فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل دوره ۱۲، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۹، ص. ۲۴۱-۲۵۲

یادداشت پژوهشی

بررسی تاثیر افزودنی نیمه‌گرم بر عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر بر روی بسترهای مختلف بر پایه نتایج مدلسازی عددی

محمدمهدی خبیری(مسئول مکاتبات)، دانشیار بخش راه و ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

هادی وطن میدانشاهی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۳۱ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۰

چکیده

کاربرد اصلاح‌کننده و افزودنیها قیر عاملی است که بر ویژگی‌های مخلوط آسفالتی تاثیر می‌گذارد، این مواد افزودنی می‌تواند عملکرد وپاسخ روسازی در برابر بارگذاری را نیز تغییر دهد.ساسوبیت به عنوان افزودنی برای تولید آسفالت نیمه‌گرم،استفاده می‌شود،تاکنون بررسی کاملی در مقیاس نرم‌افزاری از تاثیر این مصالح در عملکرد روسازی انجام نشده است، در این تحقیق سعی شده‌است بر پایه نتایج آزمایشگاهی و نرم افزار المان محدود، یک مدل سه بعدی از روسازی، که لایه رویه‌ی آن از آسفالت نیمه‌گرم است توسعه یابد، و عکس‌العملهای بحرانی روسازی در زیر لایه رویه و روی خاک‌بستر شناسایی شود. فرآیند تحقیق اینگونه است که، در متغیرهای مختلف روسازی که مدل شده، تغییراتی ایجاد شد و مقایسه‌ای بین تغییر عکس‌العملهای در روسازی شاهد و روسازی با ماده افزودنی انجام گردید به علاوه اثر تغییر در ضخامت رویه ومدول عکس العمل بستر از مواردی بوده است که این مطالعه به آنها توجه دارد. هدف از این پژوهش بررسی مقایسه عملکرد دو نوع مخلوط آسفالتی بر روی بستر معمولی و تثبیت شده‌بود، نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد، استفاده از مواد افزودنی علاوه بر اینکه باعث افزایش مدول الاستیسیته رویه آسفالتی می‌شود، کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در روسازی شاهد به میزان قابل توجهی را نیز کاهش می‌دهد، بعلاوه کرنش فشاری روی خاک‌بستر نیز کاهش می یابد. نتایج نشان داد، افزایش ضخامت لایه رویه آسفالتی در مقایسه با استفاده از افزودنی در کاهش کرنشهای بحرانی تاثیر بیشتری دارد.

واژه های کلیدی: روسازی انعطاف‌پذیر، المان محدود، کرنش‌های بحرانی، مدول الاستیسیته، ساسوبیت.

۱. مقدمه

مزیت‌های سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای و دسترسی فراوان به آن باعث گسترش زیرساخت‌های آن و تقویت مسیرهای موجود شده است. از مسائل مهم این سیستم، عبور جاده از مسیرهای با بستر سست و عدم باربری کافی است. جهت اصلاح بستر نرم و سست از مواد شیمیایی و یا افزودن لایه‌ها و مصالح متنوع استفاده می شود. از دیدگاه صنعت حمل و نقل نیز، وضعیت روسازی راه‌های کشور به جهت اتفاق افتادن خرابی‌های متعدد نیاز به توجه بیشتر بویژه در مرحله ساخت و بهسازی دارد [Kavousi , Semenarshad and Safarzadeh, 2018] اجرای مسیرهای جدید و بهسازی مسیرهای موجود در بخش زیرسازی و روسازی در جای خود در توسعه حمل و نقل جاده‌ای نقش عمده‌ای دارند. وقوع خرابی‌ها و کاهش عمر روسازی به دلیل ضعف در مصالح و بستر آن یکی از چالش‌های عمده اقتصادی و توسعه پایدار است. وقوع نشست‌های بستر که در خرابی شیارشدگی و ضعف در مقاومت کششی لایه‌های آسفالت در خرابی ترک خوردگی نمود پیدا می‌کنند و در مجموع عمر روسازی را کاهش می‌دهند، دو نوع خرابی عمده است که در این مطالعه مورد توجه قرارگرفتند.

مزایای افزودنیهای مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم[1] به تکنولوژی مورد استفاده بستگی دارد. درجات متفاوتی از مزایا برای این روش‌های مختلف وجود دارد. مزایای عمده تکنولوژی فوق شامل کاهش آلاینده‌ها، کاهش مصرف سوخت، کمک به تراکم بهتر مخلوط، پخش در دمـــاهای کمتر، مسافت حمل بیشتر، بهبود شرایط کاری و بهسازی روســـازی‌های خاص است[Hurly, and Prowel, 2005].

در ضرورت انجام این پژوهش می‌توان بیان کرد، تاکنون بیشتر مطالعات در خصوص استفاده از افزودنی‌های آسفالت نیمه گرم بر روی مشخصات قیر یا مخلوط آسفالتی ساخته شده از آن متمرکز بوده‌اند، و کمتر به ساختار سازه‌ای روسازی توجه‌شده‌است. این مطالعه تلاش دارد برعملکرد و رفتار این مخلوط در برابر بارگذاری وقتی در لایه‌های روسازی قرار می‌گیرد مورد توجه قراردهد. بنابراین در روش این تحقیق از مدلسازی المان محدود و با کمک نرم‌افزار آباکوس[2]، مدلی سه بعدی از ضخامت و لایه‌های روسازی آسفالتی رایج ساخته شده و تاثیر تغییر در مدول الاستیسیته بستر و لایه آسفالتی با ضخامتهای متفاوت مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد، از اهداف تحقیق حاضر مقایسه اثرگذاری تغییر ضخامت لایه رویه و تغییر مقاومت خاک‌بستر بر عملکرد کل روسازی در برابر بارگذاری است. این مطالعه به دنبال پاسخ به این سوال عملی و کاربردیست، که افزایش مدول الاستیسیته لایه آسفالتی تاثیر بیشتر بر افزایش عمر روسازی دارد یا افزایش ضخامت لایه رویه این امر را بهینه‌تر انجام می‌دهد، البته این مقایسه در دو بستر مقاوم و ضعیت به طور موازی انجام می‌گیرد. مدلسازی نرم افزاری انجام شده در این مطالعه با هدف درک مکانیزم گسترش خرابی در روسازیها امری رایج است و الگوی اولیه و کم هزینه بهتری برای هزینه‌کردن در انجام آزمایشهای میدانی با مقیاس کامل[3] و پرهزینه را ارائه می‌دهد [Taherkhani, Moradi and Jalali ,2017]. برای درک مقایسه بهتر همزمانی چند اقدام اصلاحی با تغییر در متغیرهای این پژوهش در نمودارهای سه بعدی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲. مرور منابع

به منظور بهبود عملکرد و افزایش دوام مخلوطهای آسفالتی افزودنیهای مختلفی استفاده می‌شود، در میان افزودنیهای رایج کاربرد ساسوبیت[4] در سالهای اخیر مورد توجه محققین بیشتری قرارگرفته‌است، نتیجه استفاده از این نوع افزودنیها افزایش مقاومت در عوامل محیطی و افزایش مدول برجهندگی[5] است [Fallah Khabiri and Khani Sanij,2017]. همچنین استفاده از این ماده کاهش دمای اختلاط و تراکم را در پی دارد، که کمکی به مسائل زیست محیطی است. استفاده از آسفالت نیمه گرم به عنوان یک پیشنهاد در کاهش مصرف سوخت و کمک به

حفظ محیط زیست مورد توجه محققین بیشماری بوده است. از جمله مقایسه‌ای مبتنی بر مدلهای اقتصادی-اجتماعی بین انواع مواد افزودنی و روان‌کننده‌های قیر برای تولید آسفالت نیمه‌گرم انجام شده است، در نتایج این مدلسازی اقتصادی-اجتماعی توسعه یافته، محققین دریافتند که استفاده از افزودنی ساسوبیت در مقایسه با سایر مواد افزودنی نظیر اواترم[6] متعادلترین ماده است [Kucukvar et al.. 2014] .

به دلیل وقوع خرابی‌های عمده روسازی ناشی از ترک‌خوردگی لایه رویه و ایجاد نشست سطحی ناشی از تغییرشکل بستر به دو کرنش کششی زیر لایه رویه آسفالتی و کرنش فشاری روی بستر روسازی‌ها توجه بیشتری می‌شود[Khabiri,2006]. بنابراین ارائه راهکار مناسب کنترل این کرنشهای بحرانی و بررسی نحوه کاهش آنها باعث کاهش خرابی‌های زودرس و کاستن از هزینه‌های مرمت روسازی در طول عمر بهره‌برداری آن می‌شود. در تحقیقی به سرپرستی کیم در سال۲۰۱۷ در کانادا از ساسوبیت به همراه مصالح بازیافتی آسفالتی استفاده شد، در نهایت با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی، عملکرد خرابی شیارشدگی میدانی با نتایج مدلهای نرم‌افزاری توسعه‌یافته مقایسه‌گردید، که نتایج انطباق مناسبی داشتند[Kim et al..2017]. در مطالعات دیگری برنامه تحلیلی و طراحی M-E[7]برای روسازی‌های آسفالتی نیمه گرم بکاربرده‌شد، که در نتایج آن اشاره می‌شود، این برنامه می‌تواند عمق شیارشدگی را بخوبی پیش‌بینی کند، منتهی از واقعیت این عمق را کمی بیشتر محاسبه‌می‌کند، همچنین درخصوص ترک‌خوردگی حرارتی و ترک بالا به پائین روسازی‌ها از این نرم‌افزار برای رویه‌ها نیمه‌گرم نتایج قبل اعتمادی بدست می‌آید[Zhang et al.. 2017] .

در مطالعات وُو و همکاران در سال ۲۰۱۶ که آسفالتهای نیمه‌گرم را به صورت میدانی در احجام ترافیکی و شرایط محیطی گوناگون در مدت دو سال در ۲۸ پروژه اجرایی مورد مطالعه قراردادند، مشخص‌گردید نحوه گسترش ترک در نوع روسازی آسفالت نیمه گرم و آسفالت داغ شبیه به یکدیگر است [Wu et al.. 2016] در مطالعه‌ای آزمایش خزش دینامیکی[8] برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده مورد استفاده قرارگرفت. نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که ساسوبیت با افزایش سختی مخلوط آسفالتی باعث افزایش مدول برجهندگی و همچنین کاهش میزان شیار شدگی نسبت به مخلوط نانوزایکوترم[9] شده است [Behbahani, Ayazi and Shojaii, 2017] در مطالعات مختلف به ویژگیهای مواد افزودنی اشاره داشته‌اند، از جمله تاثیر پودر لاستیک و ساسوبیت و تاثیر هم‌زمان این دو افزودنی بر پارامترهای مقاومتی نظیر استقامت مارشال در حالت خشک و مرطوب، خستگی در سطوح مختلف کرنش، شیارشدگی و مدول برجهندگی، بررسی شدند. نتایج حاکی از آن است که بیشترین تاثیر این دو افزودنی بر مقاومت خستگی و شیارشدگی بوده است و اثر استفاده هم‌زمان این دو افزودنی بر افزایش مقاومت خستگی و شیارشدگی قابل توجه‌است [Abotalebi and Rahimi,2017]. بسیاری از خرابیهای روسازیها به دلیل عدم رعایت استانداردهای فنی در تامین خاک‌بستر مناسب است، به جهت عدم دسترسی به بستر در زمان بهره‌برداری جهت اصلاح و تعمیر و نگهداری، مطالعه دقیق عملکرد و اثر آنها بر پاسخ روسازی قبل از نهایی شدن تصمیمات در طراحی ضروریست. نرم‌افزارهای متعددی برای مدلسازی پاسخ روسازی بکاررفته‌اند، همچنین به علت افزایش بارمحوری و سرعت و ترکیب این عوامل در رفتار روسازی، دقت این نرم‌افزارها باید مورد توجه قرارگیرد اغلب این نرم‌افزارها در مقایسه با شرایط واقعی، می‌توانند به خوبی نتایج محاسباتی را به نتایج واقعی نزدیک نمایند[Cheng et al. 2018].استفاده از بسترهای تثبیت شده سیمانی[10] در زیرساختهای حمل ونقل زمینی در حال گسترش است، در تحقیقات اخیر با کمک نرم‌افزارهای عددی و المان محدود اثرات بارگذاری مختلف بررسی می‌شود، از جمله بارهای ضربه‌ای نیز توسط این روش مطالعات عددی بررسی شده است[Ali et al.2018]. استفاده از تحلیل الاستیک خطی

برای بررسی عملکرد روسازی حاوی آسفالت نیمه‌گرم در برابر بارگذاری در مطالعات یکی از پایان‌نامه‌های دکتری مورد توجه قرارگرفته، که نتایج آن نشان داد، شکل نمونه‌ها در تحلیل المان محدود، تنش فشاری تاثیرگذار نیست، ولی در محاسبه‌ی تنشهای کششی شکل نمونه‌ها تاثیرپذیراست. تحقیق نامبرده با تغییر در مدول الاستیسیته، به این نتیجه رسید که کرنشها در مقایسه با تنشها بیشتر تحت تاثیر مدول الاستیسیته تا سطح تنش هستند[Nel, 2017] . هنوز جنبه‌های زیادی از تاثیر کاربرد مخلوطهای آسفالتی نیمه‌گرم حاوی مواد افزودنی برای تحمل بارگذاری مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. یکی از این جنبه‌های مطالعاتی، مقایسه روش استفاده از آسفالت نیمه گرم با مدول الاستیسیته بالاتر و یا افزایش ضخامت لایه روسازی است. در این تحقیق هدف ، آگاهی از تاثیر تغییر در ضخامت لایه و مدول الاستیسیته آن در دو نوع خاک‌بستر متفاوت، یکی بدون تثبیت و کم مقاومت و دیگری با تثبیت و مقاومت زیاد است.

۳. روش تحقیق

روش المان محدود قبل از انجام آزمایشهای میدانی وعملکردی می‌توانددر برنامه‌ریزی‌های آزمایشگاه میدانی و اجرائی استفاده‌گردد. در این تحقیق رفتار لایه‌های آسفالتی به صورت الاستیک خطی درنظر گرفته‌شده است. قبل از انجام عملیات مدلسازی در این تحقیق، نرم‌افزار آباکوس مورداستفاده، تحت بررسی برای اعتبارسنجی نتایج خروجی قرار گرفت. برای این منظور از تحقیق انجام‌شده در دانشگاه ایلینوی آمریکا استفاده شده‌است[Kim, 2007]. سطح بارگذاری شامل یک چرخ دایره‌ای شکل با شعاع ۱۵۲/٤ میلی‌متر و با فشار یکنواخت ۰/۵۵ مگاپاسکال است. خصوصیات مواد در هر لایه به صورت ایزوتروپیک و الاستیک خطی فرض شده‌است. بعد از ساخت و تحلیل مدل مشابه تحقیق ایالت ایلینوی در نرم‌افزار آباکوس، نتایج به دست‌آمده با نتایج ذکر شده در تحقیق مقایسه شده و دقت نرم‌افزار بررسی‌شد. مقایسه بین نتایج نشان‌داد، که پاسخ‌های روسازی در مقایسه با مدل ساخته شده در این تحقیق، در کمتر از ۱۰ درصد با یکدیگر اختلاف دارند، که می‌تواند قابل قبول باشد. این مقدار اختلاف ناشی از تفاوت اندک در نحوه مش‌بندی است و با یک روش سعی و خطا این مقدار تفاوت را نیز می‌توان کاهش داد اما نتیجه کلی اینست، که نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده در این تحقیق دارای دقت قابل قبولی است.

تمرکز تنش در اطراف سطح بارگذاری ایجاب می‌کند که از تعداد المان‌ها و گره‌های بیشتری در این ناحیه استفاده کرد اما این موضوع سبب افزایش زمان محاسبات توسط نرم‌افزار می‌شود. از طرف دیگر هر چه تعداد المان‌ها کمتر انتخاب شود دقت مدل کاهش می‌یابد[Vatanmeidanshahi,2017]. برای حل این مشکل از روشی موسوم به آنالیز حساسیت استفاده شده است. در این روش از روش سعی و خطا استفاده می‌شود، بدین صورت که در هر بار تحلیل مدل یک المان‌بندی جدید به کار برده و مدل تحلیل می‌شود، نتایج تحلیل در هر مرحله با هم مقایسه شده و هنگامی که اختلاف بین نتایج به مقداری ناچیز رسید، آنگاه مدل از دقت کافی برخوردار است. شکل المان‌ها نیز از نوع المان هشت گرهی خطی پیوسته با پیوستگی کم[11] انتخاب می‌شود تا نتایج نرم‌افزار همگرایی کافی داشته‌باشد.

۳-۱ مشخصات مصالح

ساسوبیت که از انواع افزودنیهای آلی است ،نوعی واکس فیشرتراپس است. طول مولکولی هیدروکربن ساسوبیت در محدوده C_{40} تا C_{120} و با فرمول عمومی C_nH_{2n+2} است. واکس ساسوبیت دارای نقطه ذوب ۵۸ درجه سانتیگراد و محدوده ذوب ۷۰ تا ۱۱٤درجه سانتیگراد است. واکسهای فیشرتراپس در دمای بالای ۱۱۵درجه سانتیگراد بطور کامل در قیر انحلال‌پذیرمی‌باشند و یک محلول همگن با قیر تشکیل می‌دهند و در این حالت، افت مشخصی در کندروانی قیر ایجاد می‌نمایند در هنگام خنک‌سازی، پارافینهای فیشرتراپس متبلور

شده و تشکیل بلورهای کوچکتر قیر می‌دهند که باعث افزایش استحکام و مقاومت در برابر تغییر شکل می‌شوند. ساسوبیت را می‌توان به صورت پیش‌آمیخته با قیر مخلوط نمود یا در زمان اختلاط به مخلوط اضافه نمود. در آمریکا معمولاً از ساسوبیت با ۱ تا ۱/۵ درصد وزن قیراستفاده می‌شود. در آلمان معمولاً ساسوبیت به ۲ تا ۲/۵درصد کل وزن قیر استفاده می‌شود. این نسبت با توجه به اثرات سختی در درجه حرارتهای بالا، نباید از ۳ درصد فراتررود[Fallah, 2016].

مشخصات ساسوبیت مورد استفاده در جدول (۱) موجود است. بسیاری این مشخصات بعد از حرارت دیدن این محصول وسیال شدن آن قابل انجام است. در این آزمایش بارگذاری به صورت دوره‌ای و در تعداد ۵ سیکل بارگذاری با قابلیت اندازه‌گیری تغییرشکل افقی صورت گرفت. دوره بارگذاری۰/۱ ثانیه و زمان دوره استراحت ۰/۹ ثانیه و به صورت نیمه‌سینوسی با فرکانس یک هرتز و با سطح تنش بارگذاری ۵۰۰کیلوپاسکال است. مشخصات مدول‌الاستیسیته و نتایج سایر آزمایشهای عملکردی نظیر آزمایش خستگی بارگذاری کششی غیر مستقیم، آزمایش دوام مخلوط آسفالتی دربرابر زیانهای رطوبتی و آزمایش خزش دینامیکی مخلوط آسفالتی بدست آمد. نمونه‌های آسفالتی، شامل نمونه شاهد (بدون ساسوبیت یا آسفالت داغ) ساخته شده از قیر AC60/70 و سنگدانه‌های با دانه‌بندی منطبق بر دانه‌بندی شماره ٤ دستورالعملهای ملی و همچنین به طور مشابه نمونه آسفالتی نیمه‌گرم(حاوی افزودنی ساسوبیت) ساخته شدند. در جدول (۲) مشخصات مکانیکی این مصالح ملاحظه می‌شود[Rahidco,2016]. مشخصات لایه اساس نیز از مراجع معتبر در نظر گرفته‌شده، که ضخامت آن ۱۵ سانتیمتر و مدول‌الاستیسیته آن ۱٤۰۰kg/cm^2 منظور گردید[Fakhri and Farokhi,2010]، همچنین ضخامت خاک‌بستر در مدلسازی۳ متر درنظرگرفته‌شد، در مدلسازی نیز کف خاکبستر به صورت کامل بعد از ضخامت سه متری بسته شده‌است، بدلیل ثابت بودن این پارامترها در کل مدلها، از همین مقادیر در کلیه حالات اجراء نرم‌افزار استفاده شد. مدول الاستیسیته خاک‌بستر در دو حالت مختلف در یک حالت به صورت معمول و در سناریو دیگر تثبیت شده جهت مقایسه اثر تثبیت لایه بر عملکرد روسازی در نظرگرفته‌شد. تمامی مشخصات مصالح بکاررفته در مدل در جدول(۳) نمایش داده شده است با توجه به اینکه هدف از این پژوهش بررسی مقایسه عملکرد دو نوع مخلوط آسفالتی بر روی بستر معمولی و تثبیت شده‌بود. در مجموع روسازی در هشت سناریو، بدین صورت‌که خاک‌بستر در دو مدول الاستیسیته و برای لایه آسفالتی نیز از دو نوع مخلوط آسفالتی استفاده شد و برای بررسی اثرگذاری تغییر ضخامت لایه رویه بر واکنش روسازی نیز دو ضخامت مختلف برای لایه رویه در نظرگرفته شد.

الف

ب

شکل ۱. الف)تصویری از نمونه ساسوبیت در تولید آسفالت نیمه‌گرم،ب) مرحله اختلاط با قیر[Fallah,2016 Sasolwax US,2003]

جدول ۱. مشخصات ساسوبیت مورد استفاده در تحقیق[Rahidco,2016]

پارامتر عملکردی	استاندارد مرجع	حدود مشخصات	واحد
کندروانی	ASTM-D7042	۱۳–۱۶	mm^2/s
درجه نفوذ	ASTM-D1321	۲۵–۳۰	0.1 mm
چگالی	ASTM-D6683	۰/۹۲–۰/۹۶	g/cm^2
نقطه ذوب	ASTM-D938	۸۰–۱۱۰	درجه‌سانتی‌گراد
کندروانی سی‌بولت	ASTM-D156	۲۰–۳۰	سانتی‌استوکس–CST

جدول ۲. مشخصات مصالح آسفالتی مورد استفاده در تحقیق[Rahidco,2016]

پارامتر عملکردی	واحد	استاندارد مرجع	نوع مخلوط آسفالتی	
			نمونه شاهد(HMA)	آسفالت نیمه‌گرم(WMA)
مدول‌برجهندگی	Kg/cm^2	ASTM-D4123	۷۸۰۷	۹۷۵۰
خستگی کششی غیرمستقیم	تعداد سیکل	BS-Draft-ABF	۲۲۵٤	٥۱۱٦
نسبت رطوبتی	٪	AASHTO-T283	۸۳	۹۳
خزش دینامیکی محوری	تعداد سیکل	ASTM-D6925	٤٦٤۱	۹۱۸٤

جدول ۳. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدلسازی[Rahidco,2016, Fakhri and Farokhi,2010]

لایه	سناریو روسازی	شاهد–HTG	WTG	HTC	WTC	HKG	WKG	HKC	WKC
ضخامت (mm)	آسفالت	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵
مدول الاستیسیته (kg/cm^2)	آسفالت	۷۸۰۰	۹۷۵۰	۷۸۰۰	۹۷۵۰	۷۸۰۰	۹۷۵۰	۷۸۰۰	۹۷۵۰
	خاک‌بستر	۱۷۰	۱۷۰	٤۱۰۰	٤۱۰۰	۱۷۰	۱۷۰	٤۱۰۰	٤۱۰۰

۳-۲ مشخصات بارگذاری مدل

ابعاد سطح تماس به کمک فشار باد لاستیک و میزان بار وارده بر هر چرخ محاسبه می‌شود. فشار باد لاستیک تریلرها ۷۵۹ کیلوپاسکال است. در میان کل وسایل نقلیه، کامیون‌ها دارای بیشترین سهم در خرابی‌های روسازی به دلیل وزن بالای خود می‌باشند. از سویی می‌توان به تریلرها به عنوان یکی از انواع پرکاربرد و پرتکرارترین انواع کامیون‌ها در ایران و بسیاری از کشورهای دنیا اشاره نمود. متداول‌ترین تریلرهای بحرانی عبوری در سطح جاده‌ها شامل تریلرهای پنج محور ۱۸ چرخ و ۱۲ چرخ هستند. تریلرهای ۱۸ چرخ دارای محور تاندم جفت چرخ و تریلرهای ۱۲ چرخ دارای محور تریدم تک چرخ هستند، که در مطالعات قبلی این نوع بارگذاری بحرانی‌تر از سایرین بدست‌آمد. بنابراین تریلر ۱۲ چرخ با محور تریدم مدل Scania G400 مطابق جدول(٤) مبنای محاسبات قرار گرفته و وضعیت روسازی در شرایط مختلف، با این تریلر

سنجیده می‌شود[Vatan,2017]. شکل(۲)نمایی از تاثیر این نوع کامیون بحرانی بر عملکرد دو سطح کرنش فشاری و کششی به ترتیب زیر لایه رویه و روی خاک‌بستر را نمایش می‌دهد.

جدول٤. فاصله محوری در تریلر۱۲چرخ با محور تریدم و چرخ تک

کد / محور / نوع تریلر	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)
ScaniaG400	۱۹۰	۱۵۰	۵۶۰	۵۵	۵۵	۱۹۰	۱۳۵

٤. مبانی تحلیل عددی

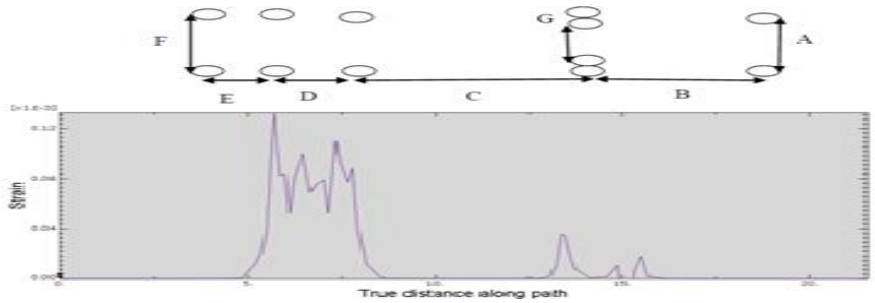
همانگونه که بیان شد، ملاک عمل در محاسبات عکس العمل روسازی، کرنشها شدند، انستیتو آسفالت جهت تعیین عمر روسازی از دو شاخص ترک خستگی لایه آسفالتی و گودافتادگی(شیارشدگی) مسیر چرخ استفاده کرده‌است. به این منظور، رابطه(۱) برای تعیین عمر خستگی و رابطه (۲) برای تعیین عمر شیارشدگی استفاده شده است. در این روابط 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 خاک‌بستر و E_1، مدول الاستیسیته لایه آسفالتی(بر حسب پوند بر اینچ‌مربع) است[Vatanmeidanshahi,2017].

$$N_f = 0.0796\times(\varepsilon_r)^{-3.291}(E_1)^{-0.854} \quad (۱)$$

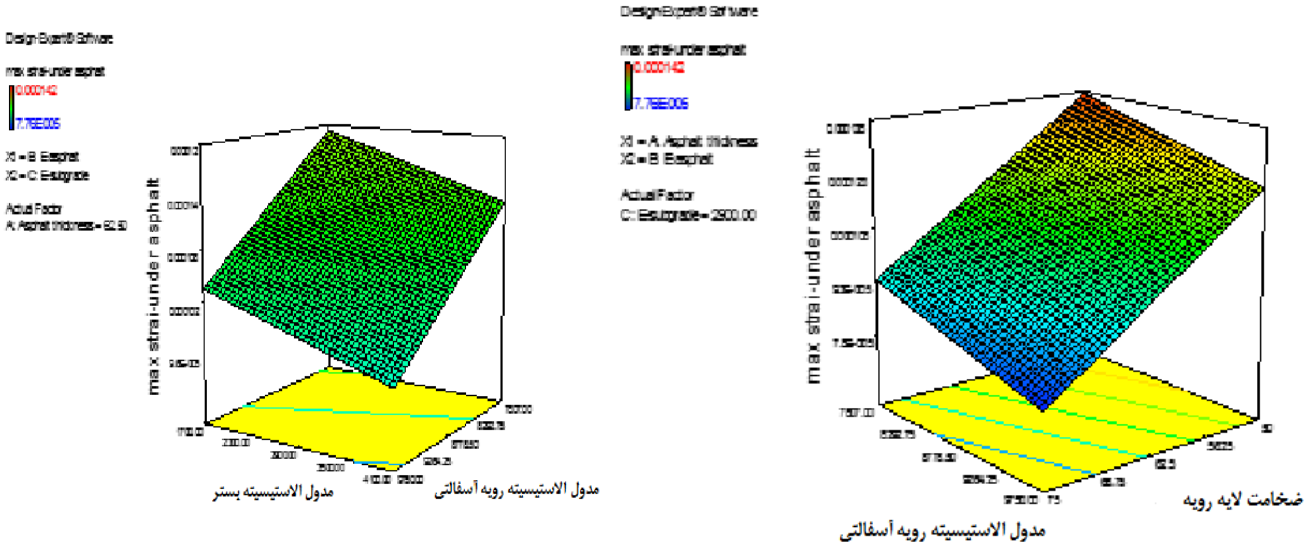
$$N_d=1.365\times(\varepsilon_c)^{-4.477} \quad (۲)$$

۵. نتایج مدلسازی و بحث در نتایج

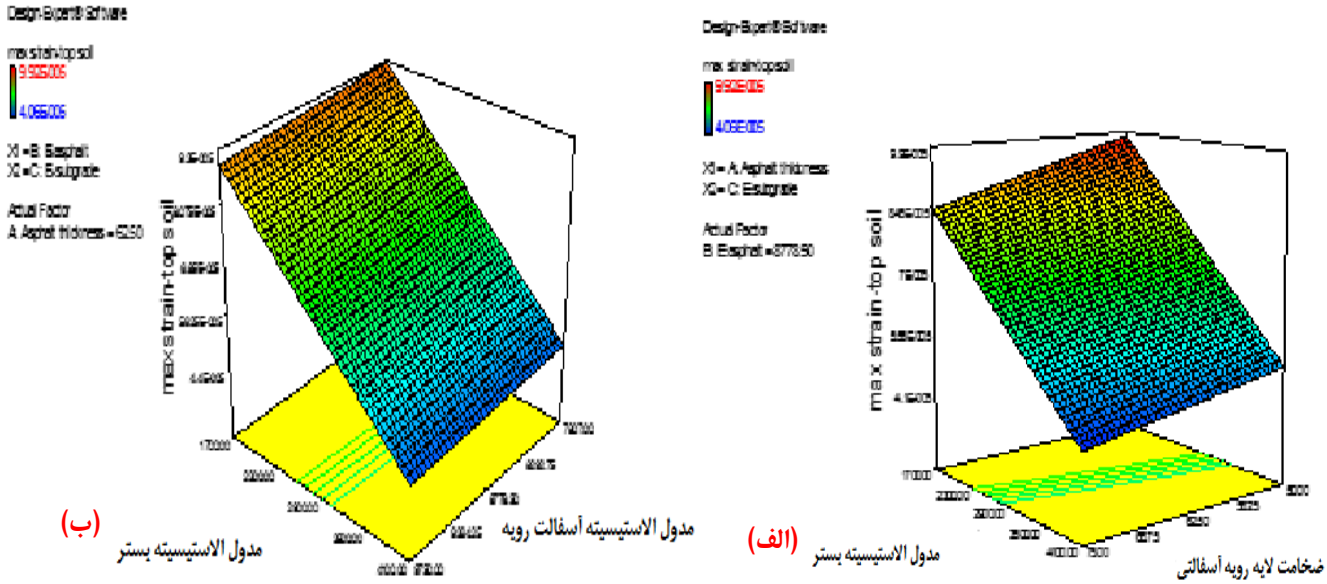
در تحلیلهای انجام شده در این تحقیق، دو نوع عکس‌العمل روسازی مشتمل بر کرنش حداکثر زیر لایه رویه و کرنش روی خاک‌بستر به عنوان معیارهای خرابی روسازی در نظرگرفته‌شد. نتیجه بررسی اثر استفاده از افزودنی در این مطالعه نشان می‌دهد با توجه به افزایش مدول الاستیسیته در مخلوط نیمه‌گرم، کرنش کششی همانگونه که در شکل(۳) الف وب و شکل(٤) الف وب مشاهده می‌شود ٪۱۵ زیر لایه رویه کاهش پیدا می‌کند، ولی کرنش فشاری روی خاک‌بستر تنها در حد ٪۲/۵ کاهش یافته‌است. به این معنی که استفاده از لایه آسفالتی نیمه‌گرم در افزایش عمر خستگی نقش بسزایی دارد، ولی در کاهش مقدار نشست سطحی تاثیر چندانی نخواهد داشت. این نتیجه در راستای نتایج مطالعات بهبهانی وهمکاران است، که افزایش عمر خستگی رویه‌ای آسفالتی نیمه‌گرم را تائید نمودند[Behbahani, Ayazi and Shojaii,2017]. در خصوص استفاده از بستر تثبیت شده همانگونه که در شکل(۳) ب وج وشکل(٤)ب وج ملاحظه می‌شود، استفاده از بسترهای تثبیت و تقویت شده باعث تغییر ناچیز در کاهش کرنش کششی زیر لایه رویه در حدود ٪۲/۱، و در عوض منجر به کاهش کرنش فشاری روی خاک‌بستر به میزان، ٪۵۰ شده است، این نتیجه نیز با نتیجه مطالعات ژئو وهمکاران که اثر افزایش مدول الاستیسیته بستر را عاملی بر کاهش شیارشدگی می‌دانند، همسو است[Zhou,2018]. در خصوص اثر تغییر ضخامت لایه رویه نیز باعث کاهش کرنش کششی زیرلایه رویه به میزان ٪۳۰ و کاهش کرنش فشاری روی خاک‌بستر به میزان، ٪ ۱۳/۳ شده‌است، به عبارت دیگر اثر افزایش ضخامت لایه رویه بر عملکرد کرنش کششی و عمر خستگی روسازی تا دو برابر بیشتر از اثر آنها بر کاهش عمق شیارشدگی است، این موضوع در شکلهای(٤) و(۵) قابل مشاهده‌است. به علت افزایش سختی لایه رویه با افزایش ضخامت به‌اندازه ٪۳۳، به همین میزان کرنش کششی نیز کاهش می یابد. در پی آن انتظار می‌رود عمر روسازی افزایش یابد.



شکل۲. آرایش بارگذاری و پاسخ روسازی در زیر محورهای تریلردرروسازی شاهد(الف) آرایش بارگذاری کامیون وکرنش کششی‌زیرلایه‌رویه(



شکل۳. تغییرات کرنش کششی زیرلایه رویه در سناریوهای مختلف روسازی،الف)تغییرات ضخامت ومدول الاستیسیته رویه ب))تغییرات مدول الاستیسیته بستر و رویه



شکل٤. تغییرات کرنش فشاری روی خاک‌بستر در سناریوهای مختلف روسازی،الف)تغییرات ضخامت رویه ومدول الاستیسیته بستر ب) تغییرات مدول الاستیسیته بستر و رویه

٦. نتیجه‌گیری

مشخص است که افزودنی قیر بر ویژگی‌های مقاومتی مخلوط آسفالتی تاثیر می‌گذارد، در این تحقیق اثر عوامل مختلف در خرابی شیارشدگی و ترک‌خوردگی رویه‌ی روسازی حاوی لایه‌ی آسفالت نیمه‌گرم با مدلسازی عددی مطالعه شد. نتایج خلاصه‌ی زیر، در دامنه شرایط ارزیابی شده قابل حصول است.

- استفاده از آسفالت نیمه گرم در لایه رویه بین ۱۵ تا ۲۰ درصد عمر روسازی را بسته به معیار انتخابی افزایش می‌دهد.
- در حالت استفاده از لایه بستر تقویت‌شده، بیشترین تاثیرگذاری بر کرنش فشار روی خاک‌بستر اتفاق می‌افتد که این کرنش را تا حد ۵۰درصد نیز کاهش می‌یابد.
- استفاده از لایه رویه ضخیم‌تر عمر خستگی را دو برابر وعمر شیارشدگی را ٪۲۰ درصد افزایش می‌دهد.
- افزایش ضخامت لایه رویه آسفالتی در مقایسه با استفاده از افزودنی در کاهش کرنشهای بحرانی نشان داد، تاثیر بیشتری دارد.
- عمر خستگی روسازی در بسترهای معمولی در یک ضخامت ثابت تاثیرپذیری کمی از جنس لایه رویه دارد، به عبارت دیگر، جهت جلوگیری از ترک‌خوردگی زودرس در روسازی راهکار افزایش ضخامت لایه و تقویت بستر موثرترین راهکارها هستند.

این تحقیق به مقایسه‌های زوجی از متغییرهای سه‌گانه در طراحی آسفالت نیمه‌گرم و معمول پرداخت، که در مطالعات آتی تعداد حالت مختلف بیشتر به علاوه‌ی در نظر گرفتن شرایط محیطی می‌تواند مورد توجه قرارگیرد.

۷.سپاسگزاری

از شرکت مهـندسی رادهیـــکوش بویژه مهندس اظهاری به علت در اختیار قراردادن برخی نتایج آزمایشگاهی که در مدلسازی بکاررفته سپاسگزاری می‌شود.

۸.پی‌نوشت‌ها

1. Warm Mixed Asphalt
2. Abaqus
3. Full Scale
4. Sasobit; Fine Crystalline Long Chain Aliphatic Hydrocarbon
5. Rapture Modulus
6. Evotherm
7. Mechanistic-Empirical Pavement Design
8. Creep Dynamic Test
9. Nano Zycotherm
10. Cement Treated Base-CTB
11. Eight-Node Brick Element with Reduced Integration-C3D8R
12. Kolmogorov-Smirnov Test
13. Analysis of Variance
14. Stands for significance level

۹. مراجع

-ابوطالبی اصـــفهانی، محسن و رحیـمی، ا.شکان (۱۳۹٦) " تاثیر پودر لاستیک و ساسوبیت بر پارامتـــرهای مقاومتی آسفالت گرم" ، فصلنامه مهندسی زیرساختهای حمل ونقل، سال سوم،شماره دوم، تابستان ۹٦، ص.۱۹-٤٤.

-بهبهانی، حمید، ایازی، محمدجواد و شجاعی، محمدحسین (۱۳۹۵) "ارزیابی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیار شدگی مخلوطهای آسفالتی نیمه گرم"، فصلنامه مهندسی حمل ونقل، سال هشتم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۵، ص.٤۰۵-.- راهیدکو (۱۳۹۵) "طرح اختلاط تثبیت مصالح با سیمان و آزمایشهای عملکردی و دوام رطـــوبتی مخـــلوط آسفالت معـــمولی و اصلاح شده با ساســـــوبیت" ، گـــزارش ۸۰ و گزارش ۳۰۰. آزمایشـــگاه مکانیک‌خاک استان خوزستان و یزد، ص۱۲ و۳۵.

-طاهرخانـی، حسن، مرادلو، امیرجواد و جلالی‌جـیردهی، مسعود(۱۳۹۵) "بررسی اثر فشارباد چرخ بر پاسخ روسازی‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک با تحلیل ویسکوالاستیک به روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس" ، دوره ۸، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۵، ص.۳۲۳-۳٤٤

-کاووسی، امیر، سمنارشاد، محمدسینا، و صفارزاده، محمود (۱۳۹٦)"ارائه مدل نگهداری و بهسازی شبکه راه‌های اصلی با بکارگیری تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر–مطالعه موردی استان خراسان جنوبی"، فصلنامه مهندسی حمل ونقل، سال نهم،شماره دوم،زمستان ۱۳۹٦، ص.۲۰۹-۲۳۰.

-وطن‌میدانشاهی،هادی (۱۳۹۵) "بررسی بارگذاری تریلرهای کشاورزی بر جاده روستایی و ارتباط آن با خرابی روسازی (مطالعه موردی: جاده روستایی شهرستان شهربابک)" ،پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، ص.۱۲٤-٤۱۸

-Ali, S., Liu, X., Thambiratnam, D., Fawzia, S., Gu, Y., Wu, J. and Remennikov, A. (2018)

،فصلنامه مهندسی حمل ونقل، سال هشتم، شماره دوم، زمستان ۹۵، ص.۳۲۳-۳٤۲.

- فخری، منصور و فرخی، مهدی (۱۳۸۹) "بررسی نحوه گسترش ترکهای بالا به پایین در روسازیهای آسفالتی، با استفاده از (TDC)فرضیه ی مکانیک شکست"، مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس،دوره دهم، شماره ۳، پائیز ۱۳۸۹،ص٦۳-۷٤.

-فلاح‌تفتی،محمد(۱۳۹٤) "ارزیابی اثر نوع سنگدانه‌ها و افزودنی بر عملکرد آسفالت نیمه‌گرم" ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران،دانشگاه یزد،ص.۱۵۸.

-Kim, M. (2007) "Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior" , Dissertations University of Illinois at Urbana-Champaign, Code: 3301166 .

-Kucukvar, M., Noori, M., Egilmez, G. and Tatari, O. (2014) "Stochastic decision modeling for sustainable pavement designs", The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.19, No.6, pp.1185-1199.

-Nel, C. L. M. (2017) "Identifying grading and binder combinations for improving the grey water resistance of asphalt", Thesis (MEng), Stellenbosch; Stellenbosch University, Cape Town, 2017, March, pp.239.

-Sasol Wax North America Corporation (2003) “Sasobit handling and blending guideline”, www.sasolwax.us.com, pp.1-4.

Wu, S., Wen, H., Zhang, W., Shen, S., Mohammad, L. N., Faheem, A. and Muhunthan, B. (2016) "Field performance of top-down fatigue cracking for warm mix asphalt pavements", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 20, Issue 1, pp.1-11.

-Zhang, W., Shen, S., Faheem, A., Basak, P., Wu, S. and Mohammad, L. (2017) "Predictive quality of the pavement me design program for field performance of warm mix asphalt pavements", Construction and Building Materials, No. 131, pp.400-410.

-Zhou, Y., Pan, L., Tang, Q., Zhang, Y., Yang, N. and Lu, C. (2018) "Evaluation of carbonation effects on cement-solidified contaminated soil used in road subgrade", Advances in Materials Science and Engineering, 2018, pp.1,(Published-online).

"Parametric study on cement treated aggregate panel under impact load", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol.18, No.2, pp.622-629.

-ASTM (2008)"Standard test method for asphalt ", Current edition approved Apr, 1, Volume 04.03, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, pp. 1-16.

-Cheng, D., Guo-yong, Z., Wen-jie, L., Lun, Z. and Rui-lei, Z. (2018) "Improved prediction model for dynamic resilient modulus of subgrade silty clay in eastern Hunan and its relevant finite element method implementation", American Journal of Civil Engineering, Vol.6, No.1, pp.44.

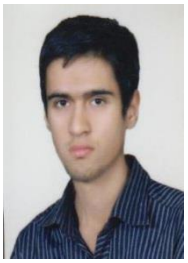
-Hurley, G. C. and Prowell, B. D. (2005) "Evaluation of sasobit for use in warm mix asphalt", NCAT Report, Vol.5, No.6, pp 1-27.

-Fallah Tafti, M. F., Khabiri, M. M. and KhaniSanij, H. (2016) "Experimental investigation of the effect of using different aggregate types on WMA mixtures", International Journal of Pavement Research and Technology, Vol.9, No.5, pp.376-386.

-Khabiri, M. M. (2006) "Development a mathematical model for increasing flexible pavement life cycle under preventive maintenance", Doctoral dissertation, University of Science and Technology 8 September 2006, pp. 188, doi: 10.13140/RG.2.2.23107.71203.

-Kim, D., Norouzi, A., Kass, S., Liske, T. and Kim, Y. R. (2017) "Mechanistic performance evaluation of pavement sections containing rap and wma additives in Manitoba", Construction and Building Materials, No.133, pp. 39-50.

محمدمهدی خبیری، درجه کارشناسی در رشته **عمران–عمران** را در سال **۱۳۷۶** و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران راه وترابری را در سال **۱۳۷۸** دریافت کرد. او در سال **۱۳۸۷** موفق به کسب درجه **دکتری** در رشته **عمران–راه وترابری، از دانشگاه علم وصنعت ایران** گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان **روسازی و ایمنی** راه بوده و در حال حاضر **عضو هیات علمی** با مرتبه **دانشیاری** در دانشگاه **یزد** است.



هادی وطن میدانشاهی، درجه کارشناسی در رشته **عمران–عمران** را در سال **۱۳۹۳** از دانشگاه **آموزش عالی کرمان** و درجه کارشناسی ارشد در رشته **عمران–راه‌وترابری را** در سال **۱۳۹۵** از دانشگاه **یزد** اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان **مدل‌سازی عددی رفتار روسازی و مطالعات آزمایشگاهی قیر و آسفالت** است.