

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

بررسی افت کیفیت توان باربری روسازی بر اثر ترک خوردگی طولی و عرضی با استفاده از
دستگاه PFWD و شبیه سازی آن با نرم افزار اجزای محدود آباکوس

نگارنده: رامین خفاجه

استاد راهنما

دکتر حسین قاسم زاده طهرانی

استاد مشاور

دکتر فرنوش باسلیقه

دانشکده : عمران

گروه : مهندسی راه و ترابری

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رامین خفاجه به شماره دانشجویی: ۹۴۰۶۸۵۴.

تحت عنوان: بررسی افت کیفیت توان باربری روسازی بر اثر ترک خوردگی طولی و

عرضی با استفاده از دستگاه PFWD و شبیه سازی آن با نرم افزار اجزای محدود آباکوس

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

..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

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

تقدیم بہ

مقدس ترین واثرہ مادر لغت نامہ دلم،
مادر مہربانم کہ زندگیم را دیون مہر و عطفوت آن می دانم.
پدر، مہربانی مشفق، بردبار و حامی.

بوسہ بردستان پر مہرمان

قدردانی

استاد فرزانه و ارجمندم، جناب دکتر حسین قاسم زاده طهرانی، چگونه سپاس گویم، مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است، چگونه سپاس گویم تاثیر علم آموزی شما را، که چراغ هدایت، بر کلبه‌ی محقر و جودم فروزان ساخته است. در مقابل این همه عظمت و شگوهستان، مرانه توان سپاس است و نه کلام و صف. از این که همیشه مرا حمایت فرمودید و با راهبانی‌های ارزنده‌ی تان، مسیر را برایم هموار نمودید، و با سخنان امیدبخشان، دریچه‌ای از امید را به رویم گشودید، کمال تشکر و قدردانی را دارم. به پاس رنج‌های صادقانه‌ی تان، حرمت کلام عارفانه‌ی تان و حمایت‌های بی‌دریغتان از خداوند منان، سلامتی و کامیابی و توفیق روز افزون شما استاد بزرگوار را مسألت دارم.

استاد گرانقدر، جناب دکتر فنوش باسیقه، از شما که در کمال سعی و فداکاری، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ‌کلی در این عرصه بر من دریغ ننموده‌اید، صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می‌کنم و موفقیت و بهروزی حضرتعالی را از خداوند متعال خواستارم.

حق یار تان

تعهد نامه

اینجانب رامین خفاجه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی افت کیفیت توان باربری روسازی بر اثر ترک خوردگی طولی و عرضی با استفاده از دستگاه PFWD و شبیه سازی آن با نرم افزار اجزای محدود آباکوس 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 پژوهشهای 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 بافتهای آنها) 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 های رایانه ای ، نرم افزار ها 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

هدف این پایان‌نامه ارزیابی اثر ترک خوردگی عرضی و طولی روسازی آسفالتی بر ضریب انتقال بار (LTE)¹ با استفاده از داده‌های دستگاه PFWD² است. همچنین این موضوع بررسی می‌شود که آیا در ترک‌های با عرض یکسان مقدار ضریب انتقال بار برای ترک خوردگی طولی و عرضی یکسان است یا تفاوت معنی داری دارند. برای این منظور بر روی دو روسازی که از نظر ضخامت آسفالت، طرح روسازی و عمر روسازی متفاوت بودند، در ۹۰۰ نقطه مختلف بر روی ترک‌های عرضی و طولی، اقدام به برداشت افت و خیزها توسط دستگاه PFWD شد. پس از بررسی داده‌های میدانی برای محاسبه LTE رابطه جدیدی پیشنهاد شد که به لحاظ منطقی انتظار می‌رود نسبت به روابط قبلی از دقت بیشتری برخوردار باشد. برای مطالعه دقیق مکانیسم انتقال بار در محل ترک عرضی، یک مدل عددی در نرم افزار آباکوس ساخته شد که نتایج آن در مقایسه با داده‌های میدانی، صحت و اعتبار مدل را تایید می‌کند. براساس نتایج به دست آمده از مدل عددی و تست‌های میدانی مشاهده شد که ضریب انتقال بار در ترک‌های انقباضی روسازی آسفالتی به عرض ترک و ضخامت آسفالت وابسته است و با افزایش عرض ترک انقباضی و ضخامت لایه آسفالتی به صورت نمایی کاهش می‌یابد. همچنین به منظور مقایسه عملکرد ترک‌های عرضی و طولی داده‌های به دست آمده از دستگاه PFWD با استفاده از روش‌های آماری مورد آنالیز و بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقدار LTE در ترک‌های عرضی و طولی با عرض یکسان متفاوت است. همچنین مشخص شد برای ترک‌های با عرض کمتر از ۵ میلی‌متر ترک طولی و برای ترک‌های با عرض بیشتر از ۵ میلی‌متر ترک عرضی تأثیر بیشتری در افت ضریب انتقال بار در روسازی آسفالتی می‌گذارند. در ادامه برای انتخاب روش تعمیر ترک، پارامتر LTE بجای عرض ترک پیشنهاد شده است، که به نتایجی متفاوت از روش‌های مرسوم می‌انجامد.

¹ Load Transfer Efficiency

² Portable Falling Weight Deflectometer

کلید واژها: ضریب انتقال بار(LTE) ،PFWD، ترک عرضی، ترک طولی، روسازی آسفالتی، المان

محدود.

فهرست مطالب

۱	فصل اول
۱-۱	مقدمه
۲-۱	مکانیسم انتقال تنش در روسازی
۳-۱	ضریب انتقال بار
۴-۱	روش‌های ارزیابی توان باربری روسازی
۱-۴-۱	تجهیزات استاتیکی
۲-۴-۱	تجهیزات ارتعاشی
۳-۴-۱	انتشار موج
۴-۴-۱	تجهیزات ضربه‌ای
۵-۱	معرفی موضوع
۶-۱	اهمیت موضوع
۷-۱	نوآوری موضوع
۸-۱	ساختار پایان‌نامه
۱۱	فصل دوم
۱۱	ادبیات موضوع و مروری بر کارهای گذشته
۱-۲	مقدمه
۲-۲	رویکردهای ارزیابی روسازی
۱-۲-۲	مقایسه روش‌های قدیم و جدید ارزیابی روسازی راه
۳-۲	تاریخچه روش PSI
۴-۲	ارزیابی روسازی راه به روش PSI
۵-۲	ارزیابی روسازی به روش PCI
۶-۲	ارزیابی روسازی با استفاده از تست‌های غیر مخرب
۷-۲	تحقیقات انجام شده روی ضریب انتقال بار
۱-۷-۲	معرفی روابط برای محاسبه پارامتر LTE
۸-۲	مقایسه FWD-LWD
۹-۲	بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف بر نتایج به دست آمده از دستگاه FWD و PFWD
۴۷	فصل سوم

۴۷	روش کار- مطالعات میدانی- جمع آوری داده‌ها
۴۸	۱-۳ مقدمه
۴۸	۲-۳ مشخصات دستگاه PFWD
۵۱	۳-۳ معرفی ساختار دستگاه PFWD
۵۲	۱-۳-۳ بخش اعمال ضربه (وزنه سقوطی)
۵۳	۲-۳-۳ صفحه بارگذاری
۵۳	۳-۳-۳ ژئوفون‌های اندازه گیری بار
۵۳	۴-۳-۳ سیستم دریافت کننده سیگنال، تحلیل و ذخیره سازی داده‌ها
۵۴	۵-۳-۳ سایر اجزای جانبی
۵۴	۴-۳ مختصری از نحوه داده برداری با استفاده از دستگاه PFWD
۵۵	۵-۳ روش انجام کار
۵۹	۶-۳ داده‌های میدانی
۶۵	فصل چهارم
۶۵	تجزیه و تحلیل داده‌ها
۶۶	۱-۴ مقدمه
۶۶	۲-۴ ارزیابی ضریب انتقال بار در ترک عرضی
۶۸	۳-۴ مقایسه عملکرد ترک‌های طولی و عرضی در انتقال بار
۶۹	۱-۳-۴ نمودار جعبه‌ای
۷۰	۲-۳-۴ آزمون t
۷۱	۳-۳-۴ نمودارهای تاریخچه زمانی
۷۳	۴-۳-۴ روابط رگرسیون
۷۴	۵-۳-۴ بحث در نتایج
۷۶	۴-۴ مدل سازی عددی ترک عرضی و کالیبراسیون آن
۷۷	۱-۴-۴ هندسه و ساختار مدل
۸۰	۲-۴-۴ صحت سنجی مدل
۸۳	۳-۴-۴ بررسی اثر ضخامت لایه آسفالتی بر ضریب انتقال بار
۸۴	۴-۴-۴ پیش بینی LTE با مدل عددی
۸۷	فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۷

۱-۵ نتیجه‌گیری ۸۸

۲-۵ پیشنهادها ۹۰

منابع ۹۱

پیوست الف: ۹۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. توزیع فشار بار چرخ در لایه‌های روسازی ۴
- شکل ۱-۲ آزمایش صفحه در روش‌های قدیمی ۱۴
- شکل ۲-۲ آزمایش تیر بنکلمن در روش‌های قدیمی ۱۴
- شکل ۳-۲ استفاده از FWD در روش‌های جدید ۱۵
- شکل ۴-۲ موقعیت مکانی انجام آزمایشات ۱۶
- شکل ۵-۲ مسیر مورد استفاده در روش PSI ۱۶
- شکل ۶-۲ مسیر مورد استفاده در روش PSI ۱۶
- شکل ۷-۲ محدوده PSI صفر تا یک، روسازی با کیفیت خیلی بد ۱۷
- شکل ۸-۲ محدوده PSI یک تا دو، روسازی با کیفیت بد ۱۸
- شکل ۹-۲ محدوده PSI دو تا سه، روسازی با کیفیت متوسط ۱۸
- شکل ۱۰-۲ محدوده PSI سه تا چهار، روسازی با کیفیت خوب ۱۸
- شکل ۱۱-۲ محدوده PSI چهار تا پنج، روسازی با کیفیت خیلی خوب ۱۹
- شکل ۱۲-۲ نمونه فرم ارزیابی روسازی به روش PCI ۲۰
- شکل ۱۳-۲ موقعیت قرار گیری دستگاه FWD نسبت به ترک طولی ۲۲
- شکل ۱۴-۲ نمونه‌ای از SWS استفاده شده در مطالعه ۲۳
- شکل ۱۵-۲ ارزیابی روسازی با استفاده از اولتراسونیک ۲۳
- شکل ۱۶-۲ مسیر آزمایش و موقعیت قرار گیری ژئوفون‌ها ۲۴
- شکل ۱۷-۲ نمونه‌ای از تصاویر آنالیز شده برای ارزیابی ترک ۲۵
- شکل ۱۸-۲ کاسه انحناف‌ت و خیز روسازی ۲۷
- شکل ۱۹-۲ تغییرات رطوبت سطح روسازی در ساعت‌ها و فصل‌های مختلف ۳۰
- شکل ۲۰-۲ تغییرات دمای سطح روسازی در ساعت‌ها و فصل‌های مختلف ۳۰
- شکل ۲۱-۲ تغییرات ضریب انتقال بار در دماهای مختلف ۳۱
- شکل ۲۲-۲ تاثیر تغییرات عرض ترک و یا درز در ضریب انتقال بار ۳۱
- شکل ۲۳-۲ تاثیر تغییرات ضخامت لایه بتنی بر ضریب انتقال بار ۳۲
- شکل ۲۴-۲ تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ضریب انتقال بار ۳۳
- شکل ۲۵-۲ بررسی اثر سن روسازی بر ضریب انتقال بار ۳۳

- شکل ۲-۲۶ تاثیر شرایط آب و هوا بر ضریب انتقال بار ۳۴
- شکل ۲-۲۷ نحوه تغییرات مدول سختی با تغییر وزنه بارگذاری ۴۱
- شکل ۲-۲۸ تاثیر ناهمواری سطح روی منحنی‌های تاریخچه زمانی بار و خیز ۴۳
- شکل ۲-۳۰ اثر سطح تماس ضعیف و سطح تماس خوب روی منحنی خیز و بار ۴۴
- شکل ۳-۱ نحوه برداشت کاسه افت و خیز روسازی ۵۰
- شکل ۳-۲ نمونه‌ای از نمودار تاریخچه زمانی به دست آمده در این مطالعه ۵۱
- شکل ۳-۳ اجزای دستگاه PFWD ۵۲
- شکل ۳-۴ موقعیت ژئوفون‌ها در روش‌های پیشین اندازه‌گیری LTE ۵۶
- شکل ۳-۵ نحوه ایجاد خطا در روش‌های پیشین اندازه‌گیری LTE ۵۷
- شکل ۳-۶ روش پیشنهادی برای استقرار ژئوفون‌ها برای اندازه‌گیری خیز روسازی ۵۸
- شکل ۳-۷ روش اندازه‌گیری افت و خیز روسازی ۵۸
- شکل ۳-۸ محور قدیم شاهرود به میامی ۶۰
- شکل ۳-۹ کروکی مورد مطالعه در دانشگاه صنعتی شاهرود ۶۰
- شکل ۳-۱۰ نحوه برداشت افت و خیزهای سطح روسازی ۶۱
- شکل ۳-۱۱ داده‌های حاصل از برداشت ترک عرضی جاده شاهرود-میامی ۶۲
- شکل ۳-۱۲ داده‌های حاصل از برداشت ترک عرضی محوطه دانشگاه ۶۲
- شکل ۳-۱۳ مقایسه داده‌های ترک عرضی، محوطه دانشگاه و جاده شاهرود-میامی ۶۳
- شکل ۳-۱۴ داده‌های ترک خوردگی طولی در جاده شاهرود - میامی ۶۳
- شکل ۴-۱ نمودار جعبه‌ای محدوده LTE در ترک خوردگی طولی ۶۹
- شکل ۴-۲ نمودار جعبه‌ای محدوده LTE در ترک خوردگی عرضی ۷۰
- شکل ۴-۳ نتایج آزمون تی برای ترک عرضی و طولی با عرض ۲ میلی‌متر ۷۱
- شکل ۴-۴ نمودار تاریخچه زمانی ترک خوردگی طولی به عرض ۳ میلی‌متر ۷۲
- شکل ۴-۵ نمودار تاریخچه زمانی ترک خوردگی عرضی به عرض ۳ میلی‌متر ۷۲
- شکل ۴-۶ مقایسه تخمین LTE برای ترک طولی و عرضی ۷۴
- شکل ۴-۷ مقایسه LTE ترک طولی و عرضی ۷۶
- شکل ۴-۸ نمونه‌ای از مدل ساخته شده همراه با شرایط مرزی و نحوه بارگذاری ۷۹
- شکل ۴-۹ مش بندی مدل ۸۰
- شکل ۴-۱۰ نمودار تاریخچه زمانی ترک عرضی جاده شاهرود به میامی ۸۱

- شکل ۴-۱۱ خیز محاسبه شده توسط مدل المان محدود ۸۱
- شکل ۴-۱۲ تغییرات خیز ناشی از بارگذاری ۸۲
- شکل ۴-۱۳ مقایسه ضریب انتقال بار محاسبه شده توسط مدل المان محدود و جاده شاهرود به میامی ۸۲
- شکل ۴-۱۴ مقدار ضریب انتقال بار در عرض‌ها و ضخامت‌های مختلف ۸۴

فهرست جداول

جدول ۱-۲ مقایسه FWD و PFWD	۳۸
جدول ۲-۲ تجهیزات FWD و PFWD	۳۸
جدول ۱-۳ مشخصات دستگاه PFWD	۴۸
جدول ۱-۴ توابع رگرسیون غیر خطی (LTE-W) در جاده شاهرود-میامی	۶۷
جدول ۲-۴ توابع رگرسیون غیر خطی (LTE-W) در محوطه دانشگاه	۶۷
جدول ۳-۴ دامنه بارگذاری استفاده شده در مطالعه	۷۸
جدول ۴-۴ مشخصات مصالح استفاده شده در مدل سازی برای صحت سنجی	۷۹

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

ارزیابی خرابی‌های روسازی راه و تعیین کیفیت روسازی یکی از اقدامات مهم و اساسی در سیستم‌های مدیریت روسازی است. اطلاعات به دست آمده از این بخش برای رسیدن به هدف‌هایی چون پیش بینی روند رشد خرابی، عمر مفید روسازی، برنامه ریزی برای نگهداری و بهسازی راه، تخمین بودجه مورد نیاز و تعیین اولویت‌های عملیات تعمیر و نگهداری و غیره استفاده می‌شود [۱]. اکثر بزرگراه‌ها و جاده‌ها از نوع روسازی آسفالتی می‌باشند که به دلایل مختلفی عمر کوتاهی دارند و در سال‌های اولیه عمرشان دچار خرابی می‌شوند. یکی از انواع ترک خوردگی‌های شایع در روسازی آسفالتی، ترک‌های عرضی و طولی است، که در افت عملکرد روسازی تأثیر بسزایی دارند. ترک خوردگی در روسازی آسفالتی باعث افزایش ناهمواری روسازی، کاهش کیفیت رانندگی و کاهش عمر روسازی می‌شود، که در نهایت منجر به افزایش قابل توجه هزینه‌های چرخه عمر روسازی می‌گردد [۲]. کاهش قابلیت انتقال بار در روسازی بر اثر ترک خوردگی یکی از فاکتورهای اصلی در خرابی روسازی است، زیرا از دست دادن توانایی انتقال بار در روسازی تأثیر زیادی بر روی افت عملکرد روسازی دارد [۳]. بنابراین یک معیار اصلی برای بهسازی روسازی آسفالتی، ترک خوردگی است. ترک خوردگی منجر به نفوذ آب به داخل ساختار روسازی می‌گردد، که باعث بروز سایر خرابی‌هایی مانند چاله، جداشدگی دانه‌ها و تورفتگی شده که منجر به کاهش سختی آسفالت و از بین رفتن روسازی آسفالتی می‌شود. دلایل زیادی باعث به وجود آمدن ترک در سطح آسفالت است، شامل: بارهای ترافیکی، شرایط آب و هوا، طرح اختلاط آسفالت، عمر روسازی و عوامل ساخت [۴].

معمولاً ارزیابی ترک‌های روسازی به وسیله ارزیابی چشمی و یا کرگیری انجام می‌شود. کرگیری روشی گران، مخرب و با تعدادی محدود است. همین‌طور ارزیابی چشمی نمی‌تواند مشخص کند که آیا عمق ترک کامل یا جزئی است. بنابراین استفاده از روش‌های غیر مخرب، ارزان و ساده برای ارزیابی ترک

خوردگی در لایه آسفالتی ضروری می‌باشد [۵]. برای این منظور می‌توان به ابزار تغییر مکان سنج ضربه-ای (مانند FWD¹)، تغییر مکان سنج‌های دینامیکی حالت پایدار (مانند Dynaflect) و تغییر مکان سنج‌های استاتیکی (نظیر تیر بنکلمن) اشاره کرد که از این میان دستگاه افت و خیز سنج ضربه‌ای (FWD) در سال‌های اخیر توسعه پیدا کرده است [۶].

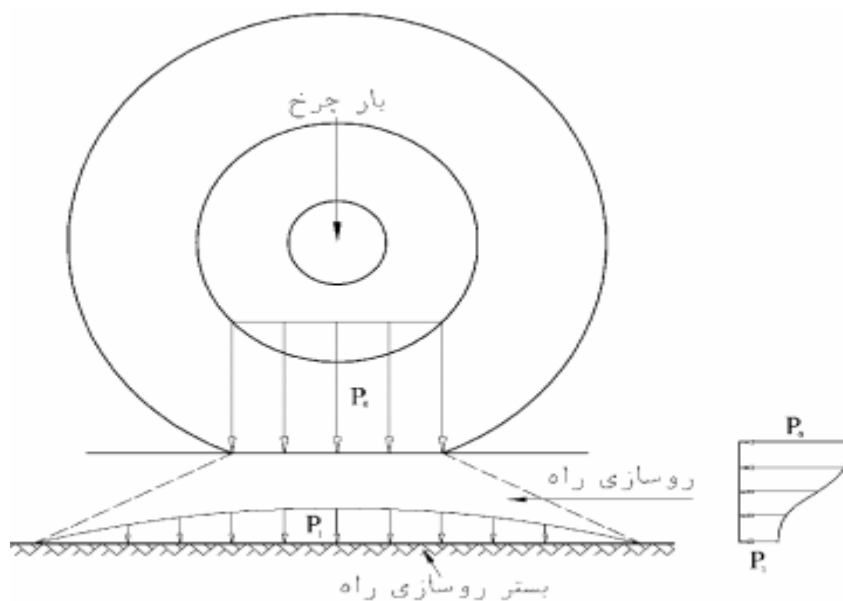
با توجه به تحقیقات صورت گرفته در زمینه به کارگیری دستگاه FWD برای ارزیابی روسازی آسفالتی، در حال حاضر FWD به عنوان یک دستگاه آزموده شده و قابل اطمینان شناخته می‌شود. از آن می‌توان به عنوان یک آزمایش استاندارد و مبنا برای سایر آزمایش‌های دینامیک صفحه‌ای استفاده نمود. ولی دستگاه FWD برای ارزیابی روزمره روسازی مناسب نیست زیرا به علت کشنده بودن، در مکان‌هایی که محدودیت دسترسی وجود دارد از آن نمی‌توان استفاده کرد. همچنین در مواردی که به علت مساحت کم منطقه مورد آزمایش به تعداد تست کمی نیاز دارد، استفاده از FWD غیر اقتصادی است. در ارزیابی-هایی که مقادیر تنش پایین ملاک می‌باشد و نیازی به حوضچه کامل افت و خیز نیست، استفاده از FWD به دلیل هزینه زیاد و پیچیدگی آن چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. به همین دلیل از سال ۲۰۰۰، برای کنترل کیفیت لایه‌های روسازی، دستگاه‌های PFWD ارائه شدند که فن‌آوری آن ساده‌تر از FWD بوده و قابلیت حمل دستی دارند [۷].

۲-۱ مکانیسم انتقال تنش در روسازی

زمین در حالت طبیعی جهت تحمل بارهای حاصل از وزن وسایل نقلیه تحمل کافی ندارد، از این رو سازه‌ای به نام روسازی بر روی آخرین لایه متراکم شده خاک زمین طبیعی قرار می‌گیرد، بطوری که این مجموعه مقاومت بیشتری در برابر بارهای وارده از طرف وسایل نقلیه دارد. لایه روسازی به عنوان یک سازه از یک طرف باید خود تحمل بار وارده را داشته باشد و از طرف دیگر باید تنش حاصله از بار وارده را در عمق کاهش داده و به اندازه قابل تحمل برای خاک بستر برساند. نحوه کلی عملکرد و توزیع بار

¹ Falling Weight Deflectometer

در روسازی در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. در این شکل، بار وسیله نقلیه توسط چرخ در سطح تماس تقریباً دایره‌ای شکل، به سطح روسازی وارد می‌شود. شدت تنش‌های فشاری قائمی که در اثر بارگذاری در یک توده خاک به وجود می‌آید، در نقاط مختلف متفاوت است. شدت این تنش‌ها در نقاط واقع در زیر سطح بارگذاری حداکثر است و با افزایش فاصله این نقاط از سطح بارگذاری (هم در عمق و هم در جهت شعاعی) از شدت تنش‌های فشاری قائم کاسته می‌شود. اگر فشار قائم در سطح تماس با راه، p_0 باشد، ضخامت لایه‌های روسازی و کیفیت مقاومتی آنها طوری انتخاب می‌شود که بار چرخ هر چه بیشتر توزیع و گسترده شده تا حداکثر شدت تنش در سطح بستر روسازی به مقدار p_1 کاهش یابد که خاک بستر بتواند با تغییر شکل مجاز، آن را تحمل کند [۸].



شکل ۱-۱. توزیع فشار بار چرخ در لایه‌های روسازی

۳-۱ ضریب انتقال بار

کاهش قابلیت انتقال بار بر اثر ترک خوردگی در روسازی آسفالتی یکی از عوامل مهم در کاهش افت کیفیت باربری روسازی است. هنگامی که در محل ترک خوردگی در سطح روسازی آسفالتی بارگذاری ناشی از ترافیک اعمال می‌شود، در هر دو سمت روسازی شامل روسازی سالم (سمت محل اعمال بار) و

روسازی معیوب (پس از ترک خوردگی) خیز ناشی از بار اعمال شده به وجود می‌آید. زیرا بخشی از بار اعمال شده توسط لایه‌های زیرین به سمت روسازی معیوب منتقل می‌شود. در نتیجه خیز و تنش در سمت محل بارگذاری با توجه به شدت ترک خوردگی ممکن است به طور قابل توجهی نسبت به سمت روسازی معیوب بیشتر باشد. مقدار کاهش در خیز به دست آمده با خیز محاسبه شده از روسازی بدون ترک خوردگی مقایسه می‌شود. روابط (۱-۱) و (۲-۱) از روابط رایج در محاسبه مقدار ضریب انتقال بار می‌باشد که مقدار LTE را براساس ماکزیمم خیز و تنش در لبه ترک در سمت روسازی سالم و معیوب محاسبه می‌کند [۹-۱۰-۱۱-۱۲].

$$LTE(W) = \frac{W_{Unloaded}}{W_{loaded}} \quad (1-1)$$

W_{loaded} و $W_{unloaded}$ به ترتیب خیز در لبه بدون بار و در لبه دارای بار در ترک می‌باشد.

$$LTE(\sigma) = \frac{\sigma_{Unloaded}}{\sigma_{loaded}} = \frac{\epsilon_{unloaded}}{\epsilon_{loaded}} \quad (2-1)$$

σ_{loaded} و $\sigma_{unloaded}$ به ترتیب تنش در لبه بدون بار و در لبه دارای بار می‌باشد.

ϵ_{loaded} و $\epsilon_{unloaded}$ به ترتیب کرنش در لبه بدون بار و در لبه دارای بار می‌باشد.

بیشتر روش‌های تعیین ضریب انتقال باربری روسازی (LTE) بر این اصل استوار است که اگر توانایی انتقال نیمی از بار را به سمت دیگر داشته باشد، به طوری که مقدار تنش یا خیز در هر دو سمت درز یا ترک یکسان باشد آنگاه سیستم درز یا ترک به طور کامل بار را منتقل کرده است [۳]. اگر درز یا ترک در انتقال بار ضعیف باشد نسبت خیز در دو طرف درز یا ترک کاهش یافته و شاخص LTE نزدیک به صفر می‌باشد. اگر توانایی انتقال بار خوب باشد، خیز در دو طرف درز یا ترک مساوی خواهد بود و LTE نزدیک به ۱۰۰ می‌باشد [۹]. LTE به پارامترهای زیادی شامل: موقعیت صفحه بارگذاری، دستگاه انتقال بار، زمان و فصل انجام آزمایش، دمای روسازی، حالت بارگذاری، ساختار روسازی، خواص مواد و ترافیک بستگی دارد [۹-۱۱-۱۲].

۴-۱ روش‌های ارزیابی توان باربری روسازی

ارزیابی روسازی راه از ارکان اصلی سیستم مدیریت و نگهداری راه‌ها می‌باشد. اگرچه ارزیابی روسازی راه شاید برای استفاده کننده از جاده مهم نباشد ولی بکار بستن آن در طول یک دوره و برداشت اطلاعات در زمان‌های مختلف می‌تواند شرایط آینده و روند تخریب روسازی را با مدل کردن آن پیش بینی کرده و برای تعمیر و نگهداری آن راهکار مناسب را تهیه نماید. روش‌های مختلفی برای ارزیابی روسازی وجود دارد که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱-۴-۱ تجهیزات استاتیکی

تجهیزات افت و خیز سنج استاتیکی یک بار استاتیکی و یا یک بار متحرک با سرعت کم را بر سطح روسازی وارد و افت و خیزهای حاصله را اندازه‌گیری می‌کنند. تجهیزات افت و خیز سنج استاتیکی رایج عبارتند از: آزمایش صفحه، تیربنکلن و دفلکتومتر [۱].

۲-۴-۱ تجهیزات ارتعاشی

تمامی این دستگاه‌ها به روش مشابهی کار می‌کنند. یک پیش بارگذاری استاتیکی نسبتاً زیاد بر روسازی وارد شده و یک ارتعاش سینوسی توسط یک مولد نیروی دینامیکی ایجاد می‌شود. مولدهای نیروی دینامیکی می‌تواند از نوع الکترومکانیکی و یا الکتروهیدرولیکی باشد. سیستم الکترومکانیکی برای تولید بار ارتعاشی، جرم‌های دوار مخالف جهت یکدیگر را بکار می‌برد. انواع این تجهیزات عبارتند از: داینافلکت، راه سنج و افت و خیز سنج دینامیکی غلتان [۱].

۳-۴-۱ انتشار موج

با ایجاد دو نوع موج فشاری یا برشی و استفاده از پارامترهای سرعت و طول موج می‌توان خواص الاستیکی و ضخامت لایه‌ها و چگالی ماده را تعیین کرد. لازم به ذکر است که نتایج این روش برای مواد الاستیک خطی، هموزن و ایزوتروپ که به صورت یک فضای نیمه بی‌نهایت باشد، جواب دقیق می‌دهد،

و چنانچه هرکدام از مشخصه‌های بالا در لایه‌های روسازی صدق نکند از دقت جواب کاسته خواهد شد. محاسبات این روش توسط فرمول‌های ارایه شده لمب قابل انجام است [۱].

۴-۴-۱ تجهیزات ضربه‌ای

عملکرد این تجهیزات به گونه‌ای است که یک وزنه با جرم مشخص از یک ارتفاع خاص بر روی یک صفحه فولادی سقوط می‌کند، ضربه حاصله به روسازی منتقل شده و لایه‌های روسازی دچار افت و خیز می‌شوند. تعدادی حسگر روی میله‌ای زیر دستگاه نصب است که قبلاً تا سطح روسازی پایین آورده شده‌اند، این حسگرها افت و خیزهای سطحی را در فواصل معین شعاعی از مرکز صفحه بارگذاری به دست می‌آورند. هرچه مقدار افت و خیزهای سطحی بیشتر باشد، سیستم روسازی ضعیف‌تر بوده و نهایتاً ضربه الاستیسیته لایه‌های مختلف روسازی از روش‌های محاسبه معکوس به دست می‌آید. تجهیزات ضربه‌ای بر حسب شدت بار به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند: FWD، LWD و HWD^۱ [۱].

۵-۱ معرفی موضوع

ترک خوردگی عرضی و طولی از شایع‌ترین و جدی‌ترین انواع خرابی است، که به طور فراوان در سطح روسازی آسفالتی مشاهده می‌شود و باعث افت شدید عملکرد روسازی می‌شوند. ترک‌های عرضی و طولی باعث افزایش ناهمواری و کاهش کیفیت حرکت شده و یکپارچگی ساختار و ظرفیت باربری روسازی را کاهش می‌دهند. همچنین ترک اجازه می‌دهد آب به داخل ساختار روسازی نفوذ کند که این امر باعث تضعیف بیشتر عملکرد روسازی می‌شود [۱۳].

ترک خوردگی عرضی به دو دسته ترک‌های حرارتی و ترک‌های انعکاسی تقسیم می‌شود. ترک‌های حرارتی بر اثر افت ناگهانی دما و یا نوسانات روزانه دما می‌باشد که از سطح بالای لایه آسفالتی شروع

¹ High Falling Weight Deflectometer

شده و به سمت پایین گسترش می‌یابد [۲-۱۴]. دسته دیگر ترک‌های انعکاسی می‌باشند که به علت تمرکز تنش در زیر لایه آسفالتی به وجود آمده و منجر به گسترش ترک به سمت بالای لایه آسفالتی می‌شود [۱۵]. مطالعات نشان داده است که دما، درصد عبوری از الک ۲۰۰ و عمر روسازی شاخص‌های کلیدی برای شروع ترک عرضی می‌باشند و خواص مصالح، ساختار روسازی، آب و هوا و ترافیک شاخص‌های کلیدی برای گسترش ترک عرضی هستند [۲].

ترک خوردگی طولی اغلب تحت تاثیر ترافیک است، نیروی برشی افقی که زیر چرخ وسایل نقلیه بر روی سطح روسازی اعمال می‌شود باعث ایجاد تنش و کرنش کششی در جهت عمود بر حرکت وسایل نقلیه در روسازی می‌شود [۱۶-۱۷]. همچنین عدم اجرای صحیح درز طولی بین دو باند آسفالت می‌تواند از علل به وجود آورنده این نوع خرابی باشد [۱]. بعضی روش‌های ارزیابی ترک خوردگی طولی بر اساس تعیین چگالی هستند، زیرا ترک خوردگی باعث ورود آب به داخل ساختار روسازی می‌شود، که علت اصلی آن نفوذ پذیری ترک است پارامترهای حفرات هوا، درصد قیر آسفالت و درجه PG قیر به ترتیب بیشترین اثر در پیدایش ترک خوردگی طولی را دارند [۱۸-۱۹]. این نوع ترک معمولاً از سطح لایه آسفالت شروع و به پایین گسترش می‌یابد [۱۶-۱۸]. اگر چه در مطالعه‌ای که توسط دستگاه CT SCANNER بر روی نمونه‌های مغزه گیری شده از جاده انجام شد، مشخص شد که ترک خوردگی طولی از سطح و کف روسازی شروع نمی‌شود بلکه از داخل ساختار روسازی گسترش می‌یابد [۱۷].

هدف از این پایان‌نامه بررسی عددی و میدانی اثر ترک عرضی و طولی بر روی ضریب انتقال بار با استفاده از داده‌های دستگاه PFWD است. همچنین به منظور بررسی مکانیسم انتقال بار در ترک از روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل دو بعدی از روسازی آسفالتی ساخته شد و نتایج حاصل از مدل با نتایج به دست آمده از ارزیابی میدانی اعتبار سنجی شد.

۱-۶ اهمیت موضوع

ترک‌های عرضی و طولی از انواع خرابی‌هایی هستند که به تعداد زیاد در رویه‌های آسفالتی دیده می‌شوند. امروز کاربرد آزمایش‌های غیر مخرب روسازی در جهان رو به گسترش است، سرعت بالای انجام آزمایش، دقت زیاد تجهیزات اندازه‌گیری، غیر مخرب بودن و پوشش نقاط بیشتر در سطح راه، از دلایل استقبال از آزمایش‌های غیر مخرب محسوب می‌شوند. بررسی ضریب انتقال بار در ترک‌های روسازی یک مسئله مهم است که با شاخص‌هایی مانند، LTE و JED^۱ و همچنین با روش‌های ارزیابی چشمی روسازی مانند PSI^۲ می‌توان آن را مورد ارزیابی قرار داد. از نتایج به دست آمده می‌توان در تعیین زمان مناسب برای عملیات مرمت و بهسازی روسازی استفاده کرد که باعث می‌شود هزینه‌های چرخه عمر روسازی به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کند.

۱-۷ نوآوری موضوع

در تحقیقات پیشین ضریب انتقال بار در محل درز روسازی بتنی مطالعه شده است ولی تاکنون تحقیقی جامع به منظور بررسی اثر ترک خوردگی عرضی و طولی بر روی ضریب انتقال بار در روسازی آسفالتی صورت نگرفته است. همچنین در مطالعات صورت گرفته بر روی روسازی بتنی برای محاسبه پارامتر LTE از روابط وسترگاد و شارپ استفاده شده است که در این مطالعه برای محاسبه ضریب انتقال بار رابطه‌ای جدید ارائه شد که از نظر منطقی انتظار می‌رود نسبت به روابط پیشین از دقت بالاتری برخوردار باشد.

¹ joint efficiency based on deflection

² Pavement Condition index

۸-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل است. در فصل اول این تحقیق به کلیات انجام این پایان‌نامه پرداخته شده است. فصل دوم مروری بر ادبیات و کارهای انجام شده قبلی را در بر گرفته است. در فصل سوم، اطلاعاتی در مورد روش انجام کار و نحوه جمع‌آوری داده‌ها ارائه شده است. فصل چهارم به نتایج آزمایش‌ها، تحلیل‌های فنی و آماری انجام شده در این تحقیق و بحث در مورد نتایج پرداخته است و در فصل پنجم نتایج این تحقیق و پیشنهادات برای ادامه کار را مورد بحث قرار می‌دهد.

فصل دوم

ادبیات موضوع و مروری بر کارهای گذشته

۲-۱ مقدمه

به طور کلی می‌توان گفت ترک خوردگی علت بسیاری از مشکلات در روسازی است. بنابراین برای حفظ و نگهداری کیفیت جاده در شرایط مطلوب و بهینه نیاز به روش‌هایی برای ارزیابی و پیش‌بینی ترک خوردگی در روسازی است. روش‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده است، که عبارتند از، آزمایش‌های مخرب (مانند کرگیری)، آزمایش‌های غیر مخرب (مانند FWD)، روش‌های ارزیابی چشمی (مانند PSI¹). همانطور که ملاحظه می‌شود روش‌های مختلفی برای ارزیابی روسازی راه وجود دارد که روش‌های غیر مخرب از جمله دستگاه PFWD در سال‌های اخیر توسعه پیدا کرده است. دستگاه سنجش فرورفتگی ناشی از ضربه در سال ۱۹۶۳ توسط Bretonniere فرانسوی ساخته شد و بعد از آن روند تکامل دستگاه توسط مهندسان دانمارکی و سوئدی ادامه یافت تا امروز که استفاده از این روش کاملاً گسترش یافته و به عنوان یک روش استاندارد مطرح است [۲۰]. دستگاه FWD در سال ۱۳۸۲ توسط وزارت راه و ترابری سابق وارد ایران شد و به عنوان ابزار غیر مخرب جهت ارزیابی سازه‌های روسازی راه و فرودگاه مورد استفاده قرار گرفت [۲۱]. امروزه کاربرد آزمایش‌های غیر مخرب روسازی در جهان رو به گسترش است، سرعت بالای انجام آزمایش، دقت زیاد تجهیزات و پوشش نقاط بستر در سطح راه از جمله دلایل استقبال از آزمایش‌های غیرمخرب می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به هزینه‌های هنگفتی که صرف احداث راه می‌شود، تا حد امکان باید تمامی مراحل اجرای پروژه راهسازی، بدون وقفه، بی نقص و با بهترین کیفیت انجام شود. بنابراین کنترل کیفیت در راهسازی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در سال‌های اخیر کاربرد دستگاه غیر مخرب و قابل حمل LWD توسعه پیدا کرده است. این دستگاه در زمان اندک و با دقت بالا نقاط مختلف لایه اجرا شده را از نظر سازه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌دهد. از نتایج به دست آمده از LWD در سیستم مدیریت و نگهداری راه به عنوان یک معیار برای

¹ Present Serviceability Index

تعیین زمان مناسب عملیات مرمت و بهسازی روسازی قبل از اضمحلال آن استفاده می‌شود. مکانیزم کار دستگاه LWD شبیه به دستگاه FWD بوده و نام دیگر آن PFWD می‌باشد.

۲-۲ رویکردهای ارزیابی روسازی

هدف از ارزیابی روسازی، برآورد کیفیت روسازی و راه با توجه به شاخص‌هایی مانند: استحکام سازه‌ای، ناهمواری، کیفیت حرکت در سرعت‌های بالا، خرابی‌های مهم (چاله، ترک و شیارشدگی)، شدت و وسعت تمام خرابی‌ها است. روش‌های مختلف ارزیابی روسازی عبارتند از:

- **آزمایش‌های مخرب روسازی:**

شامل: کرگیری، تعیین ضخامت لایه‌های روسازی، تعیین مقاومت مارشال آسفالت، تعیین CBR^۱ لایه-های راه و خاک بستر و تعیین درصد تراکم لایه‌های راه و خاک بستر.

- **آزمایش‌های غیرمخرب روسازی:**

شامل: تیر بنکلمن، آزمایش بازگذاری صفحه، دفلیکتومتر، GPR^۲، RSP.Grip tester^۳، FWD و HWD.

- **شاخص‌های ترکیبی:**

شامل: شاخص کیفیت روسازی PCI، شاخص سرویس دهی راه PSI، روش PQI^۴ و روش MCI^۵

۲-۲-۱ مقایسه روش‌های قدیم و جدید ارزیابی روسازی راه

- روش‌های قدیمی ارزیابی روسازی راه معمولاً مخرب بوده و به تجهیزات زیادی برای اندازه‌گیری نیاز دارند.

¹ California Bearing Ratio

² Ground Penetrating Radar

³ Road Surface Profiler

⁴ Pavement Quality Index

⁵ Maintenance Control Index

- روش کار با این تجهیزات بسیار سخت و وقت گیر بوده و غالباً خطرناک می باشند.
- علی رغم صرف وقت و هزینه زیاد تمام خصوصیات راه قابل اندازه گیری نبودند.
- در روش های جدید ارزیابی روسازی، گرایش به سمت استفاده از تجهیزات غیرمخرب روسازی است.
- روش های جدید نسبت به روش های قدیمی از سرعت بیشتر، هزینه کمتر، دقت بیشتر و ریسک کمتری برخوردار هستند. شکل های (۱-۲)، (۲-۲) و (۳-۲) برخی روش های قدیمی و جدید ارزیابی روسازی را نشان می دهد.



شکل ۱-۲ آزمایش صفحه در روش های قدیمی



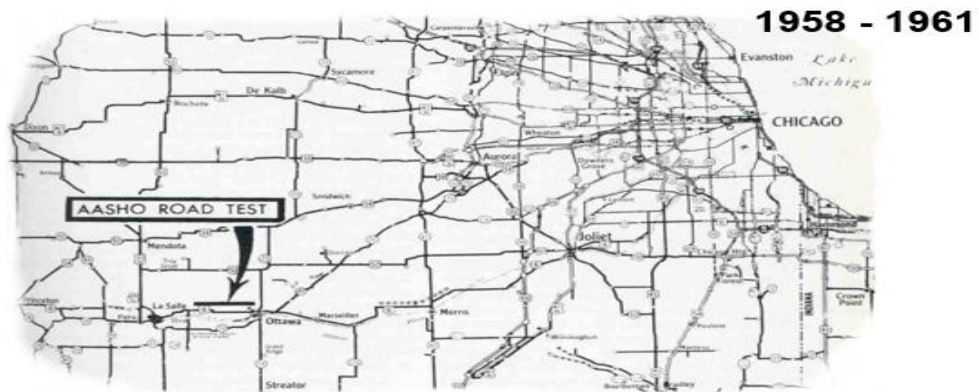
شکل ۲-۲ آزمایش تیر بنکلمن در روش های قدیمی



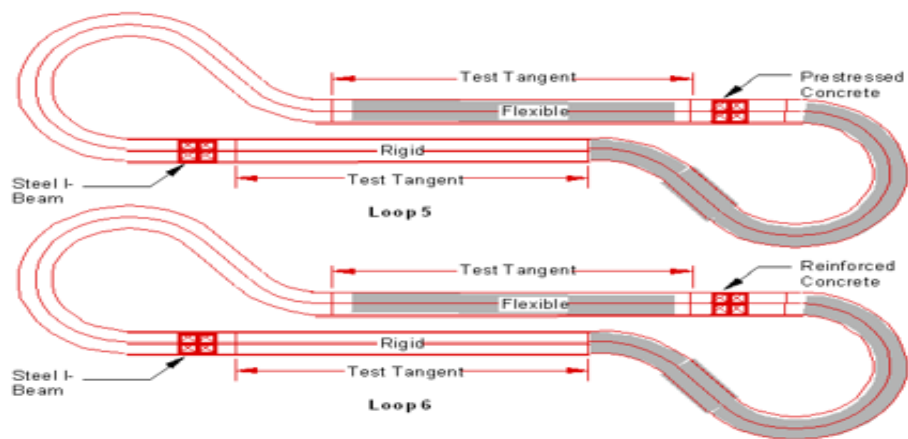
شکل ۳-۲ استفاده از FWD در روش‌های جدید

۳-۲ تاریخچه روش PSI

سه آزمایش مهم از نیمه دهه ۱۹۴۰ تا اوایل ۱۹۶۰ در امریکا صورت گرفت، اولین آنها آزمایش راه در مریلند بود که نتایج آن از ۱۹۵۲ منتشر شد. هدف از این آزمایش مطالعه تاثیر چهار نوع محور خودرو بر یک قطعه راه با روسازی بتنی بود. این آزمایش بر روی یک قطعه راه با روسازی بتنی به طول حدود ۲ کیلومتر انجام گرفت. پس از کسب نتایج موفقیت آمیز از آزمایش مریلند، دومین آزمایش مهم در این زمینه با همکاری ۱۱ ایالت صورت گرفت که به نام آزمایش WASHO معروف است. این آزمایش بر روی دو مسیر بسته با روسازی آسفالتی از سال ۱۹۵۲ تا ۱۹۵۴ انجام شد. سپس آزمایش بزرگ AASHO بر روی ۶ مسیر بسته با روسازی‌های مختلف از سال ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۰ صورت گرفت. نتایج حاصل از آن تا مدت زیادی مبنای روش‌های طرح روسازی بود. حتی در حال حاضر هم تحلیل نتایج آزمایش بزرگ آشو از جنبه‌های جدیدی ادامه دارد [۲۲]. شکل‌های (۲-۴) تا (۲-۶) مسیر مورد استفاده در مطالعات مربوط به روش PSI را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲ موقعیت مکانی انجام آزمایشات [۲۲]



شکل ۵-۲ مسیر مورد استفاده در روش PSI [۲۲]



شکل ۶-۲ مسیر مورد استفاده در روش PSI [۲۲]

۴-۲ ارزیابی روسازی راه به روش PSI

برای نخستین بار در سال ۱۹۶۰ توسط Irick و Carey از روش رگرسیون برای تحلیل نتایج آزمایش بزرگ آشتو استفاده شد. در این مدل برای اولین بار مفهوم شاخص فعلی خدمت دهی راه PSI پیشنهاد و معرفی گردید. در این روش کیفیت خدمت دهی روسازی از صفر تا پنج رتبه بندی شد و فرض می‌شود که خرابی‌های اصلی موثر بر سطح خدمت دهی روسازی عبارتند از: ناهمواری‌ها، ترک خوردگی، چاله و شیارشدگی باشند. در آزمایش بزرگ آشو از طرف گروه‌های مستقل ارزیاب به هریک از قطعات روسازی نمره‌ای بین صفر تا پنج تعلق گرفت. میانگین این نمرات به عنوان نسبت خدمت دهی راه شناخته می‌شود که با اندازه‌گیری خرابی‌های مهم روسازی رابطه‌ای بین آن‌ها برقرار می‌گردد [۱]. شکل‌های (۲-۷) تا (۲-۱۱) نشان دهنده محدوده سطح کیفیت PSI یک تا پنج می‌باشد.



شکل ۲-۷ محدوده PSI صفر تا یک، روسازی با کیفیت خیلی بد



شکل ۸-۲ محدوده PSI یک تا دو، روسازی با کیفیت بد



شکل ۹-۲ محدوده PSI دو تا سه، روسازی با کیفیت متوسط



شکل ۱۰-۲ محدوده PSI سه تا چهار، روسازی با کیفیت خوب



شکل ۲-۱۱ محدوده PSI چهار تا پنج، روسازی با کیفیت خیلی خوب

۲-۵ ارزیابی روسازی به روش PCI

شاخص کیفیت روسازی PCI با در نظر گرفتن تمام خرابی‌های روسازی راه محاسبه می‌شود. در این روش برای روسازی آسفالتی ۱۹ نوع خرابی و برای روسازی بتنی ۱۶ نوع خرابی پیش بینی شد و تنها روش ارزیابی روسازی است که توسط موسسه ASTM به عنوان یک روش استاندارد پذیرفته شده است. از اوایل دهه ۱۹۷۰ تحقیقات بر روی انواع خرابی‌های روسازی، روش اندازه‌گیری آنها، و چگونگی تأثیرگذاری آنها بر عملکرد روسازی در گروه مهندسين ارتش آمریکا انجام شد. یکی از اهداف این تحقیقات تدوین یک روش سریع برای ارزیابی روسازی بود که به ابداع روش PCI منجر شد. این روش هم برای ارزیابی در سطح پروژه و هم برای ارزیابی در سطح شبکه قابل استفاده است. توسعه این روش منجر به ارائه یک سیستم مدیریت روسازی گردید. برای تعیین PCI یک قطعه روسازی ابتدا آن قطعه به تعدادی واحد بازرسی به نام واحد نمونه تقسیم می‌شود. برای راه‌های آسفالتی و راه‌های شنی و خاکی واحد نمونه طبق تعریف یک سطح ۱۴۰ تا ۳۲۰ متر مربع را تشکیل می‌دهد. برای رویه آسفالتی فرودگاه-ها واحد نمونه طبق تعریف یک سطح ۲۵۰ تا ۶۸۰ متر مربعی را تشکیل می‌دهد و برای راه‌ها و فرودگاه‌ها با رویه بتنی واحد نمونه شامل ۱۲ تا ۲۸ دال است. برای ارزیابی روسازی در سطح شبکه و با هدف مقایسه تغییرات کیفیت روسازی در طول شبکه حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد واحد نمونه ارزیابی می‌شود و

ارزیابی‌ها به صورت چشمی صورت می‌گیرد. شکل (۲-۱۲) نمونه‌ای از فرم ارزیابی برای یک واحد نمونه را نشان می‌دهد [۱].

فرم جمع آوری خرابی‌های روسازی آسفالتی										
مرکز تحقیقات تعمیر و نگهداری دانشگاه تربیت مدرس										
نام محور:		کیلومتر/آ:		تاریخ:		سنگ:				
طول واحد:		عرض خط:		مختصات:		شماره عکس:				
						N:				
نوع شانه: <input type="checkbox"/> آسفالتی <input type="checkbox"/> شنی <input type="checkbox"/> وضعیت شانه: <input type="checkbox"/>										
خرابی	واحد	خط کندرو			خط وسط			خط کندرو		
ترک پوست سوسماری	متر مربع									
ترک طولی	متر									
ترک عرضی	متر									
ترک بالوکی	متر مربع									
ترک انعکاسی	متر									
ترک خوردگی لبه	متر									
چاله	تعداد									
تکه گیری	متر مربع									
فوزدگی	متر مربع									
دانه دانه شدن (شن زدگی)	متر مربع									
اسپلای شدن دانه ها	متر مربع									
پایین افتادگی شانه	متر									
شمار افتادگی	متر مربع									
برآمدگی و فرو رفتگی	متر									
کنار رفتگی	متر مربع									
موج زدگی	متر مربع									
ملاحظات:										
مسئول ارزیابی:					کدنگ ارزیابی:					
امضاء:					امضاء:					

شکل ۲-۱۲ نمونه فرم ارزیابی روسازی به روش PCI

۲-۶ ارزیابی روسازی با استفاده از تست‌های غیر مخرب

در سال‌های اخیر به منظور ارزیابی ترک خوردگی با استفاده از تست‌های غیر مخرب در روسازی مطالعات زیادی انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

Yang و همکارش به بررسی ترک خوردگی در روسازی آسفالتی با اساس تثبیت شده پرداختند. در این تحقیق ابتدا ترک‌ها با FWD ارزیابی شدند و سپس با کرگیری از قسمت‌های ترک خورده، فرم ترک و نحوه گسترش آن با یکی از روش‌های شناسایی الگوی آماری (KNN)^۱ بررسی و طبقه بندی شد. نتایج

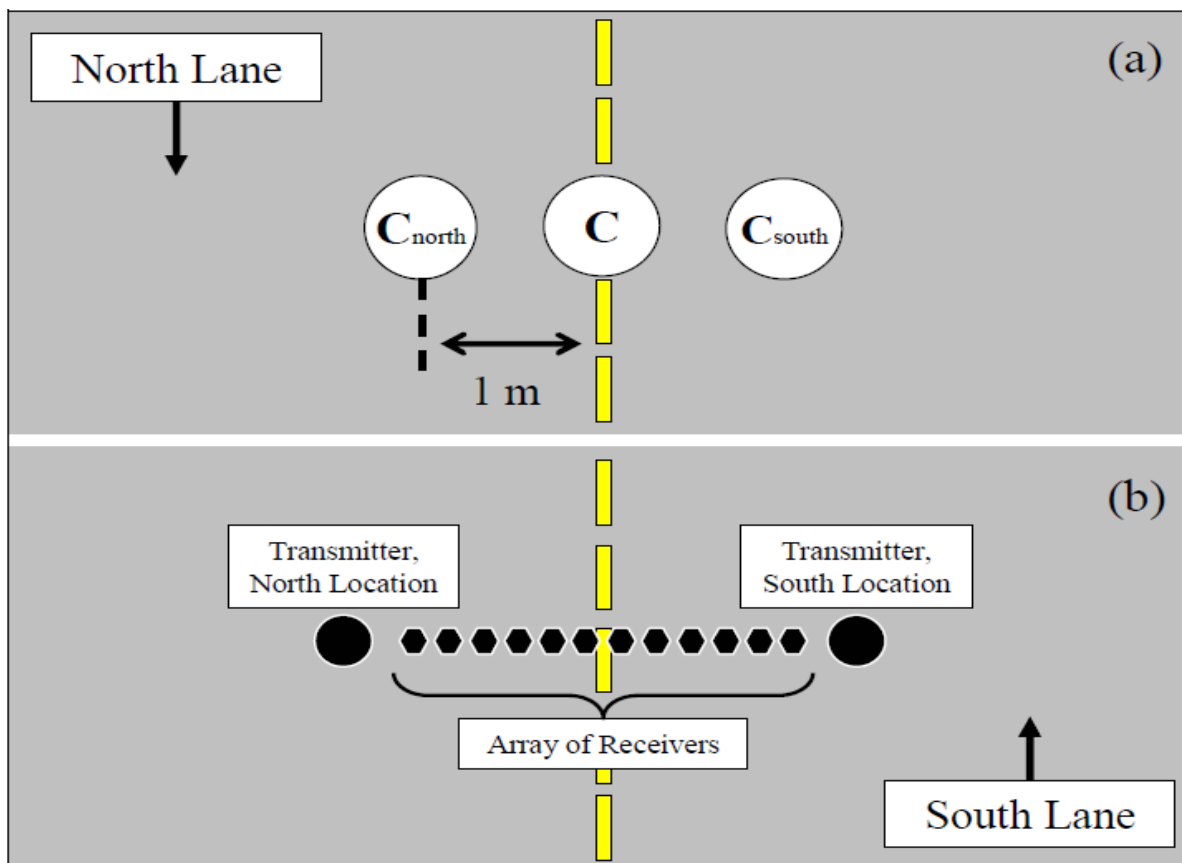
¹ K-nearest neighbour

آنها روش جدیدی برای به دست آوردن اطلاعات از هر نوع ترک با هر عرضی در روسازی آسفالتی با اساس تثبیت شده به دست داد. نتایج نشان داد که بیشتر ترک خوردگی‌ها با عرض بالا، ترک‌های برودتی بودند، که این یک نتیجه مهم در بررسی ترک‌ها با عرض‌های مختلف و با انواع متفاوت بود. تست میدانی FWD و کرگیری، آزمایش‌هایی بودند که روی ترک‌های عرضی در ۴ بزرگراه انجام شدند و سه ویژگی خیز، دامنه و نرخ خیز از هر حوضچه تغییر شکل برای بررسی ترک‌ها انتخاب شدند [۲۳].

Solla و همکاران نشان دادند تست‌های غیر مخرب GPR و infrared thermography روشی مناسب برای ارزیابی ترک خوردگی در روسازی آسفالتی هستند [۲۴].

Du-Tertre به بررسی ارزیابی توانایی تست‌های غیر مخرب PFWD و MASW^۱ در ارزیابی شرایط درزهای طولی در روسازی آسفالتی پرداختند. نتایج نشان داد که در سراسر درز طولی تغییر مقدار خیز کمتر از ۷ درصد بوده است. این نتیجه اولیه نمی‌تواند فقط به کیفیت درزها مربوط باشد، زیرا اثر لایه زیرین در اندازه‌گیری مدول PFWD هم باید در نظر گرفته شود [۳۵]. شکل (۲-۱۳) موقعیت قرارگیری دستگاه FWD را نسبت به ترک طولی را نشان می‌دهد.

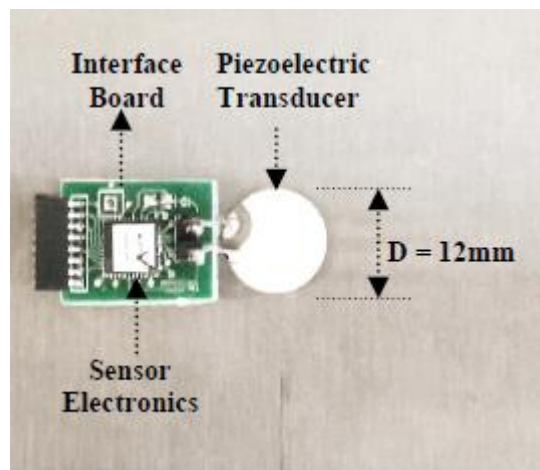
¹ Multi-Channel Analysis of Surface Wave



شکل ۲-۱۳ موقعیت قرار گیری دستگاه FWD نسبت به ترک طولی [۳۵]

در تحقیقی دیگر برای تشخیص ترک خوردگی بالا به پایین در روسازی آسفالتی از دستگاه (SWS)^۱ استفاده شد. اساس کار این دستگاه با توجه به تغییرات دامنه ولتاژ به علت خرابی‌ها و ترک خوردگی‌ها بود. نتایج نشان داد که رشد ترک خوردگی بالا به پایین توسط دستگاه SWS با دقت بالایی تشخیص داده می‌شود. شکل (۲-۱۴) نمونه‌ای از SWS استفاده شده در این مطالعه را نشان می‌دهد [۲۵].

¹ self-powered Wireless Sensor



شکل ۲-۱۴ نمونه‌ای از SWS استفاده شده در مطالعه [۲۵]

Khazanovich و همکاران کاربرد تکنولوژی اولتراسونیک برای ارزیابی ترک و درزهای طولی در روسازی انعطاف پذیر را بررسی کردند. این تکنولوژی به طور موفقیت آمیز برای سال‌های زیادی در روسازی بتنی استفاده می‌شود که می‌تواند یک روش ساده، سریع و عینی برای ارزیابی خرابی‌های سطحی در روسازی آسفالتی باشد. نتایج تست‌های آزمایشگاهی و میدانی توانایی تکنولوژی اولتراسونیک را در ارزیابی ترک خوردگی در روسازی آسفالتی ثابت کرد. شکل (۲-۱۵) نحوه ارزیابی روسازی با استفاده از اولتراسونیک را نشان می‌دهد [۵].



شکل ۲-۱۵ ارزیابی روسازی با استفاده از اولتراسونیک [۵]

Liu و همکاران به اندازه‌گیری و ارزیابی خرابی‌های روسازی تحت جابجایی بار به وسیله‌ی MLS^۱، ژئوفون و محاسبات برگشتی پرداختند. در این تحقیق یک مسیر آزمایشی در سه حالت مختلف تحت بررسی قرار گرفت (شکل ۲-۱۶). در هر حالت نوسانات مسیرکه ناشی از عبور کامیون بود، توسط ژئوفون‌ها اندازه‌گیری شد. خیز به دست آمده از ژئوفون‌ها سازگاری بالایی با یکدیگر نشان دادند. همچنین ارتعاشات محاسبه شده از مصالح و پاسخ مکانیکی متناظر با آن با افزایش بارگذاری توسط MLS سازگار بودند. بنابراین سیستم پیشنهادی ابزاری دقیق برای ارزیابی خرابی‌های روسازی آسفالتی است [۲۶].



شکل ۲-۱۶ مسیر آزمایش و موقعیت قرار گیری ژئوفون‌ها [۲۶]

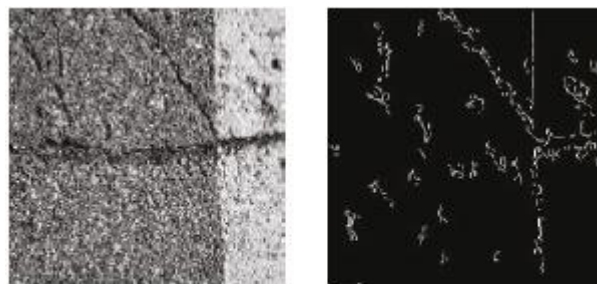
در تحقیقی دیگر روشی جدید برای ارزیابی ترک خوردگی عرضی در روسازی آسفالتی بررسی شد. در این مطالعه با در نظر گرفتن فاصله ترک‌های عرضی و عرض ترک عرضی شاخصی به نام TCCI^۲ تعریف شد. سپس این شاخص به یک مقیاس بین صفر تا صد تقسیم شد و مقدار بحرانی آن مشخص گردید.

¹ Mobile Load Simulator

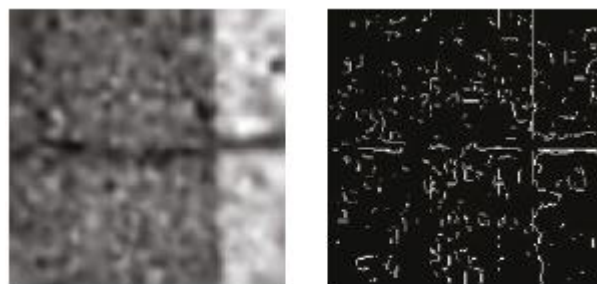
² Transverse Crack Condition Index

نتایج نشان داد که TCCI روشی مناسب برای ارزیابی ترک خوردگی عرضی در روسازی آسفالتی است، و مقدار این شاخص با شرایط واقعی روسازی می‌تواند یکسان باشد [۲۷].

در تحقیقی دیگر ترک خوردگی در روسازی آسفالتی توسط آنالیز تصاویر ترک با استفاده از BEMD^۱ و sobel edge detector مورد ارزیابی قرار گرفت. در این روش ابتدا تصاویر دارای نویز توسط BEMD حذف شدند و سپس تصاویر باقی مانده توسط sobel edge detector تحت آنالیز قرار گرفتند. در انتها نتایج حاصل با نتایج canny edge detector مقایسه شد. طبق نتایج به دست آمده canny edge detector روشی مناسب‌تر نسبت به BEMD برای ارزیابی روسازی است [۲۸]. شکل (۲-۱۷) نمونه‌ای از تصاویر آنالیز شده برای ارزیابی ترک نشان می‌دهد.



(a) With Canny: asphalt surface



(b) With BEMD/Sobel: asphalt surface

شکل ۲-۱۷ نمونه‌ای از تصاویر آنالیز شده برای ارزیابی ترک [۲۸]

¹ Bidimensional empirical mode decomposition

Saar و همکاران روشی جدید برای ارزیابی و طبقه بندی اتومات خرابی‌های روسازی ارائه دادند. این سیستم از یک شبکه عصبی برای تشخیص و طبقه بندی عیوب روسازی استفاده می‌کرد. نتایج توانایی این سیستم برای طبقه بندی و ارزیابی عیوب روسازی را ثابت کردند [۲۹].

Park و همکاران به ارزیابی روسازی با استفاده از برنامه LVECD¹ پرداختند و توانایی مدل LVECD در تشخیص شروع ترک، میل به گسترش و شدت ترک توسط مقایسه نتایج شبیه سازی با مشاهدات کرگیری میدانی و بررسی شرایط میدانی در روسازی تایید کردند. به طور کلی هماهنگی بین نرخ مشاهدات شرایط میدانی با پیش بینی نتایج شبیه سازی برنامه LVECD در حدود ۷۸ درصد بود [۳۰].

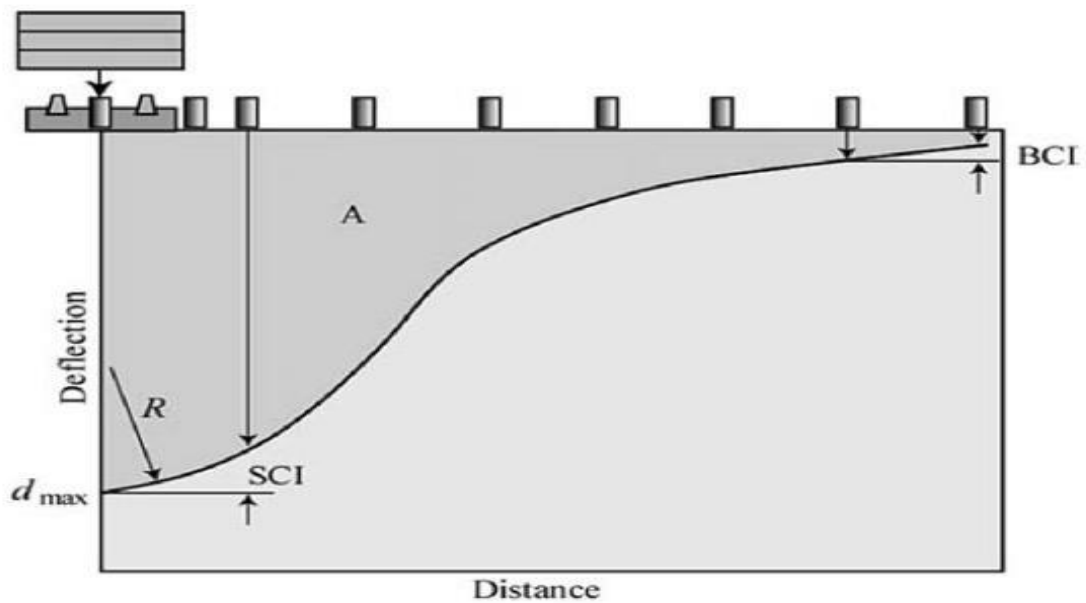
Zhang و همکاران در مطالعه خود از روش‌های آماری، رگرسیون حداقل مربعات و رگرسیون لجستیک باینری در ایجاد مدل پیش بینی برای ترک خوردگی عرضی استفاده کردند. نتایج نشان داد که شروع و گسترش ترک توسط متغیرهای پیش بینی کنترل می‌شود. خواص مواد، ساختار روسازی، آب و هوا و ترافیک، شاخص‌های کلیدی برای گسترش ترک‌های عرضی بودند. کم بودن دما، درصد عبوری از الک ۲۰۰، مقاومت کششی غیر مستقیم و طول عمر، شاخص‌های بحرانی برای شروع ترک بودند و هر دو مدل استفاد شده، پیش بینی خوب و قابل اعتمادی نشان دادند [۱۶].

در مطالعه دیگری به ارزیابی روسازی با استفاده از پارامترهای کاسه افت و خیز روسازی پرداخته شد. در ارزیابی روسازی با استفاده از دستگاه FWD تنشی معادل بار چرخ محور استاندارد به روسازی اعمال می‌شود و افت و خیز ناشی از آن در ۷ یا ۹ نقطه از امتداد محور راه اندازه‌گیری می‌شود. افت و خیز اندازه‌گیری شده در مقابل فاصله از مرکز بارگذاری، به عنوان کاسه انحناء روسازی شناخته می‌شود. با استفاده از پارامترهای D_{Max} , SCI , BDI , $AREA$, BCI که با استفاده از کاسه انحناء روسازی تعیین می‌شوند، می‌توان وضعیت سازه‌ای روسازی را در عمق‌های مختلف مورد ارزیابی قرار داد [۳۱].

¹ Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical distresses

پس از تحلیل نتایج مشخص گردید که تفسیر درست پارامترهای کاسه انحناء افت و خیز روسازی در غیاب ضخامت لایه ها و انجام محاسبات بازگشتی، اطلاعات مفیدی از وضعیت سازه‌ای روسازی و بستر در اختیار قرار می‌دهد.

کاسه انحناء افت و خیز روسازی (شکل ۲-۱۸) و پارامترهای آن:



شکل ۲-۱۸ کاسه انحناء افت و خیز روسازی [۳۱]

پارامترهای کاسه انحناء عبارتند از:

- پارامتر D_{Max} : این پارامتر مقدار افت و خیز ژئوفون مرکزی دستگاه FWD است که درست در مرکز صفحه بارگذاری قرار دارد.
- پارامتر SCI: پارامتر SCI نشان دهنده انحناء کاسه افت و خیز در بخش ابتدای آن است و سختی لایه‌های بالای روسازی تا ضخامت ۲۰ سانتی‌متر را بیان می‌کند. این پارامتر با استفاده از روابط (۱-۲) و (۲-۲) محاسبه می‌شود.

$$SCI = d_0 - d_{200} \quad (1-2)$$

$$SCI = d_0 - d_{300} \quad (2-2)$$

که در آن d_0 مقدار افت و خیز در مرکز بارگذاری و d_{200}, d_{300} به ترتیب مقدار افت و خیز در فاصله ۳۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متری از مرکز بارگذاری است. با ترسیم نمودار SCI در طول پروژه می‌توان وضعیت سازه‌ای لایه آسفالتی را مورد ارزیابی قرارداد. مقدار زیاد این پارامتر در مقایسه با d_0 نشان دهنده ضعف در لایه آسفالتی است.

- پارامتر BDI: پارامتر BDI وضعیت سازه‌ای لایه اساس را مورد ارزیابی قرار می‌دهد این پارامتر از اختلاف افت و خیز ژئوفون‌های قرار گرفته در فواصل ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متری از مرکز بارگذاری با استفاده از رابطه (۳-۲) محاسبه می‌شود.

$$BDI = d_{300} - d_{600}$$

(۳-۲)

که با ترسیم BDI در طول پروژه و مقایسه با افت و خیز مرکزی می‌توان لایه اساس را از نظر سازه‌ای مورد ارزیابی قرارداد.

- پارامتر BCI: پارامتر BCI وضعیت سازه‌ای لایه زیراساس و یا بستر روسازی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این پارامتر از اختلاف افت و خیز ژئوفون‌های قرار گرفته در فواصل ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌متری از مرکز بارگذاری با استفاده از روابط (۴-۲) تا (۶-۲) محاسبه می‌شود.

$$BCI = d_{600} - d_{900} \quad (۴-۲)$$

(USA)

$$BCI = d_{900} - d_{1200} \quad (\text{Finland}) \quad (۵-۲)$$

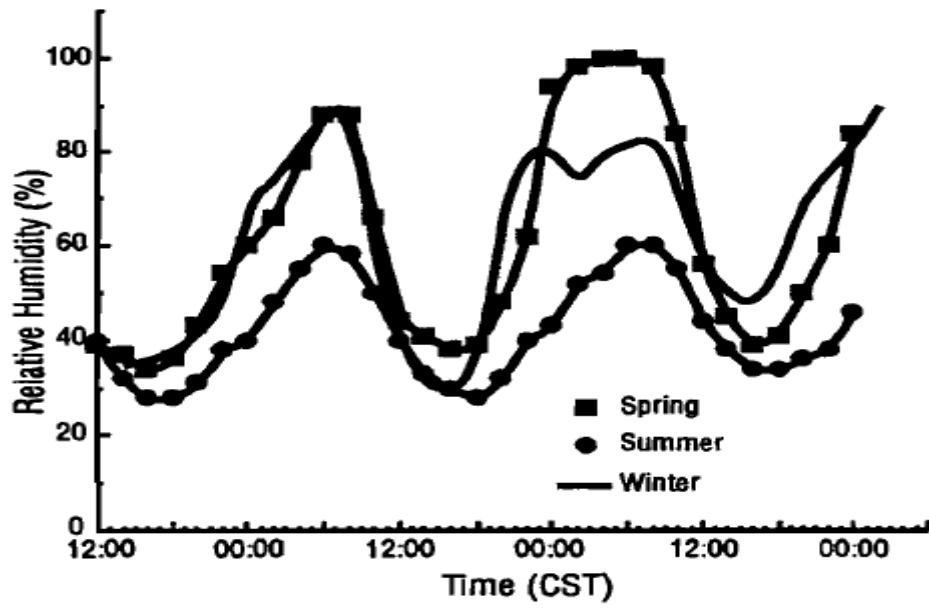
$$BCI = d_{1200} - d_{1500} \quad (\text{Estonia}) \quad (۶-۲)$$

- پارامتر AREA: برای محاسبه این پارامتر از داده‌های افت و خیز ۴ ژئوفون مقدار پارامتر AREA با استفاده از رابطه (۷-۲) بر حسب میلی‌متر محاسبه می‌شود [۳۱].

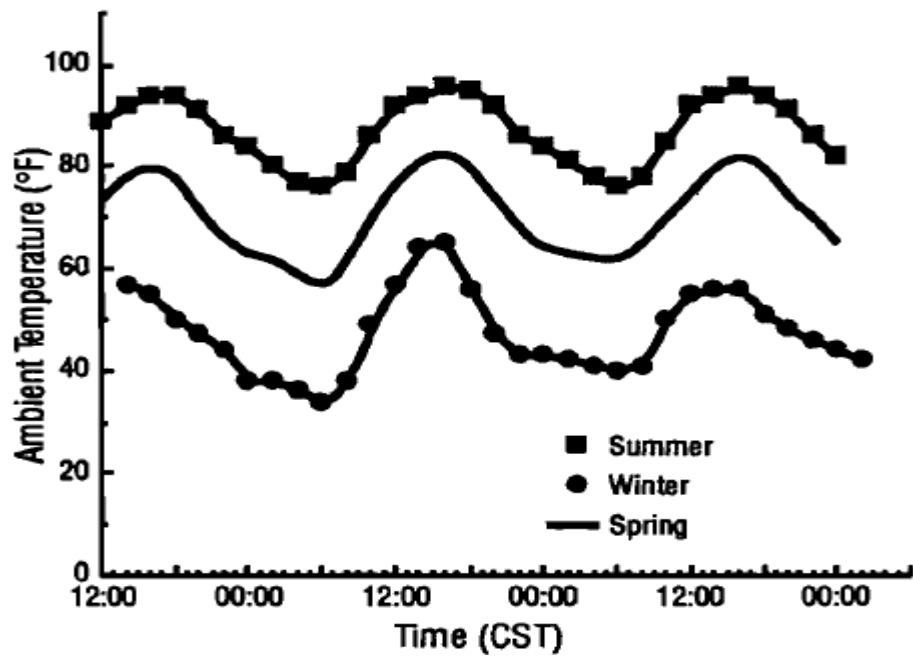
$$AREA = \frac{150(d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900})}{d_0} \quad (7-2)$$

۷-۲ تحقیقات انجام شده روی ضریب انتقال بار

Owusu-Antwi و همکاران به بررسی انتقال بار در درزها و ترک‌های روسازی صلب پرداختند و نتایج تحقیقات آنها نشان داد که ضریب انتقال بار در درزها و ترک‌های روسازی صلب یک فاکتور مهم در خرابی روسازی است. زیرا از دست دادن انتقال بار تأثیر مهمی روی عملکرد و همچنین هزینه‌های دوره عمر روسازی صلب می‌گذارد، همچنین نتایج نشان داد که در ارزیابی LTE در درزها و ترک‌های عرضی از FWD بطور موثری می‌توان استفاده کرد. نتایج حاصله از چنین ارزیابی‌هایی می‌تواند در بهسازی و نگهداری راه استفاده شود. در این تحقیق نشان داده شده که ضریب انتقال بار به فصل و ساعت انجام آزمایش وابسته است. طبق شکل (۲-۱۹) و (۲-۲۰) مشاهده می‌شود در ساعت‌های مختلف در طول روز و همچنین در فصول مختلف دمای سطح روسازی و رطوبت لایه‌های روسازی متغیر می‌باشد که این موضوع می‌تواند بر مدول و خیز به دست آمده از دستگاه FWD تأثیر بگذارد [۳].

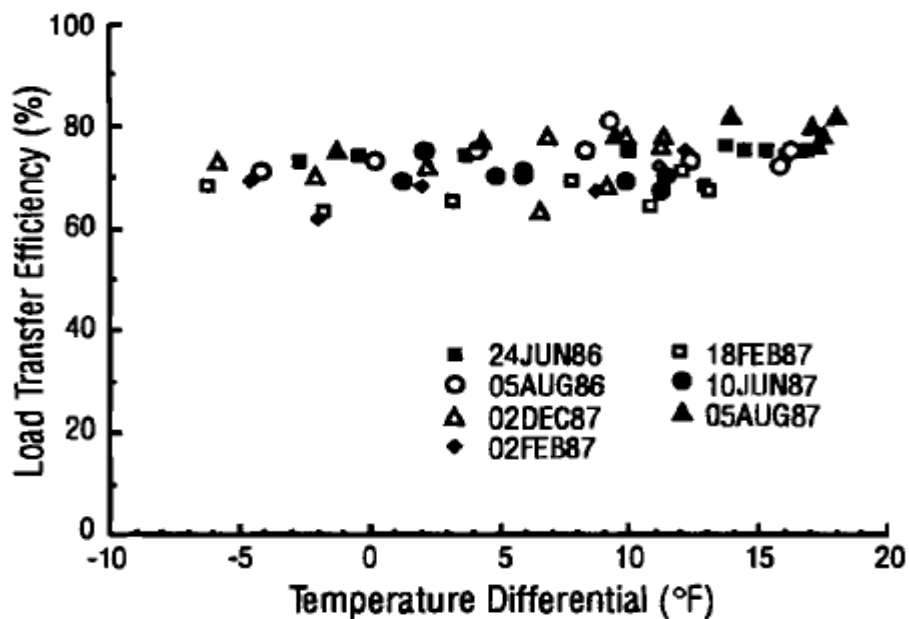


شکل ۱۹-۲ تغییرات رطوبت سطح روسازی در ساعت‌ها و فصل‌های مختلف [۳]



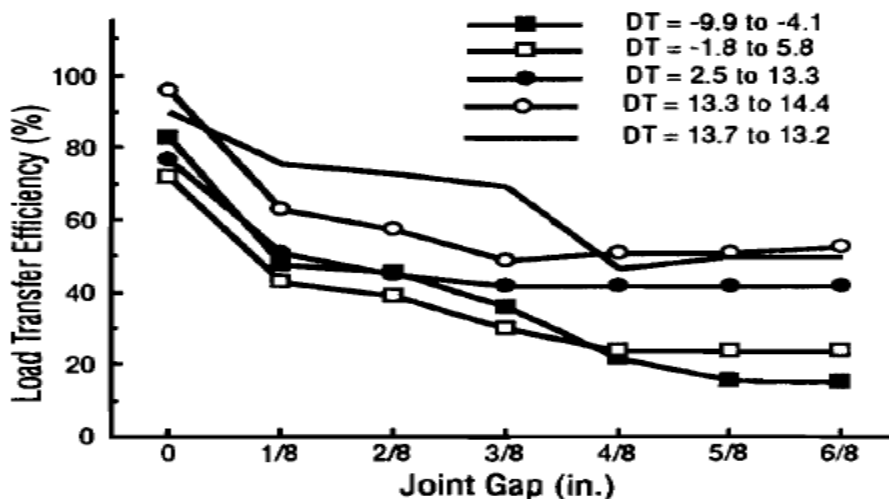
شکل ۲۰-۲ تغییرات دمای سطح روسازی در ساعت‌ها و فصل‌های مختلف [۳]

در شکل (۲۱-۲) تغییرات ضریب انتقال بار در دماهای مختلف سطح روسازی مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۲۱ تغییرات ضریب انتقال بار در دمای‌های مختلف [۳]

در شکل (۲-۲۲) مشاهده می‌شود که تغییرات عرض ترک بر روی مقدار ضریب انتقال بار تاثیر می‌گذارد، به طوری که با افزایش عرض ترک مقدار ضریب انتقال بار در ترک کاهش می‌یابد که در نتیجه باعث افت کیفیت باربری روسازی می‌شود.



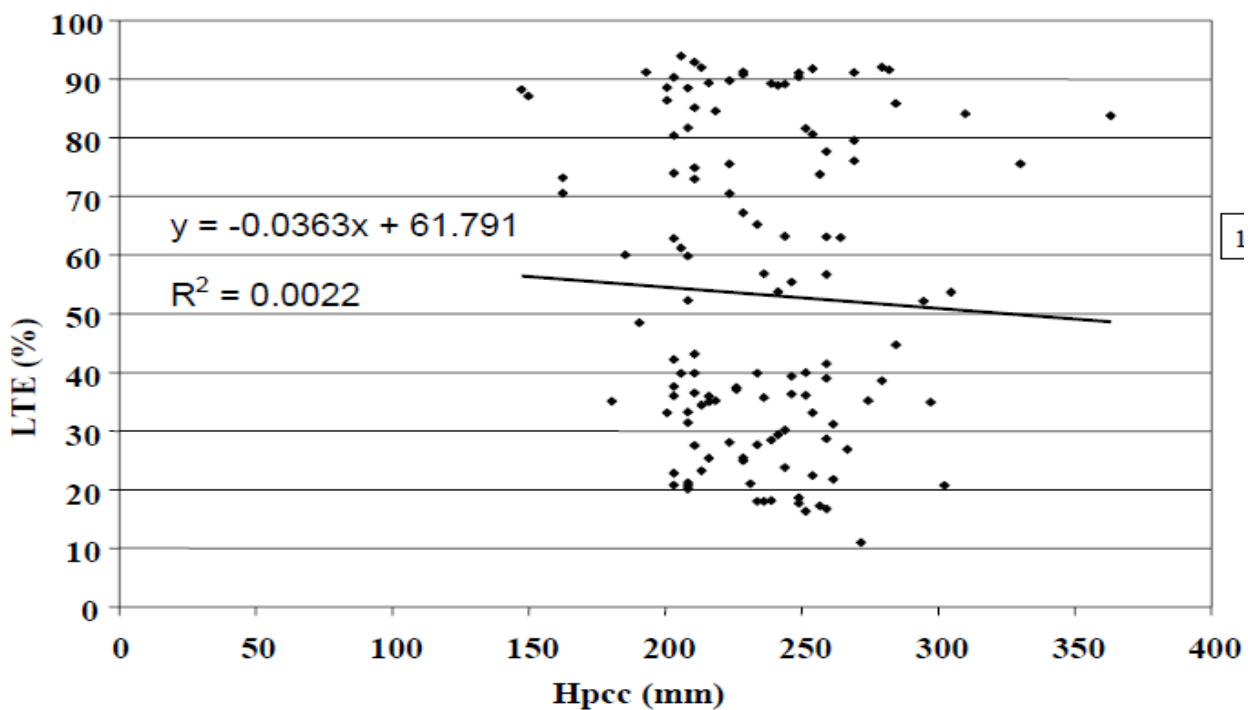
شکل ۲-۲۲ تاثیر تغییرات عرض ترک و یا درز در ضریب انتقال بار [۳]

Khazanovich و همکارش در مطالعه خود بیان کردند که LTE به پارامترهای زیادی شامل موقعیت

صفحه بارگذاری دستگاه FWD، زمان انجام آزمایش، و فصل انجام آزمایش وابسته است [۹].

در شکل (۲-۲۳) تغییرات ضخامت در برابر ضریب انتقال بار در روسازی بتنی نمایش داده شده است

که مشاهده می‌شود همبستگی خوبی بین ضخامت و ضریب انتقال بار وجود ندارد.

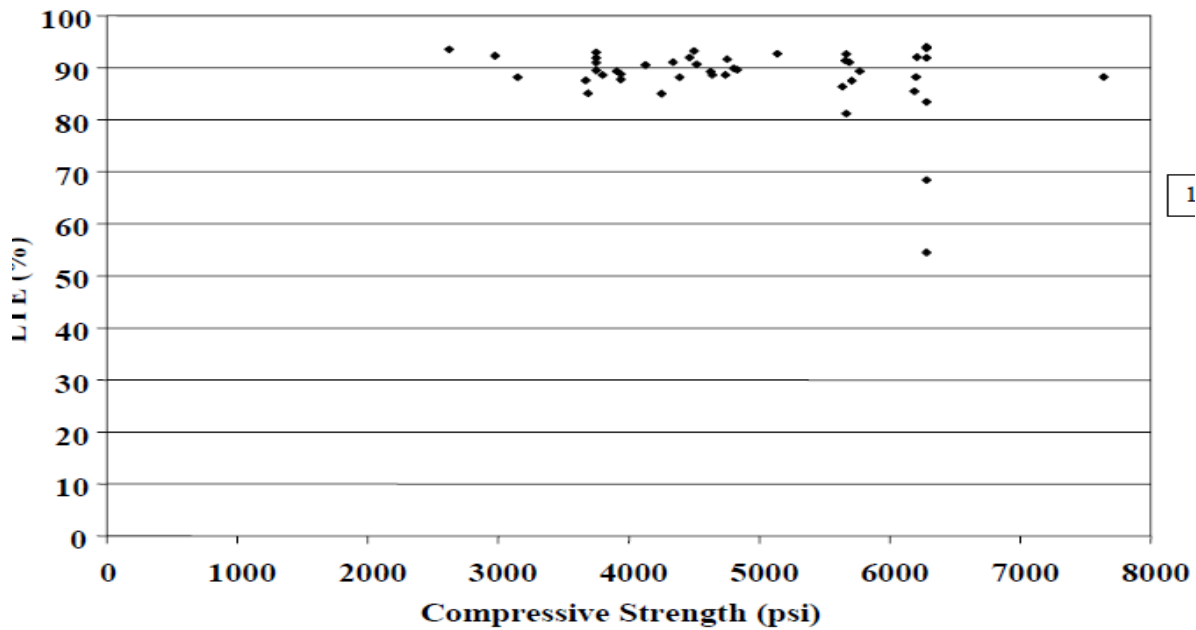


شکل ۲-۲۳ تاثیر تغییرات ضخامت لایه بتنی بر ضریب انتقال بار [۹]

اثرات مقاومت فشاری روسازی بتنی در برابر ضریب انتقال بار در محل ترک‌های سطح روسازی در این

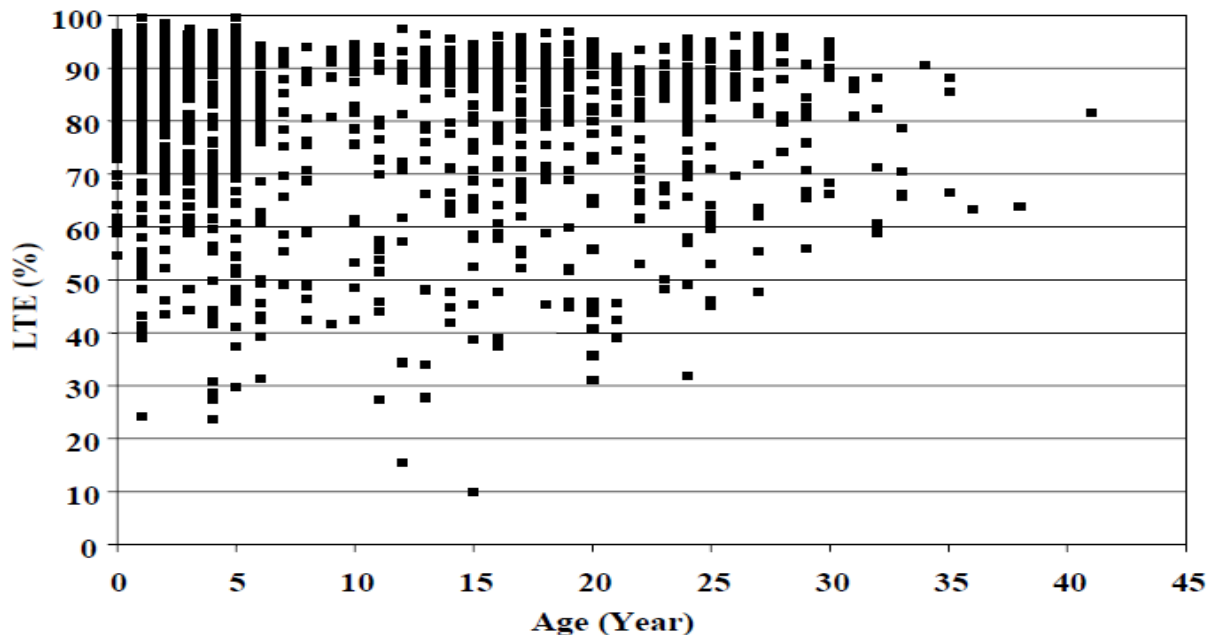
مطالعه بررسی شد. براساس شکل (۲-۲۴) کاهش جزئی در مقدار ضریب انتقال بار با افزایش مقاومت

فشاری بتن روسازی مشاهده شد.



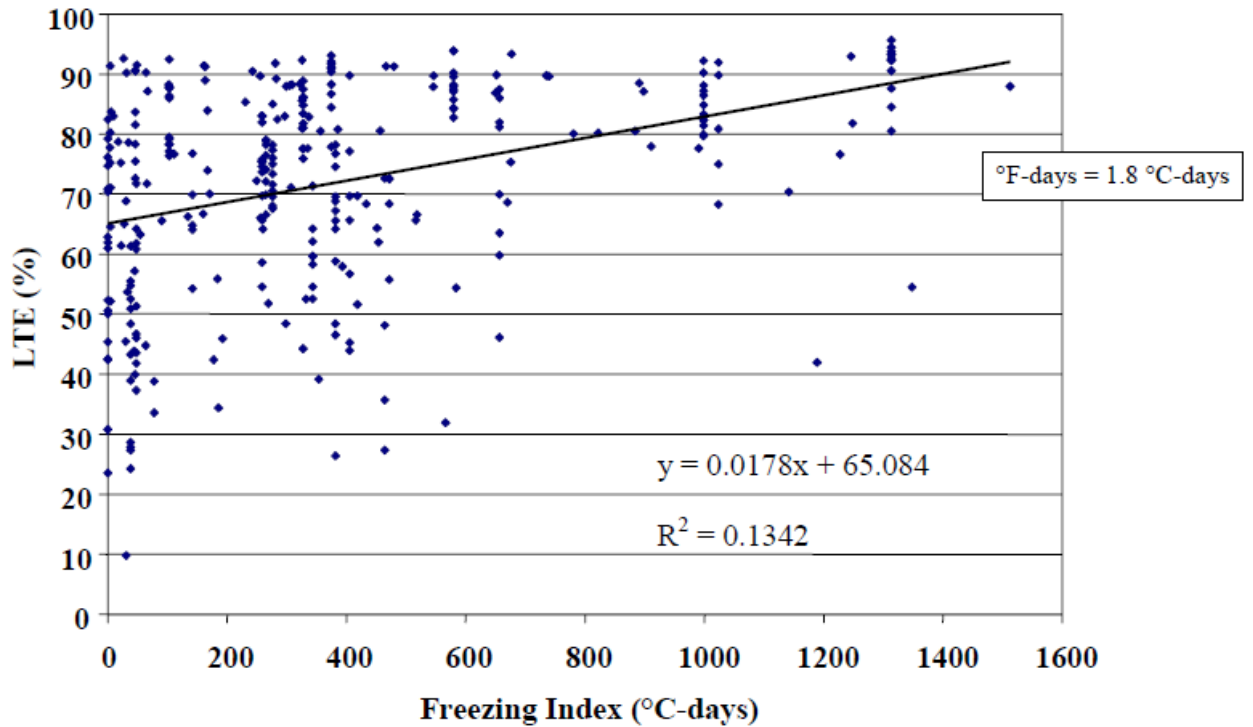
شکل ۲-۲۴ تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ضریب انتقال بار [۹]

در شکل (۲-۲۵) مشاهده می‌شود رابطه منطقی بین سن روسازی بتنی و مقدار پارامتر LTE وجود ندارد. این پراکندگی در داده‌های به دست آمده می‌تواند به علت این باشد که ضریب انتقال بار به عوامل مختلفی مانند بارگذاری ترافیکی، شرایط آب و هوا و خواص مواد-مصالح بستگی دارد.



شکل ۲-۲۵ بررسی اثر سن روسازی بر ضریب انتقال بار [۹]

شکل (۲-۲۶) تأثیر شرایط آب و هوای را بر مقدار ضریب انتقال بار نشان می‌دهد. براساس شکل مشاهده می‌شود در بخش‌هایی که دارای آب و هوای سرد می‌باشند مقدار ضریب انتقال بار نسبت به مناطق با آب و هوای گرم بیشتر است.



شکل ۲-۲۶ تأثیر شرایط آب و هوایی بر ضریب انتقال بار [۹]

Lin و همکاران نشان دادند که ترک عرضی روی عملکرد ساختار روسازی‌های مختلف تأثیر می‌گذارد و پارامتر جدیدی را معرفی کردند که شرایط انواع ترک‌های عرضی مختلف را می‌تواند تشخیص دهد. این پارامترها مستقیماً از داده‌های دستگاه FWD به دست می‌آید. نتایج به دست آمده از این مطالعه در بهسازی ترک‌های عرضی روسازی آسفالتی قابل استفاده می‌باشد. در این مطالعه شاخص جدیدی بنام PSC^۱ (رابطه ۲-۸) برای بررسی ظرفیت انتقال بار در ترک انقباضی در روسازی نیمه صلب ارائه شد [۳۲].

¹ Pavement Structure Condition

$$PSC = \frac{D_0 - D_{305}}{D_{1800}} \quad (۸-۲)$$

که D_0 ، D_{305} ، D_{1800} ، خیز در فاصله ۰، ۳۰۵ و ۱۸۰۰ میلی‌متری از مرکز بارگذاری می‌باشد. مقایسه PSC و LTE نشان داد که PSC شاخص بهتری می‌باشد زیرا که حساسیت بیشتری به شرایط ترک‌های مختلف دارد.

در مطالعه دیگری Cunliffe و همکاران به بررسی اثر ترک خوردگی بر ضریب انتقال بار (LTE) با استفاده از کرنش سنج در بتن و داده‌های محل وقوع ترک پرداختند. مشخص شد که از کرنش اوج در کرنش سنج واقع در درز یا ترک می‌توان در ارزیابی ضریب انتقال بار در طی پیدایش ترک در دال بتنی استفاده کرد [۳۳].

Xiaochun و Xinhua مکانیزم جدیدی برای مفهوم ظرفیت انتقال بار واقعی در روسازی فرودگاه و بزرگراه ارائه دادند. در واقع LTE همواره تحت اثر چرخ متحرک و با موقعیت متغیر می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی اثرات دینامیکی جابجایی چرخ در روسازی بتنی است. نتایج نشان داد که بالاتر بودن سرعت جابجایی چرخ و همچنین بالاتر بودن میرایی روسازی منجر به افزایش LTE می‌شود، و مشخص شد که LTE دینامیکی به مدول عکس العمل اساس و میرایی اساس حساس نمی‌باشد [۳۴].

Wadkar و همکاران اثرات سختی اساس تثبیت شده را روی LTE و اثرات LTE را روی عملکرد روسازی مطالعه کردند. مطالعات نشان داد، اساس تثبیت شده، خیز کمتری دارد و LTE کوچکتری را نشان می‌دهد و جهت بار منتقل شده بر روی مقدار LTE روسازی موثر می‌باشد همچنین با استفاده از آنالیز المان محدود نشان دادند که مقاومت خمشی بالاتر منجر به افزایش مقدار LTE می‌شود، اما تغییرات در مدول الاستیسیته اثر کمی بر روی مقدار LTE دارد [۳۶].

۲-۷-۱ معرفی روابط برای محاسبه پارامتر LTE

برای محاسبه LTE از معیارهای مختلفی مثل تغییر شکل یا تنش می‌توان استفاده کرد. با توجه به هر معیار روابط متفاوتی هم پیشنهاد شده که مهمترین آنها به شرح زیر است.

• فرمول وسترگاد [۳]:

$$LTE = \left\{ 1 - \frac{dj_i - dj_2}{dz_i - dz_u} \right\} * 100 \quad (۹-۲)$$

dj_u و dj_i به ترتیب خیز اندازه‌گیری شده در لبه دارای بار و بدون بار.

dz_u و dz_i تغییر مکان‌های مشابهی می‌باشند که در همان محل رخ می‌دهند (اگر درز هیچ ظرفیتی برای انتقال بار نداشته باشد).

• فرمول Sharp [۳]:

$$LTE = \frac{(dl_m - du_m)}{(dl_j - du_j)} * 100 \quad (۱۰-۲)$$

dl_j و du_j به ترتیب خیز اندازه‌گیری شده در لبه دارای بار و بدون بار.

dl_m و du_m خیز مشابه در نیمه دال که از همان سنسورهای اندازه‌گیری dl_j و du_j استفاده شده است.

• LTE براساس تنش و کرنش نیز می‌تواند بیان شود [۹-۱۰-۱۱-۱۲].

$$LTE(\sigma) = \frac{\sigma_{Unloaded}}{\sigma_{loaded}} = \frac{\varepsilon_{unloaded}}{\varepsilon_{loaded}} \quad (۱۱-۲)$$

σ_{loaded} و $\sigma_{unloaded}$ به ترتیب تنش در دال بدون بار و در دال دارای بار می‌باشد.

ε_{loaded} و $\varepsilon_{unloaded}$ به ترتیب کرنش در دال بدون بار و در دال دارای بار می‌باشد.

• همچنین LTE براساس روابط تجربی نیز می‌تواند تعریف شود [۹-۱۰]. پارامترها مشابه روابط قبلی می‌باشند.

$$LTE(S) = \frac{\sigma_{Unloaded}}{\sigma_{unloaded} - \sigma_{loaded}} * 100 = \frac{\epsilon_{unloaded}}{\epsilon_{unloaded} - \epsilon_{loaded}} * 100 \quad (۱۲-۲)$$

۸-۲ مقایسه FWD-LWD

دستگاه FWD در طول ۲۰ سال گذشته در تحقیقات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. FWD به عنوان یک دستگاه آزموده شده و قابل اطمینان شناخته می‌شود و از آن می‌توان به عنوان یک آزمایش استاندارد نام برد. ولی همان‌طور که در بخش‌های پیشین گفته شد دستگاه FWD دارای محدودیت‌هایی نیز هست. از طرف دیگر از لحاظ ساختاری دستگاه PFWD مشابه FWD بوده با این تفاوت که فن‌آوری آن خیلی ساده‌تر شده و طول مدت بارگذاری و حداکثر نیروی اعمالی آن کمتر شده است. به عبارتی به علت وزن کمتر قابلیت حمل دستی پیدا کرده و از آن می‌توان به خصوص برای ارزیابی مصالح غیر چسبنده و لایه‌های آسفالتی استفاده کرد. به همین دلیل بسیاری از محققین همبستگی نتایج FWD و PFWD را بررسی کرده‌اند.

پیش از آن تلاش‌های قابل ملاحظه‌ای در سایر کشورها جهت تعیین مدول لایه‌های روسازی به کمک مقادیر افت و خیز به دست آمده از دستگاه FWD انجام پذیرفت، این تحقیقات منجر به ایجاد روش‌های تجربی مکانیستیک در طراحی روسازی شد، پس از استقبال از FWD نمونه کوچک و قابل حمل آن با نام LWD توسعه پیدا کرد. دستگاه LWD قادر به تولید تنش‌های نسبتاً کوچک می‌باشد بنابراین کاربرد اصلی آن به مصالح غیر چسبنده محدود می‌شود. هر چند تحقیقات جهت کاربرد آن در لایه‌های آسفالتی روسازی نیز صورت گرفته است [۲۱].

مقایسه خصوصیات و تجهیزات دستگاه PFWD و FWD در جدول (۱-۲) و (۲-۲) نشان داده شده است.

جدول ۱-۲ مقایسه FWD و PFWD

۳۰۳۱ مدل LWD	۸۰۰۰ مدل FWD	خصوصیات و تجهیزات
لایه‌های غیر چسبنده روسازی	روسازی آسفالتی و بتنی	زمینه کاربرد
دستی	اتوماتیک	مکانیزم کار
۲۲	۱۲۰۰	وزن کلی دستگاه (کیلوگرم)
۱-۲-۳	۷-۹	تعداد ژئوفون‌ها
۰/۱۵-۰/۳	۰/۳-۰/۴۵	قطر صفحه بارگذاری (متر)
۱۰-۱۵-۲۰	۵۰-۱۵۰-۲۵۰-۳۵۰	وزن‌ها (کیلوگرم)
حداکثر ۱۵	۷ تا ۱۲۰	محدوده بارگذاری (کیلو نیوتن)

جدول ۲-۲ تجهیزات FWD و PFWD

PFWD	FWD	تجهیزات
۳	۷	تعداد ژئوفون
۰/۳	۰/۳	قطر صفحه بارگذاری (متر)
۴	۶	بافر (ضربه گیر)
۷۰	۵	ارتفاع سقوط وزنه (سانتی متر)
۱۵	۵۰	وزنه (کیلوگرم)

محاسبات بوسینسک برای محاسبه، تنش‌ها، کرنش‌ها، و تغییر مکان‌های در فضای نیمه بی نهایت همگن، همسان و الاستیک خطی طبق رابطه (۱۳-۲) تعریف می‌گردد.

$$E_0 = \frac{f * (1 - \nu^2) * a^2 * 6_0}{d_0} \quad (13-2)$$

در این رابطه E_0 مدول الاستیک سطحی، f فاکتور توزیع تنش، ν نسبت پواسون، σ تنش عمود بر سطح زیر صفحه بارگذاری، a شعاع صفحه بارگذاری و d_0 افت و خیز ژئوفون مرکزی می‌باشد. همچنین، می‌توان با استفاده از افت و خیزهای ژئوفون‌های دیگر، مدول الاستیسیته سطحی را محاسبه نمود. اگر فاصله r ژئوفون از مرکز صفحه بارگذاری و d_r افت و خیز نظیر آن ژئوفون باشد، می‌توان مدول الاستیسیته سطحی را با رابطه (۱۴-۲) محاسبه نمود.

$$E_0 = \frac{(1 - \nu^2) * a^2 * 6_0}{r * d_r} \quad (14-2)$$

در نهایت می‌توان گفت نتایج دستگاه LWD همبستگی خوبی با نتایج دستگاه FWD دارد. دستگاه LWD می‌تواند در مدت زمان اندک لایه‌های غیر چسبنده روسازی را از نظر سازه‌ای مورد آزمایش قرار دهد [۲۵].

طبق رابطه (۱۵-۲) مدول الاستیسیته سطحی میانگین به دست آمده از دستگاه LWD بهترین همبستگی را با نتایج FWD دارد.

$$E_{FWD} = 0.921 E_{LWD} + 23.7 \quad R^2 = 85\% \quad (15-2)$$

در یک تحقیق مشترک بین اداره حمل و نقل Hampshire و دانشگاه Maine روی راه‌های کم تردد (شامل روسازی شنی و آسفالتی با ضخامت کم)، همبستگی حدود ۰/۷ بین نتایج LWD و FWD استاندارد حاصل شد [۳۷].

Nazzal نتایج بهتری را به دست آورد و رابطه (۱۶-۲) را برای پیش بینی مدول الاستیک بازگشتی

FWD و مدول PFWD پیشنهاد نمود [۳۸]:

(۱۶-۲)

$$E_{FWD} = 0.97 (E_{PFWD}) \quad 12.5 \text{ MPa} < E_{PFWD} < 865 \text{ MPa} \quad R^2 = 0.94$$

نتایج تحقیقات Livench روی روسازی‌های آسفالتی به ضخامت ۱۲۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر نشان داد که

مقادیر مدول معکوس FWD، بزرگتر از مقادیر اندازه‌گیری شده توسط PFWD است [۳۹].

Fleming و همکاران در تحقیقی که روی ۵۰ نقطه از یک روسازی انعطاف پذیر با ضخامت لایه آسفالتی

۶۵ میلی‌متر واقع شده روی ۲۵۰ میلی‌متر مصالح زیر اساس با تراکم ضعیف انجام داد نشان داد که

مدول PFWD به طور متوسط ۱/۸ برابر مدول FWD است. در این تحقیق سطح تنش هر دو دستگاه

مشابه هم و برابر ۱۰۰ کیلو پاسکال و تغییر پذیری نتایج هر دو دستگاه مناسب بود. بر اساس نتایج به

دست آمده در این مطالعه، نسبت سختی لایه‌های بالا و پایین در میزان اختلاف مدول دو دستگاه موثر

است، همچنین چون عمق تأثیر PFWD کمتر از FWD بوده و در ضمن وزن اولیه دستگاه FWD بیشتر

از PFWD است (فشار پیش بارگذاری بیشتر) لذا مدول PFWD بالاتر می‌باشد [۴۰].

Steinert در مطالعه خود PFWD و FWD را در محل‌های مختلفی با ضخامت آسفالت ۱۲۰-۱۸۰

میلی‌متر و در زمان‌های مختلف سال مورد مقایسه قرار داد. هدف از این مطالعه بررسی به کارگیری

PFWD برای کنترل بار محوری در زمان تغییرات فصلی (یخبندان - ذوب یخ) بود. نتایج این بررسی

نشان داد که همبستگی مدول دستگاه با کاهش ضخامت آسفالت بهبود می‌یابد. بر این اساس همبستگی

مذکور روی لایه‌های نازک‌تر آسفالتی با نسبت ۰/۸۷ به صورت رابطه (۱۷-۲) است.

$$E_{PFWD} = 1.33 E_{FWD} \quad (17-2)$$

این نسبت برای لایه‌های ضخیم‌تر آسفالتی با ضریب همبستگی ۰/۵۶ تقلیل یافته است که در رابطه (۱۸-۲) ملاحظه می‌شود.

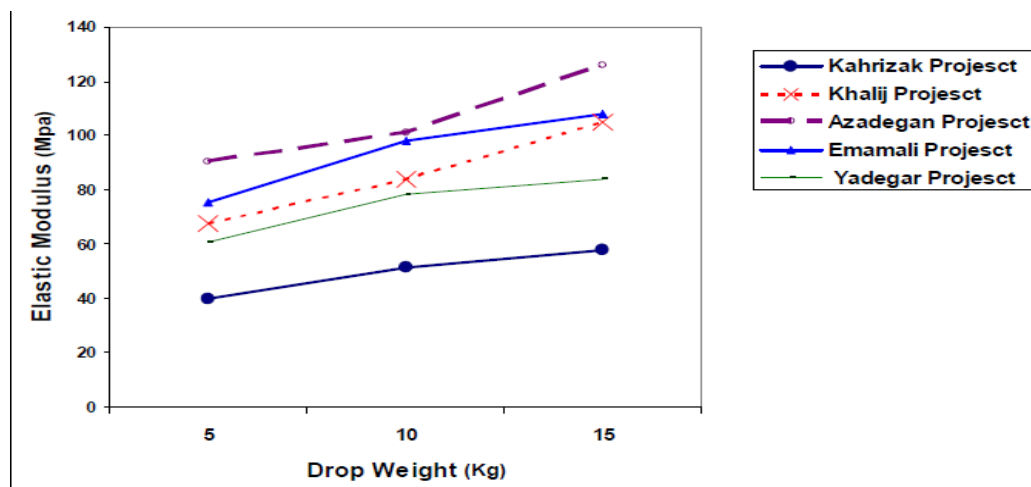
$$E_{PFWD} = 0.75 E_{FWD} \quad R=0.56 \quad (18-2)$$

آن‌ها گزارش دادند که اگر اندازه‌گیری‌های مدول سختی خیلی بالا در رابطه همبستگی مذکور کنار گذاشته شود ضریب همبستگی تا ۰/۸ بهبود می‌یابد [۴۱].

۹-۲ بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف بر نتایج به دست آمده از دستگاه

PFWD و FWD

رفیعی در تحقیقی اثر پارامترهای دستگاه PFWD نظیر میزان وزن بارگذاری، ارتفاع سقوط، قطر صفحه بارگذاری نحوه تماس صفحه با سطح، فواصل ژئوفون‌ها بر مدول سختی مصالح غیر چسبنده را مورد بررسی قرار داد. به منظور ارزیابی تأثیر وزنه بارگذاری در پروژه‌های مختلف وزنه‌های ۵، ۱۰، و ۱۵ کیلوگرمی در یک ارتفاع سقوط معین و با یک صفحه ثابت بارگذاری به کار گرفته شد و میزان سختی برای هر لایه محاسبه شد. شکل (۲-۲۷) نحوه تغییرات مدول سختی با تغییر وزنه بارگذاری را نشان



شکل ۲-۲۷ نحوه تغییرات مدول سختی با تغییر وزنه بارگذاری [۴۲]

همانطور که در شکل (۲-۲۷) دیده می‌شود، در کلیه پروژه‌ها با افزایش مقدار وزنه، مدول سختی افزایش می‌یابد. علت این است که وقتی از وزنه‌های سنگین‌تر استفاده می‌شود، وزن دستگاه و میزان تنش‌های استاتیکی جانبی قبل از بارگذاری افزایش می‌یابد و افزوده شدن تنش‌های جانبی نیز باعث افزایش مدول سختی می‌شود.

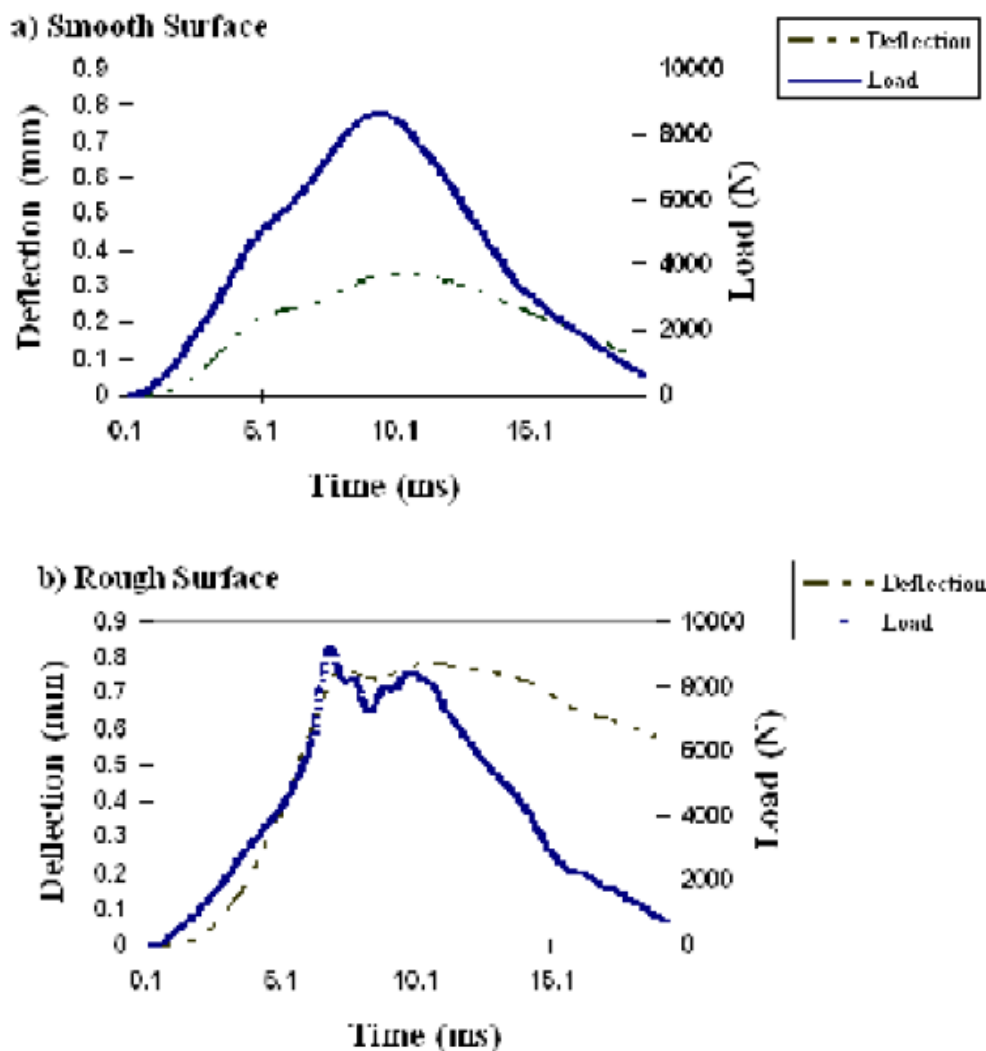
به منظور بررسی ارتفاع سقوط در نقاط مختلف، بارگذاری PFWD در آزمایش‌های میدانی در دو ارتفاع و در شرایط آزمایشگاهی در سه ارتفاع سقوط صورت گرفت. در کل آزمایش‌ها وزنه ثابت ۱۵ کیلوگرمی و با صفحه ۳۰۰ میلی‌متری به کار گرفته شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که تغییر ارتفاع سقوط در نقاط مختلف، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تغییر مدول سختی ندارد (حداکثر ضریب تغییرات برابر ۶ درصد است). علت این مسأله آن است که برای مصالح سنگ دانه‌ای که مقاومت آن‌ها به اصطکاک بین دانه‌ای بستگی دارد، مهمترین پارامتر تأثیرگذار روی مدول سختی، تنش جانبی است. در صورتی که در آزمایش PFWD با تغییر ارتفاع سقوط، تنش انحرافی تغییر می‌کند و چون بارگذاری با سرعت زیاد انجام می‌شود، فرصت کافی برای تغییر تنش جانبی ایجاد نمی‌کند و در نتیجه مدول سختی تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند.

اثر اندازه قطر صفحه (قطر ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متری) در چند نقطه در شرایط آزمایشگاهی با ارتفاع بارگذاری ۵۰ سانتی‌متر و وزنه‌های ۵ و ۱۰ کیلوگرمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که فشار وارده روی صفحه بارگذاری ۱۰۰ میلی‌متری حدود ۸ تا ۹ برابر بیشتر از صفحه ۳۰۰ میلی‌متری است. متعاقب آن مدول سختی به دست آمده از صفحه ۱۰۰ میلی‌متری به طور متوسط ۱/۸۵ برابر صفحه ۳۰۰ میلی‌متری حاصل گردید.

برای بررسی اثرات نحوه تماس صفحه بارگذاری با سطح و همچنین ارائه روشی جهت شناسایی اندازه-گیری‌های نادرست، آزمایش PFWD در چند نقطه داخل جعبه آزمایش که سطح همواری داشت، صورت

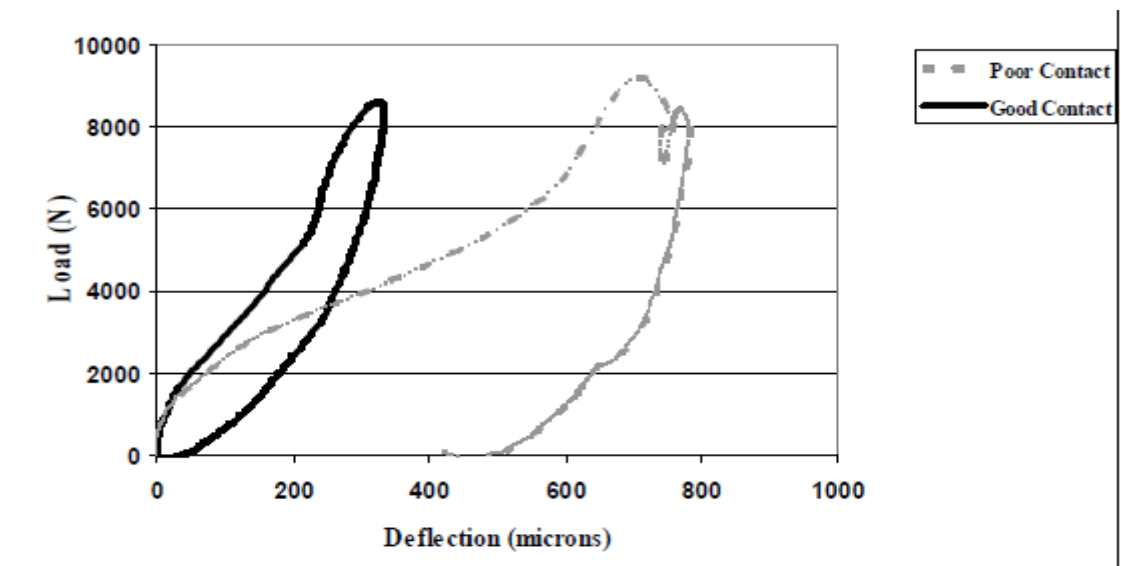
گرفت. سپس در سطح لایه عمداً به عمق چند سانتی متر ناهمواری ایجاد و مجدداً آزمایش PFWD در آن نقاط صورت گرفت.

از لحاظ عملیاتی، زمانی که آزمایش روی سطح ناهموار انجام می‌شود، مقداری جهش یا تغییر مکان افقی در دستگاه ایجاد می‌شود که برخی ارتعاشات دلالت بر وجود سطح تماس ضعیف داشت. همانطور که در شکل (۲۸-۲) مشاهده می‌شود منحنی سطح تماس خوب، شکل ظاهری بهتری نسبت به سطح تماس ضعیف دارد.



شکل ۲۸-۲ تاثیر ناهمواری سطح روی منحنی‌های تاریخچه زمانی بار و خیز [۴۲]

در این تحقیق در حالی که مدول سختی برای سطح تماس خوب برابر ۹۶ MPa بود، برای سطح تماس ضعیف این میزان برابر ۴۴ MPa ثبت شد. شکل (۲-۲۹) تأثیر ناهمواری سطح بر روی منحنی خیز و بار را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۰ اثر سطح تماس ضعیف و سطح تماس خوب روی منحنی خیز و بار [۴۲]

برای بررسی تأثیر فواصل ژئوفن اضافی بر مدول سختی لایه، ژئوفن‌های اضافی دستگاه به ترتیب در فواصل ۲۰-۳۰، ۲۰-۴۵، ۳۰-۴۵، ۳۰-۴۵ سانتی‌متر قرار داده شد و در هر یک از این فواصل، آزمایش PFWD چندین بار تکرار گردید. سپس بر اساس بار اعمال شده و میزان خیز ژئوفن‌های مرکزی در هر تکرار، میزان مدول لایه بالایی و لایه زیرین توسط نرم افزار EVERCALC محاسبه گردید. میزان مدول لایه بالایی به دست آمده از فواصل مختلف ژئوفن‌ها در نقاط مختلف تقریباً یکسان است. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت قرارگیری ژئوفن‌ها تأثیر چندانی در میزان مدول لایه بالایی ندارد با این حال میزان مدول‌های لایه پایینی برای فواصل ۲۰-۴۵ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر تا حدود زیادی به یکدیگر نزدیک بود و میزان مدول‌های فواصل ۲۰-۳۰ سانتی‌متری در بیشتر نقاط با آنها متفاوت است. به عبارت دیگر در نظر گرفتن فاصله ۳۰ سانتی‌متری برای ژئوفن دوم، از دقت لازم برای تخمین مدول لایه پایینی

برخورداریست و فاصله ۴۵ سانتی‌متری برای استقرار ژئوفن‌های دوم دستگاه PFWD مناسب‌تر است [۴۲].

طبق مطالعات Syemon حداقل سه اندازه‌گیری باید صورت گیرد و معمولاً اولین قرائت یا دو تکرار اول به دلیل داشتن خطای و تضمین تماس کامل صفحه و سطح روسازی در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شوند [۴۳]. Steinert پیشنهاد نمود شش اندازه‌گیری در یک نقطه صورت گیرد سپس از اولین قرائت طرف نظر شود و متوسط ۵ قرائت باقی مانده برای تحلیل استفاده شود [۴۱].

میزان سختی ضربه گیر لاستیکی در میزان اختلاف فاز بین بار و خیز حداکثری اثر گذار است. کاهش سختی میرا کننده صرفاً تفاوت فاز را کاهش نمی‌دهد، بلکه باعث افزایش طول مدت پالس نیز می‌شود [۴۴].

نتایج نشان می‌دهد که PFWD عمق تأثیر گسترده‌ای بین ۲۷۰ تا ۲۸۰ میلی‌متر دارد که این تقریباً ۱/۵ برابر قطر صفحه بارگذاری است. این عمق تأثیر، کمتر از عمق تأثیر آزمایش صفحه بارگذاری می‌باشد. چرا که عمق تأثیر آزمایش صفحه بارگذاری تقریباً ۲ برابر قطر صفحه است [۴۵].

ضخامت روسازی تأثیر قابل‌زیادی بر روی مدول PFWD دارد. برای روسازی‌های با ضخامت کمتر از ۲۸۰ میلی‌متر (عمق تأثیر PFWD نیازمند تفسیر درست هستند چرا که تعیین مدول ممکن است تحت تأثیر لایه‌های زیرین قرار گیرد). مطالعات همچنین نشان می‌دهند که PFWD برای لایه‌های ضخیم‌تر و فونداسیون سخت‌تر مناسب نیست. بکارگیری PFWD محدود به لایه‌های غیر چسبنده و لایه‌های چسبنده نازک و سبک می‌شود. از این رو اندازه‌های مختلفی از صفحات بارگذاری برای خاک‌ها و مصالح مختلف پیشنهاد شده است [۴۶].

در مطالعه دیگری تأثیر دما روی ضربه گیر را با انجام آزمایش در دماهای مختلف روی کف بتنی آزمایشگاه و با ارتفاع سقوط ثابت بررسی نمود نتایج نشان داد که دمای متغییر ضربه گیر تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد [۴۷-۴۵].

فصل سوم

روش کار - مطالعات میدانی - جمع آوری داده‌ها

۱-۳ مقدمه

در این مطالعه به منظور بررسی ضریب انتقال بار بر روی دو روسازی با ضخامت، عمر و طرح روسازی مختلف با استفاده از دستگاه PFWD اقدام به برداشت افت و خیزها در محل ترک خوردگی در سطح روسازی شد. در این بخش ابتدا مشخصات دستگاه PFWD استفاده شده در این تحقیق معرفی می‌شود و سپس روش انجام نمونه برداری و نحوه محاسبه ضریب انتقال بار و همچنین مشخصات انواع ترک‌های مطالعه شده توضیح داده می‌شود. در قسمت انتهایی فصل داده‌های به دست آمده از دستگاه PFWD به صورت نمودار نشان داده شده است.

۲-۳ مشخصات دستگاه PFWD

دستگاه PFWD استفاده شده در این تحقیق ساخت شرکت TML ژاپن است. مشخصات و اجزای دستگاه PFWD به شرح جدول (۱-۳) می‌باشد.

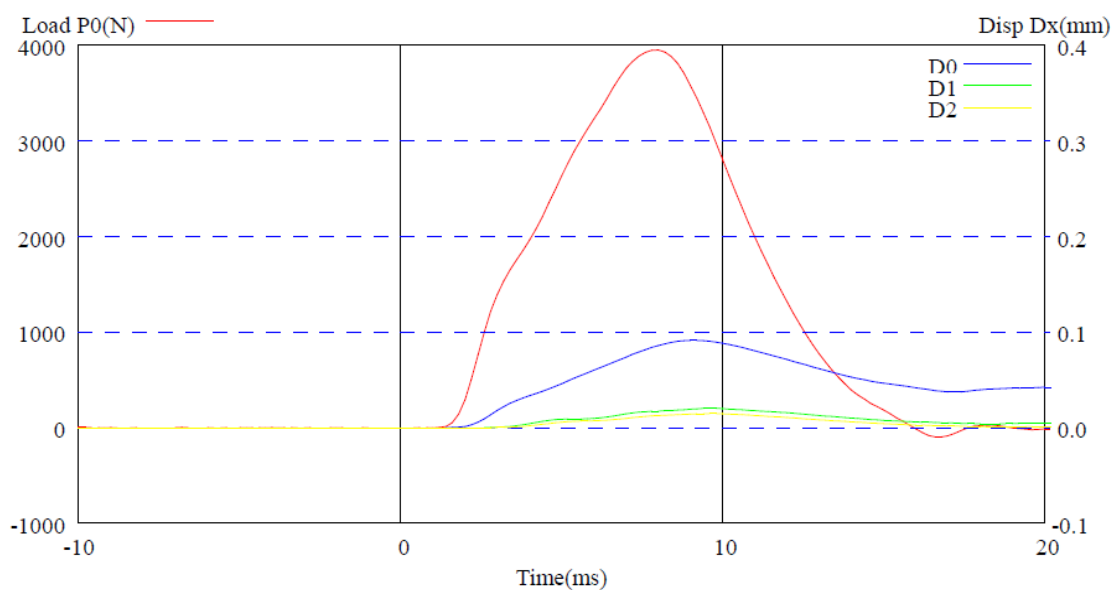
جدول ۱-۳ مشخصات دستگاه PFWD

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

ساختار کلی دستگاه TML مشابه نمونه ۱۰۰ PRIMA می‌باشد. اما تفاوت کوچکی در نحوه بارگذاری و نحوه قرارگیری ژئوفون مرکزی دارد. در مدل TML، حداکثر وزنه بارگذاری ۵ کیلوگرم و حداکثر ارتفاع سقوط وزنه ۵۳۰ میلی‌متر می‌باشد، در حالی که این مقادیر برای دستگاه ۱۰۰ PRIMA به ترتیب ۲۰ کیلوگرم و ۸۵۰ میلی‌متر می‌باشد. لذا مدل TML از حداکثر بار وارده (۱۰KN) کمتری نسبت به مدل (15KN) PRIMA100 برخوردار است. دستگاه TML دارای نرم‌افزاری برای تحلیل و اندازه‌گیری خیز و بار می‌باشد. با کمک این نرم‌افزار نمودار تاریخچه زمانی از تغییرات افت و خیز بار در زمان‌های مختلف و همچنین اطلاعاتی مانند مدت زمان بارگذاری و مساحت کاسه افت و خیز روسازی را می‌توان به دست آورد. برای این منظور باید هنگام برداشت افت و خیز دستگاه PFWD به کامپیوتر متصل باشد (شکل ۱-۳). همچنین شکل (۲-۳) نمودار تاریخچه زمانی به دست آمده از دستگاه PFWD را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ نحوه برداشت کاسه افت و خیز روسازی



	Load P0	Disp. D0	K_{TML}	E_{TML}	Disp. D1	Disp. D2
Max.	3952 N	0.226 mm	743 MN/m ³	159 MN/m ²	0.028 mm	0.020 mm
0-P Time	8.0 ms	80.0 ms			78.8 ms	78.4 ms
Area	15.25 N s	9.11 μ m s			1.19 μ m s	0.79 μ m s

شکل ۳-۲ نمونه‌ای از نمودار تاریخچه زمانی به دست آمده در این مطالعه

۳-۳ معرفی ساختار دستگاه PFWD

ساختار کلی دستگاه PFWD در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. این دستگاه از بخش‌های زیر تشکیل شده است:



شکل ۳-۳ اجزای دستگاه PFWD

۳-۳-۱ بخش اعمال ضربه (وزنه سقوطی)

در ابتدا قبل از داده برداری باید دقت شود که دستگاه در حالت تراز باشد در غیر این صورت سطح تماس کامل بین صفحه‌ای بارگذاری و سطح روسازی برقرار نمی‌شود که در نتیجه منجر به بروز خطا در داده‌های به دست آمده از دستگاه می‌شود. با استفاده از گیره تنظیم کننده، ارتفاع سقوط مشخص می‌شود سپس با زدن دکمه‌ای که در بالای دستگاه قرار گرفته وزن سقوط کرده و به بافرهای دستگاه اصابت می‌کند. این وزنه به گونه‌ای طراحی شده تا بدون هیچ گونه اصطکاک یا مقاومتی سقوط کند.

پالس 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 [۴۸].

۳-۳-۲ صفحه بارگذاری

از طریق صفحه بارگذاری بار اعمال شده توسط دستگاه PFWD به سطح روسازی وارد می‌شود که بار اعمالی را به صورت یکنواخت به سطح روسازی وارد می‌کند. برحسب نوع محل داده برداری و با توجه به شدت تنش مورد نیاز و برحسب نوع مصالح روسازی می‌توان از صفحات بارگذاری مختلف با قطر ۱۰۰، ۲۰۰ یا ۳۰۰ میلی‌متر استفاده کرد [۴۸].

۳-۳-۳ ژئوفون‌های اندازه‌گیری بار

ژئوفون‌های دستگاه PFWD بار ضربه وارد شده به سطح روسازی را اندازه‌گیری می‌کنند. این ژئوفون‌ها حداکثر بار و خیز اعمالی وارد شده به روسازی را ثبت می‌کنند. نحوه قرارگیری آن نسبت به صفحه بارگذاری باید به گونه‌ای باشد که با کمترین خطای ممکن بار اعمالی را اندازه‌گیری کند. با توجه به هدف آزمایش و لایه‌های روسازی فاصله آن از مرکز بارگذاری مشخص می‌شود. همچنین ژئوفون‌ها باید سطح تماس کامل با روسازی داشته باشند. برای این منظور باید به صورت تراز روی سطح روسازی قرار گیرند، و باید در هنگام ضربه زدن دقت شود ژئوفون‌ها تکان نخورند [۴۸].

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

با کمک این سیستم، کلیه داده‌های به دست آمده از سطح روسازی از قبیل مدول سختی کلیه لایه‌ها، ضریب عکس‌العمل بستر، حداکثر بار وارده و مقدار خیز در زیر ژئوفون‌ها ذخیره سازی و نمایش داده می‌شود. تمامی دستگاه‌های دریافت کننده سیگنال‌ها و بخش ذخیره سازی آنها می‌بایست توانایی نمایش و ذخیره سازی داده‌ها با دقتی معادل و یا کمتر از ۱ میکرون را دارا باشند [۴۸].

۳-۳-۵ سایر اجزای جانبی

این اجزاء شامل بافرهای لاستیکی با میرایی مشخص، گیره نگهدارنده وزنه جهت تنظیم ارتفاع سقوط، تراز دستگاه و کابل‌های اتصال می باشند.

۳-۴ مختصری از نحوه داده برداری با استفاده از دستگاه PFWD

روش آزمایش PFWD از نوع آزمون بارگذاری ضربه‌ای می‌باشد. بارگذاری به وسیله سقوط یک وزنه بر روی یک سیستم ضربه گیر و انتقال پالس نیرویی تولید شده به صفحه بارگذاری واقع بر روی سطح روسازی صورت می‌گیرد. نحوه انجام آزمایش مطابق استاندارد ASTM E 2583-07 به شرح زیر می‌باشد.

- سطح مورد آزمایش می‌بایست تا حد امکان تمیز و مسطح بوده و تمامی سنگدانه‌های شل و هرگونه مصالح سنگی غیرمتعارف از محل آزمایش برداشته شوند.
 - صفحه بارگذاری و ژئوفون‌ها باید به گونه‌ای روی سطح روسازی قرارگیرند که دارای وضعیت پایدار باشند.
 - وزنه سقوطی را تا ارتفاع مورد نظر بالا برده و سپس اجازه دهید تا وزنه آزادانه سقوط نمایند.
 - حداکثر میزان افت و خیزهای تولید شده برحسب میکرون، میلی‌متر و یا اینچ و حداکثر میزان بار اعمال شده برحسب کیلونیوتن یا پوند باید ثبت شود.
 - حداقل دو ارتفاع سقوطی متفاوت آزمایش شده و نتایج آزمایش‌ها با هم مقایسه شوند.
- قبل از کالیبراسیون سنسورهای اندازه گیری بار، باید بخش سخت افزاری دستگاه را از طریق پنچ بار سقوط وزنه و کنترل تغییرات نسبی نتایج در حداکثر میزان بارگذاری بررسی نمود. حداکثر میزان بار اعمالی که توسط سنسور اندازه گیری بار ثبت شده است نباید با یکدیگر بیش از ۳ درصد اختلاف داشته باشند.

اگر اختلاف بیشتر باشد، کنترل ارتفاع سقوط، اطمینان از تمیز بودن سخت افزار، فنربندی‌ها و ضربه-گیرهای دستگاه ضروری است.

محاسبه مدول دستگاه PFWD براساس تئوری بوسینسک و با فرض بارگذاری ثابت، و با در نظر گرفتن خیز ژئوفن مرکزی مطابق رابطه (۱-۳) زیر می باشد.

$$E_0 = \frac{S(1-V^2)P}{\pi.a} \quad (1-3)$$

در این رابطه P حداکثر بار وارده به صفحه بارگذاری بر حسب نیوتن، D حداکثر خیز ژئوفن مرکزی بر حسب میلی‌متر، V ضریب پواسون، a شعاع صفحه بارگذاری بر حسب میلی‌متر و S سختی صفحه بارگذاری می‌باشد. در اغلب مطالعات $S=2$ در نظر گرفته شده است.

۳-۵ روش انجام کار

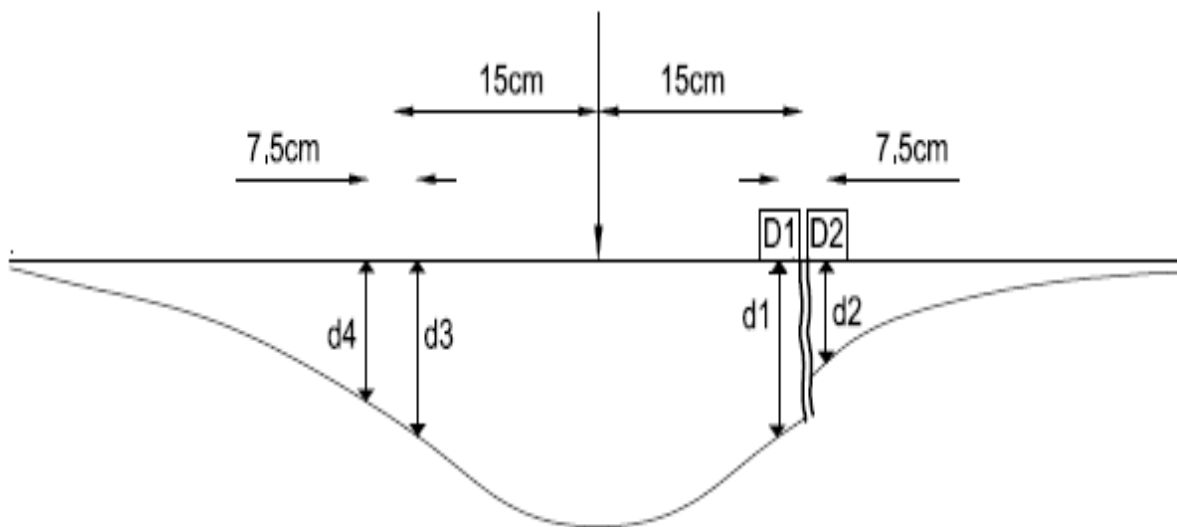
در ابتدا برای بررسی اثر ترک عرضی بر روی ضریب انتقال بار، دستگاه PFWD در فواصل ۵۰، ۲۵ و ۱۵ سانتی‌متر از ترک قرار داده شد، و دو ژئوفن D_1 و D_2 در دو سمت لبه ترک به طور ثابت قرار گرفتند، به نحوی که با جابه‌جایی دستگاه PFWD موقعیت دو ژئوفن ثابت بود. سپس در هریک از فواصل ذکر شده بارگذاری توسط دستگاه PFWD انجام شد و مقدار خیز متناسب با هریک از بارگذاری‌ها توسط دو ژئوفن D_1 و D_2 به دست آمد (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ موقعیت ژئوفون‌ها در روش‌های پیشین اندازه‌گیری LTE

پس از آنالیز نتایج مشخص شد که در فواصل ۵۰ و ۲۵ سانتی‌متری از ترک به علت فاصله نسبتاً زیاد و بار نسبتاً کم PFWD، مقدار افت و خیز هر دو ژئوفون D₁ و D₂ ناچیز بود، و دقت محاسبات به شدت کاهش می‌یابد، لذا قرار دادن صفحه بارگذاری در این فواصل نمی‌تواند ارزیابی مناسبی از مقدار LTE به دست دهد. در نتیجه فاصله ۱۵ سانتی‌متری از ترک به عنوان فاصله مبنا انتخاب شد. حال با استفاده روابط رایج می‌توان LTE را محاسبه نمود. اما این روابط هر چند از لحاظ نظری صحیح می‌باشند اما از جنبه کاربردی می‌توانند منجر به خطاهای قابل توجهی شوند. علت این موضوع در شکل (۳-۵) مشخص شده است.

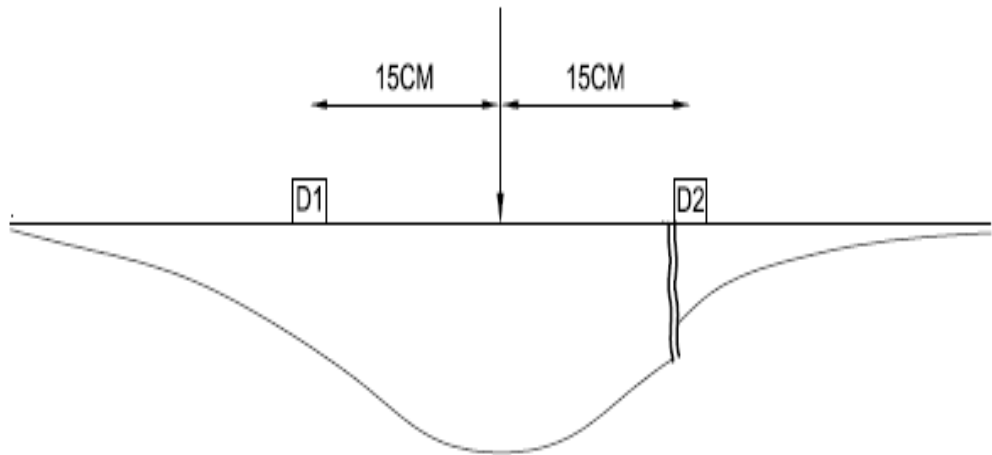
صفحه بارگذاری دستگاه PFWD



شکل ۳-۵ نحوه ایجاد خطا در روش‌های پیشین اندازه‌گیری LTE

همانطور که در شکل (۳-۵) ملاحظه می‌شود با فرمول‌های رایج محاسبه LTE نسبت تغییر مکان دو ژئوفون D1 و D2 در دو طرف ترک مبنای محاسبه ضریب انتقال بار است ($LTE=d2/d1$). اما در طرف دیگر حوضچه تغییر شکل که روسازی سالم است، در نقاطی با همان فواصل تغییر مکان‌های d_3 و d_4 ملاحظه می‌شود که هر چند ترکی وجود ندارد اما این تغییر مکان‌ها با هم فرق دارند و کاملاً طبیعی و مورد انتظار است. علت آن در نحوه استقرار ژئوفون‌ها و قطر آنها است. زیرا مرکز ژئوفون‌ها دقیقاً بر لبه ترک منطبق نیستند و به اندازه شعاع ژئوفون با آن فاصله دارد ($7.5/2=3.75\text{cm}$)، بنابراین ضریب انتقال بار که با روابط فعلی حساب می‌شود علاوه بر اثر ترک، اثر فاصله استقرار ژئوفون را هم در برمی‌گیرد. برای حذف این نوع خطا نحوه استقرار ژئوفون‌ها مطابق شکل (۳-۶، ۳-۷) و رابطه مورد استفاده مطابق رابطه (۳-۲) پیشنهاد می‌شود.

صفحه بارگذاری دستگاه PFWD



شکل ۳-۶ روش پیشنهادی برای استقرار ژئوفون‌ها برای اندازه‌گیری خیز روسازی



شکل ۳-۷ روش اندازه‌گیری افت و خیز روسازی

در ادامه بعد از آنکه نحوه صحیح موقعیت ژئوفون‌ها و صفحه بارگذاری مشخص شد، جمع آوری داده‌ها انجام شد. برای این منظور دو روسازی با ضخامت‌های متفاوت آسفالت انتخاب شدند تا اثر ضخامت آسفالت بر ضریب انتقال بار بررسی شود.

رابطه پیشنهادی LTE به دست آمده از این تحقیق براساس خیز دستگاه PFWD به صورت رابطه (۳-۲) تعریف می‌شود:

$$LTE = \frac{d_2}{d_1} * 100 \quad (۲-۳)$$

LTE- ضریب انتقال بار در ترک عرضی.

d_2 - خیز اندازه‌گیری شده در ژئوفون D_2 در قسمت پس از ترک.

d_1 - خیز اندازه‌گیری شده در ژئوفون D_1 در قسمت روسازی سالم.

۳-۶ داده‌های میدانی

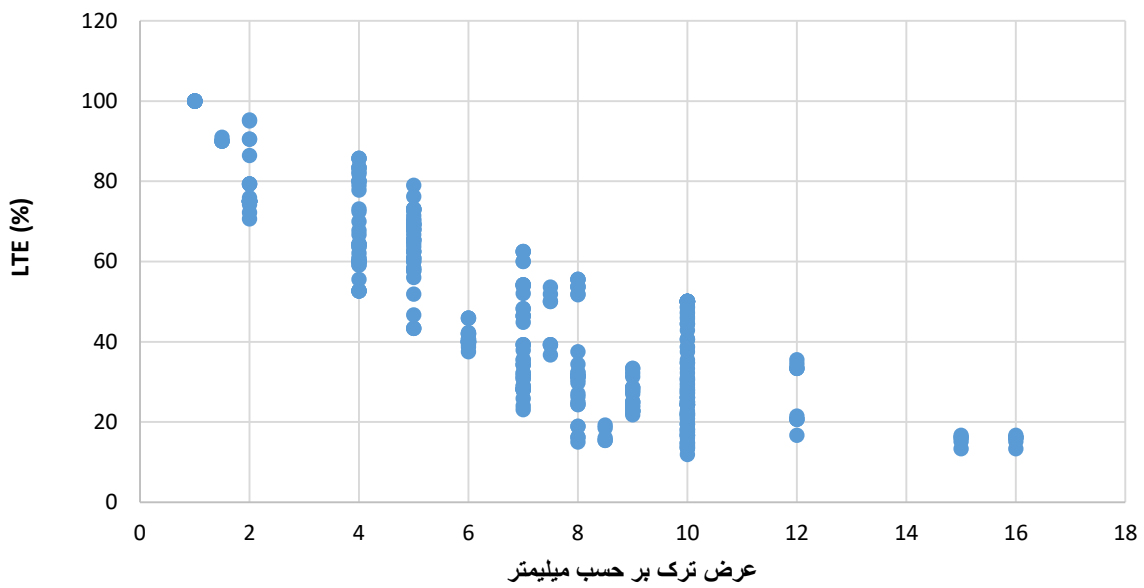
دو مسیر مورد استفاده در این مطالعه شامل روسازی داخل محوطه دانشگاه و دیگری روسازی جاده قدیم شاهرود به میامی بوده است. روسازی جاده شاهرود به میامی دارای بار ترافیکی بیشتر، عمر روسازی بالاتر و همچنین ترک خوردگی بیشتری بود، و حدود ۱۵ سانتی‌متر ضخامت دارد (شکل ۳-۸). در مقابل روسازی داخل محوطه دانشگاه با ضخامت ۷/۵ سانتی‌متر دارای بار ترافیکی پایین‌تر و عمر بهره‌برداری کمتری می‌باشد (شکل ۳-۹).

در این تحقیق ترک‌های عرضی و طولی با عرض‌های مختلف بررسی شدند و در محل هر ترک با استفاده از دستگاه PFWD اقدام به برداشت افت و خیزها شد (شکل ۳-۱۰).

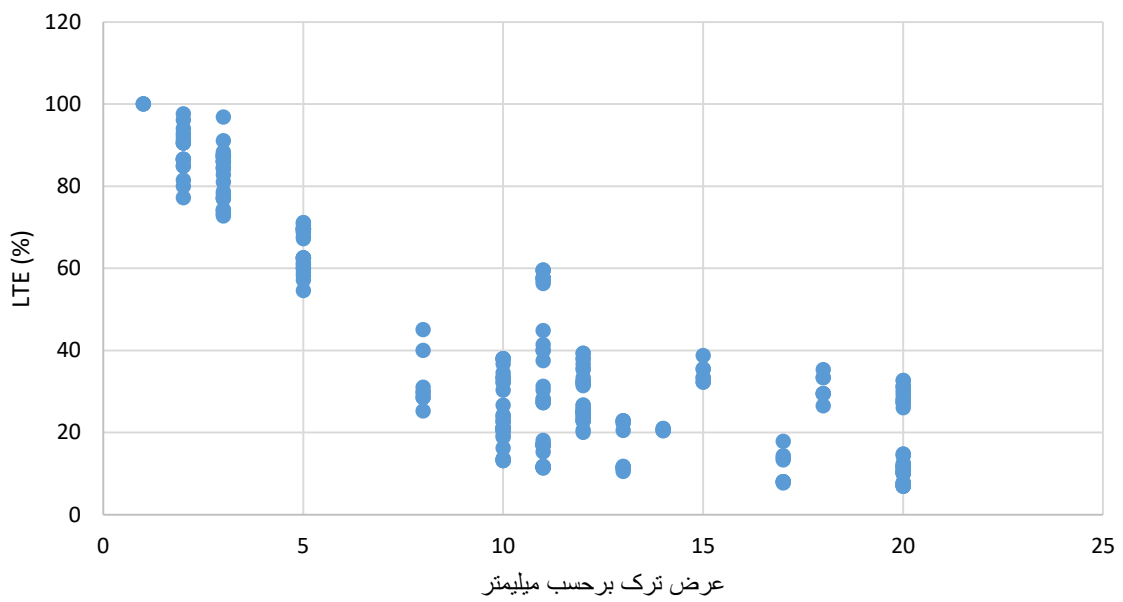


شکل ۳-۱۰ نحوه برداشت افت و خیزهای سطح روسازی

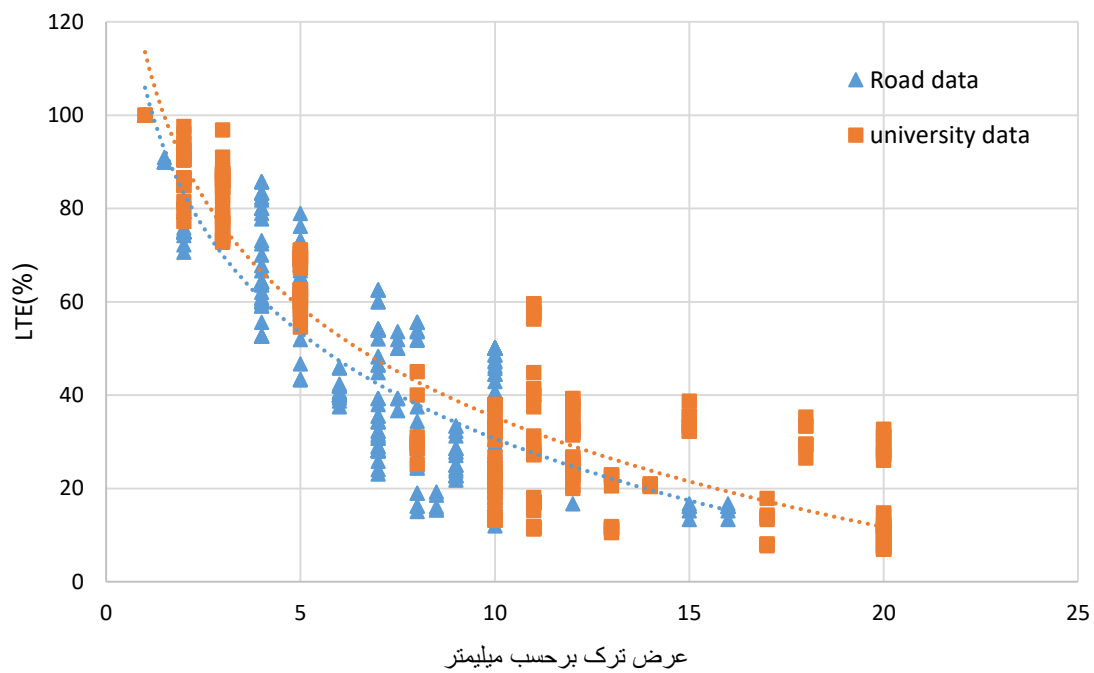
در مجموع حدود ۶۰۰ نقطه در مسیر شاهرود به میامی و حدود ۳۰۰ نقطه در محوطه داخل دانشگاه برداشت‌های PFWD بر روی ترک‌های عرضی و طولی انجام شد (کلیه داده‌های به دست آمده از دستگاه PFWD در پیوست ۱ آمده است). در این مطالعه در مسیر شاهرود به میامی ترک‌های عرضی و طولی و در محوطه داخل دانشگاه به علت عدم وجود ترک طولی فقط ترک‌های عرضی برداشت شدند. در نهایت پارامتر LTE با استفاده از رابطه (۳-۲) محاسبه گردید. شکل (۳-۱۱) و (۳-۱۲) به ترتیب نتایج حاصل از محاسبه پارامتر LTE با استفاده از داده‌های دستگاه PFWD در جاده شاهرود به میامی و محوطه داخل دانشگاه برای ترک عرضی و شکل (۳-۱۳) مقایسه برداشت‌های ترک عرضی محوطه دانشگاه و جاده شاهرود به میامی را نشان می‌دهد. و در شکل (۳-۱۴) داده‌های حاصل از محاسبه پارامتر LTE در جاده شاهرود به میامی برای ترک طولی را نشان داده شده است.



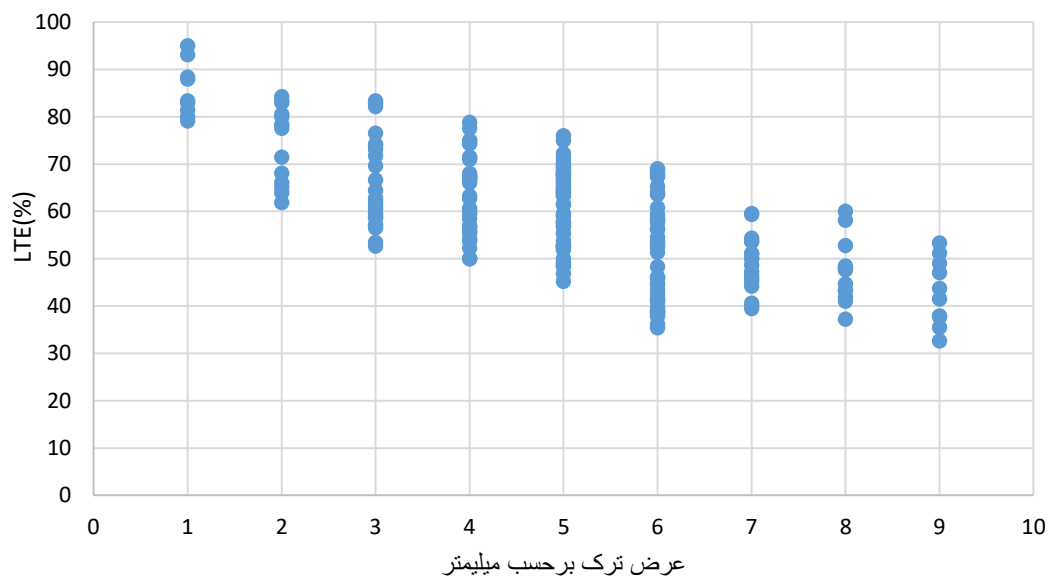
شکل ۳-۱۱ داده‌های حاصل از برداشت ترک عرضی جاده شاهرود-میامی



شکل ۳-۱۲ داده‌های حاصل از برداشت ترک عرضی محوطه دانشگاه



شکل ۳-۱۳ مقایسه داده‌های ترک عرضی، محوطه دانشگاه و جاده شاهرود-میامی



شکل ۳-۱۴ داده‌های ترک خوردگی طولی در جاده شاهرود - میامی

با توجه به شکل‌های (۳-۱۱، ۳-۱۲، ۳-۱۴) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار عرض ترک، پارامتر LTE کاهش پیدا می‌کند. در شکل (۳-۱۳) مشخص می‌شود که روسازی محوطه داخل دانشگاه که ضخامت کمتری نسبت به روسازی جاده شاهرود به میامی دارد، در ترک‌های انقباضی با عرض یکسان، ضریب انتقال بار بزرگتری نشان می‌دهد. برای این پدیده دو دلیل می‌توان ذکر کرد که نیاز به ارزیابی‌های میدانی بیشتر در جاده‌های دیگر هم دارد. اول، ضخامت کم آسفالت موجب می‌شود که نقش لایه اساس در انتقال بار بیشتر شود و در صورت بروز ترک خوردگی در آسفالت با ضخامت کم، اساس بخش عمده‌ای از بار را انتقال می‌دهد. اما در روسازی با ضخامت زیاد سهم اساس در انتقال بار کمتر شده و بیشترین نقش را خود آسفالت به عهده دارد. بنابراین با ترک خوردن آن ضریب انتقال بار به میزان بیشتری افت پیدا می‌کند. دوم، روسازی جاده شاهرود به میامی عمر بهره برداری بیشتری دارد و ممکن است عمق ترک‌های آن بیشتر بوده و تأثیر آنها را در افت ضریب انتقال بار افزایش می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که ازای یک عرض ترک خاص، مقدار شاخص LTE دارای تغییرات زیادی است. زیرا شاخص LTE به عوامل متعددی از قبیل ضخامت آسفالت و اساس، تراکم اساس و زیر اساس، کیفیت اجرای اندود نفوذی، عمر روسازی و عمق ترک‌های عرضی وابسته است. این تغییرات همچنین می‌تواند ناشی از خطای به وجود آمده در هنگام اندازه‌گیری افت و خیز روسازی باشد (تکان خوردن دستگاه PFWD در هنگام ضربه زدن و عدم تماس کافی بین صفحه بارگذاری و سطح آسفالت). همچنین می‌تواند به علت خرابی در زیر لایه آسفالتی باشد (مانند ترک خوردگی انعکاسی که هنوز به سطح آسفالت نرسیده است) که اندازه‌گیری بر روی آن انجام شده است. بنابراین علل بالا می‌تواند باعث به وجود آمدن این نوسانات در محاسبه پارامتر LTE شوند. بررسی تأثیر هر یک از این عوامل به تحقیق جداگانه‌ای نیاز دارد، اما از آنجا که در رایج‌ترین روش‌های ارزیابی چشمی ترک‌ها، فقط عرض ترک برداشت می‌شود، در این تحقیق فقط رابطه بین عرض ترک با LTE بررسی شده است.

فصل چهارم

تجزیه و تحلیل داده‌ها

۴-۱ مقدمه

هدف از این مطالعه ارزیابی اثر ترک‌های عرضی و طولی روسازی آسفالتی بر توان باربری روسازی با استفاده از دستگاه PFWD است. همچنین بررسی رابطه‌ای بین عرض ترک خوردگی و ضخامت لایه آسفالتی با پارامتر LTE و مقایسه عملکرد و تأثیرگذاری ترک‌های عرضی و طولی بر افت ظرفیت باربری روسازی است. برای این منظور دو روسازی که از نظر ضخامت آسفالت، طرح روسازی و عمر روسازی متفاوت بودند بررسی شدند. همچنین به منظور بررسی دقیق مکانیسم انتقال بار در ترک از روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل دو بعدی از روسازی آسفالتی ساخته شد و نتایج حاصل از مدل با نتایج به دست آمده از ارزیابی میدانی اعتبار سنجی شد.

۴-۲ ارزیابی ضریب انتقال بار در ترک عرضی

یکی از اهداف این پژوهش بررسی رابطه بین عرض ترک انقباضی با پارامتر LTE است. برای این منظور با توجه به داده‌های حاصل از دستگاه PFWD در محوطه دانشگاه و جاده شاهرود به میامی با استفاده از نرم افزار آماری SPSS توابع رگرسیون غیر خطی مختلفی بررسی شدند، و چهار تابع رگرسیون که بالاترین همبستگی را با داده‌های میدانی داشتند انتخاب شدند. این روابط در جدول (۴-۱) و (۴-۲) ملاحظه می‌شوند.

جدول ۱-۴ توابع رگرسیون غیر خطی (LTE-W) در جاده شاهرود-میامی

شماره	تابع	ضریب همبستگی (R ²)
۱	$LTE=110.872 \cdot \exp(-0.135 \cdot w)$	۷۷
۲	$LTE=111.303 \cdot w^{-0.507}$	۶۹
۳	$LTE=100-13.217w^{0.726}$	۷۴
۴	$LTE=100-27.414 \exp(w \cdot 0.089)$	۶۰

جدول ۲-۴ توابع رگرسیون غیر خطی (LTE-W) در محوطه دانشگاه

شماره	تابع	ضریب همبستگی (R ²)
۱	$LTE=113.374 \cdot \exp(-0.120 \cdot W)$	۸۴
۲	$LTE=141.261 \cdot w^{-0.629}$	۷۸
۳	$LTE=100-15.343w^{0.597}$	۷۶
۴	$LTE=100-33.028 \exp(w \cdot 0.052)$	۵۸

پس از آنکه توابع رگرسیون غیر خطی طبق جدول (۱-۴) و (۲-۴) با توجه به داده‌های برداشت شده توسط PFWD از نرم افزار SPSS به دست آمد، به منظور بررسی دقت توابع رگرسیون غیر خطی در محاسبه ضریب انتقال بار، با توجه به عرض‌های برداشت شده، مقدار پارامتر LTE محاسبه گردید. مشخص شد طبق جدول (۱-۴) توابع ۳ و ۴ به ازای بعضی از مقادیر W مقداری منفی برای پارامتر LTE نشان می‌دهد، و همچنین تابع ۲ به ازای $W=1$ (mm) مقدار LTE بزرگتر از ۱۰۰ نشان می‌دهد. به همین علت این سه تابع حذف شدند. تابع شماره یک به ازای مقادیر مختلف W بهترین همبستگی را با LTE نشان داد. بنابراین برای داده‌های جاده شاهرود به میامی تابع رگرسیون غیر خطی شماره یک به عنوان مبنا برای محاسبه ضریب انتقال بار انتخاب شد. پس برای تخمین LTE از عرض ترک انقباضی در مسیر جاده شاهرود به میامی رابطه (۱-۴) پیشنهاد می‌شود:

$$LTE=110.872*\exp(-0.135*w) \quad (1-4)$$

LTE- ضریب انتقال بار (درصد)

W- عرض ترک انقباضی (mm)

برای داده‌های محوطه دانشگاه طبق جدول (۲-۴) تابع ۳ مقدار بزرگتر از ۱۰۰ برای LTE نشان داد، بنابراین این تابع حذف شد. از میان سه تابع دیگر تابع شماره یک که بهترین همبستگی را با ضریب انتقال بار را داشت برای محاسبه LTE انتخاب شد. بنابراین برای تخمین LTE از عرض ترک انقباضی در محوطه دانشگاه رابطه (۲-۴) پیشنهاد می‌شود:

$$LTE=113.374*\exp(-0.120*w) \quad (2-4)$$

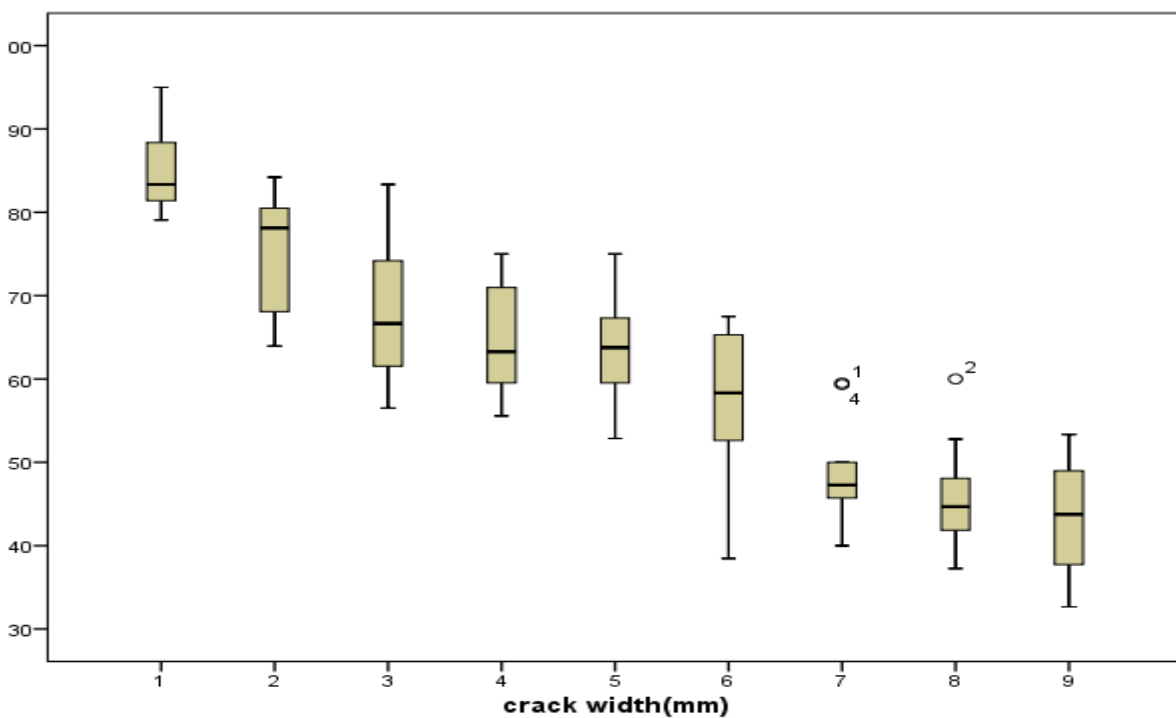
در نهایت باتوجه به روابط به دست آمده برای LTE می‌توان نتیجه گرفت که در ارزیابی اثر ترک خوردگی عرضی بر روی ضریب انتقال بار می‌توان دستگاه PFWD را حذف کرد و توسط روابطه (۱-۴)، (۲-۴) مقدار LTE را با توجه به عرض ترک موجود محاسبه کرد. به این معنا که از این پس، با داشتن عرض ترک به تنهایی، می‌توان با توجه به روابط به دست آمده مقدار پارامتر LTE را به سادگی محاسبه نمود.

۳-۴ مقایسه عملکرد ترک‌های طولی و عرضی در انتقال بار

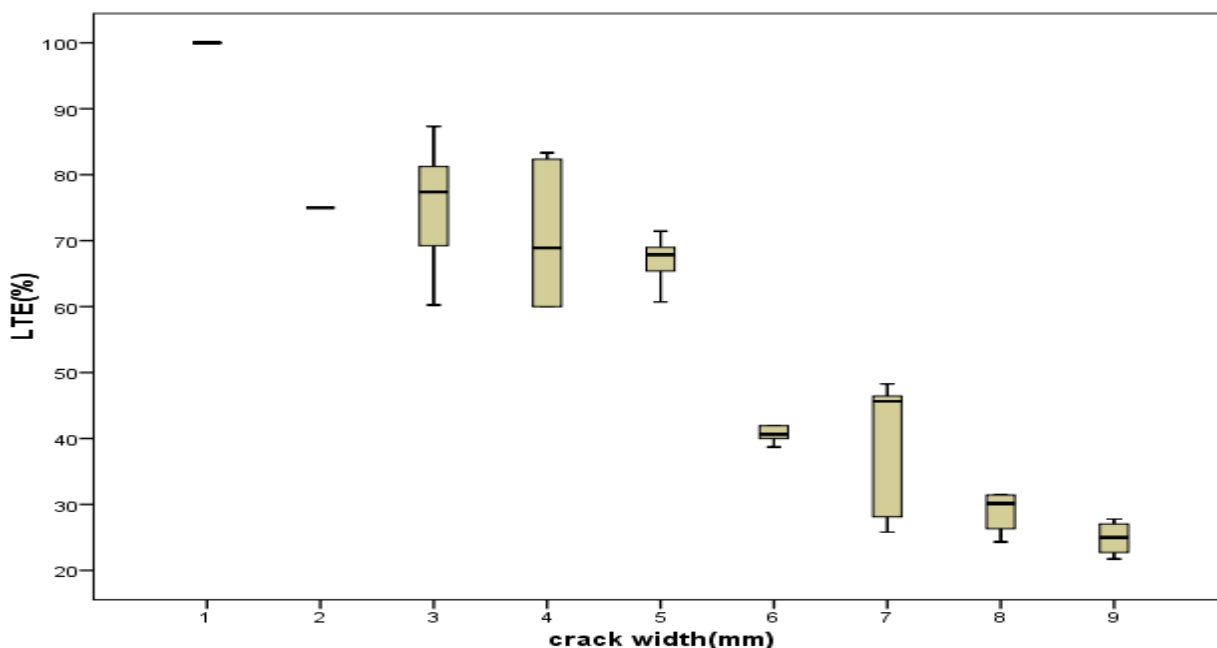
در این مطالعه به منظور بررسی و مقایسه ضریب انتقال بار در ترک‌های عرضی و طولی، و بررسی این موضوع که آیا اثر ترک طولی و ترک عرضی بر افت ظرفیت باربری روسازی یکسان است یا تفاوت معنی داری دارند، داده‌های حاصل از دستگاه PFWD به روش‌های تحلیل آماری (نمودار جعبه‌ای و آزمون t) ، نمودار تاریخچه زمانی و روابط رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۴-۳-۱ نمودار جعبه‌ای

به منظور بررسی و مقایسه ضریب انتقال بار در ترک‌های طولی و عرضی، با استفاده از نرم افزار SPSS نمودار جعبه‌ای برای این ترک‌ها در عرض‌های مختلف ترسیم شد. با توجه به شکل‌های (۴-۱ و ۴-۲) مشاهده می‌شود در عرض ۱ میلی‌متر مقدار LTE برای ترک خوردگی عرضی ۱۰۰ و در ترک طولی بین ۸۰-۹۰ است و در عرض ۲ میلی‌متر مقدار ضریب LTE بین ۶۵-۸۰ و ۷۵ به ترتیب برای ترک طولی و عرضی است. و همچنین در سایر عرض‌ها مقدار ضریب LTE برای ترک‌های طولی و عرضی مشابه یکدیگر نمی‌باشد. مشاهده می‌شود در تمام عرض‌های مختلف ترک، اختلاف LTE در ترک‌های طولی و عرضی قابل توجه می‌باشد. به ویژه در عرض‌های بزرگتر این تفاوت بیشتر دیده می‌شود.



شکل ۴-۱ نمودار جعبه‌ای محدوده LTE در ترک خوردگی طولی



شکل ۴-۲ نمودار جعبه‌ای محدوده LTE در ترک خوردگی عرضی

۴-۳-۲ آزمون t

این آزمون مقدار اطمینان از تفاوت دو متغیر تصادفی را طبق نمونه‌هایشان اعلام می‌کند. بنابراین به منظور بررسی معنی دار بودن اختلاف بین ضریب انتقال بار در ترک‌های طولی و عرضی، از آزمون t با فرض آماری به صورت زیر استفاده شد.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

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

فرض H_0 و H_1 به ترتیب نشان دهنده برابری یا عدم برابری دو سری داده (LTE در ترک عرضی و طولی) است. فرض H_0 هنگامی نقض می‌شود که به احتمال ۹۵ درصد غلط باشد. برای این منظور بر روی عرض‌های مختلف با استفاده از نرم افزار SPSS آزمون t انجام شد. جدول (۴-۳) نمونه‌ای از نتایج آزمون t برای ترک با عرض ۲ میلی متر را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۴-۳) و همچنین براساس سایر نتایج به دست آمده از دیگر عرض‌ها مشخص شد که در تمام عرض‌ها سطح معنی داری (Sig) کمتر از مقدار ۰/۰۵ است و در سطح اطمینان ۹۵٪ فرض

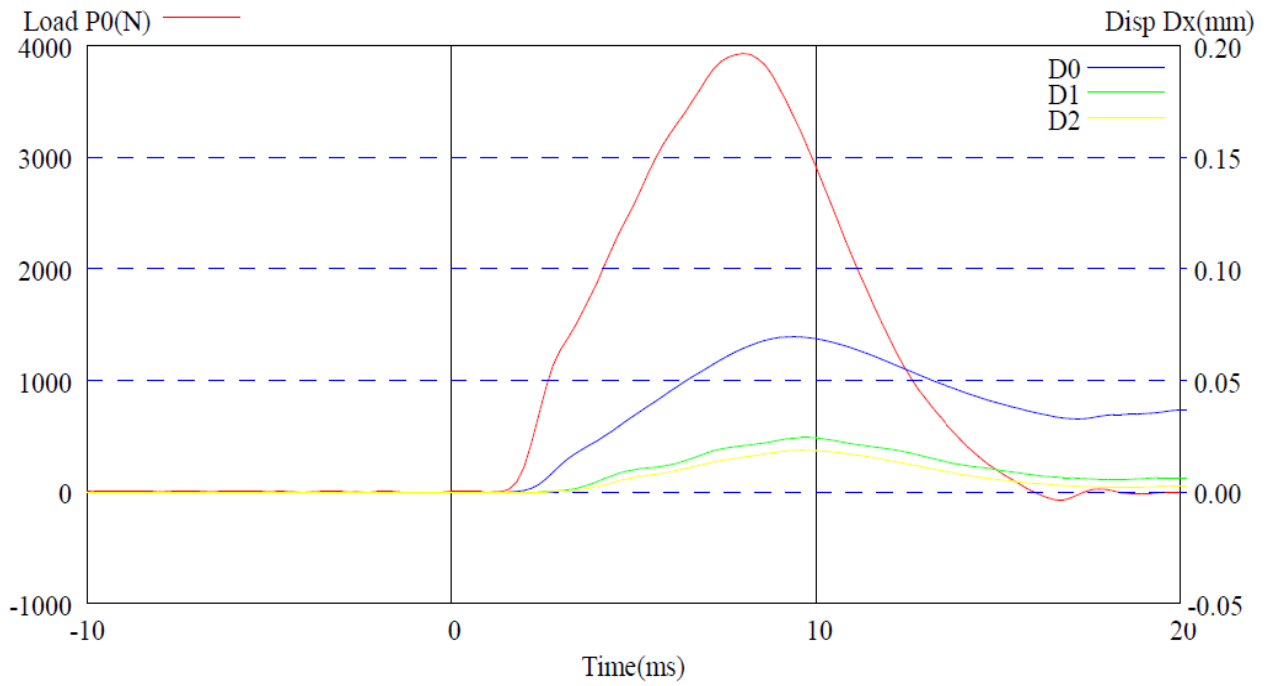
H_0 رد و فرض H_1 پذیرفته می‌شود، بنابراین ضریب انتقال بار در ترک‌های عرضی و طولی در عرض‌های مختلف با یکدیگر به صورت معنی داری تفاوت دارند. این موضوع برای ترک‌های با عرض ۱ تا ۹ میلی‌متر بررسی شد و اختلاف LTE در دو نوع ترک طولی و عرضی تایید شد.

جدول ۳-۴ نتایج آزمون تی برای ترک عرضی و طولی با عرض ۲ میلی‌متر

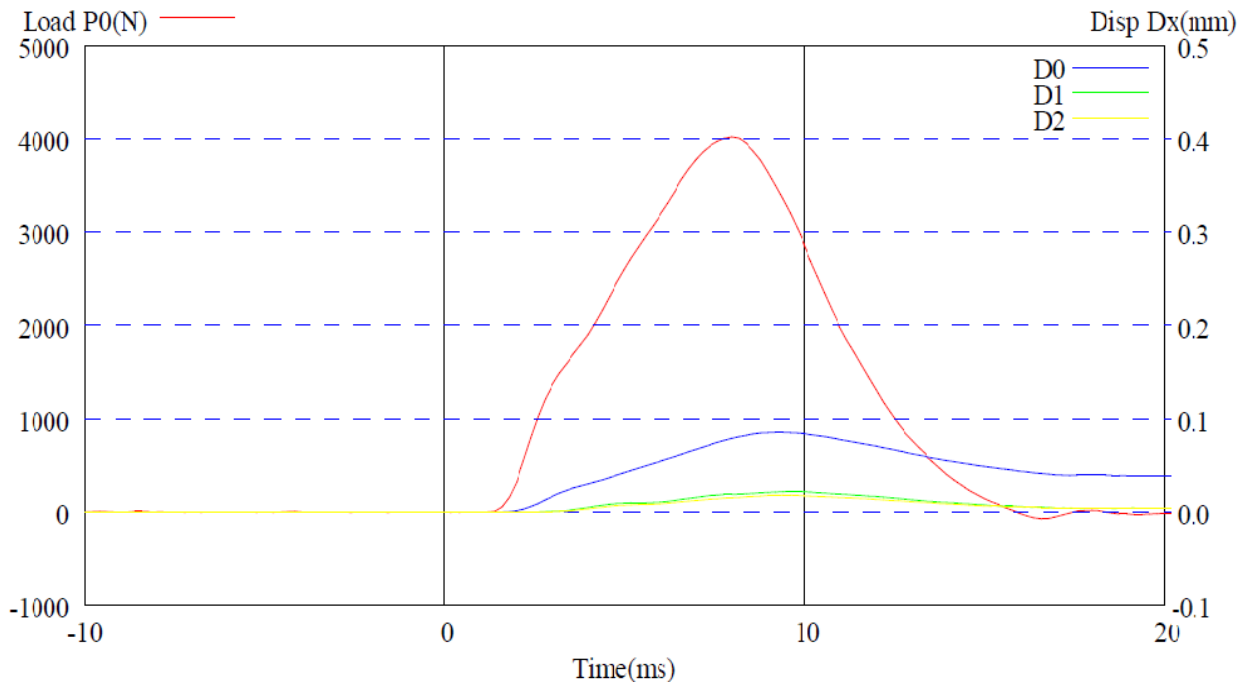
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
E	Equal variances assumed	16.086	.000	2.459	47	.018	6.76728	2.75186	1.23125	12.30331
	Equal variances not assumed			2.270	28.761	.031	6.76728	2.98068	66889	12.86566

۳-۳-۴ نمودارهای تاریخچه زمانی

شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴) نمودار تاریخچه زمانی به دست آمده از دستگاه PFWD برای ترک‌های طولی و عرضی به عرض ۳ میلی‌متر نشان می‌دهد. براساس این شکل‌ها مشاهده می‌شود، مقدار LTE محاسبه شده برای ترک عرضی برابر ۸۵ درصد و برای ترک طولی ۷۰ درصد است. همچنین مقدار حداکثر خیز در ترک طولی حدود ۰/۰۷ میلی‌متر و در ترک عرضی ۰/۰۹ میلی‌متر است. بنابراین طبق نمودار تاریخچه زمانی به دست آمده مقدار ضریب انتقال بار در ترک عرضی و طولی و رفتار ترک‌ها با یکدیگر متفاوت هستند.



شکل ۳-۴ نمودار تاریخچه زمانی ترک خوردگی طولی به عرض ۳ میلی‌متر



شکل ۴-۴ نمودار تاریخچه زمانی ترک خوردگی عرضی به عرض ۳ میلی‌متر

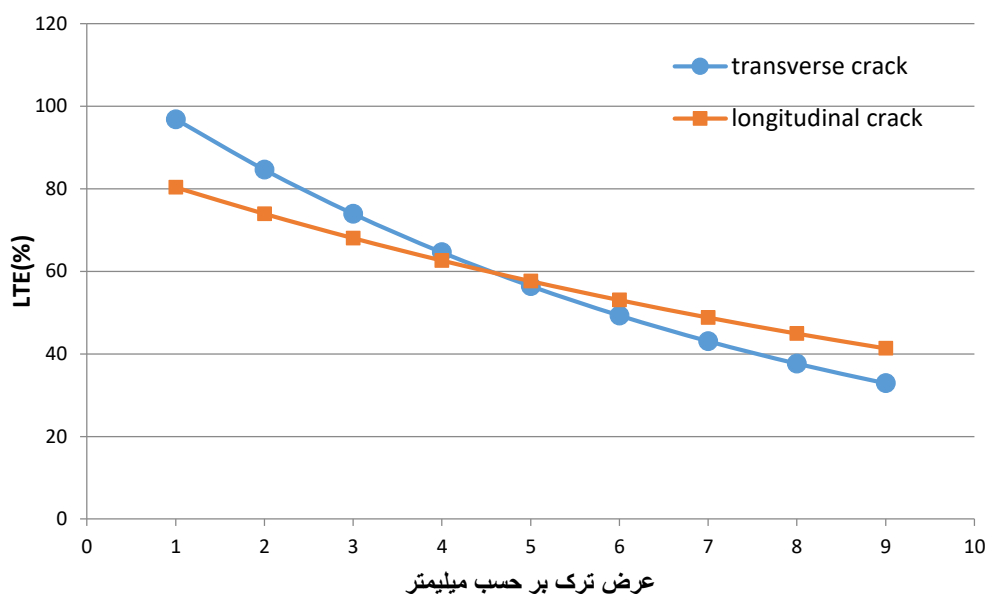
۴-۳-۴ روابط رگرسیون

با استفاده از تحلیل داده‌های جمع آوری شده از افت و خیزهای سطح روسازی در محل ترک خوردگی، روابط (۳-۴) و (۴-۴) که بالاترین همبستگی را با داده‌های میدانی داشتند، برای محاسبه ضریب انتقال بار در ترک‌های طولی و عرضی روسازی آسفالتی پیشنهاد شد. رابطه (۳-۴) و (۴-۴) به ترتیب برای محاسبه شاخص LTE در ترک‌های عرضی و طولی است.

$$\text{LTE} = 110.872 * \exp(-0.135 * w) \quad (R^2 = 0.77) \quad (۳-۴)$$

$$\text{LTE} = 87.322 * \exp(-0.083 * w) \quad (R^2 = 0.52) \quad (۴-۴)$$

به ازای عرض ترک ۱ میلی‌متر مقدار ضریب انتقال بار برای ترک طولی ۸۰/۳۶ و برای ترک عرضی ۹۶/۸۷ است و به ازای عرض ترک ۷ میلی‌متر مقدار ضریب انتقال بار برای ترک طولی ۴۸ و ترک عرضی ۴۳ می‌باشد. همچنین شکل (۵-۴) نشان دهنده تخمین LTE برای ترک عرضی و طولی است. بنابراین براساس شکل (۵-۴) و روابط (۳-۴) و (۴-۴) می‌توان نتیجه گرفت که ضریب انتقال بار در ترک عرضی و طولی با یکدیگر متفاوت است. بطوریکه برای عرض‌های کمتر از ۵ میلی‌متر مقدار LTE در ترک عرضی نسبت به ترک طولی بیشتر بوده و برای عرض‌های بزرگتر از ۵ میلی‌متر LTE در ترک عرضی نسبت به ترک طولی مقدار کمتری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵ مقایسه تخمین LTE برای ترک طولی و عرضی

۴-۳-۵ بحث در نتایج

با ارزیابی ضرایب انتقال بار در عرض‌های مختلف با استفاده از روش‌های ذکر شده در بالا مشخص شد که در LTE ترک‌های طولی و عرضی با یکدیگر متفاوت هستند. همچنین برای ترک‌های با عرض کمتر از ۵ میلی‌متر مقدار LTE ترک عرضی نسبت به ترک طولی بیشتر است و برای ترک‌های با عرض بیشتر از ۵ میلی‌متر در ترک خوردگی طولی افت کمتری نسبت به ترک خوردگی عرضی نشان می‌دهد. از مهم‌ترین دلایل تفاوت در مقدار ضریب انتقال بار در ترک‌های طولی و عرضی به موارد زیر می‌توان اشاره کرد.

۱. ترک‌های طولی در جاده قدیم شاهرود به میامی به علت عدم اجرای صحیح درز طولی بین دو باند آسفالت رخ داده است. این نوع ترک از سطح بالای لایه آسفالتی شروع شده و به پایین گسترش می‌یابد. ترک‌های عرضی از نوع ترک خوردگی انعکاسی و حرارتی بودند که ترک‌های انعکاسی از سطح زیرین لایه آسفالتی شروع می‌شود. بنابراین در ترک‌های انعکاسی ترک خوردگی در عمق آسفالت کامل است در صورتی که در ترک‌های طولی عمق ترک در لایه آسفالتی کامل نمی‌باشد. بنابراین به دلیل تأثیر کم

عمق ترک در عرض‌های کم، مشاهده می‌شود مقدار LTE در ترک عرضی نسبت به ترک طولی بیشتر است. با افزایش عرض ترک تأثیر عمق ترک به خوبی خودش را نشان می‌دهد به طوری که با افزایش عرض مقدار LTE در ترک عرضی نسبت به ترک طولی افت بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین زمانی که عمق ترک در لایه آسفالتی کامل باشد باعث نفوذ آب به داخل ساختار روسازی می‌گردد که در نتیجه این پدیده خود به تنهایی می‌تواند منجر به افت ظرفیت باربری روسازی شود.

۲. ترک‌های حرارتی به علت نوسانات دما دارای تغییرات عرض هستند. بنابراین این نوع ترک خوردگی فعال بوده و منجر به جابجایی لبه ترک با تغییرات عرض می‌شود. در نتیجه باعث عدم پیوستگی بین آسفالت و اساس در لبه ترک می‌شود. بنابراین جابجایی لبه ترک عرضی می‌تواند علتی برای افت بیشتر LTE در ترک عرضی باشد.

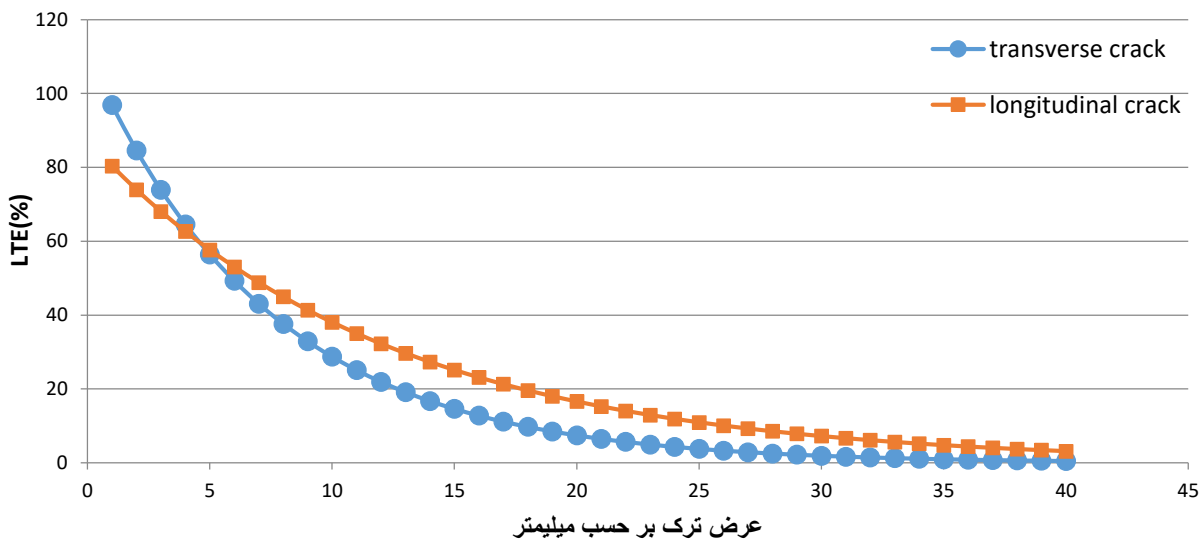
۳. طبق روش PCI و آنچه در راهنمای MicroPaver نوشته شده است، ترک‌های طولی و عرضی در یک گروه قرار دارند و روش تعمیر آنها به ترتیب زیر است:

- ترک‌های با عرض کمتر از ۳ میلی‌متر بدون اقدام.
- ترک‌های با عرض ۳ تا ۷۶ میلی‌متر پر شوند.
- ترک‌های با عرض بیش از ۷۶ میلی‌متر وصله نیمه عمیق انجام شود.

اما اگر به جای عرض ترک، معیار ضریب انتقال بار برای تصمیم‌گیری در مورد روش تعمیر ترک استفاده شود تفاوت‌های عمده‌ای دیده می‌شود. بدین ترتیب که:

- اگر LTE بزرگتر یا مساوی ۷۰ باشد (مشابه ترک‌های با عرض کمتر از ۳ میلی‌متر) بدون اقدام خواهد ماند.
- اگر LTE بین ۷۰ تا ۱۰ باشد باید ترک پر شود.
- اگر LTE کوچکتر از ۱۰ باشد وصله نیمه عمیق انجام شود.

در مورد ترک‌های با LTE کوچکتر از ۱۰ با توجه به شکل (۴-۶) و طبق روابط (۴-۳) و (۴-۴)، می‌توان نتیجه گرفت که ترک عرضی با عرض بیشتر از ۲۰ میلی‌متر و ترک طولی با عرض بیشتر از ۳۰ میلی‌متر نیاز به وصله کاری دارند (که در روشهای مرسوم ۷۶ میلی‌متر تعیین شده است). هر چند انتخاب مرز ۱۰ برای LTE نیاز به مطالعه میدانی بیشتری دارد. در عین حال از آنجا که ضریب انتقال بار، در مقایسه با عرض ترک، کیفیت سازه‌ای راه را بهتر نشان می‌دهد معیار معتبرتری برای برنامه ریزی تعمیرات روسازی است.



شکل ۴-۶ مقایسه LTE ترک طولی و عرضی

۴-۴ مدل سازی عددی ترک عرضی و کالیبراسیون آن

در این مطالعه به منظور بررسی مکانیسم انتقال بار در ترک عرضی و تغییرات LTE در عرض‌های مختلف که از نتایج تست‌های میدانی حاصل شد، با روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس یک مدل دو بعدی از روسازی مورد مطالعه ساخته شد. به منظور صحت سنجی مدل، نتایج به دست آمده از نرم افزار با نتایج حاصل از ضریب انتقال بار به دست آمده از جاده شاهرود به میامی مقایسه شد.

۴-۴-۱ هندسه و ساختار مدل

در نرم افزار آباکوس امکان تعریف رفتارهای مختلفی برای مصالح به کار رفته در مدل وجود دارد. مصالح آسفالتی با توجه به دما و زمان بارگذاری، رفتاری الاستیک، ویسکو الاستیک، تا ویسکو پلاستیک از خود نشان می دهند. با این حال تحلیل روسازی با لحاظ نمودن رفتار واقعی مصالح روسازی زمان بر و مشکل خواهد بود و عموماً با دقت قابل قبولی تحلیل با فرض رفتار الاستیک لایه ها انجام می گیرد. با توجه به اینکه هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر ترک خوردگی عرضی و طولی بر ضریب انتقال بار است، به منظور کاهش پیچیدگی رفتار کلیه لایه ها الاستیک خطی فرض شد. انتخاب ابعاد مناسب برای مدل در تحلیل های عددی نقش مهمی در افزایش دقت و درستی نتایج دارند. اگر ابعاد مدل کوچک باشد ممکن است موج حاصل از بارگذاری پس از برخورد به مرز مدل برگردد و در نتایج تأثیرگذار باشد، بزرگ بودن بیش از اندازه مدل سبب افزایش زمان تحلیل می شود. بنابراین با استفاده از آنالیز حساسیت ابعاد 1×1 متر مربع برای مدل انتخاب شد.

در روش المان محدود مشخصات مصالح، نحوه بارگذاری، شرایط مرزی، برهم کنش بین لایه های روسازی و تعداد و ابعاد المان ها از جمله پارامترهایی هستند که تأثیر مهمی بر نتایج دارند. پس این پارامترها باید به گونه ای تعریف شوند تا بتوانند رفتار واقعی روسازی آسفالتی را توصیف کنند. برای این منظور شرایط مرزی به گونه ای اعمال شد که از حرکت گره های پیرامونی و همچنین گره های کف مدل در کلیه جهت ها جلوگیری شود. به دلیل وجود تمرکز تنش در اطراف محل بارگذاری برای افزایش صحت نتایج، ابعاد مش بندی در محل بارگذاری کوچکتر از سایر قسمت ها در نظر گرفته شد. برهم کنش بین لایه ها به گونه ای تعریف شد که تحت بارگذاری و باربرداری هیچ گونه جداشدگی در راستای قائم بین لایه های روسازی ایجاد نشود برای این منظور رفتار قائم لایه ها با قید TIE تعریف شد. همچنین به دلیل اینکه ترک عرضی، ترکی فعال بوده و با تغییرات عرض ترک، لبه ترک نسبت به لایه زیرین جابه جا می شود به منظور مدل سازی این شرایط در قسمت روسازی ترک خورده به میزان دو برابر عرض ترک،

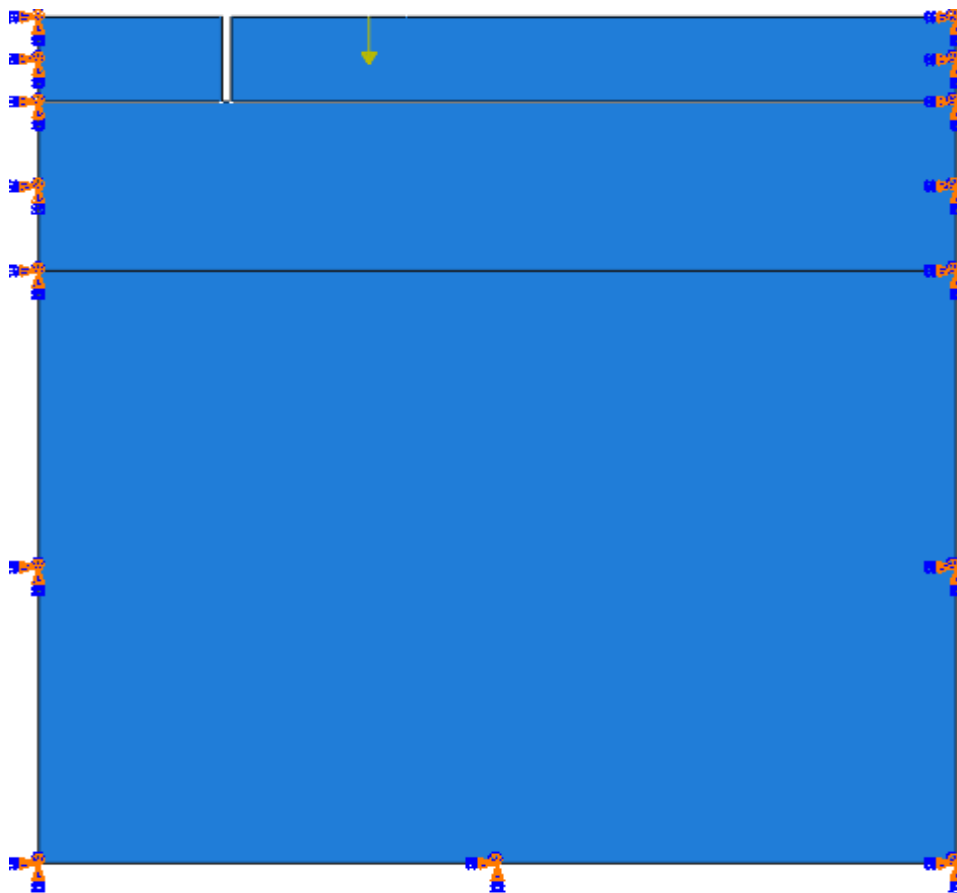
سطح تماس بین لایه اساس و آسفالت به صورت فنر تعریف شد و میزان سختی این فنر ۱۰۰۰ نیوتن بر متر مربع انتخاب شد. این قید باعث می‌شود که بخشی از نشست‌های لایه اساس به طرف دیگر ترک منتقل شود. بدین ترتیب عدم پیوستگی آسفالت و اساس در مجاورت ترک را می‌توان مدل کرد. به دلیل اینکه نحوه بارگذاری دستگاه PFWD به صورت ضربه می‌باشد نوع تحلیل مورد استفاده در این مطالعه از نوع dynamic explicit انتخاب شد. با توجه به نمودار تاریخچه زمانی به دست آمده از دستگاه PFWD مقدار بار ۴۰۰۰ نیوتن و به صورت نقطه‌ای به سطح آسفالت وارد شد و همچنین به علت اینکه مقدار بار وارده در طی زمان متغیر می‌باشد نحوه اعمال بار به صورت دامنه تعریف شد (جدول ۴-۴) و در تمامی مدل‌ها فاصله محل اعمال بارگذاری تا لبه ترک با توجه به مطالعات میدانی ۱۵ سانتی‌متر انتخاب شد، و مدت زمان بارگذاری ۱۶ میلی‌ثانیه تعیین شد. به دلیل اینکه هدف از این مطالعه بررسی رشد ترک در لایه آسفالتی نبود ترک به صورت یک ناپیوستگی در لایه آسفالتی ایجاد شد و عمق ترک خوردگی به اندازه ضخامت لایه آسفالتی در نظر گرفته شد و عرض ترک از ۵ میلی‌متر تا ۳۰ میلی‌متر تغییرات داشت. شکل (۴-۷) و (۴-۸) مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس همراه با نحوه اعمال بارگذاری، محل قرارگیری ترک، و شرایط مرزی را نشان می‌دهد. ساختار مدل از سه لایه آسفالت، اساس و بستر تشکیل شده است. ضخامت لایه‌ها، مدول الاستیسته، ضریب پواسون و وزن مخصوص لایه‌ها در محدوده پیشنهادی آیین نامه طرح روسازی راه‌های ایران و مطابق جدول (۴-۵) انتخاب شد.

جدول ۴-۴ دامنه بارگذاری استفاده شده در مطالعه

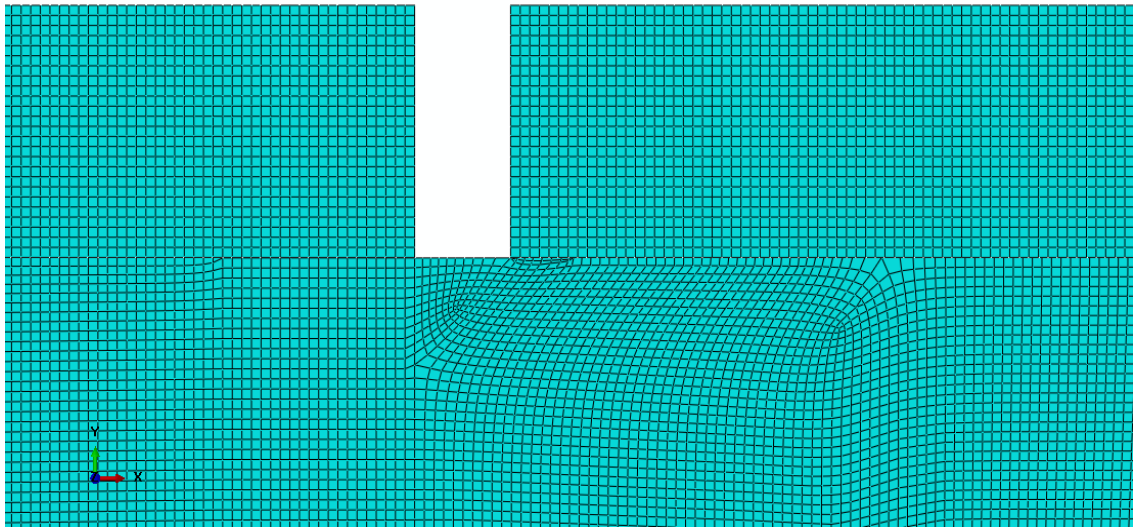
زمان (s)	۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶
دامنه	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	۰

جدول ۴-۵ مشخصات مصالح استفاده شده در مدل سازی برای صحت سنجی

نسبت پواسون	چگالی (kg/m^3)	ضخامت (cm)	مدول الاستیسیته (Mpa)	لایه
۰/۳	۲۴۰۰	۱۰	۱۳۰۰	آسفالت
۰/۳۵	۱۹۰۰	۲۰	۱۲۰	اساس
۰/۴	۱۹۰۰	۷۰	۸۰	بستر



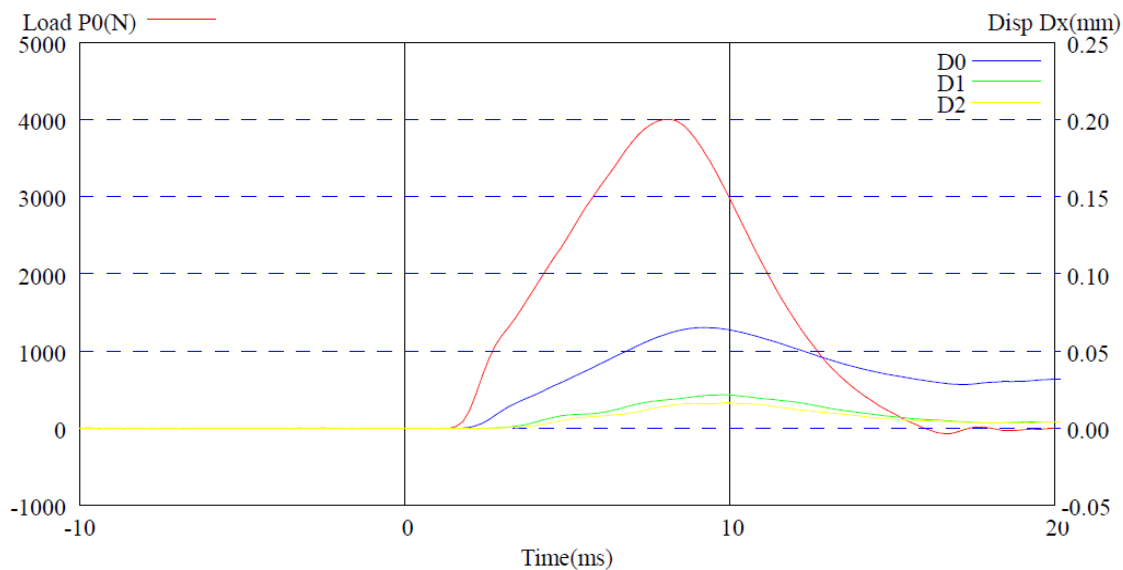
شکل ۴-۷ نمونه‌ای از مدل ساخته شده همراه با شرایط مرزی و نحوه بارگذاری



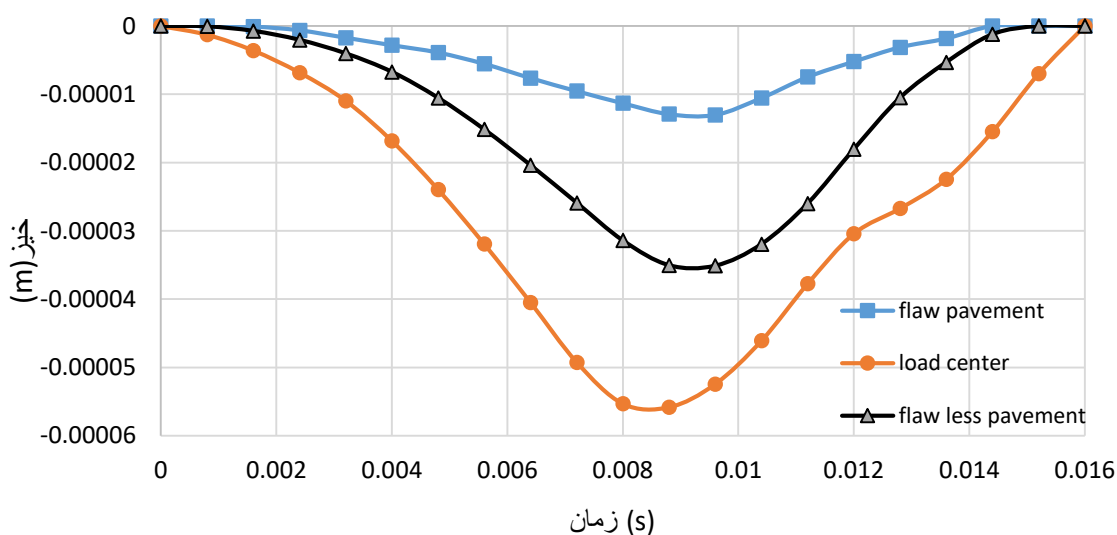
شکل ۴-۸ مش بندی مدل

۴-۴-۲ صحت سنجی مدل

شکل (۴-۹) نمودار تاریخچه زمانی برای ارزیابی از یک ترک کامل را نشان می‌دهد که تا کف لایه آسفالتی ادامه داشته است. عرض ترک تقریباً در تمام عمق لایه ۱۰ میلی‌متر بود. همچنین شکل (۴-۱۰) خیز به دست آمده از مدل المان محدود در قسمت زیر مرکز بارگذاری در سمت روسازی سالم و پس از ترک خوردگی را در طی زمان‌های مختلف برای عرض ترک ۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. با توجه به دو نمودار مشاهده می‌شود که خیز حداکثر به وجود آمده که مربوط به زیر مرکز بارگذاری می‌باشد در مدل عددی و تست‌های میدانی با دقت خوبی نزدیک به یکدیگر بوده که تقریباً برابر با ۰/۰۵۵ میلی‌متر است. بنابراین صحت مدل با بررسی مقدار خیز حداکثر تأیید می‌شود. در شکل (۴-۱۰) با فرض مواد الاستیک برای لایه آسفالتی به دست آمده است برای همین قسمت افقی انتهای نمودار در شکل (۴-۹) در نتایج مدل دیده نمی‌شود. زیرا قسمت افقی نمودار در شکل (۴-۹) به دلیل رفتار ویسکوز مصالح اتفاق افتاده می‌افتد. بنابراین فقط حداکثر خیز قابل مقایسه است.

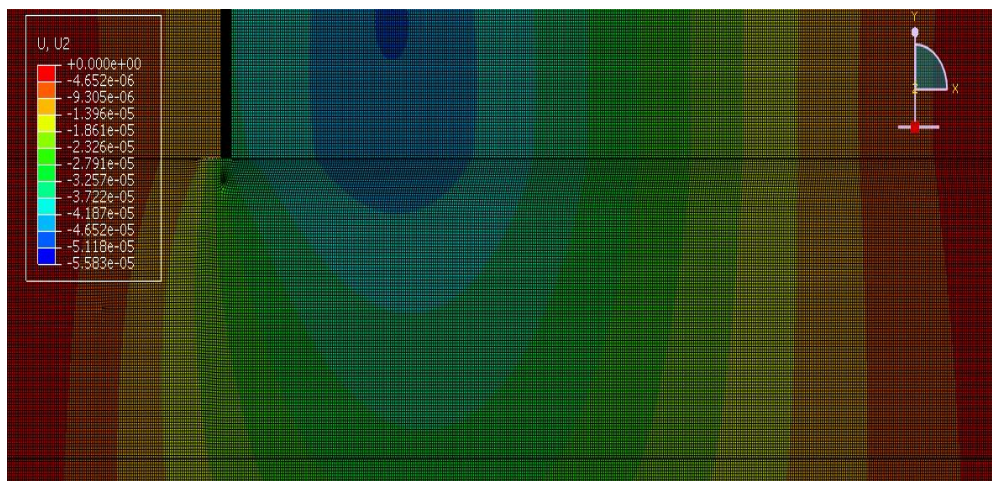


شکل ۴-۹ نمودار تاریخچه زمانی ترک عرضی جاده شاهرود به میامی



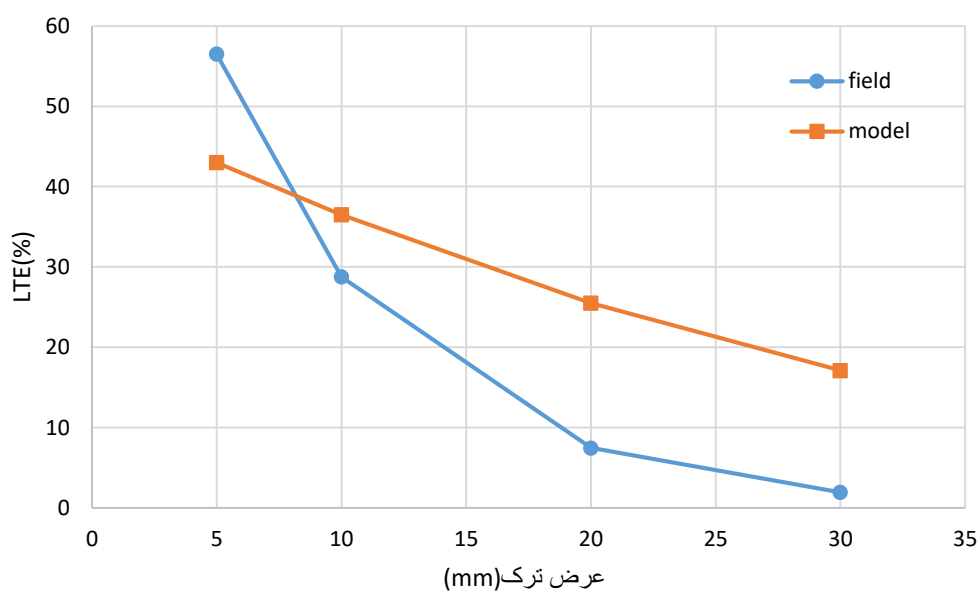
شکل ۴-۱۰ خیز محاسبه شده توسط مدل المان محدود

شکل (۴-۱۱) تغییرات مقدار خیز به وجود آمده ناشی از بارگذاری را در دو سمت ترک و در لایه‌های روسازی را نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود با دور شدن از مرکز بارگذاری مقدار خیز کاهش پیدا می‌کند. همچنین در ناحیه ترک خوردگی به علت کاهش انتقال بار، کاهش قابل توجه خیز در سمت روسازی ترک خورده مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۱ تغییرات خیز ناشی از بارگذاری

در ادامه به ازای عرض‌های مختلف ترک خوردگی، مقدار ضریب انتقال بار از رابطه (۳-۲) محاسبه شد. این رابطه مقدار LTE اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در مقابل مقدار LTE از مدل عددی که تخمینی از مقدار واقعی LTE است محاسبه شد. در این قسمت مقادیر خیز از مدل عددی بدست آمده و با استفاده از رابطه (۳-۲) پارامتر LTE محاسبه شده است. شکل (۴-۱۲) مقدار ضریب انتقال بار واقعی را در مقایسه مقدار تخمینی آن برای ترک‌های عرضی جاده شاهرود به میامی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲ مقایسه ضریب انتقال بار محاسبه شده توسط مدل المان محدود و جاده شاهرود به میامی

با توجه به شکل (۴-۱۲) مشاهده می‌شود در هر دو نمودار با افزایش عرض ترک خوردگی مقدار ضریب انتقال بار کاهش پیدا می‌کند. اما همانطور که مشاهده می‌شود مقدار پارامتر LTE برای عرض‌های مختلف برای جاده شاهرود به میامی با مقدار محاسبه شده توسط نرم‌افزار متفاوت است. عواملی که باعث تفاوت مدل با جاده می‌شوند عبارتند از:

۱- در مدل ترک در تمام عمق با عرض یکسان وجود دارد ولی در جاده تمام ترک‌ها در عمق آسفالت کامل نیستند یا عرض یکنواخت ندارند.

۲- در جاده ترک‌های مویی پراکنده در اطراف محل ترک اصلی وجود دارد که در مدل دیده نشده است.

۳- عرض قسمت‌هایی از لبه ترک که آسفالت و اساس دچار عدم پیوستگی شده‌اند متغیر می‌باشد که در مدل یکسان فرض شده است

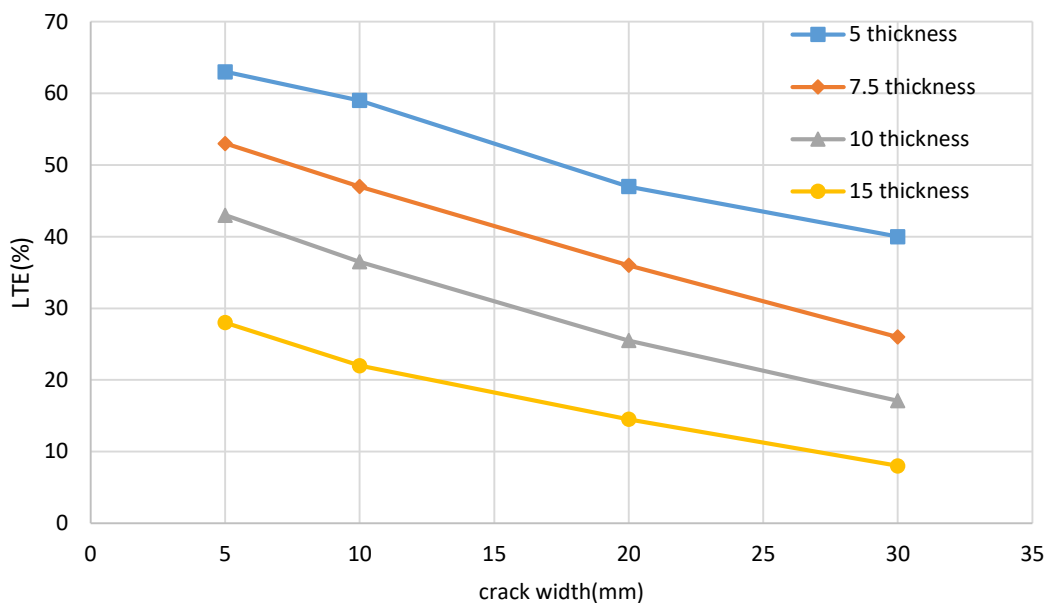
۴- می‌تواند ناشی از خطای به وجود آمده در هنگام اندازه‌گیری افت و خیز روسازی باشد، مانند تکان خوردن دستگاه PFWD در هنگام ضربه زدن و عدم تماس کافی بین صفحه بارگذاری و سطح آسفالت.

مقدار LTE برای عرض ترک ۵ و ۱۰ میلی‌متر در تست‌های میدانی به ترتیب ۴۸ تا ۳۷ و ۲۰ تا ۵۰ است در حالی که مقدار LTE محاسبه شده توسط نرم‌افزار برای این دو عرض به ترتیب ۴۳ و ۳۶/۵ است که مشاهده می‌شود در محدوده LTE به دست آمده توسط تست‌های میدانی است. در عین حال با توجه به پراکندگی داده‌های LTE در شکل‌های (۳-۱۱ و ۳-۱۲) می‌توان گفت که نمودار مدل خارج از محدوده داده‌های میدانی نیست.

۴-۴-۳ بررسی اثر ضخامت لایه آسفالتی بر ضریب انتقال بار

پس از آنکه مدل عددی با نتایج حاصل از تست‌های میدانی در عمق ثابت برای عرض‌های مختلف ترک خوردگی صحت سنجی شد. تأثیر ضخامت لایه آسفالتی بر ضریب انتقال بار توسط مدل بررسی شد. چهار ضخامت ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر برای لایه آسفالتی در نرم‌افزار مدل‌سازی شد و مقدار ضریب

انتقال بار برای هریک از ضخامت‌ها در عرض‌های مختلف محاسبه گردید. شکل (۴-۱۳) مقدار ضریب انتقال بار توسط مدل المان محدود را در عرض‌ها و ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳ مقدار ضریب انتقال بار در عرض‌ها و ضخامت‌های مختلف

با توجه به شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه آسفالتی مقدار ضریب انتقال بار کاهش پیدا می‌کند که دلیل آن در بخش (۳-۶) بیان شد. همچنین با توجه به شکل (۳-۱۳) ملاحظه می‌شود مقدار LTE به دست آمده در عرض‌های مختلف برای جاده شاهرود به میامی که ضخامت لایه آسفالتی بیشتری نسبت به روسازی داخل محوطه دانشگاه دارد کمتر است. بنابراین نتایج به دست آمده برای ضخامت‌های مختلف مطابق با نتایج تست‌های میدانی است.

۴-۴-۴ پیش بینی LTE با مدل عددی

برای محاسبه پارامتر LTE با در نظر گرفتن عرض ترک و ضخامت لایه آسفالتی با استفاده از نتایج به دست آمده از مدل المان محدود و با استفاده از نرم افزار SPSS توابع مختلفی بررسی شدند و در نتیجه

تابع رگرسیون غیر خطی (۵-۴) که بالاترین همبستگی را با نتایج حاصل از مدل المان محدود را داشت انتخاب شد.

$$LTE=100 - 0.769\exp(0.087w) - 13.78(w^{0.136})(h^{0.51}) \quad (R^2=99) \quad (۵-۴)$$

LTE- ضریب انتقال بار (درصد).

W- عرض ترک انقباضی (mm).

h- ضخامت لایه آسفالتی (cm).

در نتیجه از رابطه (۵-۴) به دست آمده از مدل عددی می توان ضریب انتقال بار را با توجه به عرض ترک و ضخامت لایه آسفالتی محاسبه نمود.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه گیری

هدف از این مطالعه بررسی عددی و میدانی اثر ترک عرضی و طولی بر ضریب انتقال بار با استفاده از داده‌های دستگاه PFWD و همچنین مقایسه ترک‌های طولی و عرضی در روسازی آسفالتی بود. این موضوع نیز بررسی می‌شود که آیا ترک خوردگی طولی و عرضی در عرض‌های یکسان دارای مقدار ضریب انتقال بار یکسانی می‌باشند؟ به عبارت دیگر آیا اثر ترک خوردگی طولی و عرضی بر افت کیفیت باربری روسازی یکسان است یا تفاوت معنی‌داری دارند. برای این منظور ابتدا با استفاده از دستگاه PFWD در جاده شاهرود به میامی و محوطه دانشگاه اقدام به برداشت افت و خیزها در محل ترک خوردگی شد و در نهایت مقدار ضریب انتقال بار محاسبه گردید. سپس به منظور بررسی دقت و صحت مقادیر به دست آمده برای LTE در عرض‌های مختلف ترک از روش المان محدود مدلی دو بعدی از روسازی آسفالتی ساخته شد و نتایج به دست آمده از نرم افزار با نتایج حاصل از ضریب انتقال بار به دست آمده از جاده شاهرود به میامی اعتبار سنجی شد. همچنین پس از بررسی صحت مدل، در مدل المان محدود برای ضخامت‌های مختلف لایه آسفالتی مقدار LTE محاسبه شد و یک رابطه کلی با توجه به ضخامت لایه آسفالتی و عرض ترک برای محاسبه LTE تعیین گردید. مهم ترین نتایج به دست آمده از این مطالعه به عبارت زیر می‌باشد:

۱- در این مطالعه به علت این که روابط فعلی منجر به خطای قابل توجهی در محاسبه پارمتر LTE می‌شدند، برای محاسبه ضریب انتقال بار در ترک‌های طولی و عرضی رابطه جدیدی پیشنهاد شد که به لحاظ منطقی انتظار می‌رود نسبت به روابط قبلی از دقت بیشتری برخوردار باشد.

۲- ضریب انتقال بار در ترک‌های انقباضی روسازی آسفالتی به عرض ترک و ضخامت لایه آسفالتی وابسته است به نحوی که با افزایش عرض ترک و ضخامت آسفالت، LTE کاهش پیدا می‌کند.

۲- ضریب انتقال بار (LTE) برای یک جاده با روسازی با ضخامت ثابت آسفالت در ترک‌های انقباضی با عرض W به صورت نمایی با فرم کلی $LTE=a*\exp(W*b)$ قابل برآورد می‌باشد.

- ۳- با افزایش عرض ترک خوردگی طولی مقدار ضریب انتقال بار کاهش می‌یابد.
- ۴- مقایسه آماری دو سری داده مربوط به LTE ترک عرضی و LTE ترک طولی نشان داد که طبق آزمون t و نمودارهای جعبه‌ای، این دو سری داده با یکدیگر بطور معنی داری تفاوت دارند.
- ۵- مقایسه نمودار تاریخچه زمانی حاصل از دستگاه PFWD در دو ترک طولی و عرضی با عرض یکسان، نشان داد که رفتار آنها کاملاً متفاوت است.
- ۶- برای پیش بینی LTE در ترک‌های عرضی و طولی دو رابطه رگرسیون متفاوت بدست آمد.
- ۷- مقدار ضریب انتقال بار در ترک‌های عرضی با عرض کمتر از ۵ میلی‌متر نسبت به ترک‌های طولی مشابه بزرگتر است.
- ۸- مقدار ضریب انتقال بار در ترک‌های عرضی با عرض بیشتر از ۵ میلی‌متر نسبت به ترک‌های طولی مشابه کوچکتر است.
- ۹- به طور کلی می‌توان گفت ترک‌های عرضی و ترک‌های طولی، به ویژه با شدت متوسط و زیاد، در یک گروه قرار نمی‌گیرند.
- ۱۰- مقایسه نتایج مدل و ارزیابی میدانی نشان داد که خیز حداکثر در مرکز بارگذاری در هر دو روش بسیار نزدیک بوده و می‌تواند صحت مدل را تایید کند.
- ۱۱- با مدل سازی چهار ضخامت ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری برای لایه آسفالتی در نرم افزار، مشاهده شد که ضریب انتقال بار با افزایش ضخامت لایه آسفالتی کاهش پیدا می‌کند.
- ۱۲- ضریب انتقال بار (LTE) در حالت کلی با توجه به ضخامت آسفالت (h) و عرض ترک (w) از رابطه (۴-۵) با دقت خوبی قابل پیش بینی است.

۱۳- برای تصمیم گیری در مورد روش تعمیر ترک، بجای عرض ترک می توان از ضریب انتقال بار استفاده کرد. در این صورت نتایجی به غیر از روشهای مرسوم حاصل می شود.

۱۴- با استفاده از این روش ضمن ارزیابی چشمی خرابی ها و با اندازه گیری عرض ترک و ضخامت لایه آسفالتی، بدون استفاده از دستگاه FWD می توان ضریب انتقال بار در ترک های عرضی و طولی را محاسبه نمود.

۲-۵ پیشنهادها

در رابطه با تحقیق های آینده موارد زیر پیشنهاد می شود:

- ۱- بررسی اثر ترک خستگی روسازی آسفالتی بر ضریب انتقال بار.
- ۲- بررسی تغییرات ضریب انتقال بار تحت اثر شرایط جوی مختلف
- ۳- تعیین حد بحرانی ضریب انتقال بار برای استفاده آن جهت بررسی سطح کیفیت روسازی آسفالتی.
- ۴- بررسی اثر عمق ترک خوردگی و ترک های پراکنده اطراف ترک اصلی بر روی ضریب انتقال بار.

- [1] Shahin, M. Y. (1994). Pavement management for airports, roads, and parking lots. Washington, Chapman and Hall.
- [2] Zhang, W. (2015). Evaluation of field transverse cracking of asphalt pavement (Doctoral dissertation). Available from ProQuest Dissertations and Theses database, (UMI No. 3732732).
- [3] Owusu-Antwi, E. B., Meyer, A. H., Hudson, W. R. (1990). Assessing load transfer across joints and cracks in rigid pavement using the falling weight deflectometer. A Report NO, FHWA/TX-91+460-2, Texas State Department of Highways and PublicTransportation, Transportation Planning Division.
- [4] Yin, H. M. (2011). Opening-mode cracking in asphalt pavements. Road Materials and Pavement Design, 11(2), 435-457.
- [5] Khazanovich, L., Velasquez, R., Nesvijski, E. G. (2005). Evaluation of top-down cracks in asphalt pavements by using a self-calibrating ultrasonic technique. Journal of the Transportation Research Board, 1940, 63-68.
- [6] Asphalt Institute. (2007). Asphalt handbook MS-4. 7th Ed.
- [7] 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.
- [8] Code-234. (2011). Iran highway asphalt paving code. Tehran: The Ministry of Road and Urban Development, Research and Education Center, Publication Number 234.
- [9] Khazanovich, L., Gotlif, A. (2003). Evaluation of joint and crack load transfer final report (Report NO. FHWA-RD-02-088). University Avenue.
- [10] Wadkar, A., Mehta, Y., Cleary, D., Guo, E., Musumeci, L., Zapata, A., Kettleon, W. (2011). Load-transfer efficiencies of rigid airfield pavement joints based on stresses and deflections. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(8), 1171-1180.
- [11] Cunliffe, C. (2014). Impact of structure, material properties, temperature gradient, and trafficking on load transfer efficiency (Master's thesis). Available from, LibraryTheses@rowan.edu
- [12] Shoukry, S. N., William, G. W., Riad, M. Y. (2005). Evaluation of load transfer efficiency measurement (Report No. WVU-2002-04). Virginia University, Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown.
- [13] Zhang, W., Shen, S., Basak, P., Wen, H., Wu, S., Faheem, A., Mohammad, L. N. (2015). Development of predictive models for initiation and propagation of field transverse cracking. Journal of the Transportation Research Board, 2524, 92-99.

- [14] Shen, S., zhang, W., Wang, H., Huang, H. (2016). Numerical evaluation of surface-initiated cracking in flexible pavement overlays with field observations. *Road Materials and Pavement Design*, 18(1), 221-234.
- [15] Zhou, Z., Lytton, R. L., Hu, S., Luo, L., Tsai, F. L., Lee, S. L. (2010). Models for predicting reflection cracking of hot-mix asphalt overlays.
- [16] Holewinski, J. M., Soon, S. C., Drescher, A., Stolarski, H. (2003). Investigation of factors related to surface initiated cracks in flexible pavement (Report NO. MN/RC - 2003-07). Department of Civil Engineering University of Minnesota.
- [17] Taniguchi, S., Nishizaki, I., Moriyoshi, A. (2011). A study of longitudinal cracking in asphalt pavement using CT scanner. *Road Materials and Pavement Design*, 9(3), 549-558.
- [18] Rahman, M. S., Podolsky, J. H., Williams, R. C., Scholz, T. (2017). A study of top-down cracking in the state of Oregon. *Road Materials and Pavement Design*, doi.org/10.1080/14680629.2017.1345782
- [19] Zhang, C., Wang, H., You, Z., Ma, B. (2015). Sensitivity analysis of longitudinal cracking on asphalt pavement using MEPDG in permafrost region. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2(1), 40-47.
- (۲۰) کاوسی، ا.، زمانی مرتضوی، ش. (۱۳۸۳). ارزیابی سازه‌ای آزاد راه تهران-قم با استفاده از دستگاه افت و خیز سنج ضربه‌ای. *فنی مهندسی تربیت مدرس*، شماره ۱۵.
- (۲۱) 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.
- [22] <http://hawaiiasphalt.org/education/pavement-guide/>
- [23] Yang, Q., Deng, Y. (2017). Evaluation of cracking in asphalt pavement with stabilized base course based on statistical pattern Recognition. *International journal of pavement engineering* <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2017.1299528>.
- [24] Solla, M., Lagüela, H., González-Jorge, Arias, P. (2014). Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. *NDT&E International*, 62, 55-65.
- [25] Hasni, H., Alavi, A. H., Jiao, J., Lajnef, N., Chatti, K., Aono, K., Chakrabarty, S. (2017). A new approach for damage detection in asphalt concrete pavements using battery-free wireless sensors with non-constant injection rates. *Measurement*, 110, 217-229.

- [26] Liu, P., Otto, F., Wang, D., Oeser, M., Balck, H. (2017). Measurement and evaluation on deterioration of asphalt pavements by geophones. *Measurement*, 109, 223-232.
- [27] Zhou, L., Ni, F., Zhao, Y. (2010). Evaluation method for transverse cracking in asphalt pavements on freeways. *Journal of the Transportation Research Board*, 2153, 97-105.
- [28] Ayenu-Prah, A., Attoh-Okine, N. (2008). Evaluating pavement cracks with bidimensional empirical Mode decomposition. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, doi:10.1155/2008/861701.
- [29] Saar, T., Talvik, O. (2010, October). Automatic asphalt pavement crack detection and classification using neural networks. 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, Estonia.
- [30] Park, H. J., Eslaminia, M., Kim, Y. R. (2014). Mechanistic evaluation of cracking in in-service asphalt pavements. *Materials and Structures*, 47(8), 1339-1358.
- (۳۱) قربانی، م.، بامداد، آ.، شورمیچ، ا.، برازوان، س. (۱۳۹۱). ارزیابی سازه‌ای روسازی با استفاده از پارامترهای کاسه انحنای افت و خیز، کنفرانس ملی زیر ساخت‌های حمل نقل.
- [32] Lin, C., Guo, Z. Y., Fang, j. G., Yang, Y. S. (2009). Analysis and evaluation of transverse-cracked semi – rigid base asphalt pavement using FWD data. *Pavement Mechanics and Performance, GeoShanghai International Conference, Shanghai, ASCE 1-6, 6–8.*
- [33] Cunliffe, C., Joshi, A., Mehta, Y. Cleary, D. (2014). A study to determine the impact of cracking on load transfer efficiency of rigid airfield pavements. *Journal of Testing and Evaluation*, 42(2), 375-389.
- [34] Xinhua, Y., Xiaochun, W. (2010). Joint load transfer efficiency of rigid pavement considering dynamic effect under a single moving load. 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science, Wuhan, China, 25-26.
- [35] Du-Tertre, A., Cascante, G., Tighe, S. (2010). Combining PFWD and surface wave measurements for evaluation of longitudinal joints in asphalt pavement. *Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, 1-18.*
- [36] Wadkar, A., Kettleon, W., Mehta, Y., Cleary, D., Brill, D. (2010). Analysis of full scale test data from national airport pavement testing facility (NAPTF) to determine impact of load transfer efficiency on pavement performance. CD ROM Transportation Research Board 90th Annual Meeting, National Academies, Washington D.C., 1-15.
- [37] Kestler, M., Eaton, R., Berg, R., Steinert, B., Smith, C., Aldrich, C. Humphrey, D. (2004). Handheld In-Situ testing devices for estimating the stiffness of trails and low volume roads, *Transportation System Workshop, Ft. Lauderdale.*

- [38] Nazzal, M. (2003). Field evaluation of In-situ test technology for QC/QA during construction of pavement layers and embankments, M.S. Thesis, Louisiana State University, Louisiana, USA.
- [39] Livneh, M., Goldberg, Y. (2001). Quality assessment during road formation and foundation construction: Use of Falling-Weight Deflectometer and Light DropWeight, Transportation Research Record 1755, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- [40] Fleming, P. R., Lambert, J. P., Rogers, C. D. F., Frost, M. W. (2002). In-Situ assessment of stiffness modulus for highway foundation during construction, Ninth International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen.
- [41] Steinert, B. C., Humphrey, D. N., Kestler M. A. (2005). Portable falling weight deflectometers study”, University of Maine, NETC Project No. 00-4.
- (۴۲) کاووسی، ا.، رفیعی، ک. (۱۳۸۹). بررسی اثر پارامترهای دستگاه PFWD در مدول سختی مصالح غیر چسبنده. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، دوره ۴۴، شماره ۴، ۵۴۵-۵۳۷.
- [43] Seyman, E. (2003). Laboratory evaluation of in-situ tests as potential quality control/quality assurance tools, M.S. Thesis, Louisiana State University, USA.
- [44] George, K. P. (2006). Portable FWD (PRIMA 100) for in-situ subgrade evaluation, Final Report , Mississippi Department of Transportation, FHWA/MS-DOT-RD-06-179.
- [45] Benedetto. A., Tosti. F., Di Domenico, L. (2011). Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer”, Published by Elsevier Ltd, Journal of Terramechanics.
- [46] Shabbir Hossain, M, Alex, K., Apeageyi. (2010) Evaluation of the light weight deflectometer for In-Situ determination of pavement layer moduli, Virginia Transportation Research Council, Virginia, USA.
- [47] Fleming, P. R., Frost, M. W., Rogers, C. D. F. (2000). A comparison of devices formeasuring stiffness in-situ, Fifth International Symposium on Unbound Aggregates in Roads/UNBAR 5, Nottingham, UK.
- (۴۸) رفیعی، کامران. (۱۳۸۸). ارائه‌ی مدل کنترل کیفی ساخت لایه‌های غیر چسبنده روسازی بر پایه نتایج PFWD ، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

پیوست الف:

جدول پ- الف- ۱

داده‌های ترک عرضی جاده شاهرود-میامی

شماره	W	LTE	۳۱	۲	۷۵	شماره	W	LTE
۱	۱	۱۰۰	۳۲	۲	۷۵	۶۲	۴	۵۲.۶۳۱۵۸
۲	۱	۱۰۰	۳۳	۲	۷۵	۶۳	۴	۵۲.۶۳۱۵۸
۳	۱	۱۰۰	۳۴	۲	۷۵	۶۴	۴	۵۲.۶۳۱۵۸
۴	۱	۱۰۰	۳۵	۲	۷۵	۶۵	۴	۵۵.۵۵۵۵۶
۵	۱	۱۰۰	۳۶	۲	۷۵	۶۶	۴	۶۰.۶۰۶۰۶
۶	۱	۱۰۰	۳۷	۲	۷۴.۱۹۳۵۵	۶۷	۴	۶۶.۶۶۶۶۷
۷	۱	۱۰۰	۳۸	۲	۷۲.۲۲۲۲۲	۶۸	۴	۶۷.۷۴۱۹۴
۸	۱	۱۰۰	۳۹	۲	۷۵.۸۶۲۰۷	۶۹	۴	۷۰
۹	۱	۱۰۰	۴۰	۲	۷۰.۵۸۸۲۴	۷۰	۴	۷۲.۴۱۳۷۹
۱۰	۱	۱۰۰	۴۱	۲	۷۹.۳۱۰۳۴	۷۱	۴	۸۱.۸۱۸۱۸
۱۱	۱	۱۰۰	۴۲	۲	۷۹.۳۱۰۳۴	۷۲	۴	۸۵.۷۱۴۲۹
۱۲	۱	۱۰۰	۴۳	۲	۷۹.۳۱۰۳۴	۷۳	۴	۸۵.۷۱۴۲۹
۱۳	۱	۱۰۰	۴۴	۲	۷۹.۳۱۰۳۴	۷۴	۴	۸۵.۷۱۴۲۹
۱۴	۱	۱۰۰	۴۵	۲	۸۶.۳۶۳۶۴	۷۵	۴	۶۰.۸۶۹۵۷
۱۵	۱	۱۰۰	۴۶	۲	۹۰.۴۷۶۱۹	۷۶	۴	۵۹.۰۹۰۹۱
۱۶	۱	۱۰۰	۴۷	۲	۹۵	۷۷	۴	۵۹.۰۹۰۹۱
۱۷	۱.۵	۹۰	۴۸	۲	۹۵.۲۳۸۱	۷۸	۴	۶۳.۶۳۶۳۶
۱۸	۱.۵	۹۰.۹۰۹۰۹	۴۹	۲	۹۰.۴۷۶۱۹	۷۹	۴	۶۳.۶۳۶۳۶
۱۹	۱.۵	۹۰	۵۰	۴	۶۰	۸۰	۴	۷۳.۰۷۶۹۲
۲۰	۱.۵	۹۰	۵۱	۴	۶۰	۸۱	۴	۸۰
۲۱	۱.۵	۹۰	۵۲	۴	۶۰	۸۲	۴	۸۰
۲۲	۲	۷۵	۵۳	۴	۶۰	۸۳	۴	۸۰
۲۳	۲	۷۵	۵۴	۴	۶۰	۸۴	۴	۸۳.۳۳۳۳۳
۲۴	۲	۷۵	۵۵	۴	۷۸.۹۴۷۳۷	۸۵	۴	۶۲.۰۶۸۹۷
۲۵	۲	۷۵	۵۶	۴	۸۳.۳۳۳۳۳	۸۶	۴	۶۴.۲۸۵۷۱
۲۶	۲	۷۵	۵۷	۴	۸۳.۳۳۳۳۳	۸۷	۴	۶۴.۲۸۵۷۱
۲۷	۲	۷۵	۵۸	۴	۷۷.۷۷۷۷۸	۸۸	۴	۶۴.۲۸۵۷۱
۲۸	۲	۷۵	۵۹	۴	۸۲.۳۵۲۹۴	۸۹	۴	۶۴.۲۸۵۷۱
۲۹	۲	۷۵	۶۰	۴	۵۲.۶۳۱۵۸	۹۰	۵	۶۴.۵۱۶۱۳
۳۰	۲	۷۵	۶۱	۴	۵۲.۶۳۱۵۸	۹۱	۵	۶۷.۸۵۷۱۴

جدول پ- الف- ۱ ادامه

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۹۲	۵	۶۷.۸۵۷۱۴	۱۲۲	۵	۶۰.۸۶۹۵۷	۱۵۲	۶	۴۰
۹۳	۵	۶۸.۹۶۵۵۲	۱۲۳	۵	۶۳.۶۳۶۳۶	۱۵۳	۶	۴۰
۹۴	۵	۶۷.۸۵۷۱۴	۱۲۴	۵	۶۶.۶۶۶۶۷	۱۵۴	۶	۴۰
۹۵	۵	۷۱.۴۲۸۵۷	۱۲۵	۵	۶۸.۱۸۱۸۲	۱۵۵	۶	۴۲.۳۰۷۶۹
۹۶	۵	۷۰.۳۷۰۳۷	۱۲۶	۵	۵۱.۸۵۱۸۵	۱۵۶	۶	۴۵.۸۳۳۳۳
۹۷	۵	۶۰.۷۱۴۲۹	۱۲۷	۵	۵۷.۶۹۲۳۱	۱۵۷	۶	۴۵.۸۳۳۳۳
۹۸	۵	۶۵.۳۸۴۶۲	۱۲۸	۵	۵۶	۱۵۸	۶	۴۵.۸۳۳۳۳
۹۹	۵	۶۵.۳۸۴۶۲	۱۲۹	۵	۶۰	۱۵۹	۷	۴۸.۲۷۵۸۶
۱۰۰	۵	۶۹.۲۳۰۷۷	۱۳۰	۵	۷۰.۳۷۰۳۷	۱۶۰	۷	۴۸.۱۴۸۱۵
۱۰۱	۵	۶۹.۲۳۰۷۷	۱۳۱	۵	۶۹.۲۳۰۷۷	۱۶۱	۷	۴۶.۴۲۸۵۷
۱۰۲	۵	۶۵.۳۸۴۶۲	۱۳۲	۵	۷۳.۰۷۶۹۲	۱۶۲	۷	۴۴.۸۲۷۵۹
۱۰۳	۵	۶۹.۲۳۰۷۷	۱۳۳	۵	۷۳.۰۷۶۹۲	۱۶۳	۷	۴۶.۴۲۸۵۷
۱۰۴	۵	۵۷.۶۹۲۳۱	۱۳۴	۵	۷۳.۰۷۶۹۲	۱۶۴	۷	۴۶.۴۲۸۵۷
۱۰۵	۵	۶۲.۵	۱۳۵	۵	۷۳.۰۷۶۹۲	۱۶۵	۷	۲۸.۱۲۵
۱۰۶	۵	۶۲.۵	۱۳۶	۶	۴۱.۹۳۵۴۸	۱۶۶	۷	۲۸.۱۲۵
۱۰۷	۵	۷۸.۹۴۷۳۷	۱۳۷	۶	۴۰.۶۲۵	۱۶۷	۷	۲۸.۱۲۵
۱۰۸	۵	۶۰	۱۳۸	۶	۴۱.۹۳۵۴۸	۱۶۸	۷	۲۵.۸۰۶۴۵
۱۰۹	۵	۶۲.۵	۱۳۹	۶	۴۱.۹۳۵۴۸	۱۶۹	۷	۲۸.۱۲۵
۱۱۰	۵	۴۳.۳۳۳۳۳	۱۴۰	۶	۴۰	۱۷۰	۷	۲۹.۰۳۳۲۶
۱۱۱	۵	۴۶.۶۶۶۶۷	۱۴۱	۶	۳۹.۳۹۳۹۴	۱۷۱	۷	۲۸.۱۲۵
۱۱۲	۵	۴۳.۳۳۳۳۳	۱۴۲	۶	۴۰.۶۲۵	۱۷۲	۷	۳۱.۲۵
۱۱۳	۵	۴۳.۳۳۳۳۳	۱۴۳	۶	۴۱.۹۳۵۴۸	۱۷۳	۷	۳۴.۳۷۵
۱۱۴	۵	۵۸.۳۳۳۳۳	۱۴۴	۶	۳۸.۷۰۹۶۸	۱۷۴	۷	۳۵.۴۸۳۸۷
۱۱۵	۵	۶۰.۸۶۹۵۷	۱۴۵	۶	۴۰.۶۲۵	۱۷۵	۷	۳۵.۴۸۳۸۷
۱۱۶	۵	۵۸.۳۳۳۳۳	۱۴۶	۶	۳۷.۵	۱۷۶	۷	۳۲.۲۵۸۰۶
۱۱۷	۵	۶۵.۲۱۷۳۹	۱۴۷	۶	۴۰	۱۷۷	۷	۳۲.۲۵۸۰۶
۱۱۸	۵	۶۹.۵۶۵۲۲	۱۴۸	۶	۴۰	۱۷۸	۷	۲۸.۸۸۸۸۹
۱۱۹	۵	۷۲.۷۲۷۲۷	۱۴۹	۶	۴۰	۱۷۹	۷	۳۰.۷۶۹۲۳
۱۲۰	۵	۷۶.۱۹۰۴۸	۱۵۰	۶	۴۰	۱۸۰	۷	۳۴.۲۱۰۵۳
۱۲۱	۵	۷۲.۷۲۷۲۷	۱۵۱	۶	۴۰	۱۸۱	۷	۳۴.۲۱۰۵۳

جدول پ- الف- ۱- ادامه

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۱۸۲	۷	۳۱.۵۷۸۹۵	۲۱۲	۸	۳۱.۴۲۸۵۷	۲۴۲	۸.۵	۱۵.۳۸۴۶۲
۱۸۳	۷	۳۰.۷۶۹۲۳	۲۱۳	۸	۳۱.۴۲۸۵۷	۲۴۳	۸.۵	۱۶
۱۸۴	۷	۲۳.۰۷۶۹۲	۲۱۴	۸	۳۱.۴۲۸۵۷	۲۴۴	۸.۵	۱۵.۳۸۴۶۲
۱۸۵	۷	۲۴	۲۱۵	۸	۳۱.۴۲۸۵۷	۲۴۵	۹	۲۳.۶۸۴۲۱
۱۸۶	۷	۲۸	۲۱۶	۸	۲۶.۳۱۵۷۹	۲۴۶	۹	۲۷.۷۷۷۷۸
۱۸۷	۷	۲۸	۲۱۷	۸	۲۷.۰۲۷۰۳	۲۴۷	۹	۲۷.۰۲۷۰۳
۱۸۸	۷	۵۳.۸۴۶۱۵	۲۱۸	۸	۲۹.۷۲۹۷۳	۲۴۸	۹	۲۵
۱۸۹	۷	۵۲	۲۱۹	۸	۲۵	۲۴۹	۹	۲۷.۷۷۷۷۸
۱۹۰	۷	۵۴.۱۶۶۶۷	۲۲۰	۸	۲۴.۳۲۴۳۲	۲۵۰	۹	۲۵
۱۹۱	۷	۵۴.۱۶۶۶۷	۲۲۱	۸	۲۴.۳۲۴۳۲	۲۵۱	۹	۲۱.۷۳۹۱۳
۱۹۲	۷	۵۴.۱۶۶۶۷	۲۲۲	۸	۵۳.۵۷۱۴۳	۲۵۲	۹	۲۲.۷۲۷۲۷
۱۹۳	۷	۵۴.۱۶۶۶۷	۲۲۳	۸	۵۵.۵۵۵۵۶	۲۵۳	۹	۲۵
۱۹۴	۷	۳۷.۹۳۱۰۳	۲۲۴	۸	۵۳.۸۴۶۱۵	۲۵۴	۹	۲۲.۷۲۷۲۷
۱۹۵	۷	۳۹.۲۸۵۷۱	۲۲۵	۸	۳۷.۵	۲۵۵	۹	۲۲.۷۲۷۲۷
۱۹۶	۷	۳۹.۲۸۵۷۱	۲۲۶	۸	۵۱.۸۵۱۸۵	۲۵۶	۹	۲۲.۷۲۷۲۷
۱۹۷	۷	۳۹.۲۸۵۷۱	۲۲۷	۸	۳۲.۳۵۲۹۴	۲۵۷	۹	۲۲.۷۲۷۲۷
۱۹۸	۷	۶۰	۲۲۸	۸	۳۴.۳۷۵	۲۵۸	۹	۲۴.۱۳۷۹۳
۱۹۹	۷	۶۰	۲۲۹	۸	۳۲.۲۵۸۰۶	۲۵۹	۹	۲۸.۵۷۱۴۳
۲۰۰	۷	۶۲.۵	۲۳۰	۸	۳۱.۲۵	۲۶۰	۹	۲۸.۵۷۱۴۳
۲۰۱	۷	۶۲.۵	۲۳۱	۸	۱۵	۲۶۱	۹	۲۸.۵۷۱۴۳
۲۰۲	۷	۶۲.۵	۲۳۲	۸	۱۸.۹۱۸۹۲	۲۶۲	۹	۳۱.۲۵
۲۰۳	۷.۵	۵۰	۲۳۳	۸	۱۸.۹۱۸۹۲	۲۶۳	۹	۳۲.۲۵۸۰۶
۲۰۴	۷.۵	۵۳.۵۷۱۴۳	۲۳۴	۸	۱۶.۲۱۶۲۲	۲۶۴	۹	۳۳.۳۳۳۳۳
۲۰۵	۷.۵	۵۰	۲۳۵	۸	۱۶.۲۱۶۲۲	۲۶۵	۹	۳۳.۳۳۳۳۳
۲۰۶	۷.۵	۵۱.۸۵۱۸۵	۲۳۶	۸	۵۱.۷۲۴۱۴	۲۶۶	۱۰	۵۰
۲۰۷	۷.۵	۳۶.۶۶۶۶۷	۲۳۷	۸	۵۵.۵۵۵۵۶	۲۶۷	۱۰	۵۰
۲۰۸	۷.۵	۳۹.۲۸۵۷۱	۲۳۸	۸	۵۵.۵۵۵۵۶	۲۶۸	۱۰	۵۰
۲۰۹	۷.۵	۳۹.۲۸۵۷۱	۲۳۹	۸	۵۳.۵۷۱۴۳	۲۶۹	۱۰	۵۰
۲۱۰	۷.۵	۳۹.۲۸۵۷۱	۲۴۰	۸.۵	۱۸.۵۱۸۵۲	۲۷۰	۱۰	۴۷.۰۵۸۸۲
۲۱۱	۸	۳۰.۵۵۵۵۶	۲۴۱	۸.۵	۱۹.۲۳۰۷۷	۲۷۱	۱۰	۵۰

جدول پ- الف- ۱ ادامه

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۲۷۲	۱۰	۵۰	۲۷۸	۱۰	۴۰.۶۲۵	۲۸۴	۱۰	۲۷.۰۲۷۰۳
۲۷۳	۱۰	۴۷.۳۶۸۴۲	۲۷۹	۱۰	۳۸.۷۰۹۶۸	۲۸۵	۱۰	۲۴.۳۲۴۳۲
۲۷۴	۱۰	۴۰.۶۲۵	۲۸۰	۱۰	۳۵.۴۸۳۸۷	۲۸۶	۱۰	۲۴.۳۲۴۳۲
۲۷۵	۱۰	۳۷.۵	۲۸۱	۱۰	۳۳.۳۳۳۳۳	۲۸۷	۱۰	۲۷.۷۷۷۷۸
۲۷۶	۱۰	۴۰.۶۲۵	۲۸۲	۱۰	۳۲.۲۵۸۰۶	۲۸۸	۱۰	۲۴.۳۲۴۳۲
۲۷۷	۱۰	۳۸.۷۰۹۶۸	۲۸۳	۱۰	۲۴.۳۹۰۲۴			

جدول پ- الف- ۲

داده‌های ترک عرضی داخل محوطه دانشگاه

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۱	۲	۹۱.۳۰۴۳۵	۲۳	۳	۷۶.۹۲۳۰۸	۴۵	۳	۷۷.۳۳۳۳۳
۲	۲	۹۲.۸۵۷۱۴	۲۴	۳	۷۸.۱۲۵	۴۶	۳	۷۴.۰۲۵۹۷
۳	۲	۹۰.۴۷۶۱۹	۲۵	۳	۸۴.۲۱۰۵۳	۴۷	۳	۷۴.۰۲۵۹۷
۴	۲	۹۰.۴۷۶۱۹	۲۶	۳	۸۴.۴۸۲۷۶	۴۸	۳	۷۷.۰۲۷۰۳
۵	۲	۹۷.۵۶۰۹۸	۲۷	۳	۸۷.۷۱۹۳	۴۹	۳	۷۳.۳۳۳۳۳
۶	۲	۹۰.۴۷۶۱۹	۲۸	۳	۸۷.۵	۵۰	۵	۶۷.۱۸۷۵
۷	۲	۷۷.۱۹۲۹۸	۲۹	۳	۸۷.۵	۵۱	۵	۶۸.۸۵۲۴۶
۸	۲	۹۶.۰۷۸۴۳	۳۰	۳	۸۵.۹۶۴۹۱	۵۲	۵	۶۸.۸۵۲۴۶
۹	۲	۹۴	۳۱	۳	۸۴.۴۸۲۷۶	۵۳	۵	۶۷.۷۴۱۹۴
۱۰	۲	۹۲.۱۵۶۸۶	۳۲	۳	۸۵.۹۶۴۹۱	۵۴	۵	۶۹.۳۵۴۸۴
۱۱	۲	۸۰	۳۳	۳	۸۲.۷۵۸۶۲	۵۵	۵	۷۰.۴۹۱۸
۱۲	۲	۸۱.۴۸۱۴۸	۳۴	۳	۹۶.۸۲۵۴	۵۶	۵	۶۱.۵۳۸۴۶
۱۳	۲	۸۴.۹۰۵۶۶	۳۵	۳	۸۷.۶۵۴۳۲	۵۷	۵	۶۹.۵۶۵۲۲
۱۴	۲	۸۴.۹۰۵۶۶	۳۶	۳	۹۱.۰۲۵۶۴	۵۸	۵	۷۱.۱۱۱۱۱
۱۵	۲	۸۶.۵۳۸۴۶	۳۷	۳	۸۶.۰۷۵۹۵	۵۹	۵	۶۹.۵۶۵۲۲
۱۶	۲	۸۶.۵۳۸۴۶	۳۸	۳	۸۵.۸۹۷۴۴	۶۰	۵	۶۹.۵۶۵۲۲
۱۷	۲	۸۶.۵۳۸۴۶	۳۹	۳	۸۷.۱۷۹۴۹	۶۱	۵	۷۱.۱۱۱۱۱
۱۸	۲	۸۶.۵۳۸۴۶	۴۰	۳	۸۷.۰۱۲۹۹	۶۲	۵	۶۹.۵۶۵۲۲
۱۹	۳	۷۲.۷۲۷۲۷	۴۱	۳	۸۸.۳۱۱۶۹	۶۳	۵	۶۹.۵۶۵۲۲
۲۰	۳	۷۴.۲۴۲۴۲	۴۲	۳	۸۷.۰۱۲۹۹	۶۴	۵	۶۰.۹۷۵۶۱
۲۱	۳	۷۳.۱۳۴۳۳	۴۳	۳	۷۷.۰۲۷۰۳	۶۵	۵	۶۰.۹۷۵۶۱
۲۲	۳	۸۰.۹۵۲۳۸	۴۴	۳	۷۸.۶۶۶۶۷	۶۶	۵	۶۲.۵

جدول پ- الف- ۲- ادامه

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۶۷	۵	۶۲.۵	۹۸	۱۰	۱۳.۱۵۷۸۹	۱۲۹	۱۱	۱۵.۲۵۴۲۴
۶۸	۵	۶۲.۵	۹۹	۱۰	۱۳.۱۵۷۸۹	۱۳۰	۱۱	۱۶.۶۶۶۶۷
۶۹	۵	۶۲.۵	۱۰۰	۱۰	۱۳.۵۱۳۵۱	۱۳۱	۱۱	۱۱.۷۶۴۷۱
۷۰	۵	۶۲.۵	۱۰۱	۱۰	۱۳.۵۱۳۵۱	۱۳۲	۱۱	۱۱.۵۳۸۴۶
۷۱	۵	۵۷.۱۴۲۸۶	۱۰۲	۱۰	۱۶.۲۱۶۲۲	۱۳۳	۱۱	۱۱.۳۲۰۷۵
۷۲	۵	۵۸.۹۲۸۵۷	۱۰۳	۱۰	۳۲.۳۳۳۳۳	۱۳۴	۱۱	۱۱.۳۲۰۷۵
۷۳	۵	۵۴.۵۴۵۴۵	۱۰۴	۱۰	۳۲.۱۴۲۸۶	۱۳۵	۱۱	۱۱.۵۳۸۴۶
۷۴	۵	۶۰	۱۰۵	۱۰	۳۴.۴۸۲۷۶	۱۳۶	۱۱	۱۱.۷۶۴۷۱
۷۵	۵	۵۸.۱۸۱۸۲	۱۰۶	۱۰	۳۲.۳۳۳۳۳	۱۳۷	۱۱	۱۱.۵۳۸۴۶
۷۶	۵	۶۰	۱۰۷	۱۰	۳۲.۱۴۲۸۶	۱۳۸	۱۱	۵۶.۸۶۲۷۵
۷۷	۵	۶۰	۱۰۸	۱۰	۳۲.۳۳۳۳۳	۱۳۹	۱۱	۵۹.۵۷۴۴۷
۷۸	۸	۱۳.۳۳۳۳۳	۱۰۹	۱۰	۲۰.۵۸۸۲۴	۱۴۰	۱۱	۵۹.۵۷۴۴۷
۷۹	۸	۱۵.۵۵۵۵۵	۱۱۰	۱۰	۲۲.۵۸۰۶۵	۱۴۱	۱۱	۵۷.۵۷۵۷۶
۸۰	۸	۱۷.۳۹۱۳	۱۱۱	۱۰	۲۶.۶۶۶۶۷	۱۴۲	۱۱	۵۷.۵۷۵۷۶
۸۱	۸	۱۵.۲۱۷۳۹	۱۱۲	۱۰	۲۲.۳۳۳۳۳	۱۴۳	۱۱	۵۹.۳۷۵
۸۲	۸	۱۷.۳۹۱۳	۱۱۳	۱۰	۲۴.۱۳۷۹۳	۱۴۴	۱۱	۵۷.۵۷۵۷۶
۸۳	۸	۱۵.۲۱۷۳۹	۱۱۴	۱۰	۲۴.۱۳۷۹۳	۱۴۵	۱۱	۵۶.۲۵
۸۴	۸	۱۵.۲۱۷۳۹	۱۱۵	۱۰	۳۰.۳۰۳۰۳	۱۴۶	۱۱	۴۴.۸۲۷۵۹
۸۵	۸	۱۵.۲۱۷۳۹	۱۱۶	۱۰	۳۶.۶۶۶۶۷	۱۴۷	۱۱	۳۷.۵
۸۶	۱۰	۲۰.۷۵۴۷۲	۱۱۷	۱۰	۳۷.۹۳۱۰۳	۱۴۸	۱۱	۴۰
۸۷	۱۰	۲۱.۱۵۳۸۵	۱۱۸	۱۰	۳۷.۹۳۱۰۳	۱۴۹	۱۱	۴۰
۸۸	۱۰	۲۱.۱۵۳۸۵	۱۱۹	۱۰	۳۷.۹۳۱۰۳	۱۵۰	۱۱	۴۱.۳۷۹۳۱
۸۹	۱۰	۱۹.۲۳۰۷۷	۱۲۰	۱۰	۳۷.۹۳۱۰۳	۱۵۱	۱۱	۳۱.۲۵
۹۰	۱۰	۱۸.۸۶۷۹۲	۱۲۱	۱۱	۱۷.۱۸۷۵	۱۵۲	۱۱	۳۰.۳۰۳۰۳
۹۱	۱۰	۲۰.۳۷۰۳۷	۱۲۲	۱۱	۱۶.۹۴۹۱۵	۱۵۳	۱۱	۲۷.۲۷۲۷۳
۹۲	۱۰	۲۲.۶۴۱۵۱	۱۲۳	۱۱	۱۸.۰۳۲۷۹	۱۵۴	۱۱	۲۷.۲۷۲۷۳
۹۳	۱۰	۲۰.۷۵۴۷۲	۱۲۴	۱۱	۱۶.۹۴۹۱۵	۱۵۵	۱۱	۲۸.۱۲۵
۹۴	۱۰	۲۱.۱۵۳۸۵	۱۲۵	۱۱	۱۶.۹۴۹۱۵	۱۵۶	۱۱	۲۸.۱۲۵
۹۵	۱۰	۲۰.۷۵۴۷۲	۱۲۶	۱۱	۱۶.۹۴۹۱۵	۱۵۷	۱۱	۲۷.۲۷۲۷۳
۹۶	۱۰	۲۰.۳۷۰۳۷	۱۲۷	۱۱	۱۷.۲۴۱۳۸	۱۵۸	۱۲	۳۱.۹۱۴۸۹
۹۷	۱۰	۱۳.۱۵۷۸۹	۱۲۸	۱۱	۱۶.۹۴۹۱۵	۱۵۹	۱۲	۳۱.۸۱۸۱۸

جدول پ- الف- ۲ ادامه

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۱۶۰	۱۲	۳۲.۵۵۸۱۴	۱۷۷	۱۲	۲۳.۵۲۹۴۱	۱۹۷	۱۳	۲۲.۸۵۷۱۴
۱۶۱	۱۲	۳۶.۶۶۶۶۷	۱۷۸	۱۲	۲۲.۸۵۷۱۴	۱۹۸	۱۳	۲۲.۲۲۲۲۲
۱۶۲	۱۲	۳۷.۹۳۱۰۳	۱۷۹	۱۲	۲۲.۸۵۷۱۴	۱۹۹	۱۳	۲۲.۸۵۷۱۴
۱۶۳	۱۲	۳۷.۹۳۱۰۳	۱۸۰	۱۲	۳۲.۴۳۲۴۳	۲۰۰	۱۳	۲۲.۸۵۷۱۴
۱۶۴	۱۲	۳۹.۲۸۵۷۱	۱۸۱	۱۲	۳۵.۲۹۴۱۲	۲۰۱	۱۴	۲۰.۴۰۸۱۶
۱۶۵	۱۲	۳۹.۲۸۵۷۱	۱۸۲	۱۲	۳۲.۳۵۲۹۴	۲۰۲	۱۴	۲۰.۴۵۴۵۵
۱۶۶	۱۲	۳۵.۷۱۴۲۹	۱۸۳	۱۲	۳۳.۳۳۳۳۳	۲۰۳	۱۴	۲۰.۹۳۰۲۳
۱۶۷	۱۲	۲۵	۱۸۴	۱۲	۳۱.۴۲۸۵۷	۲۰۴	۱۴	۲۰.۹۳۰۲۳
۱۶۸	۱۲	۲۴.۳۹۰۲۴	۱۸۵	۱۲	۲۰.۵۸۸۲۴	۲۰۵	۱۴	۲۰.۴۵۴۵۵
۱۶۹	۱۲	۲۴.۳۹۰۲۴	۱۸۶	۱۲	۲۵.۸۰۶۴۵	۲۰۶	۱۵	۳۸.۷۰۹۶۸
۱۷۰	۱۲	۲۵	۱۸۷	۱۲	۲۵.۸۰۶۴۵	۲۰۷	۱۵	۳۵.۴۸۳۸۷
۱۷۱	۱۲	۲۵	۱۹۱	۱۲	۲۶.۶۶۶۶۷	۲۰۸	۱۵	۳۲.۲۵۸۰۶
۱۷۲	۱۲	۲۵	۱۹۲	۱۲	۲۶.۶۶۶۶۷	۲۰۹	۱۵	۳۵.۴۸۳۸۷
۱۷۳	۱۲	۲۵	۱۹۳	۱۳	۱۰.۵۲۶۳۲	۲۱۰	۱۵	۳۳.۳۳۳۳۳
۱۷۴	۱۲	۲۰	۱۹۴	۱۳	۱۱.۴۲۸۵۷	۲۱۱	۱۵	۳۳.۳۳۳۳۳
۱۷۵	۱۲	۲۲.۸۵۷۱۴	۱۹۵	۱۳	۱۱.۴۲۸۵۷	۲۱۲	۱۵	۳۲.۲۵۸۰۶
۱۷۶	۱۲	۲۳.۵۲۹۴۱	۱۹۶	۱۳	۲۰.۵۱۲۸۲			

جدول پ- الف- ۳

داده‌های ترک طولی جاده شاهرود-میامی

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۱	۱	۸۲.۹۶۲۹	۹	۱	۷۹.۰۶۹۷۷	۱۷	۲	۸۳.۳۳۳۳۳
۲	۱	۸۳.۳۳۳۳۳	۱۰	۲	۷۸.۱۲۵	۱۸	۲	۸۰
۳	۱	۸۰	۱۱	۲	۶۳.۹۶۸۲	۱۹	۲	۷۸.۲۶۰۸۷
۴	۱	۸۸.۳۷۲۰۹	۱۲	۲	۸۴.۲۱۰۵۳	۲۰	۲	۶۱.۸۵۱۸
۵	۱	۸۷.۹۳۱۰۳	۱۳	۲	۶۶.۰۳۷۷۴	۲۱	۲	۶۵.۱۱۶۲۸
۶	۱	۹۵	۱۴	۲	۸۰.۴۸۷۸	۲۲	۲	۷۱.۴۲۸۵۷
۷	۱	۹۳.۱۰۳۴۵	۱۵	۲	۶۸.۰۸۵۱۱	۲۳	۲	۸۲.۹۲۶۸۳
۸	۱	۸۱.۳۹۵۳۵	۱۶	۲	۷۷.۵۵۱۰۲	۲۴	۳	۸۳.۳۳۳۳۳

جدول پ- الف- ۳ ادامہ

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۲۵	۳	۸۲.۱۴۲۸۶	۵۵	۴	۶۶.۰۳۷۷۴	۸۵	۵	۵۹.۵۲۳۸۱
۲۶	۳	۶۲.۷۹۰۷	۵۶	۴	۷۰.۹۶۷۷۴	۸۶	۵	۷۵
۲۷	۳	۷۱.۶۹۸۱۱	۵۷	۴	۷۵	۸۷	۵	۵۲.۸۵۷۱۴
۲۸	۳	۷۴.۱۹۳۵۵	۵۸	۴	۵۰	۸۸	۵	۶۳.۷۶۸۱۲
۲۹	۳	۵۸.۷۳۰۱۶	۵۹	۴	۵۶.۴۱۰۲۶	۸۹	۵	۶۵.۱۵۱۵۲
۳۰	۳	۶۱.۵۳۸۴۶	۶۰	۴	۵۰	۹۰	۵	۶۱.۵۳۸۴۶
۳۱	۳	۵۶.۵۲۱۷۴	۶۱	۴	۶۸	۹۱	۵	۵۰
۳۲	۳	۶۶.۶۶۶۶۷	۶۲	۴	۷۱.۴۲۸۵۷	۹۲	۵	۷۰.۳۷۰۳۷
۳۳	۳	۵۳.۴۴۸۲۸	۶۳	۴	۵۰	۹۳	۵	۴۵.۲۳۸۱
۳۴	۳	۶۰.۸۶۹۵۷	۶۴	۴	۵۵.۵۵۵۵۶	۹۴	۵	۵۳.۷۳۱۳۴
۳۵	۳	۶۲.۲۶۴۱۵	۶۵	۴	۶۷.۱۸۷۵	۹۵	۵	۶۴.۲۸۵۷۱
۳۶	۳	۶۹.۶۴۲۸۶	۶۶	۴	۷۷.۵۵۱۰۲	۹۶	۵	۷۶
۳۷	۳	۵۷.۱۴۲۸۶	۶۷	۴	۵۸.۴۶۱۵۴	۹۷	۵	۶۸.۰۸۵۱۱
۳۸	۳	۵۲.۶۳۱۵۸	۶۸	۴	۶۶.۶۶۶۶۷	۹۸	۵	۷۱.۴۲۸۵۷
۳۹	۳	۷۳.۱۷۰۷۳	۶۹	۴	۵۲.۲۳۸۸۱	۹۹	۵	۶۱.۵۳۸۴۶
۴۰	۳	۷۶.۵۶۲۵	۷۰	۴	۶۶.۶۶۶۶۷	۱۰۰	۵	۴۶.۸۰۸۵۱
۴۱	۳	۶۴.۴۴۴۴۴	۷۱	۴	۷۸.۸۴۶۱۵	۱۰۱	۵	۶۳.۳۳۳۳۳
۴۲	۳	۵۸.۶۹۵۶۵	۷۲	۴	۷۴.۳۵۸۹۷	۱۰۲	۵	۵۲.۵۶۴۱
۴۳	۳	۸۲.۸۹۴۷۴	۷۳	۴	۶۰.۶۰۶۰۶	۱۰۳	۵	۴۸.۴۸۴۸۵
۴۴	۳	۵۷.۱۴۲۸۶	۷۴	۴	۶۰	۱۰۴	۵	۶۹.۸۴۱۲۷
۴۵	۳	۷۳.۹۱۳۰۴	۷۵	۴	۷۵	۱۰۵	۵	۶۷.۹۲۴۵۳
۴۶	۳	۵۹.۵۵۰۵۶	۷۶	۴	۵۶.۸۱۸۱۸	۱۰۶	۵	۵۲.۶۳۱۵۸
۴۷	۳	۵۹.۳۷۵	۷۷	۴	۵۴.۲۳۷۲۹	۱۰۷	۵	۵۹.۰۹۰۹۱
۴۸	۳	۶۰.۶۰۶۰۶	۷۸	۴	۷۴.۲۸۵۷۱	۱۰۸	۵	۶۵.۸۵۳۶۶
۴۹	۴	۶۲.۷۱۱۸۶	۷۹	۴	۶۷.۳۹۱۳	۱۰۹	۵	۶۸.۴۲۱۰۵
۵۰	۴	۵۵.۵۵۵۵۶	۸۰	۴	۶۷.۳۹۱۳	۱۱۰	۵	۶۶.۶۶۶۶۷
۵۱	۴	۵۶.۸۹۶۵۵	۸۱	۴	۵۳.۷۰۳۷	۱۱۱	۵	۶۷.۵۶۷۵۷
۵۲	۴	۶۳.۲۶۵۳۱	۸۲	۵	۵۷.۶۹۲۳۱	۱۱۲	۵	۵۵.۳۵۷۱۴
۵۳	۴	۷۱.۴۲۸۵۷	۸۳	۵	۶۷.۳۰۷۶۹	۱۱۳	۵	۶۴.۷۰۵۸۸
۵۴	۴	۵۹.۵۲۳۸۱	۸۴	۵	۷۲.۲۲۲۲۲	۱۱۴	۵	۵۷.۶۲۷۱۲

جدول پ- الف- ۳- ادامه

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۱۱۵	۵	۶۴	۱۴۵	۶	۶۷.۳۰۲۵	۱۷۵	۶	۴۱.۰۲۵۶۴
۱۱۶	۵	۵۶.۸۶۲۷۵	۱۴۶	۶	۴۳.۳۳۳۳۳	۱۷۶	۶	۴۴.۹۲۷۵۴
۱۱۷	۵	۵۲	۱۴۷	۶	۶۵.۳۰۶۱۲	۱۷۷	۶	۴۰.۹۸۳۶۱
۱۱۸	۵	۴۹.۰۹۰۹۱	۱۴۸	۶	۴۵.۹۴۵۹۵	۱۷۸	۶	۵۶.۲۵
۱۱۹	۵	۶۹.۲۳۰۷۷	۱۴۹	۶	۳۹.۶۵۵۱۷	۱۷۹	۶	۶۴.۱۰۲۵۶
۱۲۰	۵	۶۳.۳۳۳۳۳	۱۵۰	۶	۴۴.۴۴۴۴۴	۱۸۰	۶	۵۴.۵۴۵۴۵
۱۲۱	۵	۵۲.۵۶۴۱	۱۵۱	۶	۵۳.۶۵۸۵۴	۱۸۱	۶	۵۲.۵۴۲۳۷
۱۲۲	۵	۴۸.۴۸۴۸۵	۱۵۲	۶	۴۱.۴۶۳۴۱	۱۸۲	۷	۵۹.۵۲۳۸۱
۱۲۳	۵	۶۹.۸۴۱۲۷	۱۵۳	۶	۳۸.۸۸۸۸۹	۱۸۳	۷	۴۷.۲۷۲۷۳
۱۲۴	۵	۶۷.۹۲۴۵۳	۱۵۴	۶	۶۳.۶۳۶۳۶	۱۸۴	۷	۴۵.۷۱۴۲۹
۱۲۵	۵	۵۲.۶۳۱۵۸	۱۵۵	۶	۵۳.۴۸۸۳۷	۱۸۵	۷	۵۹.۳۲۲۰۳
۱۲۶	۵	۵۹.۰۹۰۹۱	۱۵۶	۶	۳۸.۶۳۶۳۶	۱۸۶	۷	۵۰
۱۲۷	۵	۶۵.۸۵۳۶۶	۱۵۷	۶	۵۶.۲۵	۱۸۷	۷	۴۴.۱۸۶۰۵
۱۲۸	۵	۶۸.۴۲۱۰۵	۱۵۸	۶	۳۸.۲۹۷۸۷	۱۸۸	۷	۴۰
۱۲۹	۵	۶۶.۶۶۶۶۷	۱۵۹	۶	۴۲.۳۷۲۸۸	۱۸۹	۷	۴۶.۳۴۱۴۶
۱۳۰	۵	۶۷.۵۶۷۵۷	۱۶۰	۶	۳۷.۷۷۷۷۸	۱۹۰	۷	۵۰
۱۳۱	۵	۵۵.۳۵۷۱۴	۱۶۱	۶	۳۹.۰۲۴۳۹	۱۹۱	۷	۵۳.۷۰۳۷
۱۳۲	۵	۶۴.۷۰۵۸۸	۱۶۲	۶	۳۹.۰۲۴۳۹	۱۹۲	۷	۵۳.۶۲۳۱۹
۱۳۳	۵	۵۷.۶۲۷۱۲	۱۶۳	۶	۵۱.۳۵۱۳۵	۱۹۳	۷	۴۵.۲۳۸۱
۱۳۴	۵	۶۴	۱۶۴	۶	۳۵.۴۱۶۶۷	۱۹۴	۷	۵۱.۰۶۳۸۳
۱۳۵	۵	۵۶.۸۶۲۷۵	۱۶۵	۶	۶۷.۸۵۷۱۴	۱۹۵	۷	۵۱.۰۲۰۴۱
۱۳۶	۵	۵۲	۱۶۶	۶	۵۹.۳۲۲۰۳	۱۹۶	۷	۴۸.۶۴۸۶۵
۱۳۷	۵	۴۹.۰۹۰۹۱	۱۶۷	۶	۶۰.۷۸۴۳۱	۱۹۷	۷	۴۰.۶۲۵
۱۳۸	۵	۶۹.۲۳۰۷۷	۱۶۸	۶	۶۸.۵۱۸۵۲	۱۹۸	۷	۵۴.۳۲۰۹۹
۱۳۹	۶	۶۷.۵	۱۶۹	۶	۳۶.۱۷۰۲۱	۱۹۹	۷	۳۹.۴۳۶۶۲
۱۴۰	۶	۳۸.۴۶۱۵۴	۱۷۰	۶	۴۸.۳۳۳۳۳	۲۰۰	۸	۴۳.۲۸۳۵۸
۱۴۱	۶	۵۷.۶۲۷۱۲	۱۷۱	۶	۶۳.۶۳۶۳۶	۲۰۱	۸	۶۰
۱۴۲	۶	۵۲.۶۳۱۵۸	۱۷۲	۶	۶۹	۲۰۲	۸	۵۲.۷۷۷۷۸
۱۴۳	۶	۵۸.۳۳۳۳۳	۱۷۳	۶	۴۵.۸۳۳۳۳	۲۰۳	۸	۴۱.۰۲۵۶۴
۱۴۴	۶	۵۸.۳۳۳۳۳	۱۷۴	۶	۴۶.۱۵۳۸۵	۲۰۴	۸	۴۱.۸۶۰۴۷

جدول پ- الف- ۳- ادامه

شماره	W	LTE	شماره	W	LTE	شماره	W	LTE
۲۰۵	۸	۴۸.۰۷۶۹۲	۲۱۱	۸	۵۸.۱۳۹۵۳	۲۱۷	۹	۵۳.۳۳۳۳۳
۲۰۶	۸	۳۷.۲۵۴۹	۲۱۲	۸	۴۳.۳۳۳۳۳	۲۱۸	۹	۳۵.۴۸۳۸۷
۲۰۷	۸	۴۴.۶۸۰۸۵	۲۱۳	۹	۳۷.۹۳۱۰۳	۲۱۹	۹	۴۷.۰۵۸۸۲
۲۰۸	۸	۴۸	۲۱۴	۹	۳۷.۷۳۵۸۵	۲۲۰	۹	۳۲.۶۵۳۰۶
۲۰۹	۸	۴۷.۶۱۹۰۵	۲۱۵	۹	۵۱.۱۶۲۷۹	۲۲۱	۹	۴۸.۹۷۹۵۹
۲۱۰	۸	۴۸.۴۸۴۸۵	۲۱۶	۹	۴۳.۷۵	۲۲۲	۹	۴۱.۵۰۹۴۳

Abstract

The main purpose of this study is to evaluate the effects of transverse and longitudinal cracking of asphalt pavements on load transfer efficiency (LTE) using data obtained from PFWD. It will also be investigated the longitudinal and transverse cracking with the same width by their load transfer efficiency (LTE). So, two pavements different in asphalt thickness, pavement pattern and life were chosen to collect data regarding the deflections and fallings of the 900 different spots of transverse and longitudinal cracks on these pavements using PFWD. After the field data was examined, a new formula was proposed for LTE calculation which is expected to be more accurate than previous formulas. A numerical model formed in Abacus software was used to investigate the LTE mechanism on transverse cracks with more precision, the results of which confirmed the validity of this model compared to field data results. Based on the results obtained from the numerical model and field tests, it was observed that LTE in transverse cracks of asphalt pavement was dependent on the crack's width and asphalt's thickness. Also, the data was analyzed by descriptive statistical methods such as box plot, t-test, regression analysis and time history of PFWD. The results indicated that in both types of cracks, as the width of the cracks increased, the load transfer efficiency decreased. It was also found that in the cracks with the same width, the load transfer efficiency was different for both longitudinal and transverse cracks. It was also proved that the cracks, the longitudinal cracking of which was less than 5mm and the cracks the transverse tracking of which was larger than 5mm had more significant effects on dropping the load transfer efficiency in asphalt pavements. Later in this study, in order to choose a crack-repair method, LTE parameter will be used as a substitute for "width of crack" parameter, yielding different results comparing to the results found in conventional methods.

Keywords: load transfer efficiency (LTE); portable falling weight deflectometer (PFWD); transverse crack; longitudinal crack; asphalt pavement.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc.Thesis in Road and Transport Engineering

**Investigation of the loss of quality of load bearing capacity of
pavement effect to longitudinal and transverse cracking using PFWD
and its simulation with ABAQUS finite element software**

By:

Ramin Khafajeh

Supervisor:

Dr. Hosein Ghasemzadeh Tehrani

Advisor:

Dr. Farnoosh Basaligheh

December 2017