چکیده

روسازی مرکب یکی از انواع روسازی‌های راه محسوب می‌گردد که از ترکیب یک یا چند لایه بتن اعم از بتن غلتکی (RCC)، بتن معمولی (PCC)، اساس سیمانی (CTB) و یا اساس تثبیت شده با سیمان (CSB) همراه با یک یا چند لایه روسازی آسفالتی که معمولا روی قسمت بتنی قرار می‌گیرد، تشکیل می‌شود. این نوع از روسازی‌ها بدلیل بکارگیری مصالح مرغوب در آنها، برای مسیرهای با ترافیک سنگین مناسب هستند. همچنین وجود اساس صلب باعث می‌شود که بیشتر مقاومت سازه‌ای روسازی توسط این لایه تامین گردد و لایه آسفالتی بیشتر نقش منعطف‌سازی سطح راه را داشته باشد. روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی یکی از متداول‌ترین نوع از روسازی مرکب می‌باشد که دارای خصوصیات ساختاری ویژه‌ای است. برای بررسی این نوع از روسازی تحت بارگذاری جانبی و افقی به روش المان محدود، می‌توان از نرم‌افزار آباکوس استفاده نمود. با تحلیل و مدلسازی سه‌بعدی روسازی مرکب با بکارگیری نرم‌افزار آباکوس و اعمال مودهای مختلف بارگذاری، می‌توان به مود بحرانی دست پیدا کرد و بحث‌های مربوط به مکانیک شکست را نیز بررسی نمود. همچنین می‌توان با بررسی در زمینه ترک‌های از بالا به پایین در این نوع از روسازی مرکب، بحث‌های مربوط به مکانیک شکست و پیش‌بینی در زمینه ترک را نیز مطالعه کرد.

تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه تحلیل و طراحی انواع روسازی‌های موجود انجام گردیده است. انجام چنین تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی منجر به ایجاد روش‌های مختلفی برای تحلیل روسازی‌های مختلف شده است که به عنوان مثال می‌توان به تئوری‌های لایه‌ای و صفحه‌ای اشاره کرد. یکی دیگر از روش‌های موجود با پیشرفت تکنولوژی، روش اجزای محدود (FEM) است. نرم‌افزار قدرتمند آباکوس یکی از نرم‌افزارهای مهم در زمینه تحلیل به روش اجزای محدود است. استفاده از روش المان محدود با استفاده از آباکوس، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش آزمایشگاهی باشد به شرط آنکه اعتبارسنجی‌های لازم و تحقیقات لازم در این زمینه صورت گیرد. نرم‌افزار آباکوس این قابلیت را دارد که با اعمال مودهای مختلف بارگذاری، به مود بحرانی دست پیدا کرد و این اساس کار تحلیل و طراحی روسازی محسوب می‌گردد. در سال‌های اخیر تحلیل‌های فراوانی در بخش روسازی‌های انعطاف‌پذیر و صلب صورت پذیرفته است اما توجه اندکی به روسازی مرکب شده است. بنابراین در این تحقیق، این خلا پژوهش مورد بررسی و پژوهش و اثبات قرار گرفته است. ضمن اینکه فرض‌های صورت گرفته در این پژوهش از جمله مشخصات مصالح، مبتنی بر تحقیقات صورت گرفته در سال‌های اخیر است. ضمنا برای تکمیل تحقیقات در زمینه مدل‌سازی روسازی مرکب با اساس بتن غتلکی، بهتر است نیم‌نگاهی به تحقیقات مشابه گذشته در مدل‌سازی روسازی انعطاف‌پذیر هم داشته باشیم.

واژه‌های کلیدی: روسازی مرکب، تحلیل و مدلسازی روسازی، اجزای محدود، نرم‌افزار آباکوس، مکانیک شکست

فصل ۱: مقدمه و تعریف مساله

۱-۱ کلیات

ساختار روسازی مرکب مشتکل از لایه‌های صلب و انعطاف‌پذیر است. تجربه کشورهای مختلف نشان داده است که روسازی‌های مرکب عملکرد بسیار خوبی را در راه‌های با ترافیک سنگین داشته‌اند. در مقایسه با روسازی انعطاف‌پذیر و صلب، روسازی مرکب کارایی بهتری چه به لحاظ سازه‌ای و چه عملکردی (جنبه‌های فنی) داشته و از نظر اقتصادی نیز به صرفه‌تر است [۱]. ایجاد تکیه‌گاه مستحکم برای لایه آسفالتی توسط لایه اساس صلب، افزایش راحتی راننده از طریق ارائه یک سطح صاف و هموار، مقاومت کافی روسازی در برابر لغزیدن، محافظت لایه آسفالتی از لایه صلب در برابر فرسایش و خورندگی آب‌های سطحی و با فرآیند یخزدایی، کاهش تغییرات حرارتی در لایه صلب و به تبع آن کاهش ترک‌خوردگی ناشی از انبساط و انقباض، کاهش تنش‌های ناشی از گرادیان و بار ترافیک و نیاز به عملیات نگهداری کمتر نسبت به روسازی‌های انعطاف‌پذیر از جمله مزایای روسازی مرکب است [۲-۴].

یکی از انواع روسازی‌های مرکب که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، مشتکل از لایه اساس از نوع بتن غلتکی و رویه آسفالتی است. روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی به عنوان ساختاری مقاوم و باصرفه اقتصادی برای مناطق با ترافیک سنگین استفاده می‌شود [۴]. بتن غلتکی نوعی بتن سیمانی است که از اختلاط مصالح سنگی درشت و ریز، سیمان و آب به مقدار کم ساخته شده و با اسلامپ نزدیک به صفر توسط فینیشر مخصوص آسفالت پخش شده و توسط غلتک‌های ارتعاشی متراکم می‌شود [۵, ۶]. از دیگر مزایای بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی، عدم نیاز به قالب، آرماتورهای مسلح‌کننده، میلگردهای اتصال و تای‌بار و درز است [۷]. روسازی‌های مرکب ممکن است در طول عمر بهره‌برداری به انواع خرابی‌ها دچار شوند که این خرابی‌ها به دلیل اینکه لایه آسفالتی در سازه مرکب قرار دارد، خیلی شبیه به خرابی‌های روسازی آسفالتی است [۴]. عمر سرویس‌دهی و عملکرد روسازی مرکب ممکن است به علت ترک انعکاسی، ترک خستگی بالا به پایین در رویه آسفالتی، شیارشدگی، جداشدگی اتصال دو لایه و جمع شدگی لایه آسفالتی کاهش یابد.

مناطق با بارگذاری سنگین از قبیل بنادر و ترمینال‌های بارگیری، محموله‌های باری را از طریق بخش حمل و نقل دریایی به زمینی و بالعکس منتقل می‌کنند. در این مکان‌ها برای حمل بارهای سنگین توسط وسایل نقلیه بارگیر و همچنین برای ایجاد یک جریان ترافیکی منظم و مطمئن در روند انتقال بار، روسازی نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این موارد در کشورهای اروپایی و آمریکا به طور گسترده روسازی مرکب با لایه آسفالتی و اساس صلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا این روسازی دارای عمر زیاد، آلودگی صوتی کم، سطح صاف، اصطکاک زیاد، ظرفیت باربری بالا و حداقل عملیات نگهداری است [۴]. جراردو و همکاران در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که روسازی مرکب می‌تواند کرنش کششی بحرانی در پایین لایه سطحی آسفالت که باعث ایجاد ترک خستگی می‌شود را از بین ببرد [۸]. بتن غلتکی به دلیل عملکرد اقتصادی و ساختاری و فنی آن ممکن است یک ماده بالقوه برای لایه اساس در روسازی مرکب باشد. روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی می‌تواند ترک خوردگی ناشی از خستگی را از بین ببرد و به طور قابل ملاحظه‌ای عمق شیارشدگی در لایه آسفالت را کاهش دهد و بنابراین ممکن است یک جایگزین ساختاری و اقتصادی بالا برای مناطق با بارگذاری سنگین باشد. ترک از بالا به پایین ممکن است به عنوان شاه ترک طولی ظاهر شود و معمولاً هنگام اجرای عملیات روسازی ایجاد می‌شود. شارپ (SHRP) بیان کرد که این مشکل برای روسازی مرکب یک مسئله حیاتی نیست زیرا کرنش کششی در سطح آسفالت کوچک و ناچیز است. علاوه بر این، اتصال کافی

بین سطح آسفالت و اساس صلب بتنی ضروری است. شکست این اتصال سطحی ممکن است به برخی نگرانی‌های حیاتی مانند ترک‌خوردگی ناشی از خستگی، چاله‌ها و ترک خوردگی لغزشی روی سطح آسفالت منجر شود [۹].

مطالعات نشان داده‌اند که در لایه آسفالتی روسازی‌های مرکب ترک‌خوردگی خستگی از نوع بالا به پایین می‌باشند؛ زیرا علاوه بر بار قائم که به روسازی وارد می‌شود، در سیستم روسازی چند لایه، بارهای افقی و جانبی هم در اثر ترمز و کرنش‌ها در پایین لایه آسفالتی معمولا از نوع فشاری است، مگر اینکه اتصال بین رویه آسفالتی و لایه صلب زیرین وجود نداشته باشد. ژائو و همکارانش با مقایسه ترک‌خوردگی خستگی، دو نوع روسازی شامل روسازی با اساس تثبیت‌شده با سختی بالا و روسازی با اساس سنگدانه‌ای با سختی کم دریافتند که در روسازی با اساس سخت ترک‌های بالا به پایین حاکم بوده و احتمال ترک‌خوردگی پایین به بالا وجود ندارد؛ اما در روسازی‌های با اساس سنگدانه‌ای، در دماهای متوسط و پایین ترک خوردگی پایین به بالا حاکم است و در دماهای بالا ترک‌های بالا به پایین حاکم است [۱۰].

شیارشدگی روسازی‌های مرکب اگرچه به اندازه روسازی‌های انعطاف‌پذیر نیست، اما به دلیل قرار گرفتن بر روی یک لایه با سختی بالا، لایه آسفالتی تحت تنش‌هایی قرار خواهد گرفت. این خرابی ضمن تحمیل هزینه‌های سنگین مرمت و بهسازی، سبب بروز مشکلات ایمنی برای استفاده‌کنندگان از راه شده و از این طریق خسارت‌های زیادی اعم از جانی و مالی را وارد می‌آورد. تجمع تغییر شکل‌های پلاستیک در لایه آسفالتی و بستر و لایه‌های تثبیت‌نشده زیر لایه صلب باعث شیارشدگی می‌شود. به دلیل سختی بالای لایه بتنی در روسازی مرکب، مقدار تنش و کرنش ایجاد شده در بستر و لایه تثبیت‌نشده این نوع روسازی‌ها بسیار کم بوده و در شیارشدگی این نوع روسازی‌ها تاثیر ندارند، مگر اینکه لایه صلب آسیب‌دیده بوده و نتواند به درستی بار را توزیع کند [۴]. معمولا در مطالعاتی که توسط محققین صورت گرفته است، برای ارزیابی این نوع خرابی از جابجایی قائم لایه آسفالتی استفاده شده است.

شتاب‌گیری و حرکت بر روی قوس‌های افقی به وسیله نقلیه اعمال می‌شود که تاثیر بسیاری بر ترک‌های بالا به پایین در سطح آسفالت و جداشدگی بین لایه‌ها دارند. به دلیل وجود بار افقی، به صورت قابل‌توجهی کرنش‌های کششی در سطح لایه آسفالت بوجود می‌آید که کرنش کششی افقی بالا در سطح رویه آسفالتی برای ارزیابی ترک بالا به پایین و تنش برشی سطح مشترک دو لایه آسفالتی و اساس بتن غلتکی، برای ارزیابی خرابی اتصال ضعیف استفاده می‌شوند. این خرابی‌ها ممکن است زمانی که بار افقی به روسازی اعمال می‌شود، اتفاق بیافتند. اگر تنش برشی بیشتر از مقاومت برشی اندود سطحی در نظر گرفته شده برای فصل مشترک دو لایه باشد، خرابی اتصال بین لایه‌ها اتفاق می‌افتد [۱۱].

شرایط اتصال لایه‌های روسازی نقش قابل‌توجهی در طراحی و ساخت روسازی برای تضمین ظرفیت باربری موردنیاز، نظیر مقاومت و دوام روسازی بازی می‌کند. از این رو اتصال ضعیف به لغزش روسازی‌ها کمک می‌کند. این پدیده مخصوصا در محل‌هایی مثل عوارضی‌ها، لحظه مشاهده پلیس برای کاهش سرعت و ... که وسایل نقلیه ترمز می‌کنند، اتفاق می‌افتد [۱۲]. برای رسیدن به ظرفیت باربری مطلوب روسازی و در نتیجه عمر طولانی روسازی، اتصال مناسب بین لایه‌های روسازی مهم است. شکست پیش از موعد مقاطع جاده به دلیل جدایی لایه‌ها منجر به باز توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در روسازی آسفالتی می‌شود. خصوصا در سطوحی مانند تقاطع‌ها، رمپ‌های شیب‌دار و قوس‌هایی با شعاع کوچک که وسایل نقلیه نیروهای افقی و جانبی وارد می‌کنند [۱۳].

۱-۲ بیان مساله

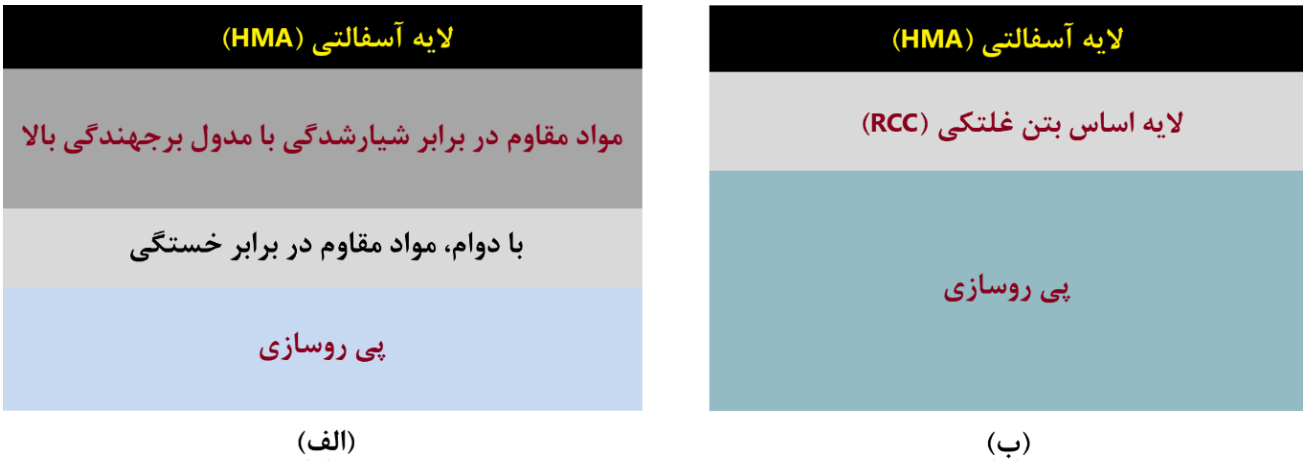
روسازی مرکب یکی از انواع روسازی‌های راه محسوب می‌گردد که از ترکیب یک یا چند لایه بتن اعم از بتن غلتکی (RCC)، بتن معمولی (PCC)، اساس سیمانی (CTB) و یا اساس تثبیت شده با سیمان (CSB) همراه با یک یا چند لایه روسازی آسفالتی که معمولا روی قسمت بتنی قرار می‌گیرد، تشکیل می‌شود. روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی یکی از متداول‌ترین نوع از روسازی مرکب می‌باشد که دارای خصوصیات ساختاری ویژه‌ای است. این نوع از روسازی اثر کرنش کششی بحرانی را حذف می‌کند که در نتیجه آن باعث جلوگیری از وقوع ترک های خستگی از بالا به پایین در لایه آسفالت روسازی می‌شود. علاوه بر این، دیگر خرابی‌ها مثل ترک‌خوردگی از بالا به پایین و گسیختگی و چسبندگی بین لایه‌ای بر عملکرد روسازی تاثیر مخرب می‌گذارند و عمر روسازی را کاهش می‌دهند. در سیستم روسازی چند لایه‌ای، بارگذاری افقی که ناشی از اصطکاک بین تایر و روسازی است و در طول مدت زمان ترمزگیری یا شتاب گیری وسایل نقلیه به وجود می‌آید و اثر قابل توجهی در شکل گیری ترک‌های از بالا به پایین در لایه آسفالتی دارد و همچنین باعث جداشدگی در محل اتصال بین دو لایه می‌گردد. در ناحیه‌های با بارگذاری سنگین، وسایل نقلیه بارگیر مرتبا بر روی روسازی ترمز یا شتاب می‌گیرند. بنابراین اثر بارگذاری افقی بر روی ترک‌های از بالا به پایین و رفتار چسبندگی بین دو لایه آسفالتی و بتنی در سیستم روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی باید به صورت عددی مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق، برای ارزیابی ترک از بالا به پایین و رفتار چسبندگی بین لایه ای، به ترتیب کرنش افقی روی لایه آسفالت و تنش برشی بین لایه آسفالت و بتن در مدل المان محدود محاسبه شده است. نتایج تحقیق بدین صورت بیان گردیده که تاثیر اعمال بارگذاری افقی چه تاثیر یا تاثیراتی بر ایجاد ترک از بالا به پایین دارد [۱۱].

۱-۳ اهمیت و ضرورت تحقیق

افزایش حجم و وزن محور ترافیک در راه‌ها باعث شده که روسازی‌های انعطاف‌پذیر عملکرد مناسبی در برخی از راه‌ها نداشته باشند و نیاز به گزینه‌های دیگری برای روسازی مطرح باشد. یکی از این گزینه‌ها استفاده از روسازی‌های ترکیبی هستند که در آن یک لایه صلب به عنوان اساس استفاده شده و یک لایه آسفالتی انعطاف‌پذیر بر روی آن اجرا می‌گردد. تجربه کشورهای مختلف، نشان داده شده است که روسازی‌های ترکیبی، عملکرد بسیار خوبی را در راه‌های با ترافیک سنگین داشته‌اند. اگرچه اجرای روسازی مرکب، نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر معمولی دارای هزینه بیشتری است، اما بدلیل کارایی بسیار مناسب‌تر در مقابل بارهای سنگین، می‌تواند گزینه مناسبی باشد. در حقیقت بحث اقتصادی اجرای روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی، در دراز مدت قابل دفاع است [۱۱]. بنابراین لازم است تا با مدلسازی عددی و شناخت خصوصیات روسازی مرکب، تسلط کافی بر روی این موضوع ایجاد گردد.

با پیشرفت تکنولوژی، تحقیقات به سمت استفاده از نرم‌افزارهای مدلسازی هوشمند، همراه با آزمایشات اعتبارسنجی رفته است. نرم‌افزار قدرتمند آباکوس یکی از نرم‌افزارهای مهم در زمینه تحلیل به روش اجزای محدود است. استفاده از روش المان محدود با استفاده از آباکوس، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش آزمایشگاهی باشد به شرط آنکه اعتبارسنجی‌های لازم و تحقیقات لازم در این زمینه صورت گیرد. نرم‌افزار آباکوس این قابلیت را دارد که

با اعمال مودهای مختلف بارگذاری، به مود بحرانی دست پیدا کرد و این اساس کار تحلیل و طراحی روسازی محسوب می‌گردد.



شکل ۱- (الف) روسازی دائمی، (ب) روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی (RCC)

فلینچ و همکاران، تحلیل حساسیت روسازی مرکب برای بزرگراه را با بررسی اثرات مواد لایه اساس مختلف بر روی عملکرد روسازی به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند [۱۴]. این مطالعه گزارش داد که استفاده از روسازی مرکب ممکن است انحراف سطح را کاهش دهد و کرنش یا تنش کششی بالا در پایین لایه آسفالتی را به حداقل برساند و یا حتی حذف کند. همچنین نشان داده شده که عمق شیارشدگی در لایه HMA تمایل به افزایش دارد؛ زیرا سختی اساس بیشتر از HMA است. همچنین انجمن سیمان پرتلند گزارش طراحی را با مقایسه روسازی انعطاف پذیر و روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی منتشر کرد [۱۵]. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل عددی نشان داد که روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی، عمر طراحی طولانی‌تری نسبت به روسازی‌های دیگر دارد. با همان سطح ترافیک، روسازی مرکب با اساس بتن غتلکی، ضخامت آسفالت نازک‌تری نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر و لایه بتن غلتکی نازک‌تر از روسازی تمام بتنی (RCC) دارد. دلات یک جدول طراحی ساده شده برای سیستم روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی و لایه آسفالتی (HMA) به عنوان سطح سواری ارائه کرد. در این مطالعه طراحی بر اساس آنالیز مکانیکی انجام شد و تنها ترک ناشی از خستگی به عنوان عملکرد روسازی در نظر گرفته شد. همچنین نویسنده گزارش داد که هزینه اولیه روسازی بتن غلتکی، به تنهایی ۶۲ درصد از هزینه جایگزین روسازی معمولی است [۱۶].

تنوع سایر عوامل طراحی نیز ممکن است بر روی عملکرد روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی تأثیرگذار باشد و بررسی اثرات آن‌ها ضروری است. بنابراین این مطالعه بر تأثیر تغییر مدول مواد، ضخامت لایه و بارگذاری بر عملکرد روسازی مانند ترک خوردگی ناشی از خستگی و عمق شیار با اعمال بارگذاری چرخ‌های سنگین وسیله نقلیه مورد استفاده در ناحیه بنادر متمرکز است. علاوه بر این مقاطع روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی که معیارهای طراحی را برآورده می کنند (یعنی بدون ترک خستگی در سطح HMA و در اساس RCC، و همچنین عمق شیار کم و زیر ۱۰ میلی‌متر)، ممکن است به عنوان مقاطع طراحی روسازی برای مناطق با بارگذاری سنگین در یک سطح انتخاب شوند.

۱-۴ تعاریف، اصول و مبانی نظری

۱-۴-۱ روسازی مرکب با کاربرد اساس بتن غلتکی (RCC)

بتن غلتکی (RCC) یک ترکیب بتنی سیمانی پرتلند با اسلامپ صفر و دانه‌بندی متراکم است که توسط ماشین‌آلات متداول در بتن آسفالتی، پخش شده و به وسیله‌ای غلتک‌های فلزی چرخ لاستیکی و غلتک‌های ویبره‌ای، متراکم می‌شود. بتن غلتکی در پروژه‌های راهسازی و سدسازی کاربرد گسترده‌ای دارد. در روسازی راه، بتن غلتکی بعنوان رویه اصلی برای تامین استقامت باربری سازه روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طرح روسازی بتن غلتکی مشابه طراحی روسازی بتنی درزدار غیرمسلح با درزهای انقباضی یا درزهای ساخت بدون داول می‌باشد. اختلاف اصلی بین بتن غلتکی و بتن معمولی در ارتباط با روش ساخت روسازی، فواصل درزها و رویه است. از جمله مزیت‌های این نوع روسازی نسبت به سایر روسازی‌های صلب می‌توان به عدم نیاز به آرماتور و میلگردهای داول، اجرای ساده‌تر، هزینه کمتر، عدم نیاز به فینیشر بتنی برای اجرای روسازی، میزان کمتر ترک‌های انقباضی به دلیل مصرف کمتر سیمان و موارد دیگر اشاره کرد [۱۷].

از آنجا که در این نوع روسازی پس از تسطیح و متراکم نمودن سطح بوسیله غلتک‌ها، سطح نهایی فاقد بافت درشت‌دانه قابل‌توجه بوده و امکان ایجاد بافت در سطح نیست، مقاومت لغزشی این نوع از روسازی‌ها نسبت به سایر کمتر است. همچنین بدلیل به جا ماندن اثر غلتک‌ها روی روسازی، سطح روسازی از همواری خوبی برخوردار نیست. مطابق با نشریه ۳۵۴ سازمان برنامه و بودجه، بدلیل مقاومت لغزشی پایین و عدم ایجاد سطحی کاملا هموار، کاربرد در این نوع روسازی در ایران تنها به روسازی محل‌هایی با سرعت ترافیک پایین محدود شده است. یکی از راهکارهایی که برای بهبود ویژگی‌های سطحی روسازی بتن غلتکی پیشنهاد شده است، اجرای یک لایه روکش آسفالتی روی سطح روسازی بتن غلتکی است. در حقیقت لایه بتن غلتکی به عنوان اساس در نظر گرفته می‌شود. در مقایسه با روسازی‌های تمام آسفالتی که ترک‌خوردگی خستگی و شیارافتادگی دو خرابی عمده در کاهش عمر سرویس‌دهی روسازی‌های انعطاف‌پذیر است، در روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی این خرابی‌ها به صورت چشمگیری کاهش یافته است[۴].

اگرچه روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی به کرات اجرا شده و در بسیاری از موارد موفقیت‌آمیز بوده است، اما این سیستم مرکب روسازی از مقاومت و دوام روسازی‌های صلب برخوردار نیست و همچنین ظهور و گسترش ترک‌های انعکاسی در سطح این روسازی امری رایج است. همچنین چسبندگی کافی بین دو لایه از اهمیت بالایی برخوردار است و در صورت عدم چسبندگی لازم، خرابی‌هایی از جمله ترک‌های خستگی، چاله و ترک‌های لغزشی در لایه آسفالتی ایجاد می‌شود [۱۱]. همچنین دمای بالای مخلوط آسفالتی و تبخیر رطوبت دال بتن غلتکی بدلیل اجرای لایه آسفالتی، به ترتیب دچار افزایش انبساط و جمع‌شدگی دال زیرین می‌شود [۱۷].

جدول ۶- جدول جامع بخش مهمی از تحقیقات محققین

نویسنده و سال تحقیق	موضوع تحقیق	نتایج تحقیق
Makara Rith, Young Kyu Kim, Seung Woo Lee, 2018	رفتار روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی برای مناطق با بارگذاری سنگین	روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی می‌تواند کرنش کششی افقی بحرانی در پایین آسفالت سطحی که باعث ترک خستگی از پایین به بالا در این لایه سطحی می‌شود را از بین ببرد.
Makara Rith, Young Kyu Kim, Seong Jae Hong, Seung Woo Lee, 2016	اثر بارگذاری افقی بر عملکرد روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی در مناطق با بارگذاری سنگین	کرنش کششی بالای لایه آسفالت که دلیل اصلی وقوع ترک‌های بالا به پایین است، به طور قابل ملاحظه‌ای با زیاد شدن بارگذاری افقی افزایش می‌یابد.
M. Ameri, A. Mansourian, M. Heidary Khavas, M.R.M. Aliha, M.R. Ayatollahi, 2011	ترک در روسازی آسفالتی تحت بارگذاری ترافیکی - تحلیل المان محدود سه بعدی	با توجه به نتایج المان محدود، روسازی آسفالتی ترک‌خورده به طور کلی تحت بارگذاری حالت ترکیبی قرار می‌گیرد و هر سه حالت شکست ممکن است بر رفتار انتشار ترک تأثیرگذار باشد.
M.R. Ayatollahi, 1391	رفتار رشد ترک در آسفالت تحت بارهای ترکیبی کششی-برشی در دمای پایین	هر سه حالت بارگذاری ممکن است بر رفتار انتشار ترک تاثیرگذار باشد و حالت ترکیبی هم تاثیرگذار است.
حسن طاهرخانی، الهه خبره، ۱۳۹۶	بررسی شیارشدگی و ترکهای از بالا به پایین در روسازی های ترکیبی ساخته شده با بتن غلتکی با استفاده از روش المان محدود	میزان شیارشدگی و عمر خستگی رویه آسفالتی به نوع مخلوط مورد استفاده در رویه بستگی زیادی دارد بطوری که کمترین مقدار شیارشدگی در مخلوطهای مورد بررسی در این تحقیق برای مخلوط سوپرپیو نوع ۱ و بیشترین آن برای ماستیک ماستیک درشت دانه نوع ۲ است. عمر خستگی رویه آسفالتی با افزایش ضخامت رویه آسفالتی کاهش و با افزایش ضخامت لایه بتن غلتکی افزایش می یابد.

مراجع

.۱ Núñez, O., *Composite Pavements: A Technical and Economic Analysis During the Pavement Type Selection Process*. 2007, Virginia Polytechnic Institute and State University.

.۲ Li, S., X. Liu, and Z. Liu, *Interlaminar shear fatigue and damage characteristics of asphalt layer for asphalt overlay on rigid pavement.* Construction and Building Materials, 2014. **68**: p. 341-347.

.۳ Nunn, M., *Development of a more versatile approach to flexible and flexible composite pavement design.* 2004.

.٤ Rao, S.P., *Composite pavement systems: HMA/PCC composite pavements*. Vol. 1. 2013: Transportation Research Board.

.٥ Hazaree, C., H. Ceylan, and K. Wang, *Influences of mixture composition on properties and freeze–thaw resistance of RCC.* Construction and Building Materials, 2011 :(۱)۲٥ .p. 313-319.

.٦ Omran, A., et al., *Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study.* Construction and Building Materials, 2017. **133**: p. 450-458.

.۷ Rao, S.K., P. Sravana, and T.C. Rao, *Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS.* Construction and Building Materials, 2016. **114**: p. 925-933.

.۸ Flintsch, G.W., B.K. Diefenderfer, and O. Nunez, *Composite pavement systems: Synthesis of design and construction practices*. 2008, Virginia Center for Transportation Innovation and Research.

.۹ Zou, X., et al., *Effects of shear stress on pavement cracking and interface debonding: Case study in Arkansas*. 2013.

.۱۰ Zhao, Y., M. Alae, and G. Fu, *Investigation of mechanisms of top-down fatigue cracking of asphalt pavement.* Road Materials and Pavement Design, 2018. **19**(6): p. 1436-1447.

.۱۱ Rith, M., et al., *Effect of horizontal loading on RCC-base composite pavement performance at heavy duty area.* Construction and Building Materials, 2017. **131**: p. 741-7.٤٥

.۱۲ Taherkhani, H. and H. Abdolahi Darabad, *Investigating the Performance of Composite Pavement under Lateral and Horizontal Load Using Finite Element Modeling.* Journal of Transportation Research, 2018. **15**(2): p. 173-195.

.۱۳ Romanoschi, S.A. and J.B .Metcalf, *Effects of interface condition and horizontal wheel loads on the life of flexible pavement structures.* Transportation Research Record, 2001. **1778**(1): p. 123-131.

.۱٤ Rith, M., Y.K. Kim, and S.W. Lee, *Mechanistic Study of Composite Pavement Behavior in Heavy Duty Area.* International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018. **12**(8): p. 780-787.

.۱٥ Delatte, N., *Simplified design of roller-compacted concrete composite pavement.* Transportation Research Record, 2004. **1896**(1): p. 57-65.

.۱٦ NEW, O. and R. PAVEMENT, *Guide for Mechanistic-Empirical Design.* Washington DC, 2004.

.۱۷ ., بررسی خواص مکانیکی و شکست روسازی های بتنی تک لایه و دولایه. مهندسی etalاحمدی, عمران مدرس, ۲۰۲۱. ۲۱(۲): p. 7-19.

.۱۸ Rith, M., Y.K. Kim, and S.W. Lee, *Behavior of RCC-base composite pavement for heavy duty area.* Construction and Building Materials, 2018. **175**: p. 144-151.

.۱۹ Tayabji, S.D. and D.J. Halpenny, *Thickness Design of Roller-Compacted Concrete Pavements (Discussion and Closure)*. 1987.

.۲۰ Barber, S.D., *Pavement design for port areas*. 1980, Newcastle University.

.۲۱ Hossain, M.S. and H.C. Ozyildirim, *Investigation of roller-compacted concrete for use in pavements in Virginia*. 2016, Virginia Transportation Research Council.

.۲۲ Association, P.C., *Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements*. 1987: Portland Cement Association.

.۲۳ Bathe, K.-J., *Finite Element Procedures for Solids and Structures LinearAnalysis.* Finite Element Procedures, 1982: p. 148-214.

.۲٤ Bathe, K.-J., *Finite element procedures*. 2006: Klaus-Jurgen Bathe.

.۲٥ Mashaan, N.S., et al., *A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement.* The Scientific World Journal, 2014. **2014**.

.۲٦ Lugmayr, R. and E. Tschegg. *Mechanism of fatigue crack growth and fracture behavior in bituminous roads*. in *Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials*. 2009. CRC Press; Taylor and Francis Group.

.۲۷ Kim, H. and W.G. Buttlar, *Finite element cohesive fracture modeling of airport pavements at low temperatures.* Cold Regions Science and Technology, 2009. **57**(2-3): p. 123-130.

.۲۸ Labuz, J. and S. Dai, *Cracking of asphalt concrete at low temperatures.* 1994.

.۲۹ Anderson, D.A., et al., *Low-temperature thermal cracking of asphalt binders as ranked by strength and fracture properties.* Transportation Research Record, 2001. **1766**(1): p. 1-6.

.۳۰ Li, X.-J. and M. Marasteanu, *Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete.* Experimental mechanics, 2010. **50**(7): p-۸٦۷ . .۸۷٦

.۳۱ Molenaar, J. and A. Molenaar. *Fracture toughness of asphalt in the semi-circular bend test*. in *PROCEEDINGS OF THE PAPERS SUBMITTED FOR REVIEW AT 2ND EURASPHALT AND EUROBITUME CONGRESS, HELD 20-22 SEPTEMBER 2000, BARCELONA, SPAIN. BOOK 1-SESSION 1*. 2000.

.۳۲ Molenaar, A., et al., *Semi-circular bending test; simple but useful?* Association of Asphalt Paving Technologists. Journal, 2002. **71**: p. 794-815.

.۳۳ Molenaar, J., X. Liu, and A. Molenaar. *Resistance to crack-growth and fracture of asphalt mixture*. in *PERFORMANCE TESTING AND EVALUATION OF BITUMINOUS MATERIALS PTEBM'03. PROCEEDINGS OF THE 6TH INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM HELD ZURICH, SWITZERLAND, 14-16 APRIL 2003*. 2003.

.۳٤ Chen, X.-H., W.-N. Li, and H.-T. Li, *Evaluation of fracture properties of epoxy asphalt mixtures by SCB test.* Journal of Southeast University (English Edition), 2009. **25**(4): p. 527-530.

.۳٥ Edwards, M.A. and S.A. Hesp, *Compact tension testing of asphalt binders at low temperatures.* Transportation research record, 2006. **1** :(۱)۹٦۲p. 36-43.

.۳٦ Wagnoner, M., W.G. Buttlar, and G. Paulino, *Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture.* Experimental mechanics, 2005. **45**(3): p. 270-277.

.۳۷ Mamlouk, M. and B. Mobasher, *Cracking resistance of asphalt rubber mix versus hot-mix asphalt.* Road materials and pavement design, 2004. **5**(4): p. 435-451.

.۳۸ Kim, K.W. and M. El Hussein, *Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures.* Construction and building Materials, 1997. **11**(7-8): p. 403-411.

.۳۹ Kim, H., M.P. Wagoner, and W.G. Buttlar, *Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test.* Materials and Structures, 2009. **42**(5): p. 677-689.

.٤٠ Roque, R., Z. Zhang, and B. Sankar, *Determination of crack growth rate parameter of asphalt mixtures using the superpave IDT.* Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1999. **68**.

.٤١ Braham, A. and W. Buttlar, *Mode II cracking in asphalt concrete.* Adv Test Charact Bituminous Mater, 2009. **2**: p. 699.۷۰٦-

.٤٢ Artamendi, I. and H.A. Khalid, *A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt.* Road Materials and Pavement Design, 2006. **7**(sup1): p. 163-180.

.٤٣ Vanelstraete, A. and L. Francken, *Prevention of reflective cracking in pavements*. 2004: CRC Press.

.٤٤ Novak, M., B. Birgisson, and R. Roque, *Near-surface stress states in flexible pavements using measured radial tire contact stresses and ADINA.* Computers & structures, 2003. **81**(8-11): p. 859-870.

.٤٥ Akbulut, H. and K. Aslantas, *Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism.* Materials & design, 2005. **26**(4): p. 383-387.

.٤٦ Li, X. and M. Marasteanu, *The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature.* Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1175-1190.

.٤٧ Kim, H., M.P. Wagoner, and W.G. Buttlar, *Numerical fracture analysis on the specimen size dependency of asphalt concrete using a cohesive softening model.* Construction and Building Materials, 2009. **23**(5): p.۲۱۲۰-۲۱۱۲ .

.٤٨ Loizos, A., et al., *Modeling of top-down cracking (TDC) propagation in asphalt concrete pavements using fracture mechanics theory,* in *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Two Volume Set*. 2009, CRC Press. p. 713-7.۲٤

.٤٩ Myers, L.A., R. Roque∗, and B. Birgisson, *Use of two-dimensional finite element analysis to represent bending response of asphalt pavement structures.* International Journal of Pavement Engineering, 2001. **2**(3): p. 201-214.

.٥٠ Mulungye, R., P. Owende, and K. Mellon, *Finite element modelling of flexible pavements on soft soil subgrades.* Materials & design, 2007. **28**(3): p. 739-756.

.٥١ Collop, A. and D. Cebon, *A theoretical analysis of fatigue cracking in flexible pavements.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1995. **209**(5): p. 345-361.

.٥٢ Smith, D., M. Ayatollahi, and M. Pavier, *The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed-mode loading.* Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2001. **24**(2): p. 137-150.

.٥٣ Ayatollahi, M., M. Aliha, and M. Hassani, *Mixed mode brittle fracture in PMMA—an experimental study using SCB specimens.* Materials Science and Engineering: A, 2006. **417** :(۲-۱)p. 348-356.

.٥٤ Ayatollahi, M. and M. Aliha, *On the use of Brazilian disc specimen for calculating mixed mode I–II fracture toughness of rock materials.* Engineering Fracture Mechanics, 2008. **75**(16): p. 4631-4641.

.۵۵ Aliha, M.R.M., et al., *Geometry and size effects on fracture trajectory in a limestone rock under mixed mode loading.* Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(11): p. 2200-2212.

.۵۶ Ayatollahi, M. and M. Aliha, *Fracture toughness study for a brittle rock subjected to mixed mode I/II loading* .International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007. **44**(4): p. 617-624.

.۵۷ Theocaris, P., *A higher-order approximation for the T-criterion of fracture in biaxial fields.* Engineering Fracture Mechanics, 1984. **19**(6): p. 975-991.

.۵۸ Monismith, C., J. Sousa, and J. Lysmer, *Modern pavement design technology including dynamic load conditions.* SAE Transactions, 1988: p. 747-766.

.۵۹ Marasteanu, M.O., et al., *Low temperature cracking of asphalt concrete pavement.* 2004.