

بررسی تاثیر سرعت وسایل نقلیه بر خرابی بحرانی روسازی انعطاف پذیر به کمک تابع ضریب نرمی خزشی و تحلیل تئوری لایه‌ای

مقاله پژوهشی

محمد مهدی خیبری*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۹۷/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۹۸/۰۲/۰۵

صفحه ۷۴-۶۳

چکیده

سرعت وسایل نقلیه می‌تواند بر عملکرد و خرابی روسازی تاثیرگذار باشد. دومعیار مهم در خرابی های ناشی از عبور بار در روسازی انعطاف پذیر، ترک‌های خستگی و شیارشدگی است. کرنش کششی زیر لایه رویه و کرنش فشاری روی خاک‌بستر در برابر خستگی و شیارشدگی به عوامل مختلفی مانند خصوصیات بارگذاری وسایل نقلیه نظیر سرعت و مقدار بار عبوری و فشار سطح تماس بستگی دارد. در این مطالعه در دمای ثابت آسفالت، تاثیر سرعت عبور ترافیک بر مقدار حداکثر کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت و حداکثر کرنش فشاری روی خاک بستر، با کمک تغییر در مقدار نرمی خزشی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از مقادیر مدول الاستیسته ناشی از تغییر در ضریب نرمی خزشی کرنش بدست آمده در اثر تغییر در عامل سرعت عبور وسیله نقلیه بر عمر روسازی مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل روسازی با استفاده از نرم افزار لایه‌ای KenPav که امکان تحلیل الاستیک روسازی تحت اثر بار را فراهم می‌سازد انجام شده است. تحلیل‌های صورت گرفته بر روی نه مقطع مختلف با سه ضخامت مختلف رویه آسفالتی بر سه نوع خاک‌بستر در پنج سرعت مختلف تحت اثر عبور بار محوری استاندارد انجام شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، کرنش کششی بحرانی در لایه آسفالت کاهش می‌یابد بنابراین به دلیل کاهش ضریب نرمی خزشی در سرعت‌های بالا در مجموع عمر خستگی با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. تاثیر زمان بارگذاری بر سرعت رشد خرابی شیارشدگی به هندسه‌ی روسازی وابسته می‌باشد. به واسطه تحلیل مدل‌ها، چنین مشاهده شد که با افزایش سرعت بارگذاری به ازاء ده کیلومتر بر ساعت به طور متوسط ترک خوردگی ۱۴٪ کاهش می‌یابد. در انتها مدل‌های آماری نظیر درخت تصمیم و شبکه عصبی نیز بر روی نتایج بحث شد.

واژه‌های کلیدی: تئوری لایه‌ای، سرعت وسایل نقلیه، ضریب نرمی خزش، خرابی بحرانی روسازی، زمان بارگذاری

۱- مقدمه

روسازی و ترکیب چندین عامل و اثرات آن در طراحی و بهره برداری مناسب روسازی همیشه مورد توجه مهندسين طراح و محققين بوده است. شرایط بارگذاری ترافیکی و وضعیت خاک‌بستر همیشه یکی از پیچیده‌ترین متغیرهایی است که در طرح روسازی مطرح است و این موضوع باعث شده است عمر بهره‌برداری و طراحی با عمر مفید سازه

عامل اصلی در طراحی روسازی، خرابی و جلوگیری از وقوع آن است، شناخت دلایل و فرایند وقوع خرابی‌ها می‌تواند به کنترل و جلوگیری از رشد آنها و در نهایت شکست روسازی را به تاخیر می‌اندازد. هم‌چنین ویژگی‌های بارگذاری، خواص مصالح و شرایط محیط در طراحی روسازی اطلاعات مهم ورودی محسوب می‌شوند. بررسی تغییرات و نحوه واکنش

قابل توجهی دارد. محققین مختلفی، تاثیر سرعت‌های مختلف بر خرابی روسازی را بررسی نمودند، به عنوان نمونه، برای این منظور منحنی اثر برای عبور بار با سرعت‌های مختلف در وسط لایه آسفالتی بدست آمده و با بررسی میزان تنش و کرنش‌ها تاثیر سرعت‌های مختلف در خرابی‌های روسازی تخمین زده شد (زیاری، گرائیلی‌فرا، ۱۳۹۴). رفتار تابع زمان و نحوه بارگذاری برای نمایش اثرات تغییر سرعت بارگذاری بر پاسخ روسازی بتن آسفالتی، در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. در بررسی سایر منابع علمی، شفابخش و همکاران در مطالعه‌ای به مدل‌سازی پاسخ بهینه روسازی آسفالتی به کمک روش اجزای محدود پرداختند. ایشان اثر بار سرعت، اثر رد چرخ، تناوب استراحت را مورد بررسی قرار دادند. نرم افزارهای آباکوس^۶، انسیس^۶ و تری-دی-موور^۷، برای تحلیل روسازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت، در نتایج اشاره می‌شود که سرعت و کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در سرعت‌های پایین در مقایسه با سرعت‌های بالا چشمگیر است (شفابخش، نادرپور و معتمدی، ۱۳۹۵). در مطالعه‌ی دیگری، توسط اعرابی و همکاران، با کاربرد تئوری ویسکوالاستیسیته برای پیش‌بینی پاسخ و چارچوب محاسباتی برای اعمال در مدل سه بعدی چندلایه به روش المان محدود بدست آمد. تئوری ویسکوالاستیک رفتار مواد را تحت شرایط بارگذاری و محیطی وابسته به نرخ زمانی توضیح می‌دهد. مدل ساخته شده در تحقیق مورد اشاره، تحت چندین بارگذاری تکرار شونده قرار گرفت و پاسخ مخلوط آسفالت گرم برای شرایط بارگذاری تکراری که که بیانگر سرعت وسایل نقلیه ست و حساسیت رفتار به تغییرات دامنه سرعت بررسی شد. سناریو بارگذاری با سه سرعت مختلف محدود شد. نتایج مدل‌سازی برای رفتار ویسکوالاستیک نشان داد، که با افزایش سرعت بارگذاری تفاوت بین رفتار الاستیک و ویسکوالاستیک کاهش می‌یابد اما به دلیل حافظه زمانی، مقدار تغییر شکل نهایی بیشتر است. توزیع تنش در جسم روسازی نیز نشان داد که برای سرعت ۱۰ کیلومتر، لایه اساس تنش هشت برابری را تحمل کرده است. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین حساسیت کرنش و تنش به بارگذاری بیشتر بوده و در بازه دوم سرعت این حساسیت نصف می‌گردد (اعرابی، طباطبایی، ۱۳۹۶). در پژوهش انجام شده توسط عطاری و ایمانی، سعی شده، روسازی

روسازی تفاوت زیادی داشته باشد (Khabiri, 2010). در این راستا شناخت عملکرد ترافیک و به ویژه پارامتر سرعت وسایل نقلیه می‌تواند در بهینه سازی طرح روسازی موثر باشد. عوامل مطرح بارگذاری به صورت، وزن مجموع وسیله نقلیه، توزیع محوری بارها، هندسه تماس چرخ با روسازی، شرایط مکانیکی و الاستیک تایر، توزیع جانبی بار در مقطع عرضی روسازی، سرعت بارگذاری (مدت بارگذاری)، شکل موج دینامیکی بارگذاری^۳ و تکرار بارگذاری می‌باشد (Xueying, AiQin, Baofu, 2018). اندرکنش خصوصیات وسایل نقلیه و پاسخ روسازی^۴ نسبت به بارگذاری از عواملی هستند که معمولاً به عنوان پارامتر ورودی در طراحی‌ها مورد توجه مستقیم قرار نمی‌گیرند. این پارامتر به صورت مدت زمان بارگذاری نیز معرفی شده است. مدت زمان بارگذاری زیاد در سرعت‌های کم یا در وضعیت ساکن اتفاق می‌افتد (Ziari, Ameri, Khabiri, 2007) و نحوه شکل‌گیری خرابی روسازی با سرعت های زیاد و زمان بارگذاری کم متفاوت است (Subhy, 2017)(Zhang, Xu, Wang, 2010). هدف اصلی این مطالعه بررسی تاثیر سرعت خودروها بر خرابی روسازی می‌باشد. با امکانپذیر شدن، تحلیل کامپیوتری روسازیهای انعطاف‌پذیر وصلب و تحلیل عددی روسازیها به جهت صرف زمان کمتر و بررسی دقیقتر این بررسیهای عددی اجتناب‌ناپذیر است. این مطالعه در پی بررسی اثر تغییرات سرعت بارگذاری بر سه عکس‌العمل عمده روسازی انعطاف پذیر است، این سه عکس‌العمل روسازی شامل تغییر شکل سطحی روسازی، معیار کرنش کششی زیر لایه رویه آسفالتی و کرنش فشاری روی خاک بستر است. برای وارد کردن متغیر سرعت از تغییر در زمان بارگذاری و تماس بار بر روی رویه استفاده شد، این زمان بار گذاری بر روی ضریب خزش نرمی تاثیر می‌گذارد که معکوس این ضریب به عنوان مدول الاستیسیته لایه آسفالتی محاسبه و در مدل‌سازی روسازی استفاده می‌شود.

۲-پیشینه تحقیق

تعیین سرعت مجاز وسایل نقلیه، برای ایجاد شرایط مطلوب برای ایمنی و خصوصیات هندسی مسیر می‌باشد، در حالی که سرعت حرکت وسایل نقلیه بر روسازی تاثیرات

تنش وارده کاهش می‌یابد (عالی، ۱۳۹۴). خادمی‌آستان، در پژوهشی، بیان می‌کند، خستگی روسازی می‌تواند ناشی از عوامل زیادی از جمله سرعت حرکت، ترافیک، شیب طولی و عرضی محور، عرض محور و بطور کلی طرح هندسی باشد. تمامی عوامل فوق با تاثیر بر میزان تنش و کرنشها در لایه روسازی انعطاف‌پذیر آسفالتی به عنوان عامل ایجاد ترکهای خستگی و عمر شیارشدگی روسازیهای انعطاف‌پذیر اثر گذار می‌باشد (خادمی، ۱۳۹۴). خصوصیات مصالح دما ضخامت لایه‌ها و همچنین سرعت و مقدار بارعبوری از روی روسازی در خستگی آن موثر است، فخری و همکاران عوامل مؤثر برکرنش کششی تارپایین لایه و همچنین مدول دینامیک آسفالت و نیز عمرخستگی لایه آسفالتی را مطالعه کردند، باتوجه به طبیعت ویسکوالاستیک مصالح اسفالتی رفتار مصالح تابعی از دما و نرخ بارگذاری است از این رو ایشان در مطالعه فوق‌الذکر سعی نمودند، تاثیر دمای اسفالت رویه و همچنین سرعت عبور ترافیک بر مقدارکرنش کششی تارپایین لایه اسفالت مورد بررسی قراردهند و رابطه بین این دو پارامتر بامقدارکرنش کششی تارپایین لایه اسفالت و خستگی اسفالت تعیین نمایند، تحلیل روسازی با استفاده از نرم افزار D-MOVE-3 که امکان تحلیل ویسکوالاستیک روسازی تحت اثر بارهای متحرک را فراهم می‌سازد انجام شده است در تحلیل های صورت گرفته دو مقطع مختلف در سه دمای متفاوت تحت اثر بارچرخ زوج عبوری در سه سرعت مختلف تحلیل شدند. نتایج ایشان نشان داد، افزایش دما کرنش کششی تارپایین لایه اسفالت افزایش می‌یابد با این وجود به دلیل کاهش مدول دینامیک در درجه حرارت‌های بالا در مجموع عمرخستگی با افزایش دما افزایش می‌یابد (فخری، غنی‌زاده و الماسی ناجی، ۱۳۹۲). در مطالعه‌ای، خاکی و سرکار، ابتدا ساختار یک نوع روسازی، با استفاده از نرم‌افزار Kenlayer را مدل کردند، جهت تحلیلهای خصوصیات رفتاری آسفالت بصورت ویسکوالاستیک وسایر لایه‌ها به صورت الاستیک فرض نموده و تنشها و کرنشهای بحرانی در جسم روسازی در زیر چهار نوع محور منفرد دوچرخ، چهار چرخ، تاندم و تریدم محاسبه گردید. نتایج تحقیق مورد اشاره نشان داد که برای محورهای مختلف در یک محدوده وزنی، افزایش یا کاهش سرعت و مدت سیکل بارگذاری، نوع و مقدار خرابی ایجاد شده در سطح راه را

انعطاف‌پذیر تحت اثر بارگذاری قائم در بالای رویه مورد بررسی قرار گرفته و توسط تئوری الاستیسیته و فرض ساده کننده روش برمیستر جهت مدل لایه‌ای بکاررفت، نتایج نشان داد که وسایل با بیشترین اضافه بار شامل وانت‌ها، کامیون‌های ۳ محور، کامیون های بنز، تریلر ۴ محور ۱۴ چرخ و تریلر ۵ محور ۱۸ چرخ می‌باشد به طوری که بیش از ۹۰٪ کل اضافه‌بار در این وسایل اتفاق می‌افتد. بررسی نشان می‌دهد وسایلی که بیشترین ظرفیت بلااستفاده را دارند شامل تریلر ۵ محور ۱۸ چرخ، کامیونهای ۳ محور، کامیون‌های بنز و کامیون های ۲ محور ۶ چرخ هستند. وانت‌بارها، کامیون ۴ محور و ۳ محور بالاترین میزان بهره‌وری را دارند و کامیون های ۲ محور، تریلر ۳ محور و ۴ محور کمترین میزان بهره‌وری را دارا هستند. کامیون‌های ۳ محور با وزن مجاز ۲۶ تن و فارغ از نوع روسازی بیشترین خرابی‌ها را ایجاد می‌نماید، در روسازی نوع ۴ که روسازی ضعیفی به شمار می‌رود تریلر ۵ محور ۱۸ چرخ، کامیون‌های بنز و کامیون‌های ۴ محور در رده‌های بعدی بیشترین صدمات وارده به راه قرار می‌گیرند. لذا میزان بهره‌وری روسازی راه‌ها تقریباً برابر با ۵۰٪ و به همین دلیل میزان صدمات وارده به روسازی راه نیز ۵۰٪ می‌باشد (عطاری‌نیا، ایمانی، ۱۳۹۵). عالی، در مطالعه‌ای اشاره می‌کند، الزامات یک طراحی مناسب در روسازی آسفالتی شناسایی اثرات محیطی و ترافیکی گوناگون و تاثیر آنها بر عملکرد لایه های اسفالتی است از جمله عوامل تاثیرگذار بر روابط و رفتار تنش-کرنش روسازی اسفالتی تاثیرات سرعت وسایل نقلیه هستند. ایشان در تحقیقاتشان به بررسی تاثیر این عامل بر عملکرد لایه های آسفالتی با ابزارهای مورد استفاده در آنالیز به روش المان محدود پرداخت برای این منظور نرم‌افزار المان محدود سه بعدی آباکوس به کارگرفت، نرم‌افزار آباکوس می‌تواند انواع گوناگون و متنوعی از شبیه‌سازی‌ها را انجام دهد تمامی لایه‌های رویه آسفالتی اساس زیراساس و بستربطور جداگانه مدل شدند شرایط تکیه‌گاهی نحوه بارگذاری و المان‌بندی لایه‌ها مورد بررسی قرارگرفتند در نهایت بیشینه تنش وارده برای سرعت‌های متفاوت بارگذاری به دست آمد، نتایج مطالعه مذکور، نشان می‌دهد، با افزایش سرعت وسیله نقلیه از ۲۰ به ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت مقادیر تنش وارده بر لایه های اسفالتی افزایش می‌یابد و برای سرعت های بالاتر از ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت مقادیر

تحلیل روسازی‌های انعطاف‌پذیر هنوز رایج است، به طوریکه حافظ و همکاران در مقاله‌ای تاثیر استفاده از پلاستیک بازیافت شده پلی اتیلن ترفتالات (PET) به عنوان مصالح تقویت‌کننده خاک بر مدول برجهندگی خاک رسی، یعنی خاک معمول در منطقه دلتا در مصر، را بررسی کردند، علاوه بر آزمون آزمایشگاهی جامع در آزمایشگاه مهندسی بزرگراه و فرودگاه دانشگاه منصوره انجام شد. تحلیل خرابی با استفاده از نرم افزار Kenlayer برای نشان دادن بهبود عملکرد رویه راه در اثر تقویت بستر روسازی با پت بکار رفت. آزمایش انجام شده شامل آزمایش‌های مهندسی استاندارد و آزمایش‌های بارگذاری مکرر سه محوری بود. نمونه‌های آزمایشگاهی با چهار درصد متفاوت پت بازیافتی (۰/۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸) تهیه شدند. نتایج RLTT نشان می‌دهد که مدول برجهندگی نمونه‌های تقویت شده با ۰/۶٪ پت در مقایسه با مدول نمونه شاهد ۰/۸٪ افزایش می‌یابد (Hafez, Mousa, Awed, & El-Badawy, 2018). در خصوص کاربرد نرم افزار Kenlayer در جدیدترین مستندات علمی منتشر شده می‌توان به، مطالعه‌ای در خصوص استفاده از مصالح کنترل شده کم مقاومت (CLSM)^۱ به عنوان مصالح بستر روسازی اشاره کرد. مخلوطهای CLSM با مقادیر مختلف سیمان، خاکستر و سنگدانه ریز تهیه شده و خواص فیزیکی و شیمیایی هر جزء مخلوط مطالعه شد. پس از اختلاط، خواص CLSM بر مبنای آزمایش استاندارد سیمان تازه و مصالح بستر اصلاح شده با سیمان بررسی شدند. خواص مکانیکی CLSM سخت‌شده بوسیله آزمایش‌های CBR^۲، مقاومت فشاری نامحدود و مدول برجهندگی تعیین شدند. نتایج مدول برجهندگی در طراحی تحلیلی رویه راه انعطاف‌پذیر با بستر CLSM بوسیله نرم افزار Kenlayer بکار رفتند. داده‌های ترافیک بحرانی در جاده پرحجم که از سوی اداره بزرگراه‌های تایلند گردآوری شده بود در این مطالعه استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که بستر CLSM عملکرد و همچنین عمر طراحی رویه آسفالتی را در مقایسه با روسازی دارای بستر متعارف سنگدانه‌ای بطور قابل توجهی افزایش داد (Chompoorat, Likitlersuang, & Jongvivatsakul, 2018). کاربرد نرم‌افزار الاستیک خطی مبتنی بر تئوری لایه‌ای (Houng, 2004)، در مطالعه‌ی

تغییر می‌دهد و خارج از آن محدوده وزنی، تغییرات سرعت یا مدت سیکل بارگذاری تاثیری بر نوع خرابی نداشته و فقط مقدار خرابی مشاهده شده در سطح روسازی را تغییر می‌دهد. همچنین در نتایج این مطالعات نشان داده شده، که جهت جلوگیری از کاهش سطح خدمت‌دهی روسازی، سرعت ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت محدوده‌ی مناسبی می‌باشد که در آن احتمال وقوع ناهمواری‌های روسازی کمتر و وقوع ترک خوردگی بیشتر می‌باشد (خاکی و سرکار، ۱۳۹۰). در پژوهش دیگری همان محققین، با اعمال سرعت‌های بارگذاری مختلف در دماهای متفاوت به نمونه‌ها سرعت پیشرفت شیارشدگی در روسازی‌های آسفالتی بررسی نمودند به این منظور نمونه‌ها در دو دمای مختلف ۵۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد تحت سه زمان بارگذاری ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی ثانیه قرارداد و با بررسی آزمایش‌های صورت گرفته این نتیجه را بیان کردند، که تاثیر زمان بارگذاری بر سرعت رشد خرابی تابع دمای محیطی می‌باشد و با کاهش دمای بارگذاری از ۵۵ به ۴۰ درجه سانتیگراد سرعت رشد شیار ۳/۶۵ درصد کاهش یافت (منصورخاکی، سرکار و متولی‌زاده، ۱۳۹۳). مجدداً همان محققین در مطالعه‌ای دیگر، ۲۱ نمونه مخلوط آسفالتی گرم با دانه‌بندی شماره ۵ ساختند. نمونه‌ها در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد، تحت تنش‌های ۲۱۱ و ۱۱۱ کیلوپاسکال، در ۳ زمان مختلف بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفتند، که مشاهده شد، افزایش زمان بارگذاری و افزایش تنش تاثیرات متقابلی در رشد خرابی خزشی روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. تحلیل نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در شرایط ثابت اعمال بار تنش و سرعت حرکت خودرو ثابت با دمای بارگذاری ۵۵ درجه و کاهش زمان بارگذاری از ۲۱۱ به ۱۱۱ میلی ثانیه در سطح تنش ۲۱۱ کیلوپاسکال کاهشی در حدود ۸۹٪ و در سطح تنش ۱۱۱ کیلوپاسکال کاهشی در حدود ۵۲٪ مشاهده می‌گردد، به عبارت دیگر، عبور خودروهای سبک با سرعت بالا تخریب قابل توجهی در روسازی ایجاد نمی‌کند. همچنین با کاهش همزمان زمان بارگذاری از ۲۱۱ به ۲۱ میلی ثانیه و افزایش بار محوری از ۲۱۰ به ۱۱۰ کیلوپاسکال میزان نرخ تغییرات کرنش پلاستیک ۲۳٪ کاهش می‌یابد که نشان دهنده تاثیر مثبت افزایش سرعت می‌باشد (منصورخاکی، متولی‌زاده، ۱۳۹۴). استفاده از نرم افزار Kenlayer در تحقیقات بروز دنیا برای

۳- روش تحقیق و مدل سازی

تأثیر تغییر سرعت بر عکس العمل های روسازی شامل خرابی شیارشدگی و ترک خوردگی و تغییر شکل سطحی هدف اصلی این مطالعه است. بدین منظور واکنش روسازی شامل کرنش فشاری روی خاک بستر و کرنش کششی زیرلایه رویه و نیز تغییر شکل سطح روی با توجه به تغییر در مشخصات لایه های روسازی و مدت زمان بارگذاری توسط نرم افزار تحلیلی محاسبه شده است. برای تحلیل واکنش روسازی در برابر بار ترافیکی با سرعت های مختلف از مدل سازی لایه ای توسط نرم افزار Kenlayer استفاده شد. لایه های روسازی با دیدگاه روسازی قوی، متوسط و ضعیف بر روی سه نوع بستر قوی، متوسط و ضعیف بررسی شده است بدین منظور ضخامت لایه رویه در سه حالت برشمرده فوق ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی متر بر روی خاک بستر با مدول الاستیسیته ۵۰، ۵۵ و ۶۰ مگاپاسکال بوده است. جدول (۱) مشخصات لایه های روسازی را که در مدل سازی به کار رفته اند مشخص می کند. برای بارگذاری روسازی از یک چرخ با دایره ای معادل به شعاع ۱۵ سانتی متر و فشار سطح تماس ۵۷۰ مگاپاسکال استفاده شده است. رابطه ی (۱) نحوه مدول الاستیسیته ی لایه رویه که وابسته به نرمی خزش مخلوط آسفالتی مطابق مراجع علمی شناخته شده، را نمایش می دهد.

روسازی برای ناحیه ای با ترافیک سنگین، رویه آسفالتی که به عنوان راه ورودی ساخته شده و ممکن است در طی عمر خدمت خود متحمل فرسودگی هایی نظیر ترک خوردگی و شیار شدگی شود، مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. برای کاستن از مشکلات خرابیها، رویه کامپوزیتی با بستر بتن غلتکی به عنوان راهکار خوبی بررسی شد. مطالعه ی ریس و همکاران، بر تاثیر تغییر مدول مصالح، ضخامت لایه و بارگذاری بر عملکرد های رویه کامپوزیتی تمرکز کرد. تنش و کرنش در این موقعیت بحرانی بوسیله نرم افزار KenLayer تعیین شده و به عنوان ورودی تابع انتقال برای خرابی های مربوطه جهت ارزیابی عملکرد رویه راه استفاده شدند. در نتیجه، این تحقیق نشان می دهد که روسازی مرکب توانایی حذف ترک خوردگی خستگی در سطح آسفالتی و کاهش قابل توجه عمق شیار را دارد. به علاوه، بستر صلب ضخیم یا قوی می تواند عمق شیار را بسیار کاهش داده و عمر خستگی این لایه را طولانی کند (Rith, Kim & Lee, 2018). همانگونه که بررسی شد، سرعت بارگذاری یا سرعت عبور وسایل نقلیه نقش قابل توجهی در شکل گیری و میزان خرابی است. از منظر دیگر مدل های آزمایشگاهی نیز حالت کلی عبور وسایل نقلیه را بررسی می نمایند. بنابراین، مطالعه پیشرو به بررسی تأثیر سرعت وسایل نقلیه بر عملکرد روسازی انعطاف پذیر و خرابی آن پرداخته است.

$$D(t) = \frac{1}{E_0} \left(t + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_i}\right) \right] \quad (1)$$

جدول ۱. مشخصات هندسی و مکانیکی لایه های روسازی آسفالتی

نام لایه	ضخامت (cm)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	ضریب پواسون
رویه آسفالتی	متغیر	متغیر	۰/۳۵
اساس شنی	۲۰	۲۶۰	۰/۴۰
خاک بستر	∞	۶۰ و ۵۵ و ۵۰	۰/۴۵

انتخاب گردید؛ یعنی از یک روسازی معمول تا مقطع نزدیک به روسازی تمام آسفالت انتخاب گردید. انتخاب مدول

حداقل ضخامت لایه های روسازی با توجه به مقادیر و ضوابط نشریه ۱۰۱ و با فرض ترافیک سبک تا بسیار سنگین

تغییر در مقدار E (مدول الاستیسیته) مخلوط آسفالت می باشد. نمونه ای از مقادیر نرمی خزشی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در جدول (۲) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نمایش داده شده است.

الاستیسیته ی لایه رویه وابسته به نرمی خزش مخلوط آسفالتی به کار رفته می باشد که از مقدار 1.1×10^{-4} تا مقدار 69.6×10^{-4} بر حسب MPa می باشد. فرض به کار رفته در این مطالعه تغییر در مدت زمان بارگذاری (t) و در پی آن تغییر در D(t) و در نتیجه

جدول ۲. مقادیر نرمی خزشی ($\frac{1}{MPa}$) برای مخلوط آسفالتی تابع زمان بارگذاری [keymanesh et al.,2016]

سرعت Km/h	1100	360	120	40	11	3.5	1.1	0.35	0.11	0.011	0.0011
زمان S	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3	1	3	10	100	1000
$D(t)\frac{1}{MPa} \times 10^{-7}$	110	140	213	332	53.3	89/1	190	373	696	183	2440

متداول کشور بوده است. بعد از مرحله محاسبات مشخصات مصالح رویه، با استفاده از نرم افزارهای لایه‌ای مدل نهایی، ویژگی‌های رویه در نرم افزار وارد شد، برای تحلیل روسازی مدل شده و گیرداری بین لایه‌ای به صورت کامل انجام شد و یک گروه بارگذاری بار چرخ وسایل نقلیه سنگین انتخاب شد. رابطه محاسبه زمان بارگذاری مطابق نتایج تحقیقات هوآنگ بر اساس رابطه (۲) است که این زمان (T) به سرعت وسیله نقلیه (V)، شعاع سطح تماس چرخ و روسازی (a) وابسته است (Houng,2004).

$$T = \frac{2 \times a}{v}$$

همانطور که در این جدول مشخص است، افزایش زمان بارگذاری یا کاهش سرعت حرکت وسایل نقلیه باعث افزایش D_t یا کاهش مدول الاستیک رویه آسفالتی در دمای ثابت می‌شود. مدول الاستیسیته آسفالت در یک دمای مشخص و در یک فرکانس ثابت بارگذاری به‌عنوان مدول الاستیک لحظه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، مشخصات سایر لایه‌های روسازی مدل شده به صورت همگن و متجانس و به صورت الاستیک فرض شده است مشخصات این لایه‌ها براساس ویژگی ساختاری روسازی‌های

(۲)

که در این معادله شعاع دایره بارگذاری ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

۴- بررسی نتایج مدلسازی آماری و بحث

در ادامه طی دو آزمون آماری برای بررسی میزان وابستگی بین کرنش فشاری و مشخصات لایه‌های روسازی به کمک نرم افزاری انجام می‌شود، فرضیه آماری (وابستگی کرنش فشاری روی خاکبستر):

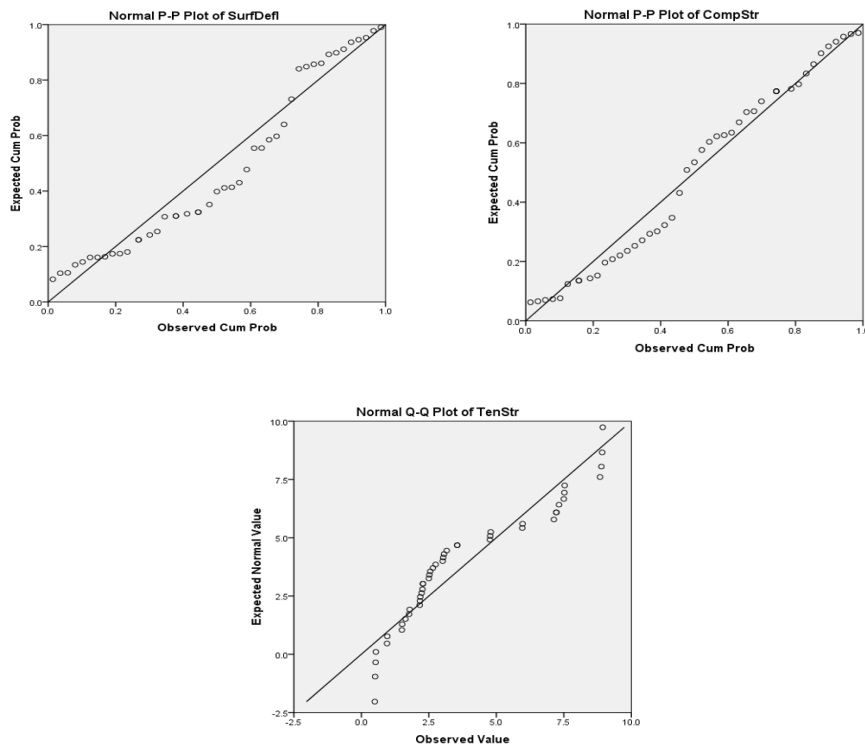
H_0 بین کرنش فشاری روی خاکبستر و مدول الاستیسیته خاکبستر و ضخامت لایه رویه و سرعت حرکت تفاوت معنی داری وجود ندارد.

در ابتداء برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از خروجی‌های نرم افزار تحلیل داده‌ها پاسخ‌های روسازی دریافت شده و در نمودار شکل (۱) با کمک نرم‌افزار SPSS⁸ ترسیم گردیدند، همانگونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر پیش بینی شده توسط نرم افزار آماری و نتایج تحلیل‌ها از یک روند ثابتی پیروی می‌کنند و فرض نرمال بودن داده‌ها قابل قبول است.

صفر بین کرنش فشاری روی خاکبستر و مدول الاستیسیته خاک بستر، رد می‌شود و تنها بین این دو متغیر ارتباط معنادار تأیید می‌شود.

H_1 بین کرنش فشاری روی خاکبستر و مدول الاستیسیته خاکبستر و ضخامت لایه رویه و سرعت حرکت تفاوت معنی داری وجود دارد.

در جدول (۳) مشاهده می‌شود، که با آزمون گاما به دلیل ترتیبی بودن متغیرها، تنها در این سه آزمون فرض، فرض



شکل ۱. بررسی نرمال بودن نتایج پاسخهای سه گانه روسازی

جدول ۳. مقایسه سطح معنی داری سه فرض (کرنش فشاری)

		Symmetric Measures				
		Value	Asymp. Std. Error ^a	Approx. Tb	Approx. Sig.	
SubEla	Ordinal by Ordinal	Gamma	.926	.041	22.170	.000
AsticK	Ordinal by Ordinal	Gamma	.177	.133	1.331	.183
Speed	Ordinal by Ordinal	Gamma	-.092	.122	-.750	.453
N of Valid Cases		45				
a. Not assuming the null hypothesis.						
b. Using the asymptotic standard error assuming the null hypothesis.						

H_0 بین کرنش کششی زیر لایه رویه و مدول الاستیسیته خاک بستر و ضخامت لایه رویه و سرعت حرکت تفاوت معنی داری وجود ندارد.

آزمون آماری (وابستگی کرنش کششی زیر لایه رویه):

و ضخامت لایه رویه بستر، رد می‌شود و تنها بین این دو متغیر ارتباط معنادار در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید می‌شود. ولی در سطح اطمینان ۹۰٪ می‌توان فرض ارتباط بین سرعت وسایل نقلیه کرنش کششی زیرلایه رویه را تأیید نمود.

H_1 بین کرنش کششی زیرلایه رویه و مدول الاستیسیته خاک بستر و ضخامت لایه رویه و سرعت حرکت تفاوت معنی داری وجود دارد. در جدول آماری (۴)، مشاهده می‌شود، که با آزمون گاما به دلیل ترتیبی بودن متغیرها، تنها در این سه آزمون فرض، فرض صفر بین کرنش کششی زیرلایه رویه

جدول ۴. مقایسه سطح معنی داری سه فرض (کرنش کششی)

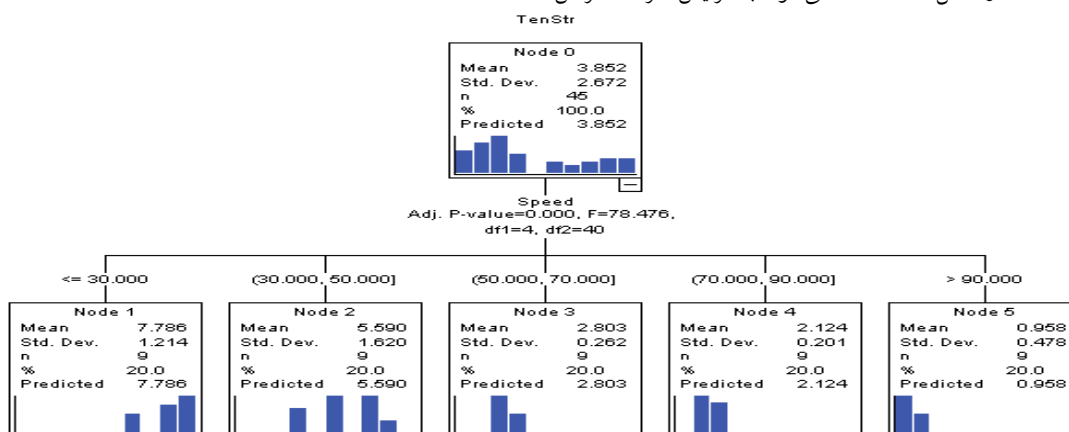
Symmetric Measures						
			Value	Asymp. Std. Error ^a	Approx. T ^b	Approx. Sig.
SubEla	Ordinal by Ordinal	Gamma	-.193	.150	-1.291	.197
AsticK	Ordinal by Ordinal	Gamma	.363	.510	2.45	.016
Speed	Ordinal by Ordinal	Gamma	-.214	.130	-1.647	.100
N of Valid Cases			45			

a. Not assuming the null hypothesis.

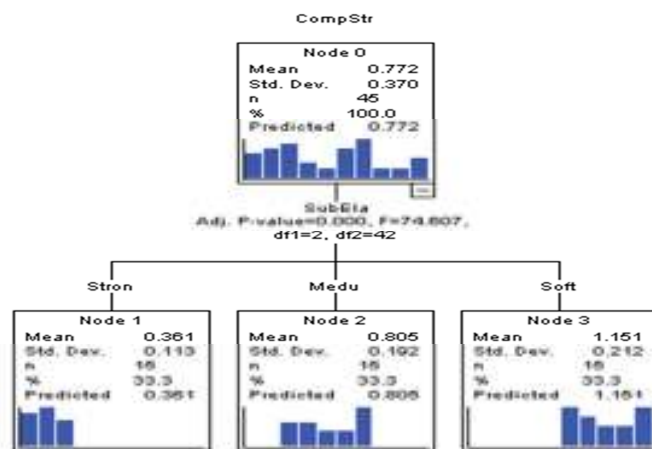
۴-۱- بررسی و تحلیل نتایج

کششی زیرلایه آسفالتی که موجب ترک خوردگی می‌شود، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر سرعت در این نوع گسیختگی نقش موثری داشته است، که نرم افزار بر اساس سرعت گروه‌بندی را انجام داده است، ولی در شکل (۳) ملاحظه می‌شود نقش مقاومت خاک‌بستر، در وقوع کرنش روی خاک‌بستر بسیار زیاد است، به طوری که سرعت تأثیر کمتری در وقوع این خرابی داشته است و در این درخت گروه‌بندی نقشی ندارد. با افزایش مقاومت خاک‌بستر میزان نشست سطح آن نیز کاهش می‌یابد. در شکل (۴) مشاهده می‌شود که مقدار ضخامت لایه رویه و مدول الاستیسیته آن در کاهش تغییر شکل سطحی نقش موثری دارد.

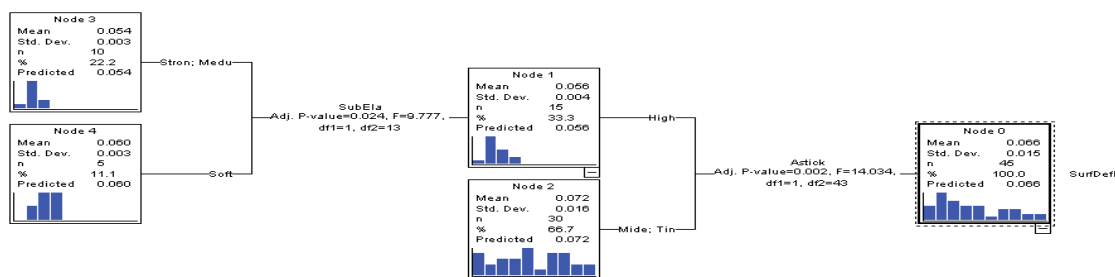
پس از اجراء مدل و محاسبات نرم افزار در حالات ۹ گانه برای هر یک از سرعت‌های حرکت مشخصات کرنش‌ها و تغییر شکل‌ها به دست آمده است. با توجه به تعداد زیاد حالات مختلف تحلیل نرم‌افزاری در این تحقیق، تقسیم‌بندی حالات آزمایشها، نتایج با کمک ابزار درخت تصمیم از طریق نرم‌افزار SPSS امکان‌پذیر است. درخت گروه‌بندی و رگرسیون CART^۹ ابزار مناسبی برای داده‌کاوی می‌باشد. درخت گروه‌بندی نتایج این تحقیق در شکل (۲) الی (۴) نمایش داده‌شده که در آن با توجه به تغییر شکل قائم سطحی، کرنش قائم روی خاک‌بستر و کرنش کششی زیر لایه رویه، برای حالات مختلف بهترین تقسیم‌بندی صورت گرفته است. در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت کرنش



شکل ۲. تغییرات کرنش کششی زیر لایه رویه آسفالتی وابسته به سرعت در انواع روسازی‌های قوی تا ضعیف



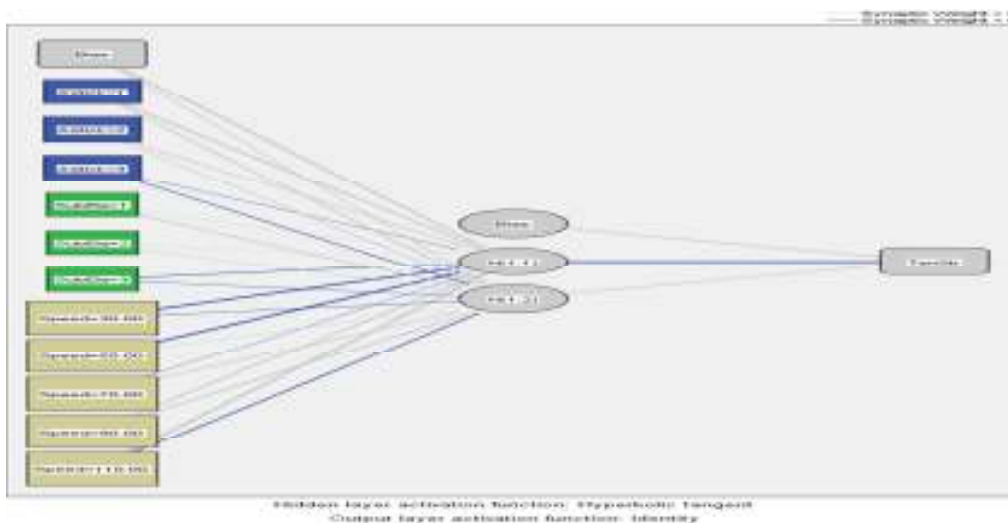
شکل ۳. تغییرات کرنش فشاری روی خاک‌بستر وابسته به سرعت در انواع خاک‌بستر قوی تا ضعیف



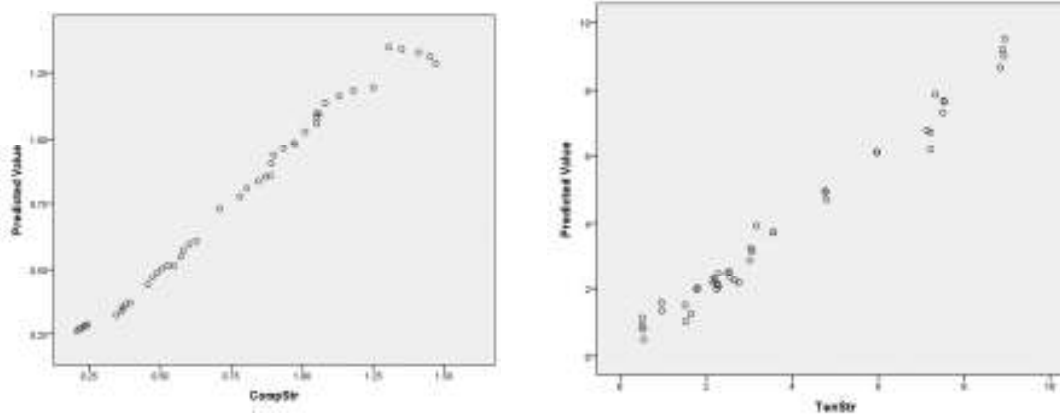
شکل ۴. سطح لایه‌روی وابسته به سرعت در انواع روسازی ها و خاک بستر

پس از ساخت مدل شبکه عصبی بین ورودی و خروجی‌ها، آنالیز حساسیت بر روی آن می‌توان انجام داد. در نمودار شکل (۷)، مقادیر درصد‌های آماری مربوط به حساسیت نسبی مقادیر، متغیرهای ورودی مدل یعنی، مدول الاستیسیته، ضخامت رویه و سرعت نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای کرنش کششی بیش از ۹۰ درصد مقادیر حساسیت نسبی برای سرعت وسایل نقلیه است و بعد از آن متغیر ضخامت لایه رویه بیشترین تاثیر را داراست. همچنین بر روی کرنش فشاری روی خاک‌بستر بیشترین تاثیر ناشی از مدول الاستیسیته خاک‌بستر و بعد از آن ضخامت لایه رویه است و کمترین تاثیر را سرعت حرکت وسایل نقلیه را می‌گذارد، که در بیشتر موارد منطبق بر نتایج روش تحلیل درخت گروه‌بندی داده‌هاست.

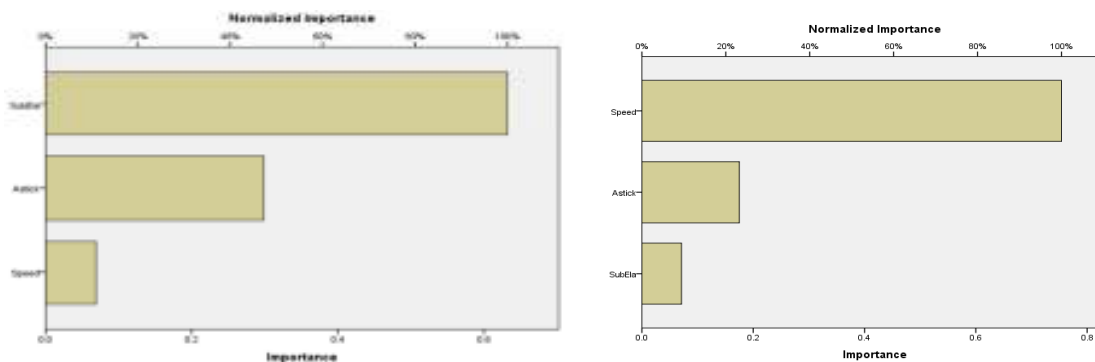
پاسخهای روسازی به‌صورت جداگانه با تغییر دادن در متغیرهای ورودی نرم‌افزار تحلیلی متناسب با روسازیهای قوی، متوسط و ضعیف بر روی بسترهای قوی، متوسط و ضعیف به‌دست آمده‌اند و مدل شبکه عصبی مصنوعی توسط نرم‌افزار آماری متداول، ساخته شد. به‌طور شماتیک نرونهای لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی و اتصال بین آنها در شکل (۵) برای شبکه MLP10 که در پیش‌بینی پاسخ روسازی در دو سطح کرنش کششی زیر لایه رویه و روی خاک‌بستر استفاده شده را نشان می‌دهد. همچنین برای بررسی و سنجش درستی پیش‌بینی پاسخ روسازی در این دو پارامتر با نتایج محاسباتی قبلی مقایسه و هر دو بر روی دو نمودار در شکل (۶)، رسم گردید. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، اختلاف زیادی بین دو متغیر حاصل از تحلیلهای نرم افزاری و نیز شبکه عصبی وجود ندارد.



شکل ۵. شمایک نرونیهای لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی و اتصال بین آنها در مدل پاسخ روسازی در سرعت‌های مختلف و برای روسازیهای مختلف



شکل ۶. نمایش ترسیمی پاسخ روسازی (سمت راست: کرنش کششی و سمت چپ: کرنش فشاری) و پاسخ پیش‌بینی شده در مدل شبکه عصبی



شکل ۷. آنالیز حساسیت شبکه عصبی برای متغیرهای موثر در پاسخ روسازی

(سمت راست: کرنش کششی و سمت چپ: کرنش فشاری)

۵- نتیجه گیری

اجراء برنامه‌ی KenLayer را در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه یزد، در بهمن ماه این سال انجام دادند، سپاسگزاری می‌شود.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Controlled Low-strength Material Base (CLSM)
2. California Bearing Ratio (CBR)
3. Dynamic waveform loading(DWL)
4. Pavement response
5. FEA contains several distinct modules(Abaqus)
6. Engineering simulation and 3D design software(ANSYS)
7. 3D-Mover Pavement Analyzer
8. Statistical Package for the Social Sciences(SPSS)
9. Classification And Regression Trees (CART)
10. Multilayer Perceptron (MLP) Artificial Neural Network

۸- مراجع

-اعرابی، س. طباطبایی، س.ع.، (۱۳۹۶)، "اثر تغییر سرعت عبور بار بر توزیع تنش نرمال در بدنه روسازی بتن آسفالتی به روش المان محدود و رفتار ویسکوالاستیک"، نهمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، موسسه فرهنگی نشر فن آریا، ص. ۱-۱۱.

-خادمی‌استانه، ع.، (۱۳۹۴)، تاثیرات سرعت و طرح هندسی بر ایجاد خستگی در روسازیهای انعطافپذیر، کنفرانس بین المللی پژوهشهای نوین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران، شرکت مدیران ایده پردازان پایتخت ایلیا، صفحه ۱-۷.

-زیاری، ح. و گرائیلی‌افرا، م.، (۱۳۸۵)، "بررسی تاثیر سرعت حرکت وسایل نقلیه بر خرابی های روسازی انعطاف پذیر"، هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران، ص. ۱-۸.

-شفابخش غ.ع. نادرپور، و ح. معتمدی، م.، (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی پاسخ بهینه روسازی آسفالتی به کمک روش اجزای محدود"، مجله مدلسازی در مهندسی، مقاله ۳، دوره ۱۴، شماره ۴۷، شماره زمستان، ص. ۳۳-۴۰.

نتیجه‌گیری نتایج حاصل از مدل سازی روسازی تحت اثر سرعتهای متغیر را برای انواع روسازی قوی تا ضعیف بر روی بستر ضعیف تا قوی به صورت زیر خلاصه نمود:

- با توجه به مدلسازی لایه‌های روسازی و پاسخ آن در سرعت‌های مختلف وابسته به زمان‌های مختلف تماس بار، با افزایش سرعت بارگذاری حداکثر کرنش های بحرانی (کششی زیر لایه آسفالتی) افزایش می‌یابد.

- از دیدگاه آماری کرنش فشاری روی خاک بستر وابستگی کمی به سرعت بارگذاری (حرکت وسایل نقلیه) دارد. همچنین این کرنش به ضخامت لایه رویه یا مشخصات مکانیکی لایه رویه وابستگی کمی دارد.

- بین کرنش کششی زیر لایه رویه و ضخامت لایه رویه بستر، ارتباط معنادار در سطح اطمینان ۹۵٪ تائید می‌شود و در سطح اطمینان ۹۰٪ می‌توان فرض ارتباط بین سرعت وسایل نقلیه کرنش کششی زیر لایه رویه را تائید نمود.

- برای کرنش کششی زیر لایه رویه بیش از ۹۰ درصد مقادیر حساسیت نسبی برای سرعت وسایل نقلیه است و بعد از آن متغییر ضخامت لایه رویه بیشترین تاثیر را داراست.

با توجه به موضوعات مورد مطالعه در این پژوهش، توجه به تقویت خاک بستر و قویتر شدن آن در خطوط ترافیکی کناری- کندرو- اهمیت بیشتری نسبت به افزایش ضخامت لایه آسفالتی آنها دارد بنابراین پیشنهاد می‌شود در فعالیت های اجرایی و نظارت پروژه‌های ساخت و بهبود روسازی‌ها به تقویت خاک بستر در خطوط تندرو توجه بیشتری شود، البته به دلیل قرارگیری این خطوط در لبه شيروانی‌ها برعکس، تراکم و تقویت آنها به سختی انجام می‌شود.

به عنوان موضوعات مطالعات آینده، بررسی روند پژوهش حاضر با نرم افزارهای تحلیل روسازی های اجزای محدود و یا نرم افزارهای تحلیلی با مدل کردن اثر سرعت و ضربه می‌باشد. نوع و شکل محور بارگذاری و تغییر در فشار سطح تماس نیز می‌تواند متغیرهایی برای تحقیقات آتی در این موضوع باشند.

۶- سپاسگزاری

از دانشجویان کارشناسی‌ارشد راه و ترابری ورودی مهر ۱۳۹۶ که در قالب پروژه کلاسی تحلیلهای نرم افزاری و

Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology", Springer, Cham, pp. 7-20.

-Huang Y. H., (2004), "Pavement Analysis and Design", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 2004, pp. 451.

-Keymanesh M.R, Pirhadi, A., Mirshekarian, B., Jafarian Y.A. (2016), "Sensitive Analysis of the speed of vehicle on the bottom stress of flexible pavement using finite element software", civil engineering journal, 2016 July. No.115, pp.62-74.

-Khabiri, M.M., (2010), "The effect of stabilized subbase containing waste construction materials on reduction of pavement rutting depth". Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15, pp.1211-1219.

-Kim, J. Sholar, G. A., Kim, S. (2008), "Determination of accurate creep compliance and relaxation modulus at a single temperature for viscoelastic solids," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 20, no. 2, pp. 147-156.

-Rith, M., Kim, Y. K., & Lee, S. W. (2018), "Behavior of RCC-base composite pavement for heavy duty area". Construction and Building Materials, 175, pp.144-151.

-Subhy, A. (2017), "Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterizations of modified bitumen: literature review," Construction and Building Materials, vol. 156, pp. 28-45.

-Xue, W. Weaver, E. Wang, L. Wang, Y. (2016), "Influence of tire inflation pressure on measured pavement strain responses and predicted distresses," Road Materials and Pavement Design, vol. 17, no. 2, pp. 328-344.

-Xueying Z., Aiqin S., Baofu M., (2018), "Temperature Adaptability of Asphalt Pavement to High Temperatures and Significant Temperature Differences," Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2018, AID 9436321, pp.16.

-Ziari, H., Ameri, M. and Khabiri, M.M., (2007). Resilient behaviour of hot mixed and crack sealed asphalt concrete under repeated loading. Technological and Economic Development of Economy, 13(1), pp.56-60.

-Zhang, J. Xu, L. Wang, B. L. (2010), "Modification of creep model of asphalt mixture and parameters determination," Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), Vol. 4, pp. 699-702.

-عالی، ع.، (۱۳۹۴)، "بررسی اثر سرعت تایر بر تنش لایه‌های روسازی آسفالتی با آنالیز المان محدود"، دومین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه‌های عمرانی، سمنان، گروه آموزش و پژوهش شرکت مهندسی بارو گستر پارس، شرکت مهندسی مشاور پرهون آبراهه، ص. ۱-۱۳.

-عطارنیاری، م.، ایمانی کله سره، (۱۳۹۵)، "تعیین اثر وزن محورها و سرعت خودروها بر روسازی راه‌های آسفالتی"، سومین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و توسعه اقتصاد شهری، شیراز، موسسه آموزشی مدیران خبره نارون، ص. ۱-۱۳.

-فخری، م.، غنی زاده ع. ر و ناجی الماسی، س.، (۱۳۹۲)، "تاثیر سرعت و دما بر کرنش کششی و عمرخستگی لایه‌های آسفالتی، اولین کنفرانس ملی زیر ساختهای حمل و نقل، تهران، پژوهشکده حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران، ص. ۱-۷.

-منصورخاکی، ع. و سرکار، ع. ر.، (۱۳۹۰)، "ارزیابی تحلیلی مدت زمان بارگذاری بر تعداد سیکل بارگذاری منجر به خرابی در روسازی‌های آسفالتی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان، ص. ۱-۹.

-منصورخاکی، ع.؛ سرکار ع. ر. و متولی زاده، س. م.، (۱۳۹۳)، "بررسی تاثیر همزمان سرعت بارگذاری و شرایط محیطی بر عملکرد روسازی آسفالتی گرم، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران"، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، ص. ۱-۸.

-منصورخاکی، ع. و متولی زاده، س. م.، (۱۳۹۴)، "بررسی تاثیر همزمان وزن محور و سرعت حرکت خودرو بر رفتار خزشی مخلوطهای آسفالتی بر اساس مدلهای آزمایشگاهی - تجزیه توسط آزمایش بارگذاری تکرار شونده"، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز دانشکده مهندسی عمران، ص. ۱-۸.

-Chompoorat, T., Likitlersuang, S., & Jongvivatsakul, P. (2018), "The Performance of Controlled Low-strength Material Base Supporting a High-volume Asphalt Pavement". KSCE Journal of Civil Engineering, 22(6), pp.2055-2063.

-Hafez, M., Mousa, R., Awed, A., & El-Badawy, S. (2018), "Soil Reinforcement Using Recycled Plastic Waste for Sustainable Pavements". In International Congress and Exhibition "Sustainable