروی تحمل در آزمایش خمش شده است. همچنین با توجه به شکل (۴-۱۳) مشخص شد در نمونه‌هایی که به صورت نرم شکسته‌اند، برعکس حالت قبلی، حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه در خارج از مسیر چرخ کمتر از نمونه‌های واقع در مسیر چرخ بوده است. به عبارت دیگر در نمونه‌های با شکست نرم، خستگی ایجاد شده در مسیر چرخ باعث افزایش حداکثر نیروی تحمل شده در آزمایش خمش شده است.

جدول (۴-۷) حداکثر نیروی تحمل شده در نمونه‌های با شکست ترد و نرم

شماره ایستگاه	نوع شکست	در مسیر چرخ	خارج از مسیر چرخ
		F'max(kN)	Fmax(kN)
A9	ترد	۱/۱۶	۱/۷۶
A15	ترد	۱/۰۴	۱/۵۸
A11	نرم	۱/۸۹	۱/۴۱
A22	نرم	۲/۱۹	۱/۶۴



شکل (۴-۱۲) مقایسه حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌هایی که به صورت ترد شکسته اند



شکل (۴-۱۳) مقایسه حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌هایی که به صورت نرم شکسته اند

فصل ۵: نتایج این تحقیق و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده

۵-۱- مقدمه

هدف از این مطالعه بررسی رابطه و همبستگی بین نتایج دستگاه PFWD و آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای در روسازی آسفالتی بود. همچنین در ادامه نیز رابطه و همبستگی بین نتایج دستگاه PFWD و آزمایش خمش سه نقطه بررسی شد. برای این منظور ابتدا با استفاده از دستگاه PFWD در جاده‌ی قدیم شاهرود به میامی اقدام به برداشت داده‌های روسازی در دو قسمت مسیر چرخ و خارج از مسیر شده است. پس از برداشت داده‌ها، آسفالت روسازی برش داده شده و نمونه‌هایی برای آزمایش های خستگی و خمش سه نقطه آماده شده و خصوصیات خستگی و خمش آنها نیز تعیین شده است.

۵-۲- نتیجه گیری

تحلیل و ارزیابی داده‌های آزمایش‌های خستگی و خمش و همچنین دستگاه PFWD نتایج زیر حاصل گردید.

۱- با توجه به نمودارهای جعبه‌ای و آزمون t که روی داده‌های دستگاه PFWD انجام شد، مشخص شد که پارامترهای خروجی از دستگاه PFWD در دو قسمت مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ کاملاً با هم متفاوت خواهند بود.

۲- با رسم نمودارهای پراکنش دو داده‌ی افت و خیز تحت بار ضربه‌ای دستگاه PFWD و عمر خستگی حاصل از آزمایش خستگی چهار نقطه در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ و همچنین در دو دمای ۲۵ و صفر درجه سانتی‌گراد، در مرحله اول مشخص شد که عمر خستگی در نقاط واقع در مسیر چرخ کمتر از نقاط واقع در خارج از مسیر چرخ بوده و همچنین در مرحله دوم ثابت شد که کاهش دما بر عمر خستگی نمونه‌ها مؤثر بوده و باعث کاهش عمر خستگی در نمونه‌های تیری شکل خواهد شد.

۳- با برازش خط بر نمودار پراکنش دو داده‌ی افت و خیز تحت بار ضربه‌ای دستگاه PFWD و عمر خستگی نمونه‌ها مشخص شد که همبستگی بالایی بین نتایج این دو آزمایش وجود دارد. به طوری که با افزایش افت و خیز تحت بار ضربه‌ای دستگاه PFWD، عمر خستگی حاصل از آزمایش خستگی

کاهش می‌یابد.

۴- با توجه به این که در یک ایستگاه نمونه برداری شرایط روسازی و زیرسازی یکسان بوده است و همچنین عملکرد روسازی در انتقال بار به خاک بستر، مشخص شده است که خستگی بیشتر و وجود ترک‌های ناشی از خستگی در روسازی باعث می‌شود که افت و خیز تحت بار ضربه‌ای دستگاه PFWD، در مسیر چرخ وسایل نقلیه بیشتر از افت و خیز در خارج مسیر چرخ باشد.

۵- نتایج رگرسیون خطی نشان داد که عمر خستگی نمونه‌ها همبستگی بالایی با دو متغیر افت و خیز و مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ها خواهد داشت. بنابراین دو مدل رگرسیون خطی با استفاده از نرم افزار SPSS برای دماهای ۲۵ و صفر درجه سانتی گراد ارائه شد. ضریب R^2 برای مدل‌های خروجی برای دماهای ۲۵ و صفر درجه به ترتیب ۰/۸۹۸ و ۰/۸۱۴ خواهد بود.

۶- با برازش خط بر نمودار پراکنش در داده‌های افت و خیز تحت بار ضربه‌ای دستگاه PFWD و حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌ی تیری شکل در آزمایش خمش، مشخص شد که بین این دو داده نیز همبستگی وجود خواهد داشت. هر چند که ضرایب همبستگی بین این دو داده در مقایسه با آزمایش خستگی کمتر خواهد بود. همچنین با افزایش افت و خیز تحت بار ضربه‌ای دستگاه PFWD، حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه در آزمایش خمش نیز کاهش خواهد یافت.

۷- خستگی بیشتر در مسیر چرخ در نمونه‌هایی که به صورت ترد شکسته‌اند باعث کاهش حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های واقع در خارج از مسیر چرخ شده است، اما در نمونه‌هایی که به صورت نرم شکست خورده‌اند، نتیجه برعکس بوده و حداکثر نیروی تحمل شده در مسیر چرخ بیشتر از خارج مسیر چرخ بوده است.

۵-۳- پیشنهادات

۱- با توجه به تفاوت معنادار مشخصات فنی در دو قسمت واقع در مسیر چرخ و خارج از مسیر چرخ، می‌توان روی نحوه‌ی انجام تعمیرات کار کرد و روشی مناسب به طور مثال تعمیر موضعی راه در مسیر چرخ‌ها را برای تعمیر پیشنهاد کرد.

۲- همبستگی و رابطه‌ی بین افت و خیز برداشت شده از PFWD و عمر خستگی حاصل از آزمایش خستگی برای روسازی‌های مختلف با شرایط متفاوت مورد بررسی قرار گیرد.

۳- بررسی علت افزایش حداکثر نیروی تحمل شده در نمونه‌های با شکست نرم در مقابل کاهش مقاومت تحمل در نمونه‌های با شکست ترد در اثر خستگی. به عبارت دیگر بررسی شود که چرا با وجود خستگی بیشتر در مسیر چرخ، در حالتی که نمونه به صورت نرم دچار شکست می‌شود، حداکثر نیروی تحمل شده در این قسمت بیشتر از خارج مسیر چرخ خواهد بود.

منابع

[1] Mallick, Rajib Basu. (1996) "Pavement engineering, principle and practice Rajib B. Mallick", Tahar El-korchi

[2] Hafeez I, Kamal MA, Mirza MW, Bilal S. (2013) "Laboratory fatigue performance evaluation of different field laid asphalt mixtures". Constr Build Mater; 44:792–7.

[3] Bazin P, Saunier JB, Deformability. (1967) "fatigue and healing properties of asphalt mixes. In: Second international conference on the structural design of asphalt pavements proc". ann Arbor. Michigan.

[4] Bell CA. (1969) "Summary report on ageing of asphalt aggregate systems". In: Project A- 003A (performance related testing and measurement of asphalt–aggregate interactions and mixtures). Strategic Highway Research Program, National Research Centre, Washington, USA

[5] Khattak M.J, and Baladi G.Y. (2001) "Fatigue and Permanent Deformation Models for Modified Asphalt Mixtures," Transportation Research Record", No. 1767, Transportation Research Board, Washington, D. C.

[6] George, V.; Rao, N. H.; Shivashankar, R. (2009) "PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades", International Journal of Pavement Engineering 10(3):189–199.

[7] Steinert, B. C.; Humphrey, D. N.; Kestler, M. A. (2006)"Portable falling weight deflectometers for tracking seasonal stiffness variations in asphalt surfaced roads". Transportation Research Board Meeting, National Research Council, CD-ROM, Washington D.C.

(۸) برازوان، س.، بامداد زیکساری، آ.، قربانی، م.، شورمیچ، ا. (۱۳۹۲). "مقایسه نتایج LWD و

FWD و شبیه سازی آن با نرم افزار اجزای محدود آباکوس"، پژوهشنامه حمل نقل، سال دهم، شماره

دوم، ۱۲۹-۱۴۲.

(۹) عامری، محمود و افتخارزاده، سید فرهاد. (۱۳۷۸) "مدیریت روسازی برای راه ها ، فرودگاه

ها ، پارکینگ ها". مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت.

[10] Owende P.M.O, Hartman A.M, Shane M, Gilchrist M, and Mahony M. (2001) "Minimizing Distress on Flexible Pavements Using Variable Tire Pressure", Journal of Transportation Engineering, Vol. 127, No. 3, May/June.

(۱۱) کاوسی ا، زمانی مرتضوی ش. (۱۳۸۳) "ارزیابی سازهای آزاده راه تهران قم با استفاده از

دستگاه افت و خیز سنج ضربه‌ای". فنی مهندسی تربیت مدرس، شماره ۱۵.

[12] Code-772. (2017) "Guideline for Nondestructive Testing. Tehran: The Ministry of Road and Urban Development, Road, Housing & Urban Development", Publication Number 772.

[13] Dore G, Zubeck H. K. (2009) "Cold Regions Pavement Engineering, America Society of Civil Engineers", ASCE PRESS Hill.

(۱۴) قربانی م، بامداد آ، شورمیچ ا، برازوان س. (۱۳۹۱) "ارزیابی سازه ای روسازی با استفاده از

پارامتر های کاسه انحنای افت و خیز"، کنفرانس ملی زیرساخت های حمل و نقل.

[15] Tarefder RA, Zaman M, Hobson K. (2003) "A laboratory and statistical evaluation of factors affecting rutting". Int J Pavement Eng; 4:59–68.

[16] Suo Zhi, Wong Wing Gun, Luo Xiao Hui, Tian Bo. (2012) "Evaluation of fatigue crack behavior in asphalt concrete pavements with different polymer modifiers", Construction and Building Materials 27 117–125.

[17] Harold Von Quintus, Brian Killingsworth. (1998) "Analysis relating to pavement material characterization and their effect on pavement performance", FHWA-RD-97-085, US. Department of transportation federal highway administration.

[18] Segio Higashi, Toshihiro Kanai, Toshiyuki Okabe, Shinya Hayashi, Kunihiro Matsui. (1998) "Application of time historical data to structural evaluation of asphalt pavement", Journal of pavement engineering, vol. 3, pp. 31-38, JSCE, 1998.2.

[19] Kimio Maruyama, Masayuki Kumagai . "Evaluation of fatigue damage in asphalt using FWD dissipated work", Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02693-3.

[20] Houang Y. (2004) "Material Characterization and Performance Properties of Superpave Mixtures", North Carolina State University.

[21] Monismith C.L, Epps J.A, Finn, F.N. (1995) "Improved Asphalt Mix Design," Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 54.

- [22] Paris P, Erdogan F. "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", *Journal of Basic Engineering* 85. pp. 528-534. 1963.
- [23] Ghuzlan, K.A, Carpenter, S.H. (2000) "Energy-derived damage-based Failure Criterion for Fatigue Testing", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1723, pp. 141-149.
- [24] Abojaradeh, M.A, Witczak M.W, Mamlouk M.S, and Kaloush, K. (2007) "Validation of Initial and Failure Stiffness Definitions in Flexure Fatigue Test for Hot Mix Asphalt", Vol. 35, No. 1, ASTM, *Journal of Testing and Evaluation*, pp. 95-102.
- [25] Van Dijk, W, Visser, W. (1977) "The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*;46: 1–40.
- [26] Carpenter S.H, Shen S. (2006) "A dissipated energy approach to study HMA healing in fatigue", In: *Proceeding 85th annual transportation research board meeting*, CDROM. Transportation Research Board of the National Academics, Washington, DC.
- [27] Shen, S, Carpenter S. (2005) "Application of the Dissipated Energy Concept in Fatigue Endurance Limit Testing", In: *Presented at 84th annual meeting of the transportation research board*, Washington, DC.
- [28] Tayebali A, Rowe A.G.M, Sousa J.B. (2010) "Fatigue response of asphalt aggregate mixtures", *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.* 61 333–360
- [29] Umme Amina Mannan, Md Rashadul Islam, Rafiqul A. Tarefder. (2015) "Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies". *International Journal of Fatigue* 78 72–80.
- [30] Mollenhauer K, Wistuba M, Rabe R. (2009) "Loading frequency and fatigue: in-situ conditions and impact on test results". In: Pais, editor. *2nd Workshop on four point bending*, University of Minho.
- [31] Amir Rasouli, Amir Kavussi, Morteza Jalili Qazizadeh, Amir Hossein Taghikhani. (2018) "Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime". *Construction and Building Materials* 164 655–662.
- [32] S.M. Abtahi, M. Ghorban Ebrahimi, M.M. Kunt. (2011) "Production of polypropylene reinforced asphalt concrete mixtures based on dry procedure and superpave gyratory compactor", *Iran. Polym. J.* 20 (10) 813–823.
- [33] J. Norambuena-Contreras, I. Gonzalez-Torre, D. Fernandez-Arnau, C. Lopez-Riveros. (2016) "Mechanical damage evaluation of geosynthetic fibres used as antireflective cracking systems in asphalt pavements", *Constr. Build. Mater.* 109 47–54.

[34] Zohreh Dehghan, Amir Modarres. (2017) "Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test", Construction and Building Materials 139 384–393.

[35] T. Baghaee Moghaddam, M. Rehan Karim, T. Syammaun. "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles", Constr. Build. Mater. 34 (2012) 236–242.

[36] A. Modarres, H. Hamed, (2014) "Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes", Mater. Des. 61 8–15.

[37] Waligora J, Bulteel D, Degrugilliers P, Damidot D. (2010) "Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: a multi-analytical technique approach". Mater Charact; 61:39–48.

[38] Amir Kavussi, Morteza Jalili Qazizadeh. (2014) "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging", Construction and Building Materials 72. 158–166

[39] Jiang Y, Shao W, Xiao Z. (2005) "A study of the fatigue performance of asphalt mixes based on the uniform design method". In: Proceeding of 24th Southern African transport conference.

[40] H. Saeidi, I. Aghayan." Investigating the effects of aging and loading rate on low-temperature cracking resistance of core-based asphalt samples using semi-circular bending test".Construction and Building Materials 126 .682–690.

[41] Fleming P.R, Frost M.W, Lambert J. (2007) "A review of the light weight deflectometer (LWD) for routine in situ assessment of pavement material stiffness", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 80-87.

(۴۲) رفیعی، کامران. (۱۳۸۸) "ارائه‌ی مدل کنترل کیفی ساخت لایه‌های غیر چسبنده روسازی

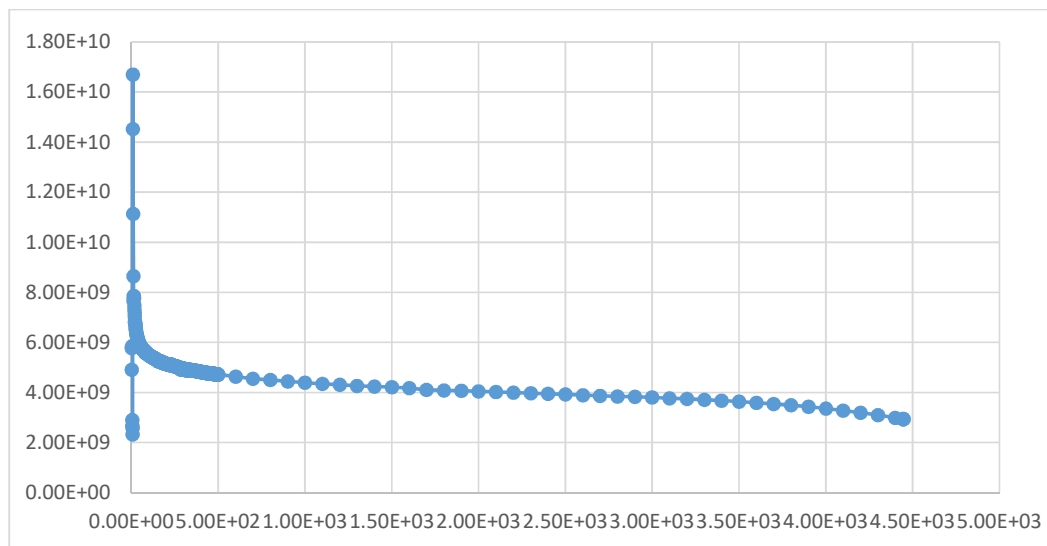
بر پایه نتایج PFWD"، رساله‌ی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

[43] Sunarjono S. (2007) "Tensile Strength and Stiffness Modulus of Foamed Asphalt Applied a Grinding Representative of Indonesian Road Recycled Pavement Materials", dinamika TEKNIK SIPIL, Volume 7, Nomor 1, Januari: pp 1 – 10.

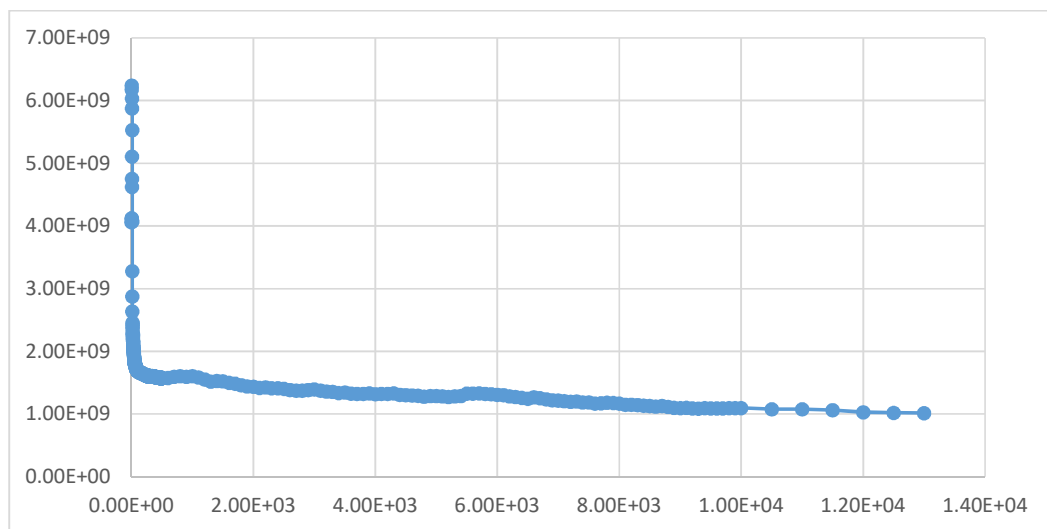
[44] Code-234. (2011). Iran highway asphalt paving code. Tehran: The Ministry of Road and Urban Development, Research and Education Center, Publication Number 234.

پوست

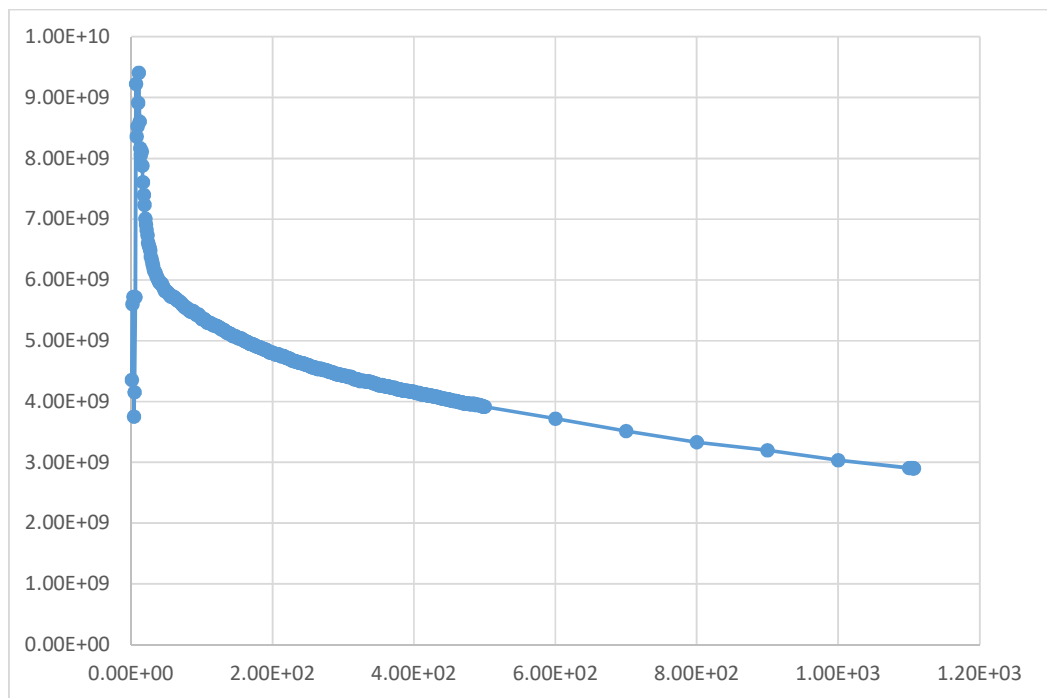
نمودارهای سختی خمشی در مقابل سیکل بارگذاری در آزمایش خستگی چهار نقطه در شکل های زیر ارائه شده است.



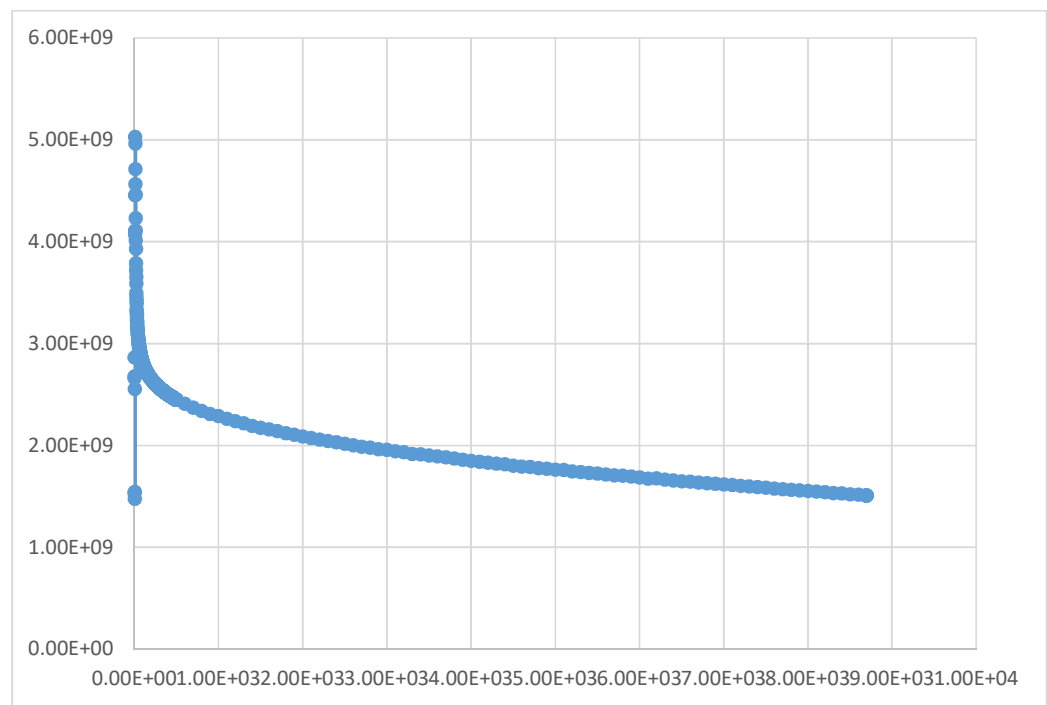
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A1 در دما صفر درجه سانتی گراد



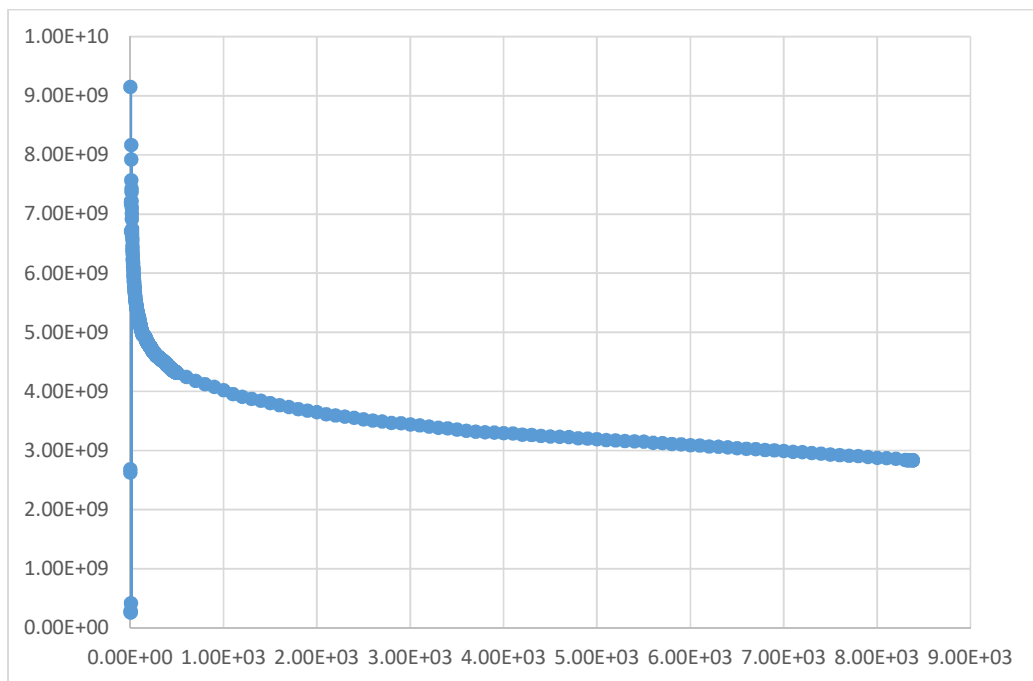
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A1 در دما ۲۵ درجه سانتی گراد



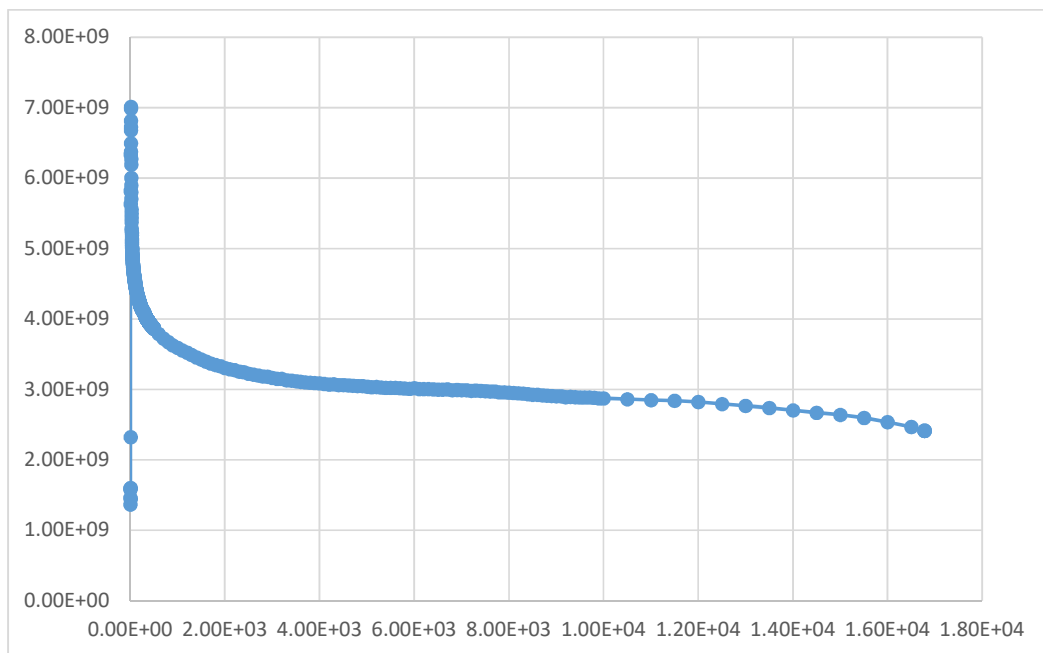
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A1 در دما صفر درجه سانتی گراد



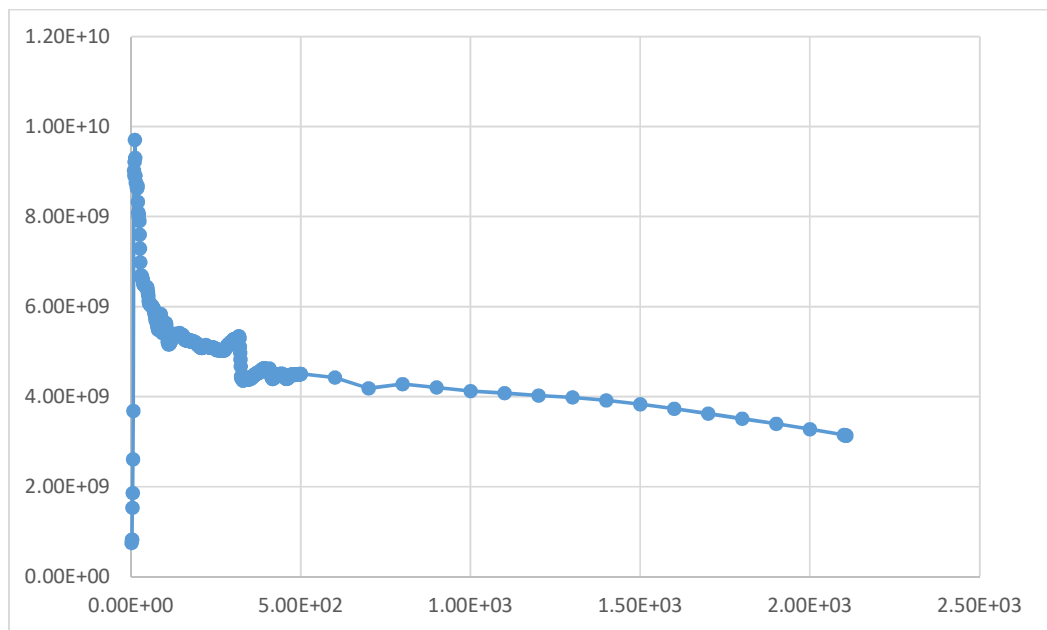
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A1 در دما ۲۵ درجه سانتی گراد



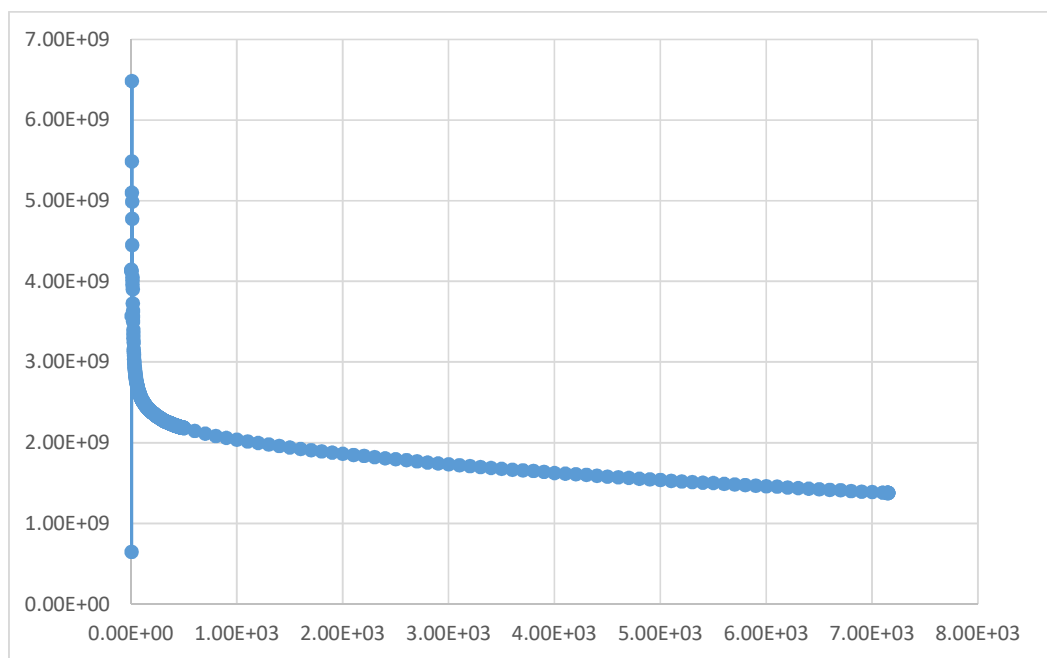
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A18 در دما صفر درجه سانتی گراد



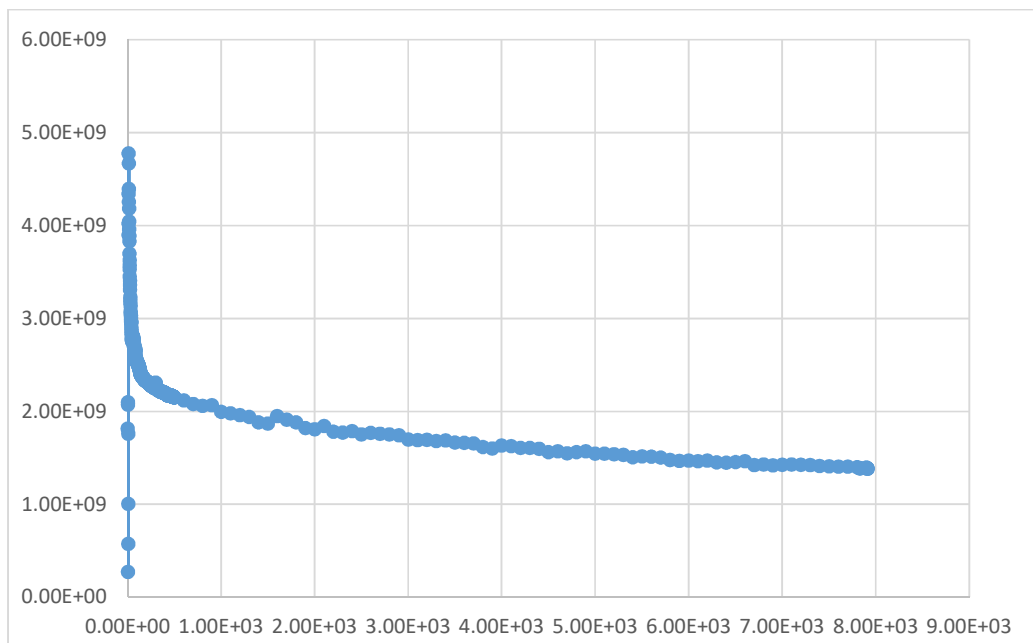
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A18 در دما ۲۵ درجه سانتی گراد



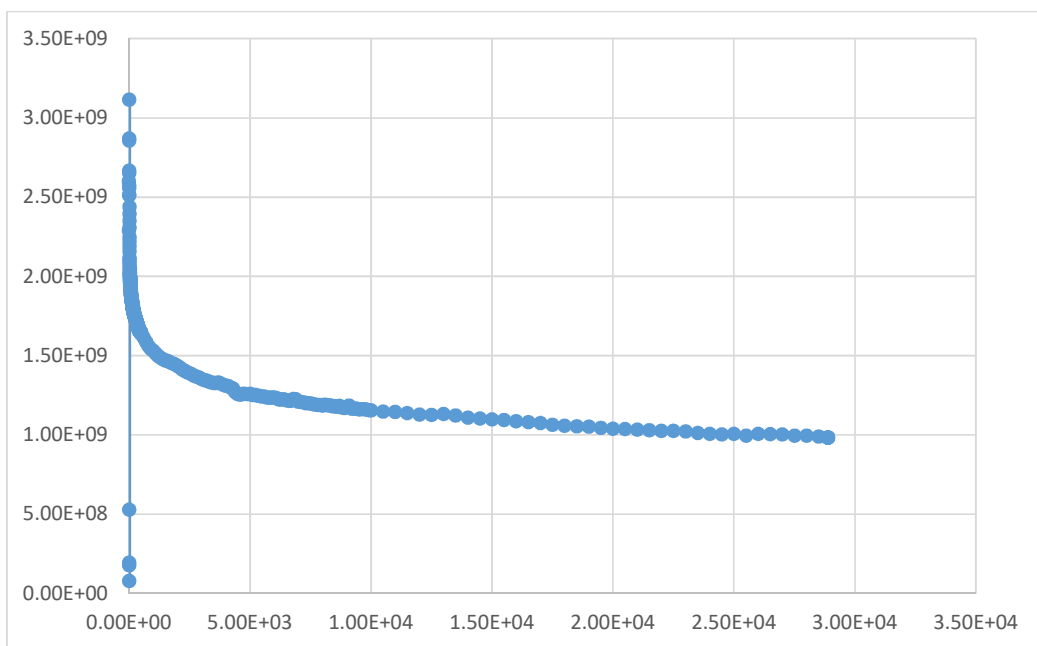
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A18 در دما صفر درجه سانتی گراد



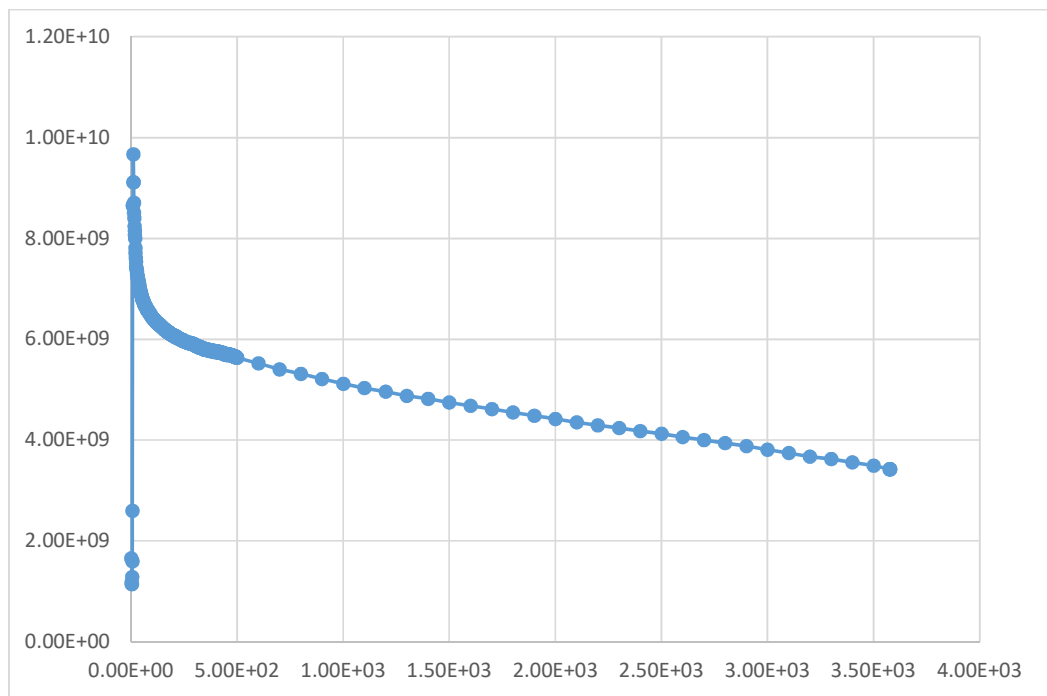
نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A18 در دما ۲۵ درجه سانتی گراد



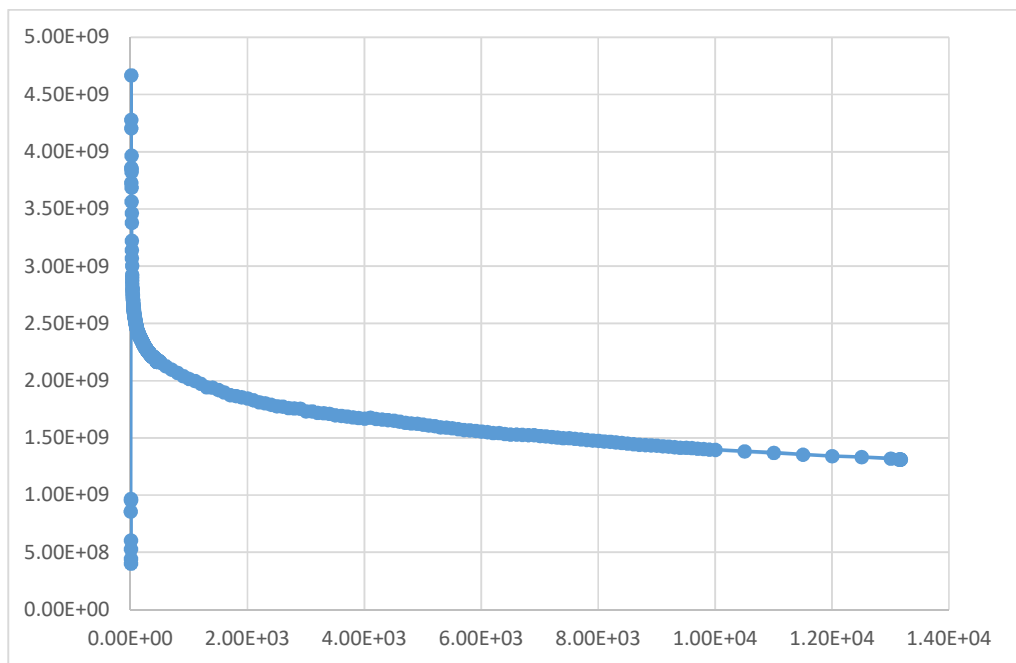
نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A24 در دما صفر درجه سانتی گراد



نمودار سختی خمشی در خارج از مسیر چرخ از ایستگاه A24 در دما ۲۵ درجه سانتی گراد



نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A24 در دما صفر درجه سانتی گراد



نمودار سختی خمشی در مسیر چرخ از ایستگاه A24 در دما ۲۵ درجه سانتی گراد

Abstract

Fatigue is one of the most important causes of damage in asphalt pavement. Four point beam fatigue test, which is considered as a destructive test, can be used to determine the fatigue properties of asphalt mix. The destructive tests will always have significant costs. On the other hand, destructive tests can cause damage to the desired structure, so it will not be possible to repeat the test.

This study intends to minimize the need for destructive tests by investigating the correlation between two destructive tests including four point beam fatigue test and three point bending test with Portable Falling Weight Deflectometer (PFWD) which is a non-destructive test.

For this purpose, in 25 stations, the data were taken using PFWD and then at 7 stations road surface asphalt was cut and beam specimens with standard dimension were prepared and were subjected to fatigue and bending tests. The data are divided into two groups: One group of data and samples has been taken from the wheel path and another from the outside of the wheel path. Fatigue tests were conducted in strain-controlled mode with a sinusoidal load applied with frequency of 10 Hz (without rest) at 25°C and 0°C. Fatigue life was analyzed by the stiffness reduction method.

Subsequently, by analyzing the PFWD's data and the output of fatigue and bending tests, it is found that more displacement under impact load of PFWD occurs on the wheel paths due to fatigue and its cracks.

Finally, linear relation and high correlation were achieved between results of PFWD and fatigue test. In a way that by increasing the displacement achieved by PFWD, fatigue life decreases. As well a model using linear regression is presented for samples fatigue life in two different temperatures, 25 °C and 0 °C.

Keywords: Fatigue, Four point beam fatigue test, Portable Falling Weight Deflectometer, PFWD, Three point bending test, Destructive tests, Non-destructive test, Asphalt pavement.



Shahrood University of Technology
M.Sc.Thesis in Road and Transport Engineering

**Investigation of behavior of asphalt concrete in parts with
fatigue and without fatigue effect in road pavement**

By:
Ali Tahen Chenar

Supervisor:
Dr. Hosein Ghasemzadeh Tehrani

Advisor:
Dr.Abbas Mohammadi

January 2020