مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره هجدهم، شماره ۵، سال ۱۳۹۷

ارتباط بین شاخص ساختار–ترافیک و عملکرد روسازی راه‌های روستایی

هادی وطن میدانشاهی[۱]، محمدمهدی خبیری[۲*]، محمد محمدکریمی[۳]

۱-کارشناس ارشد مهندسی عمران، راه و ترابری، دانشگاه یزد
۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، راه و ترابری، دانشگاه یزد
۳- استادیار مهندسی عمران، راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

***mkhabiri@yazd.ac.ir**

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۲/۲۰] تاریخ پذیرش: [۹۷/۰۱/۱٤]

چکیده

ساختار لایه‌ای روسازی راه‌های روستایی تحت ترافیک سنگین به دلیل رعایت هم‌زمان مسائل اقتصادی و فنی دارای اهمیت خاصی است. در این پژوهش با بررسی مطالعه موردی روسازی یک راه روستایی، مدل‌های مختلف لایه‌ای یک راه تحت عبور ترافیک تریلرهای کشاورزی بررسی شده است. برای شناسایی کردن مدل‌های مختلف راه از شاخص ساختار-ترافیک (STI[۱]) استفاده شده است. این شاخص از تقسیم عدد سازه‌ای روسازی بر مجذور پارامتر بارگذاری ترافیک بدست‌می‌آید در ابتدا با استفاده از مدلسازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مشخص شد که تریلرهای ۱۲ چرخ با محور تریدم اثر مخرب‌تری نسبت به تریلرهای ۱۸ چرخ با محور تاندم روی روسازی دارند و تریلر اسکانیا جی، به عنوان تریلر بحرانی مبنای محاسبات قرار گرفت. سپس مدل‌های مختلف روسازی برای خرابی خستگی و شیارشدگی به صورت جداگانه در اثر عبور تریلر بحرانی بررسی شد. در مدلسازی سناریوهای مختلف برای مدل راه مشاهده شد که افزایش ۲/۵ سانتی‌متری در ضخامت آسفالت گرم باعث ۲۳ درصد کاهش تنش کششی زیر لایه آسفالت می‌شود و همچنین افزایش ۵ سانتی‌متری آن باعث ٤۱ درصد کاهش در این تنش می‌شود. همچنین در این پژوهش سعی شده است به تاثیر لایه‌های مختلف روسازی در کاهش پارامترهای خرابی شیارشدگی و خستگی پرداخته شود که مهمترین آن، تاثیر قابل ملاحظه لایه آسفالت سرد در کاهش خرابی شیارشدگی است به طوری که حتی استفاده از لایه آسفالت سرد از اجراء مجموع دو لایه اساس و زیراساس، باعث کاهش پارامتر خرابی شیارشدگی به میزان ٪۱۵ است.

واژگان کلیدی: تریلرهای کشاورزی، راه‌روستایی، شاخص ساختار-ترافیک STI، عملکرد روسازی، مدلسازی عددی.

۱-مقدمه

معمولا به دلیل اهمیت کمی که راه‌های روستایی دارند، پژوهش‌های کمی برای بررسی رفتار روسازی این‌گونه از راه-ها تحت عبور و مرور وسایل نقلیه صورت گرفته است. اما در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تصادفات در راه‌های روستایی

1 Structure-Traffic Index

ناشی از خرابی‌های سطح روسازی و همچنین به‌دلیل اعتبارات کم برای بهسازی و نوسازی این‌گونه از راه‌ها، نیاز به بررسی-های بیشتر در مورد علل خرابی‌ها و جلوگیری از این عوامل پدیدار شد. به طوری که در طی یک روند صعودی افزایش تصادفات در راه‌های روستایی در سال‌های اخیر در برخی از استان‌های با جمعیت روستایی قابل توجه، در سال ۱۳۹۱ به طور متوسط ٪۲۰ فوت شدگان در راه‌های روستایی اتفاق می‌افتد، که این آمار برای راه‌های کم تردد روستایی نگران کننده است [1]. از طرف دیگر نتایج تحلیل‌های آماری و رگرسیونی نشان می‌دهد که وضعیت روسازی راه اثر قابل توجهی روی تصادفات فردی و چند وسیله‌ای دارد [2]. جاده به طور متوسط سهم ۲۰ درصدی در افزایش تعداد وشدت حوادث به خود اختصاص داده‌است. از عوامل جاده‌ای تصادفات راه‌های روستایی به ناهمواری روسازی ضعیف سهمی نسبت داده می‌شود، پس توجه به کاهش خرابی‌ها برای ایمن‌سازی رویه راه‌ها نیاز است، مورد توجه پژوهش‌های جدید قرارگیرد [3]. فانوس و همکاران در سال ۱۹۹۹ اثر عبورومرور ماشین‌آلات کشاورزی روی روسازی راه‌ها ایالت آیووای آمریکا را بررسی کردند. یکی از مهمترین نتایج آنها، تفاوت در میزان کرنش و تنش ایجاد شده ناشی از ماشین‌های چرخ زنجیری و دیگر ماشین‌ها بود. در انتهای بررسی‌ها مشخص شد؛ که ماشین‌های چرخ زنجیری اثر مخرب کمتری نسبت به سایر وسایل روی سطح روسازی دارند، زیرا این-گونه وسایل سطح تماس بیشتری با سطح روسازی دارند [3].

در سال ۱۹۹۹ سبعلی و همکاران پژوهش دیگر درباره اثر ماشین‌های بزرگ کشاورزی را بر راه‌های ایالت داکوتای جنوبی انجام دادند. آنها با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی مشخص کردند اگر سرعت این وسایل از ٤٠ مایل بر ساعت به ۲۰ مایل بر ساعت کاهش یابد، باعث ۳۰ تا ٤٠ درصد کرنش افزوده می‌شود در حالیکه تغییرات تنش و خیز ناچیز است [4].

یکی از کاملترین پژوهش‌ها درباره اثر وسایل نقلیه کشاورزی بر راه‌های روستایی طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ در ایالت مینه‌سوتا توسط پژوهشگران دانشگاه این ایالت صورت گرفت. آنها اثر چندین نوع وسیله کشاورزی را با آرایش‌های متفاوت در محورها و همچنین در فصل‌های مختلف سال روی روسازی بررسی کردند. در طول این پژوهش مشاهده شد که وسایل با محورهای کم حتی با وزن کم اثر مخرب‌تری نسبت به وسایل سنگین‌تر با تعداد محورهای بیشتر دارند و آنها می‌توانند تنش و کرنش قابل‌توجهی در روسازی ایجاد کنند [5].

در گزارشی از پژوهش انجام شده در ایالت ویسکانسین در سال ۲۰۱۳ آمده است که افزایش ۲۰ درصدی بار مجاز وسایل نقلیه کشاورزی می‌تواند تا ۱۰۰ درصد برای راه‌های روستایی مخرب باشد. به دلیل عدم وجود شانه روسازی شده برای راه روستایی موردنظر، کرنش زیرسطح روسازی و تنش فشاری روی زیرسازی راه تا سطح قابل توجهی تحت بارگذاری این وسایل افزایش می‌یابد که باعث بروز خرابی پکیدگی شدید در کناره‌های لبه رویه روسازی می‌شود [6].

یونگ هونگ و همکاران در سال ۲۰۱٦ برای تعیین مناسب بودن ترافیک عبوری از سطح یک راه با مشخصات ساختاری مرتبط با راه، شاخص ترافیک‌ساختار یا STI[1] را معرفی کردند [7]. این شاخص از تقسیم پارامتر ساختار روسازی بر مجذور پارامتر بارگذاری ترافیک به دست می‌آید. از طرف دیگر پارامتر بارگذاری ترافیک یا TI نیز به صورت نسبت هر سطح تعداد تکرار عبور وسایل نقلیه(سبک، متوسط، سنگین) به کمترین تعداد تکرار ترافیک عبوری تعریف می‌شود. بنابراین با به دست‌آوردن پارامتر بارگذاری ترافیک برای سنگین‌ترین ترافیک عبوری از یک راه و با استفاده از پارامتر ساختار روسازی راه، می‌توان میزان تحمل بار و مناسب‌بودن بار عبوری را بررسی‌کرد. هر میزان که شاخص STI برای یک راه کوچکتر باشد، ساختار روسازی برای تحمل سطح بار موردنظر مناسب نبوده و روند تخریب روسازی سریع‌تر رخ می‌دهد. در این پژوهش برای بررسی مناسب بودن ساختار لایه‌ای یک راه با ترافیک عبوری از آن، از شاخص ترافیک-ساختار یا STI استفاده می‌شود. یونگ هونگ و همکاران در سال ۲۰۱٦ با بررسی ۸ ساختار متفاوت راه در ایالت‌های

مختلف کشور چین و به کار بردن سطوح ترافیک سبک، متوسط، سنگین و خیلی سنگین، شاخص STI را به دست آورده و با ارتباط دادن آن با PSI راه، هزینه نگهداری هر کیلومتر از راه به دست آوردند. آنها بعد از تحلیل داده‌ها، نشان دادند که هر چه این شاخص کاهش یابد، هزینه‌های نگهداری افزایش می‌یابد [7].

در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۷ برای جاده‌ای با حجم ترافیک کم یا جاده‌های روستایی برای بررسی وضعیت سازه‌ای روسازی از ابزار آزمایش غیرمخرب قابل حمل(LWD[1]) برای ظرفیت باربری روسازی استفاده شد و با کمک نرم‌افزارهای تحلیلی لایه‌ای[2] محاسبه عکس‌العمل‌های بحرانی برای طراحی روکش و بهبود ساختار روسازی انجام گرفت [8]. در جمع‌بندی مرور منابع، می‌توان به اهمیت خرابی‌ها در ایمنی ترافیک به‌ویژه در مسیرهای روستایی اشاره‌کرد، همچنین شاخص ساختار-ترافیک به عنوان شاخصی که برای دو نوع خرابی مختلف روسازی قابل محاسبه‌است و کمتر مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته، معرفی شد. در مجموع می‌توان بیان کرد، در طراحی کلیه راه‌ها به ویژه راه‌های روستایی به دلیل تردد کم وسایل نقلیه، طراحی بر مبنای اقتصاد اهمیت بیشتری دارد. اما در بعضی مواقع به دلیل ناهماهنگی بین ساختار طراحی‌شده و ترافیک عبوری، روسازی راه متحمل خرابی‌های زودهنگام و پیش‌بینی نشده می‌شود.

در این پژوهش ضمن بررسی وضعیت باربری یک روسازی راه روستایی بصورت موردی، با استفاده از شاخص STI، مناسب بودن حالت‌های مختلف ساختاری برای این گونه راه-ها بررسی می‌شود. به بیان دیگر روند نوآورانه این مطالعه توجه به شاخص ترافیکی در یک راه روستایی است، به طوریکه هر پاسخ روسازی برابر هر نوع بارگذاری خاص که کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته، بررسی می‌شود.

1Structure-Traffic Index
2 Light Weight Deflectometer
3 Kenlayer

۲- روش تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها

پژوهش موردنظر به بررسی یکی از راه‌های روستایی شهربابک ازاستان کرمان در کشور ایران می‌پردازد. راه مورد نظر محور ارتباطی بسیاری از زمین‌های کشاورزی روستا به مرکز شهرستان است و سالانه حجم ترافیکی به طور متوسط ۲۲۵۰۰ تریلر کشاورزی به منظورهای مختلف مانند حمل محصول، حمل کودهای کشاورزی، حمل شن و ماسه و غیره روی راه تردد دارند. به دلیل عدم استفاده از مصالح مرغوب و عدم استفاده‌ی کامل از اصول صحیح روسازی، به علت وجود خرابی‌های متعدد در محور ارتباطی موردنظر با شاخص وضعیت روسازی پائین‌تر از ۵۰ پاسخگوی ترافیک سنگین کشاورزی نبوده و دچار خرابی‌های شدیدی در سطح روسازی شده است. بنابراین در این پژوهش با آزمایش‌های مورد نظر برای شناخت باربری روسازی موجود راه و مدل-سازی آن در نرم‌افزار، رفتار روسازی راه به صورت مشابه با واقعیت بررسی شد.

۲-۱- آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی(DCP[3])

در ابتدا قبل از انجام آزمایش‌ها باید مناطق موردنظر برای نمونه‌گیری و آزمایش‌های میدانی تعریف شود، بدین منظور محدوده موردمطالعه به سه ناحیه تقسیم شده است. با توجه به وقوع شدت خرابی‌ها ده ایستگاه برای انجام آزمایش‌ها تعریف شده است. برای تعیین محل مغزه‌گیری با توجه به ارزیابی وضعیت روسازی به روش سیستم مدیریت روسازی، محل‌های با بیشترین خرابی شناسایی شد، و برای بررسی ویژگی‌های مقاومتی لایه خاک‌بستر ابتدا آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی در این محل‌ها در چندین نقطه از بستر روسازی و به ویژه در محل‌های بحرانی از لحاظ خرابی مطابق شکل (۱)، انجام شد. این آزمایش برای اندازه‌گیری غیرمستقیم و سریع مقاومت و اندازه‌گیری مدول الاستیسیته لایه‌های غیرچسبنده روسازی و مدول برجهندگی بستر روسازی طراحی شده است [9]. با توجه به ارزیابی بستر به عنوان مصالح متوسط برای

1Dynamic Cone Penetrometer
2Penetrate Index

نفوذ مخروط، به ازای هر ۵ ضربه وارد شده از وزنه ۸ کیلوگرمی به خاک یک قرائت به عنوان نرخ نفوذ یا PI[1] بر حسب میلی‌متر بر ضربه یا mm/blow خوانده شده است [10، 11]. قرائت‌ها در چندین مرحله و با توجه به یکسان بودن لایه زیرین در کل مقطع برای رعایت مسائل ایمنی نزدیک به لبه روسازی آزمایش انجام شد و میزان نفوذهای اندازه‌گیری شده نزدیک به ۹ میلی‌متر به ازای هر ۵ ضربه بود. تاکنون رابطه‌ای بین مقدار نفوذ و ضریب برجهندگی خاک ارائه نشده، پس، برای معادل سازی نرخ نفوذ به ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) روابط مختلفی ارائه شده است که یکی از روابط دارای بیشترین ضریب همبستگی را گابر و همکاران [12] طی نتایج آزمایشگاهی و میدانی به صورت رابطه ۱ ارائه دادند.

$$\text{Log (CBR)} = 1.4 - 0.55 \log (\text{PI}) \qquad (1)$$

با توجه به رابطه ۱ و مقدار نفوذ ۹ میلی‌متر، مقدار معادل CBR برای لایه متراکم خاک بستر برابر با ۷/۵ درصد محاسبه می‌شود و با توجه به نمودارهای معادل کننده [13]، مقدار مدول برجهندگی محل‌ها به طور متوسط برابر با ۱۱۰ مگاپاسکال به دست می‌آید.

شکل ۱. انجام آزمایش DCPدر محل‌های مختلف راه

Fig. 1. DCP test at different points of road in field.

۲-۲- عملیات مغزه‌گیری آسفالت

با توجه به اینکه جاده موردنظر در حدفاصل سال‌های ۷۰ تا ۷۵ به صورت مرحله‌ای و بدون درنظر گرفتن ترافیک سنگینی، تنها با هدف سهولت جابه‌جایی مردم روستا طراحی و احداث شده است بدیهی است، جاده بدون در نظر گرفتن ترافیک سنگین عادی با استفاده از مصالح غیرمرغوب احداث شده است. مشخصات لایه آسفالتی با استفاده از مغزه‌گیری از قطعات منتخب روسازی راه و آزمایش‌های شناخت مصالح و مقاومت، مانند تعیین دانه‌بندی، درصد قیر، مقاومت مارشال و ضریب برجهندگی، روی نمونه‌ها انجام شد. به دلیل مشکلات حمل دستگاه مغزه‌گیر، ابتدا نمونه‌های آسفالتی همگن در اندازه‌های مناسب از روسازی با دیلم از لایه زیرین جدا و در محل آزمایشگاه عملیات مغزه‌گیری انجام شد. در شکل (۲) روند عملیات مغزه‌گیری نشان داده شده است.

شکل ۲. مغزه‌گیری از آسفالت

Fig. 2. Coring the asphalt concrete in the laboratory.

برای تعیین مدول برجهندگی نمونه‌ها از دستگاه UTM[2] استفاده شده است. این دستگاه در ۵ سیکل بارگذاری در مقادیر مشخص بارگذاری، مقدار مدول برجهندگی نمونه طبق استاندارد ASTM D4123-82/AASHTO TP31 را اندازه-گیری می‌کند. در شکل (۳) نمونه‌ای از تغییرشکل‌های افقی نمونه در هر سیکل بارگذاری نمونه نشان داده شده است. نتایج کاملتر در جدول (۱) نمایش داده شده است. مقدار متوسط مدول بر جهندگی در دمای محیط (۲۵درجه سانتیگراد) برای هر ٦ نمونه برای انجام مدلسازی، برابر با ۳۲۰۰ مگاپاسکال بدست می‌آید.

شکل ۳. تغییرشکل‌های افقی نمونه آسفالتی در سیکل‌های بارگذاری آزمایش UTM

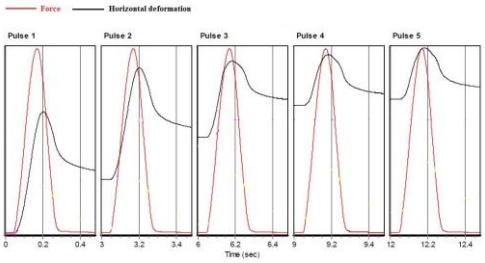

Fig. 3. Horizontal deformation of asphalt concrete under the cyclic loading applied by UMT.

1Universal Testing Machine

۳- مدلسازی در نرم‌افزار

۳-۱- ویژگی‌های مدل

از آنجا که تحلیل‌های سه‌بعدی المان محدود یکی از بهترین راه کاربرای تعیین عملکرد روسازی خارج از فرآیندهای آزمایشگاهی و میدانی است [14]، در این پژوهش نیز از نرم-افزار المان محدود آباکوس برای مدل‌سازی روسازی راه روستایی موردنظر استفاده شده است. مشخصات لایه‌های راه با استفاده از اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌های ذکر شده در قسمت قبل، وارد نرم افزار شد. این مشخصات در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

Parameter Cycle	1	2	3	4	5	Man	C.V.%
Horizontal deformation recoverable	1366	1260	1267	1259	1260	1262	6.0
load (kN)	380	380	279	380	279	279	0.15
Rapture Modulus(Mpa)	2812	2784	2802	2786	2793	2795	10.45

Table 1. Rapture Modulus Experiment Results

جدول ۲. مشخصات لایه‌های مختلف لایه

Layer	Thickness(mm)	Modulus(Mpa)	Poisson Ratio
Hot Mixed Asphalt	70	3200	0.35
Cold Mixed Asphalt	70	1150	0.40
Subgrade	5000	110	0.45

Table 2. Specifications of layers of different layers

به علت عدم دسترسی به امکانات اندازه‌گیری ضریب پوآسون مصالح، ضریب پواسون لایه‌ها نیز مطابق با ویرایش پنجم نشریه طراحی آشتو در نظر گرفته شد [14]. قابل ذکر است که مشخصات مصالح با فرض اینکه در هر یک از لایه‌ها همگن و همسان است، در نرم‌افزار استفاده شده است [14 ،15]. رفتار مصالح برای تعیین نشست در محاسبه تغییرشکل ماندگار مطابق با پژوهش‌های دیگران، الاستیک منظور و از این نوع مشخصات استفاده شد [16، 17، 18].

معمولا ضخامت لایه خاک بستر به صورت نامحدود فرض می‌شود اما به دلیل تعریف یک ضخامت برای مدل نرم‌افزار، ضخامت به صورتی در نظر گرفته می‌شود که توزیع تنش در لایه خاک بستر به صورت کامل صورت گیرد بدین منظور ضخامت ۵ متر مناسب تشخیص داده شد. مدل استفاده شده به دلیل بارگذاری تریلر، دارای طول ۲۰ متر و عرض ۷ متر است و از تحلیل الاستیک خطی برای بررسی مدل استفاده شده است. یکی از مهمترین مباحث در مدلسازی المان محدود، انتخاب اندازه مناسب برای المان‌ها است. معمولا برای بهبود در همگرایی جواب‌های نرم‌افزار از المان‌های پیوسته خطی با ۸ گره[1] در مش‌بندی لایه‌ها استفاده می‌شود [16]، که در این پژوهش نیز از این المان برای مدلسازی استفاده شده است. همچنین از مش کوچک در محل بارگذاری و از مش بزرگ در فواصل دور از بارگذاری استفاده شده است. در شکل (٤) مدل مش‌بندی شده روسازی راه در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است، ابعاد در این مدل بر پایه مدل‌های قبلی در پژوهشهای دیگر انتخاب شد [17]. شرایط تکیه‌گاهی مدل به صورت غلتکی در اطراف مدل که در جهت عمودی آزاد است و در پایین مدل به صورت کاملا گیردار تعریف می‌شود [16]. سطح تماس بارگذاری متشکل از یک مستطیل و دو نیم‌دایره در اطراف آن است که اندازه-های آن با توجه به فشار باد ۷۵۹ کیلوپاسکالبرای تریلرها و با توجه به میزان بار وارد شده بر هر چرخ قابل محاسبه است [18، 19].

۳-۲- مشخصات ترافیک عبوری

در این منطقه حدود ۱۰۰ حلقه چاه وجود دارد و در هر حلقه چاه به طور متوسط ٦٠ هکتار زمین کشاورزی پسته وجود دارد، بنابراین در کل ٦٠٠٠ هکتار زمین کشاورزی در منطقه مورد مطالعه قرار دارد. معمولا زمین‌های کشاورزی در قطعه-های چهار هکتاری تقسیم‌بندی می‌شوند و یک زمین چهار هکتاری به طور متوسط سالیانه به ۱۵ تریلر کود، سم، ماسه و

1C3D8R

غیره نیاز دارد. بنابراین حدود ۲۲۵۰۰ تریلر در سال از راه روستایی موردنظر تردد می‌کند.

جدول ۳. نوع و وزن محورها برای تریلرهای رایج عبوری(وزن‌ها بر حسب تن)

Trailer Type and Axels		Tandem-Dual Wheel	Tridem-Single Wheel
Front axle	Type	Single	Single
	Weight	6	6
Middle axle	Type	Tandem	Single
	Weight	16	10
Rear axle	Type	Tandem	Tridem
	Weight	18	24
Total Weight		40	40

Table 3 Type and weight of axles for commonly used trucks and trailers (tons)

شکل ٤. مش‌بندی مدل راه در نرم‌افزار

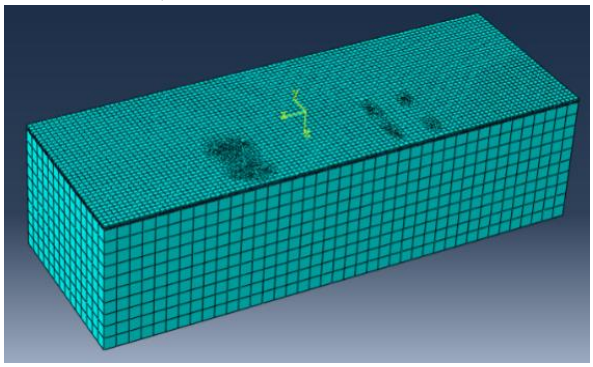

Fig. 4. Meshing the road structure in the software.

شکل ۵. آرایش بارگذاری و فاصله محورهای تریلر FH 440 (ابعاد برحسب سانتیمتر)

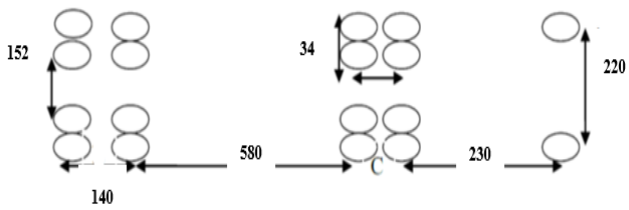

Fig. 5. Wheel configuration and spacing between the wheels of FH440 (cm).

در این مطالعه، ۵ نوع تریلر ۱۸ چرخ با محور تاندم و ۵ نوع تریلر ۱۲ چرخ با محور تریدم بررسی شده است. در هر گروه یک نوع تریلر، بحرانی شناخته شد که تریلر FH440 در گروه تریلرها با محور تاندم و تریلر ScaniaG400در گروه تریلرها با محور تریدم مشخص شد.در شکل (۵)، آرایش بارگذاری و فاصله محورهای این تریلر FH نشان داده شده است. مطابق با نشریه ۲۳٤، بار وارد شده بر هر محور در هر گروه از تریلر، مطابق با مقادیر جدول (۳) است.

٤- تحلیل نتایج و بحث

در ابتدا نتایج نرم‌افزار آباکوس برای عبور هر دو نوع تریلر روی مدل موجود روسازی بررسی می‌شود تا تریلر بحرانی انتخاب شود. نتایج نرم‌افزار برای پارامترهای مخرب روسازی، مطابق با جدول (٤) است، که در این جدول مقادیر دقیق عکس العمل روسازی نمایش داده شده است.

جدول ٤. بیشنه پاسخ‌های روسازی در اثر عبور دو نوع تریلر

Table 4. The maximum pavement response due to the moving of two types of trailer

Trailer Model	Pavement Reaction	Max. Pavement Reaction
FH440	Surface Deflection(mm)	0.492
	Tensile Stress bottom of Asphalt layer(Mpa)	1.58
	Tensile Strain bottom of Asphalt layer	0.000433
	Compressive Stress Top of Subgrade (Mpa)	0.134
	Compressive Strain Top of Subgrade	0.000754
ScaniaG400	Surface Deflection(mm)	0.739
	Tensile Stress bottom of Asphalt layer(Mpa)	2.09
	Tensile Strain bottom of Asphalt layer	0.000549
	Compressive Stress Top of Subgrade (Mpa)	0.158
	Compressive Strain Top of Subgrade	0.000121

با توجه به نتایج جدول (۳)، مقادیر پاسخ روسازی برای تریلر Scania G400 بیشتر از مقادیر برای تریلر FH440 است. بنابراین تریلر Scania G400 بحرانی شناخته شده و مبنای محاسبات بعدی قرار می‌گیرد. این موضوع نشان می‌دهد که

آرایش بارگذاری تریلرهای ۱۲ چرخ با محور تریدم بحرانی‌تر از تریلرهای ۱۸ چرخ با محور تاندم هستند زیرا با توجه به خروجی‌های نرم‌افزار آباکوس مشخص است که تمرکز بار و درنتیجه پارامترهای مخرب روسازی در زیر محور تریدم بیشتر از محور تاندم است.

همان‌گونه که در بخش قبلی توضیح داده‌شد، در ابتدا برای تعیین شاخص STI برای مدل‌های ساختار متفاوت راه، پارامتر ترافیک عبوری یا TI تعیین می‌شود [7]. بر اساس تعریف، راه روستایی موردنظر از نوع درجه یک بوده و کمینه ترافیک متوسط روزانه سال طرح یا سبک‌ترین ترافیک عبوری ٤٠٠ وسیله نقلیه است [20]. مطابق با آمار بیان شده، سنگین‌ترین ترافیک عبوری برای تریلرهای کشاورزی ۲۲۵۰۰ تریلر در سال است. برای تعیین پارامتر TI باید این دو ترفیک را به یک وسیله نقلیه تبدیل کرده و نسبت آنها اندازه‌گیری شود. کمینه ترافیک عبوری راه روستایی ٤٠٠ وسیله نقلیه است برای اطمینان آنها به صورت ترافیک سواری سبک در نظرگرفته می‌شوند [21]، باید ترافیک ۲۲۵۰۰ تریلر نیز به خودروی سواری معادل تبدیل شده و به این ترافیک اولیه اضافه شوند. برای مدلسازی خودروی سبک سواری، فشار باد لاستیک آن ۲۰۷ کیلوپاسکال و بار وارد شده روی چرخ ۵۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد.

در ساختار روسازی موجود راه لایه اساس و زیراساس وجود ندارد و برای تعیین پارامتر ساختار روسازی یا SN تنها دو لایه آسفالت گرم و سرد در نظر گرفته شود. با توجه به مدول برجهندگی ۳۲۰۰ مگاپاسکال برای لایه آسفالت گرم و ۱۱۵۰ مگاپاسکال برای لایه آسفالت سرد، ضرایب قشر برای این دو لایه به ترتیب برابر با ۰/٤٦ و ۰/۳۲ به دست آمده و ضرایب زهکشی این دو لایه طبق نشریه ۲۳٤ نیز برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر ضخامت این دو لایه برابر با ۷ سانتی‌متر است، بنابراین پارامتر SN برای ساختار موجود روسازی برابر با ۲/۱۸ به دست می‌آید. با استفاده از تحلیل در نرم‌فزار آباکوس، پارامترهای تاثیرگذار بر خرابی‌های خستگی و شیارشدگی یعنی کرنش کششی زیر لایه آسفالت و کرنش فشاری روی بستر روسازی به دست می‌آید. سپس با استفاده از روابط موسسه آسفالت مطابق با روابط ۲ و ۳، تکرار مجاز عبور تریلر بحرانی روی مدل‌های ساختاری مختلف راه به دست می‌آید [22].

$$N_f = 0.0796\times(\varepsilon_r)^{-3.291}(E_1)^{-0.854} \quad (2)$$

$$N_d = 1.365\times(\varepsilon_c)^{-4.477} \quad (3)$$

در این روابط N_f تعداد تکرار مجاز بارگذاری برای جلوگیری از خستگی؛ N_d تعداد تکرار مجاز بارگذاری برای محدود کردن گودی مسیر چرخ‌ها؛ ε_r کرنش کششی زیر لایه آسفالتی؛ ε_c کرنش فشاری روی خاک بستر و E_1 مدول الاستیسیته لایه آسفالتی است.

بعد از تعیین تعداد تکرارهای مجاز، خسارت یا هزینه عبور محورها از مدل‌های مختلف راه به صورت تقسیم هزینه ساخت راه بر تعداد عبور مجاز به دست می‌آید. سپس با تعیین شاخص STI برای هر مدل راه، تغییر این شاخص در برابر خسارت عبور محور تریلر از مدل روسازی موجود بررسی می‌شود. پارامتر ساختار–ترافیک به صورت مستقل برای خرابی شیارشدگی و خستگی محاسبه‌می‌شود. با توجه به نتایج نرم‌افزار آباکوس میزان تنش کششی زیر لایه آسفالت در اثر عبور محور تریدم تریلر حدود ٤/۵ برابر عبور خودروی سواری است، بنابراین اگر تعداد عبور واقعی محور تریدم تریلر ٤/۵ برابر شود، ترافیک معادل برای خرابی خستگی به میزان ۲۵٤ به دست می‌آید. به همین ترتیب برای خرابی شیارشدگی، این پارامتر به میزان ٤١١ به دست می‌آید. بنابراین با توجه به میزان پارامترهای ساختار و ترافیک، شاخص STI برای خرابی خستگی ۰/١٤ و برای خرابی شیارشدگی ۰/١١ حاصل می‌شود.

برای محاسبه خسارت خستگی، در ابتدا تعداد تکرار مجاز با استفاده از رابطه موسسه آسفالت و کرنش کششی ماکزیمم ۰/۰۰۰۷٤٤ ، به میزان ۲۲۸۰۰ محور تریدم تریلر به دست می‌آید. سپس اگر هزینه احداث هر کیلومتر از راه دو خطه برابر با ۱۰۰۰ میلیون واحد درنظر گرفته شود، هزینه هر بار عبور محور تریدم تریلر کشاورزی موردنظر از تقسیم هزینه ساخت

راه بر تعداد مجاز عبور آن یعنی ٤٣٨٦٠ واحد به دست می‌آید [23]. به همین ترتیب برای محاسبه خسارت شیارشدگی، با استفاده از کرنش فشاری ٠/٠٠٠٧٦٠ بر روی بستر و محاسبه تعداد عبور مجاز شیارشدگی، هزینه هر بار عبور محور تریدم برای شیارشدگی $٧/٩٥\times١٠^{-٦}$ واحد به دست می‌آید. در ادامه می‌توان شاخص STI و میزان خرابی یا خسارت عبور محور تریلر را برای هر ساختار جدیدی از روسازی بدست آورده و در رابطه با آنها بحث کرد.

۴-۱- ساختار لایه‌ای پیشنهادی برای راه

۴-۱-۱- مدل‌های خستگی

در این قسمت چندین مدل لایه‌ای، برای روسازی پیشنهاد شده و با توجه به تحمل مناسب مدل از لحاظ خرابی یا همان خسارت وارده در اثر عبور تریلرهای کشاورزی، مدل مناسب برای شرایط موجود راه انتخاب می‌شود. به علت وضعیت کیفیت پائین روسازی و مناسب نبودن برای رانندگی، تعریف سناریو "انجام هیچ کار" امکان‌پذیر نبود. پس، در ابتدا برای بررسی ارتباط بین خرابی خستگی و شاخص STI، ٥ مدل مختلف برای روسازی تعریف می‌شود، که همگی مبتنی بر تقویت لایه رویه است:

- سناریو ١: لایه آسفالت گرم ٥ سانتی‌متری
- سناریو ٢: لایه آسفالت گرم ٧/٥ سانتی‌متری
- سناریو ٣: لایه آسفالت گرم ١٠ سانتی‌متری
- سناریو ٤: لایه آسفالت گرم ١٢/٥ سانتی‌متری
- سناریو ٥: لایه آسفالت گرم ١٥ سانتی‌متری

جدول ۵. پارامترهای ساختاری و ترافیکی برای سناریوهای خستگی

Scenario	SN	TI(Rutting)	STI(Rutting)
1	2.75	1132	0.082
2	2.83	1409	0.073
3	3.39	2653	0.062
4	2.49	801	0.088
5	2.76	1191	0.080
6	3.02	1499	0.078

Table 5. Structural and Traffic Parameters for Fatigue Scenarios

با توجه به نتایج تحلیل نرم‌افزار آباکوس برای هر مدل و خسارت خستگی هر کدام در جدول ٥ پارامترهای ساختاری و ترافیکی برای به دست آوردن شاخص STI برای هر مدل محاسبه شده است.

با توجه به نتایج جدول (٥)، رابطه بین شاخص STI و خرابی خستگی یک رابطه غیر مستقیم است.

۴-۱-۲- مدل‌های شیارشدگی

در ادامه برای بررسی ارتباط بین خرابی شیارشدگی و شاخص STI، ٦ مدل دیگر برای راه تعریف می‌شود:

- سناریو ١: اضافه کردن لایه زیر اساس
- سناریو ٢: اضافه کردن لایه اساس
- سناریو ٣: اضافه کردن لایه اساس و زیراساس
- سناریو ٤: حذف لایه آسفالت سرد و اضافه کردن لایه اساس و زیراساس
- سناریو ٥: حذف لایه آسفالت سرد و افزایش ٢/٥ سانتی-متری لایه اساس و زیراساس
- سناریو ٦: حذف لایه آسفالت سرد و افزایش ٥ سانتی‌متری لایه اساس و زیراساس

لایه‌های اساس و زیراساس فرض‌شده برای مدل‌های پیشنهادی دارای حداقل ضخامت به ترتیب ١٠ و ١٥ سانتی-متر است و مدول برجهندگی این دو لایه برای مدلسازی در نرم‌افزار آباکوس به ترتیب برابر با ٧٥٠ و ٣٠٠ مگاپاسکال فرض شده است. از طرف دیگر برای تعیین پارامتر ساختار برای مدل‌های مختلف، ضرایب قشر لایه‌های اساس و زیراساس به ترتیب برابر با ٠/١٤ و ٠/١١؛ و ضرایب زهکشی آنها به ترتیب برابر با ١/١ و ٠/٩ در نظر گرفته شده است.

در جدول (٦) نیز پارامترهای ساختاری و ترافیکی برای به دست آوردن شاخص STI برای هر مدل محاسبه شده است.

جدول ٦. پارامترهای ساختاری و ترافیکی برای سناریوهای شیارشدگی

Table 6. Structural and Traffic Parameters for rutting

Scenario	SN	TI(Fatigue)	STI(Fatigue)
1	1.82	481	0.083
2	2.28	265	0.14
3	2.74	222	0.18
4	3.19	163	0.25
5	3.66	93	0.38

Scenarios

با توجه به نتایج جدول (٦)، رابطه بین شاخص STI و خرابی شیارشدگی یک رابطه مستقیم است. از طرف دیگر از نتایج جدول‌ها، می‌توان اهمیت لایه‌های مختلف را در تاثیرگذاری پارامترهای خرابی خستگی و شیارشدگی تشخیص داد. نتایج این پژوهش به طور قابل ملاحظه‌ای با نتایج دیگرپژوهش‌ها در این زمینه قابل مقایسه است. برای مثال یونگ هونگ و همکارانش نشان دادند که رابطه بین شاخص STI و هزینه نگهداری راه‌ها یک رابطه نمایی است که در آن به خرابی ناشی از تکرار زیاد تردد وسایل نقلیه اشاره شده است [7]. در این پژوهش نشان داده شد که هر چه شاخص STI کوچکتر باشد، راه موردنظر تحمل کمتری را در برابر خرابی خستگی نشان می‌دهد. مطابق مطالعاتی که توسط اداره راه فدرال آمریکا انجام شده است، هزینه عبور محورهای سنگین از راه-های با ترافیک کمتر(و در نتیجه با روسازی ضعیف‌تر) ممکن است تا چندین برابر هزینه‌ها در راه‌های لایه بیشتر است [24]. در این پژوهش نیز با مطالعه موردی یک روسازی راه روستایی با روسازی ضعیف و ترافیک عبوری با محور سنگین نشان داده شد که با توجه به ترافیک، می‌توان خسارت‌های خستگی و شیارشدگی مرتبط با ترافیک سنگین را به شدت کاهش داد. بنابراین بحث هماهنگی ترافیک و ساختار یا همان شاخص STI یکی از عوامل مهم در جلوگیری از خسارات وارد شده بر روسازی راه‌ها است.

۵- نتایج

با توجه به نتایج نرم‌افزار و مقایسه آنها می‌توان به اهمیت سازگاری بین ساختار راه و ترافیک راه عبوری پی برد. در این پژوهش با بررسی یک مطالعه موردی از راه‌های روستایی، به وضوح نشان داده شد در صورتی که طراحی ساختار لایه‌ای راه بدون در نظر گرفتن مسائل ترافیکی انجام شود، این موضوع سبب خرابی‌ها و خسارات زیادی می‌شود. برخی از نتایج مهم این تحقیق عبارتند از:

۱-در مدلسازی سناریوهای مختلف برای روسازی افزایش۲/۵ سانتی‌متری در ضخامت آسفالت گرم باعث ۲۳ درصد کاهش تنش کششی زیر لایه آسفالت می‌شود و همچنین افزایش ۵ سانتی‌متری آن باعث ٤١درصد کاهش دراین تنش می‌شود.

۲- شاخص STI ناشی از خرابی خستگی بیشتر تحت تاثیر مدل‌های ساختاری ضعیف است که در این پژوهش ناشی از ضخامت کم لایه آسفالتی است. شاخص STI ناشی از خرابی شیارشدگی بیشتر تحت تاثیر پارامتر بارگذاری سنگین است.

۳- استفاده از لایه آسفالت سرد در راه‌های روستایی با ترافیک سنگین به عنوان یک زیرسازی مناسب برای کنترل خرابی شیارشدگی راهکار مناسبی است، به طوری که یک لایه اساس یا زیر اساس نیز نمی‌تواند به اندازه لایه آسفالت سرد، کرنش فشاری روی خاک بستر روسازی را کاهش دهد و با حذف لایه آسفالت سرد تا میزان ۱۰ برابر پارامتر موثر در خرابی شیارشدگی افزایش می‌یابد.

٤-شاخص STI باتوجه به مطالعات اندک موجود می‌توان بیان کرد، پارامتری جدید در پژوهش‌های اخیر است و این موضوع می‌تواند بیشتر در پژوهش‌های آینده مورد استفاده قرار گیرد. همان‌گونه که ذکر شد موضوع خرابی روسازی راه‌های روستایی و حمل‌ونقل کشاورزی از موضوعاتی هستند که کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، پس نیاز است، پژوهش بیشتری در این زمینه صورت گیرد.

٦- تقدیر و قدردانی

پایان‌نامه‌ی مرجع این مقاله روی مطالعه موردی راه روستایی شهرستان شهربابک انجام شده است. بدین منظور از زحمات و همکاری‌های کارکنان اداره راه و شهرسازی این شهرستان قدردانی می‌شود.

۷- مراجع References

1-Teravatmanesh, S., Hashemi, S. S. Ghadirmanesh, R., and Tervatmanesh, L.,2016, Epidemiological study of accidents and traffic accidents leading to death in Sistan and Baloochestan province in the year. Journal of Safety Promotion and Prevention of Injuries, Volume 3, Issue 3, Autumn 1993, p. 161-168(in Persian).

2-World Road Association (PIARC), 2003 , Road Safety Manual Montreal, 63 pages.

3- Sahu, K. K. ,2017, Trend, Growth, and Problems of Road Transport in India. Handbook of Research on Economic, Financial, and Industrial Impacts on Infrastructure Development; Das, RC, Ed, Pp.201-223.

3- Coree, B. Wood, D.,2000 , Center for Transportation Research and Education (CTRE), 2000, Response Of Iowa Pavements To A Tracked Agricultural Vehicle, Iowa State University, 16 pages.

4- Sebaaly, P.B. Siddharchan, R. Desouky, Y.Pirathapan M.E., Hitti, E. Vivekanathan, Y. ,2002, Federal Highway Administration, 2002, Effects of Off-Road Tires on Flexible & Granular Pavements, South Dakota Department of Transportation of Research Office, 132 pages.

5- Lim, J. Andrea, A. Khazanovich, L. Wang, S. S. Kim, Ceylan, H. Gopalakrishnan, K. ,2012, TRB Local Road Research Board, 2012, Effect of Implements of Husbandry (Farm Equipment) On Pavement Performance, Minnesota Department of Transportation, 551 pages.

6- Phase II Report to the Secretary of the Wisconsin Department of Transportation, 2013, Implements of Husbandry study, 42 pages.

7- Yang Y.H., Jiang Y.H., Wang X., 2016,"Pavement Performance PredictionMethods and Maintenance Cost Based on the Structure Load", Procedia Engineering 137 (2016), School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 8 pages.

8-Kumar, V., Deol, S., & Kumar, R. ,2017,. Structural Evaluation of Flexible Pavement Using Non-destructive Techniques in Low Volume Road. In International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology" ,pp. 168-184, Springer, Cham.

9- Chen, D. H., Lin, D.F., Liau, P. H. and Bilyeu, J. ,2005, “A correlation between dynamic cone penetrometer values and pavement layer moduli”, Geotechnical Testing Journal, 38 (1), 18 pages.

10- ASTM D6951 ,2003, “Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications1”, Book of Standards, Volume 04.03, ASTM International, USA, 57 pages.

11. Brassawan, S. and Fakhri, M. ,2011 , Correlation between the results of CBR, DCP and cyclic triplex tests (in Qom-Semnan axis), Transportation Engineering Journal,Vol.4. No.1.p. 11-21 (in Persian).

12- Gabr, M. A., Hopkins, K., Coonse, J. and Hearne, T.,2000, "DCP Criteria for Performance Evaluation of Pavement Layers", Journal of Performance of Constructed Facilities, Nov.2000, 187 pages.

13- Iran Asphalt Roads Guide, Code No. 234, Iranian Bitumen and Asphalt Institute, Transportation Research Institute, First Review, 2001, 264 pages (in Persian).

14- American Association of state Highway and transportation officials (AASHTO),1998 “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”, Washington DC, AASHTO, 1998,624 pages.

15- Chen, H.H., Marshek, K.M. and Saraf, C.L. ,1990 , “Effects of Truck Tire Contact Pressure Distribution on the Design of Flexible Pavements: A ThreeDimensional Finite Element Approach”, Transportation Research Record, No. 1095, 156 pages.

16.Abotalebi, M. and Shahidi, S., 2015,"Changing the loading arrangement and its effect on stresses and strains in flexible pavements", Journal of Transportation Technology, Vol. 9, No. 22, 10, p.(in Persian).

17-Taherkhani, H., Moradlou, A. J., Jalalijiridi, Masoud, ,2016 , Investigating the effect of wheel pressure on the response of armed pavements with geosynthetics with visco-elastic analysis by finite element method using Abacus software, Journal of Transportation Engineering, Eighth, No. 2, pp. 323-342(in Persian).

18- Shafabakhsh, G.A. Motamedi, M., Famili, A.,2013, "Influence of Asphalt Concrete Thickness on Settlement of Flexible Pavements," EJGE, Volume 18, 11 pages.

19- Hadi M. N. S. and Bodhinayake, B. C. ,2003, “Non-linear finite element analysis of flexible pavements,” Advances in Engineering Software, vol. 34. pp. 657–662.

20-American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). , 2004.A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. 5th Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

21- Yang H.H., 2002, “Pavement Analysis and Design", 2002, prentice hall, 785 pages.

22-Iran the Rural Road Geometry ,1999 , code No. 196, Planning and Budget Organization, First Edition, 1999, 160 pages(in Persian).

23-Ziari, H. and Bomana, K.,2006,"Calculation of damage to super-heavy axes based on the lifetime of flexible pavements", Journal of Transportation Research, Year 4, No. 3, 8 pp(in Persian).

24-Federal Highway Administration ,2000 , "Comprehensive truck weight and size (TS&W)", Vol. 2, Chapter 6. USA: Federal highway Administration, 127 pages.

The correlation between the structure-traffic index and pavement performance in the rural roads

H. Vatan Meidanshahi[1], Mohammad M. Khabiri[2*], Mohammad M. Karimi[3]

1- M.Sc. of Road and Transportation, Yazd University, Engineering Faculty
2- Associated Professor, Yazd University, Engineering Faculty
3- Assistant propessor, Highway and Transportation, Tarbiat modares university

* **mkhabiri@yazd.ac.ir**

Abstract

The pavement structure of rural roads under heavy traffic has essential importance because of both economical and technical considerations. In this research, different models of a case study rural road under the agricultural trailers traffic has been studied. To identify different road models, the structure-traffic index (STI) is used. The STI is the result structure number (SN) over traffic loading parameter. In this research, the STI index consists of two common fatigue and rutting distresses. The asphalt concrete sample was cored from the field and then, the resilience modulus experimental tests were conducted to identify the elasticity modulus of asphalt concrete. In this research, 5 types of 18 wheels and 5 types of 12 wheels trailers have been investigated. In each group, one type of the trailer was considered as critical trailer that the FH440 and ScaniaG400 are considered as critical trailer in tandem and tridem axle, respectively. First, based on the finite element (FE) simulation in the ABAQUS software it is concluded that the 12 wheels trailers with tridem axle have a more destructive effect on the pavement structure in comparison to 18 wheels trailers with tandem axle. The tensile strain at the bottom of asphalt concrete layer and compressive strain at the top of subgrade were exported from the FE simulations. In addition, the Scania G400 is defined as critical vehicle. Then, different models have been conducted to investigate the fatigue and rutting distresses. The results show 23% and 41% reduction in tensile stress at the bottom of asphalt concrete as the 2.5cm and 5cm increases in asphalt concrete layer, respectively. The obtained results from the FE simulation show that the tensile strain at the bottom of asphalt concrete is 4.5 times more than that the personal car and the STI index for the fatigue and rutting distresses is 0.14 and 0.11, respectively. In addition, this research investigates the effects of the cold asphalt concrete on rutting and fatigue distresses of pavement structure. The results show that the cold asphalt mixture made of base and subbase materials has 15% reduction in rutting distress. The results show that using the cold asphalt mixture in rural roads can improve the rutting resistance and effects of cold asphalt mixture on rutting resistance are more than that base and subbase layers. Comparing the results obtained from the FE simulations show a considerable compatibility of structural and traffic parameters in the pavement structure. Investigation of a rural road case study show clearly that design the road structure without considering the traffic parameters results in significant distress and cost in the pavement structure. It means that the design for the rural road without considering the pavement structure and traffic parameters results in under predicted design. The proposed STI index in this research is a new index to design the rural pavement structure and needs to be investigated more in future studies. The investigation of rural road against of truck and agricultural vehicle is a crucial problems in the rural roads and needs more investigations.

Keywords: Agricultural Trailers, Rural Roads, STI Index, Pavement Performance, Numerical Modeling.