

بررسی عملکرد روسازی مرکب تحت بارگذاری جانبی و افقی

به روش المان محدود

حسن طاهرخانی*، دانشیار، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسین عبدالهی درآباد، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۹/۲۵ - پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

صفحه ۱۹۵-۱۷۳

چکیده

در این تحقیق، اثر اعمال بار افقی، قائم و جانبی وارده از وسایل نقلیه بر روی تنش برشی بین لایه رویه و اساس، جابه‌جایی جانبی و طولی رویه و حداکثر کرنش کششی در رویه مورد مطالعه قرار گرفته است. اثرات سه حالت مختلف بارگذاری، شامل اعمال بار قائم، بار قائم و افقی به‌طور همزمان و بار قائم، افقی و جانبی به‌طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. بار از طریق دو آرایش چرخ شامل زوج چرخ و تکی عریض با وزن محور ثابت ۸/۲ تن و فشار باد 60 kPa به سطح روسازی اعمال شده و پاسخ‌های روسازی در دو دمای 20°C و 40°C تعیین گردیده‌اند. تحلیل با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی با روش المان‌های محدود در نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفته است. نتایج نشان دهنده این است که بارگذاری افقی تأثیر قابل‌توجهی بر کرنش کششی در سطح، تنش برشی بین دولایه و جابه‌جایی جانبی و طولی دارد. در دمای 20°C ، با اعمال بار افقی به میزان ۵۰٪ بار قائم، برای حالت زوج چرخ، تنش برشی، حداکثر کرنش کششی در سطح، جابه‌جایی طولی و جابه‌جایی جانبی، به ترتیب، ۷۶، ۲۸۶، ۳۲۹ و ۱۵/۵٪ نسبت به حالت تنها اعمال بار قائم افزایش یافتند. همچنین، نتایج بیانگر این است که چرخ‌های عریض پاسخ‌های بزرگ‌تری را در روسازی نسبت به زوج چرخ ایجاد می‌کنند. به طوری که جابه‌جایی طولی و جانبی در دمای 40°C درجه در چرخ عریض به ترتیب ۱/۷ و ۱/۸ برابر زوج چرخ به‌دست آمده‌اند. همچنین، نشان داده شد که در نظر گرفتن بار جانبی تغییر قابل‌توجهی در کرنش کششی سطح و تنش برشی و حداکثر جابه‌جایی طولی ایجاد شده تحت بار قائم و افقی ایجاد نمی‌کند. افزایش دما باعث افزایش قابل‌توجه در کرنش سطحی و جابه‌جایی‌های طولی و جانبی داشته اما تأثیر قابل‌توجهی در تنش برشی بین لایه رویه و اساس ندارد.

واژه‌های کلیدی: روسازی مرکب، بار افقی، ترک بالا به پایین، جابه‌جایی جانبی، تنش برشی

۱-مقدمه

چه به لحاظ سازه‌ای و چه عملکردی (جنبه‌های فنی) داشته و از نظر اقتصادی نیز به صرفه‌تر است (Nunez, 2007). 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

ساختار روسازی مرکب متشکل 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 (Nunez, 2007). در مقایسه با روسازی انعطاف‌پذیر و صلب، روسازی مرکب کارایی بهتری

کرنش‌ها در پایین لایه آسفالتی معمولاً 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 ترک‌خوردگی پایین به بالا حاکم است و در دماهای بالا ترک‌های بالا به پایین حاکم است (Zhao et al., 2017).

شیار شدگی روسازی‌های مرکب اگرچه به‌اندازه روسازی‌های انعطاف‌پذیر نیست، اما به دلیل فرار 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 تثبیت نشده زیر لایه صلب باعث شیار شدگی می‌شود. به دلیل سختی بالای لایه بتنی در روسازی مرکب، مقدار تنش و کرنش ایجادشده در بستر و لایه تثبیت نشده این نوع روسازی‌ها بسیار کم بوده و در شیار شدگی این نوع روسازی‌ها تأثیر ندارند، مگر این‌که لایه صلب آسیب‌دیده بوده و نتواند به‌درستی بار را توزیع نماید (SHRP, 2013). معمولاً در مطالعاتی که توسط محققان صورت گرفته، برای ارزیابی این نوع خرابی از جابه‌جایی قائم لایه آسفالتی استفاده شده است، اما در این تحقیق فقط جابه‌جایی‌های افقی و جانبی ناشی از بارهای افقی و جانبی بررسی شده است.

شتاب‌گیری و حرکت بر روی قوس‌های افقی به‌وسیله نقلیه اعمال می‌شود که تأثیر بسیاری بر ترک‌های بالا به پایین در

از لایه صلب در برابر فرسایش و خوردگی آب‌های سطحی و یا 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 (Nunn, 2004; SHRP, 2013; Li et al., 2014).

یکی از انواع روسازی‌های مرکب که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، متشکل 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 (SHRP, 2013). بتن غلتکی نوعی بتن سیمانی است که از اختلاط مصالح سنگی درشت و ریز، سیمان و آب به مقدار کم ساخته‌شده و با اسلامپ نزدیک به صفر توسط فینیشر مخصوص آسفالت پخش‌شده و توسط غلتک‌های ارتعاشی متراکم می‌شود (Hazree et al., 2011; Omran et al., 2017). از دیگر مزایای بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی عدم نیاز به قالب، آرماتورهای مسلح‌کننده، میلگردهای اتصال و تایل بار و درز است (Krishna et al., 2016). روسازی‌های مرکب ممکن است در طول عمر بهره‌برداری به انواع خرابی‌ها دچار گردند که این خرابی‌ها به دلیل اینکه لایه آسفالتی در سازه مرکب قرار دارد، خیلی شبیه به خرابی‌های روسازی آسفالتی است (SHRP, 2013). عمر سرویس‌دهی و عملکرد روسازی مرکب ممکن است به علت ترک انعکاسی، ترک خستگی بالا به پایین در رویه آسفالتی، شیار شدگی، جداشدگی اتصال دولایه و جمع شدگی لایه آسفالتی کاهش یابد.

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 چندلایه، بارهای افقی و جانبی هم در اثر ترمز و

این کرنش‌ها در عقب ناحیه بارگذاری کششی و در جلو ناحیه بارگذاری فشاری هستند (Gideon and Kishnan, 2016). مطالعه نگردیده است. به ویژه اینکه، اثر ترکیب چرخ و دما و لحاظ نمودن رفتار الاستو ویسکوپلاستیک آسفالت مورد بررسی قرار نگرفته است؛ بنابراین، هدف این تحقیق بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی خرابی جداشدگی اتصال فصل مشترک بین دولایه صلب و آسفالتی، ترک بالا به پایین و تغییر شکل سطحی در روسازی مرکب است. به همین منظور، اثر سه نوع بارگذاری مختلف، شامل بارگذاری قائم، بارگذاری قائم به همراه بارگذاری افقی و بارگذاری قائم همراه با بارگذاری‌های افقی و جانبی، اعمال شده از دو نوع ترکیب چرخ شامل تکی عریض و زوج چرخ در دو دمای مختلف بررسی گردیده است.

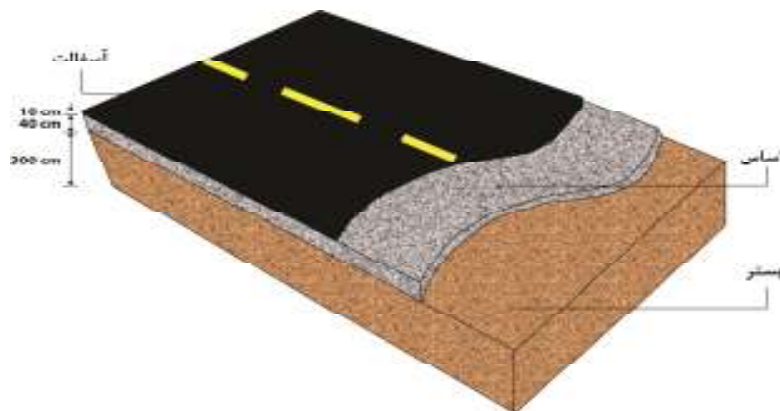
۲- روش تحقیق

با توجه به اینکه اثر بارهای افقی و جانبی بر عملکرد روسازی‌های مرکب به خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است؛ در این تحقیق، تأثیر اعمال بارهای جانبی و افقی، علاوه بر بار قائم، بر کرنش‌های کششی سطح رویه آسفالتی، تنش برشی بین دولایه (رویه و اساس) و جابه‌جایی افقی و جانبی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مدل‌سازی‌ها از نسخه ۴-۶، نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. تحلیل‌ها به صورت سه‌بعدی انجام گردید. در این مطالعه از سه لایه با ضخامت‌های ۱۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰۰ میلی‌متر به ترتیب برای لایه رویه آسفالتی، لایه اساس بتن غلتکی (RCC) و بستر استفاده شد (Rith et al., 2016). شکل ۱ تصویری از این لایه‌ها را نشان می‌دهد.

سطح آسفالت و جداشدگی بین لایه‌ها دارند (Rith et al., 2016). به دلیل وجود بار افقی، به صورت قابل توجهی کرنش‌های کششی در سطح لایه آسفالت به وجود 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 دولایه باشد خرابی اتصال بین لایه‌ها اتفاق می‌افتد (Rith et al., 2016).

شرایط اتصال لایه‌های روسازی نقش قابل توجهی در طراحی و ساخت روسازی برای تضمین ظرفیت باربری مورد نیاز، نظیر مقاومت و دوام روسازی بازی می‌کند. از این رو، اتصال ضعیف به لغزش روسازی‌ها کمک می‌کند. این پدیده مخصوصاً در محل‌هایی که وسایل نقلیه ترمز می‌کنند (عوارضی‌ها، لحظه مشاهده پلیس برای کاهش سرعت و...) اتفاق می‌افتد (Lushinga, 2014). برای رسیدن به ظرفیت باربری مطلوب روسازی و نتیجتاً عمر طولانی روسازی اتصال مناسب بین لایه‌های روسازی مهم است (Romanoschi and Metcalf, 2001). شکست پیش از موعد مقاطع جاده به دلیل جدایی لایه‌ها منجر به باز توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در روسازی آسفالتی می‌شود. خصوصاً در سطوحی مانند تقاطع‌ها، رمپ‌های شیب‌دار و قوس‌هایی با شعاع کوچک که وسایل نقلیه نیروهای افقی و جانبی وارد می‌کنند (Romanoschi and Metcalf, 2001).

بررسی ادبیات فنی نشان دهنده این است که اثر بارهای افقی و جانبی بر عملکرد روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی به خوبی



شکل ۱. نمایی از سه لایه استفاده شده در روسازی مرکب

۱-۲- مشخصات مصالح

گذشت این دوره زمانی و یک مقدار معین تغییر شکل، نرخ خزش افزایش می‌یابد و در نهایت شکست رخ می‌دهد (Von Quintus, 1994). مدل توانی خزش با دو حالت سخت شدگی با زمان^۲ و سخت شدگی با کرنش^۳ در نرم‌افزار موجود است؛ اما با توجه به سادگی و کارایی بهتر مدل سخت شدگی با زمان در این مطالعه از آن استفاده شده است. در این مطالعه برای آنکه هر دو فاز الاستیک و پلاستیک مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شود و وابستگی به دما و زمان آن نیز مدنظر قرار گیرد، رفتار ویسکو الاستو پلاستیک برای لایه آسفالتی در نظر گرفته شده است. برای تعریف مشخصات لایه‌های آسفالتی در نرم‌افزار المان محدود (ABAQUS)، نیاز به داشتن ضرایب موردنیاز برای استفاده در مدل وابسته به زمان خزشی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون است. در این مدل رفتاری مقدار کرنش با استفاده از رابطه ۱ بیان می‌شود (Huang, 2004; Hua, 2001).

بر اساس تحقیقات صورت گرفته، پاسخ مخلوط‌های بتن آسفالتی کاملاً وابسته به درجه حرارت و مدت‌زمان بارگذاری است. پرل و همکارانش (Perl et al., 1983) در تحقیقات خود نشان دادند که، مخلوط آسفالتی دارای کلیه رفتارهای ویسکوز، الاستیک خطی و الاستیک غیرخطی است. بسته به دمای مخلوط و سرعت بارگذاری، سهم هر یک از آن‌ها در عملکرد مخلوط متفاوت است. در دماهای پایین، رفتار مخلوط آسفالتی را می‌توان الاستیک خطی فرض کرد؛ با افزایش دما ویژگی‌های رفتار الاستیک خطی کاهش و خصوصیات رفتار الاستیک غیرخطی افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر دما، رفتار الاستیک غیرخطی شروع به کاهش نموده و رفتار ویسکوز مخلوط آغاز می‌گردد. در دمای بال، تحت تنش ثابت، تغییر شکل مخلوط آسفالتی با سرعت کم ادامه می‌یابد که به این رفتار خزش^۱ گفته می‌شود. در یک تنش و دمای ثابت، نرخ خزش برای یک دوره زمانی طولانی تقریباً ثابت است. بعد از

$$\varepsilon = A \sigma^n t^m \quad (1)$$

□
 ε : نرخ کرنش، σ : تنش وارده، t : زمان بارگذاری، A, m, n : پارامترهای وابسته به مصالح می‌باشند. مقادیر این پارامترها

که در آن:

(RCC) و بستر، به صورت الاستیک خطی فرض شد. برای مدل سازی این لایه ها در نرم افزار آباکوس، نیاز به داشتن ضریب پواسون و مدول یانگ مصالح است که از نتایج تحقیقات قبلی استفاده گردیده است (Rith et al., 2016). مقادیر مورد نیاز در جدول (۲) آورده شده است.

برای مخلوط آسفالتی رویه در دو دمای مختلف ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد از نتایج تحقیقات قبلی استخراج گردیده است که در جدول ۱ نشان داده شده است. این مقادیر مربوط به مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با قیر PG70-22 و سنگدانه های با حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ میلی متر و درصد قیر ۴/۶٪ است (Alqadi et al., 2009). همچنین، رفتار لایه های بتن غلتکی

جدول ۱. مشخصات مخلوط های آسفالتی مورد استفاده (Alqadi et al., 2009)

ویژگی های مصالح لایه آسفالتی					
خزش		الاستیک		دما (°C)	
m	n	A	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	
-۰/۴۱۸۹	۱/۱۳۰۱	$۳/۲۸e^{-۴}$	۰/۳۳	۴۲۳۰	۲۰
۰/۴۲۸۹	۰/۷۶۵	$۷/۴۵e^{-۴}$	۰/۳۶	۱۹۰۵	۴۰

جدول ۲. مشخصات الاستیک لایه های زیرین روسازی (Rith et al., 2016)

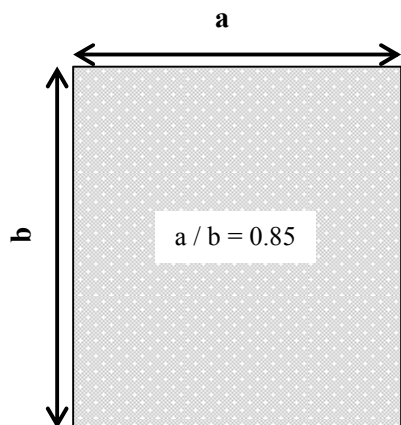
ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	لایه های روسازی
۰/۱۵	۳۰۰۰۰	بتن غلتکی
۰/۴۵	۱۰۰	بستر

در راستای X (در جهت جریان ترافیک) و عرض در راستای Y (عمود بر جهت جریان ترافیک)، ۲ متر می باشد (Liao, 2007). با توجه به نوع رفتار لایه آسفالتی که در بخش های قبل تشریح شد و وابستگی این رفتار به زمان و دما، برای تحلیل تنش شبه استاتیکی اعم از خطی و غیرخطی در ABAQUS مانند خزش، هنگامی که اثرات اینرسی قابل صرف نظر کردن است، می توان از تحلیل ویسکوز استفاده کرد (ABAQUS User's Manual).

۲-۲- مدل سازی در نرم افزار

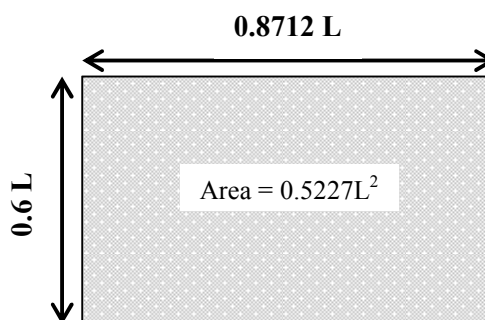
انتخاب ابعاد مناسب برای مدل در تحلیل های عددی نقش مهمی در افزایش دقت و درستی نتایج دارد. اگر ابعاد مدل کوچک باشد ممکن است موج حاصل از بارگذاری پس از برخورد به مرز مدل برگردد و در نتایج تأثیر بگذارد. همچنین، بزرگ بودن بیش از اندازه مدل سبب افزایش زمان تحلیل می شود (Sun and Duan, 2013). در این پژوهش، از نصف محور کامیون در تحلیل ها استفاده شده است. طول مدل

روسازی به صورت مستطیلی که معادل سطح بیضوی می‌باشد در نظر گرفته شده است (Kim, 2008) که با در نظر گرفتن فشار باد چرخ 60 kPa ابعاد سطح بارگذاری محاسبه گردید. همچنین، برای به دست آوردن ابعاد سطح تماس چرخ عریض از نسبت $0.85/1$ استفاده شد (Kim, 2008). در شکل ۲ سطح تماس دو نوع چرخ نشان داده شده است.



شکل ۲ (ب): چرخ عریض

در این تحقیق، بارگذاری مدل‌های ساخته شده برای محور $8/2$ تنی با چرخ‌های زوج و عریض (425/65R22.5) انجام گرفته است. بر اساس مطالعات انجام شده بهترین مقطع برای توصیف سطح بارگذاری تایر و روسازی، یک مقطع بیضی شکل است که توسط انجمن سیمان پرتلند به دست آمده است (Novak et al., 2003)؛ بنابراین، به منظور افزایش کارایی مدل و کاهش زمان تحلیل، سطح تماس بین چرخ و



شکل ۲ (الف): زوج چرخ

شکل ۲. مشخصات سطح تماس بین چرخ‌ها و روسازی (Kim, 2008)

قائم برای بار جانبی در جهت محور Y وسیله نقلیه اعمال شد (Rith et al., 2016; Liu and Hao 2011).

معادله (۲) نحوه محاسبه بار افقی و جانبی را نشان می‌دهد:

$$F = P \times f$$

اصطکاک که در این مطالعه 0.2 و 0.5 در نظر گرفته شده است.

اعداد به دست آمده از محاسبات سطح تماس چرخ‌ها و روسازی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، بارگذاری افقی و جانبی با ضریب اصطکاک به مقدار 50% برای بار قائم برای بار افقی در جهت محور X و ضریب اصطکاک به مقدار 20% در

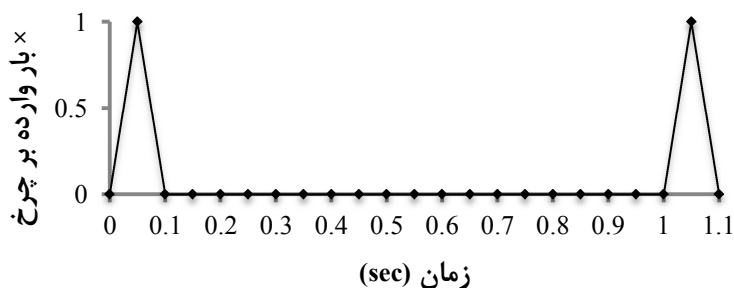
که در آن F بار افقی یا بار جانبی، P بار قائم و f ضریب

جدول ۳. ابعاد سطح تماس مستطیلی

محور منفرد	وزن محور (Ton)	فشار باد چرخ (Kpa)	نوع چرخ	ابعاد سطح تماس مستطیلی (m)	
				در راستای محور X	در راستای محور Y
منفرد	۸/۲	۶۰۰	زوج چرخ	۰/۲۲۱	۰/۱۵۲
			چرخ عریض	۰/۱۶۹	۰/۱۹۹

فرض بر چسبندگی کامل لایه‌ها می‌باشد و برای ارزیابی تنش برشی از مقاومت برشی دو نوع اندود سطحی شامل قیرابه آنیونیک دیر شکن SSI-h و اندود سطحی امولسیون‌ی اصلاح‌شده با پلیمر با عنوان Trackless که قیر خالص پایه‌ای سخت دارد استفاده شد (جدول ۴) که با توجه به تحقیقات پیشین به‌دست آمده است (NCHRP, 2012).

بار به‌صورت مثلثی در نظر گرفته شده است. به‌این ترتیب که زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و گام بارگذاری برابر با ۰/۰۵ ثانیه، است (Salama and Chatti, 2006). در تحلیل‌ها، این روند ۱۰۰ مرتبه تکرار می‌گردد. شکل ۳ نحوه بارگذاری مدل‌ها را نشان می‌دهد؛ در تمامی مدل‌های ساخته‌شده در این تحقیق، برای اندرکنش بین لایه‌ها،



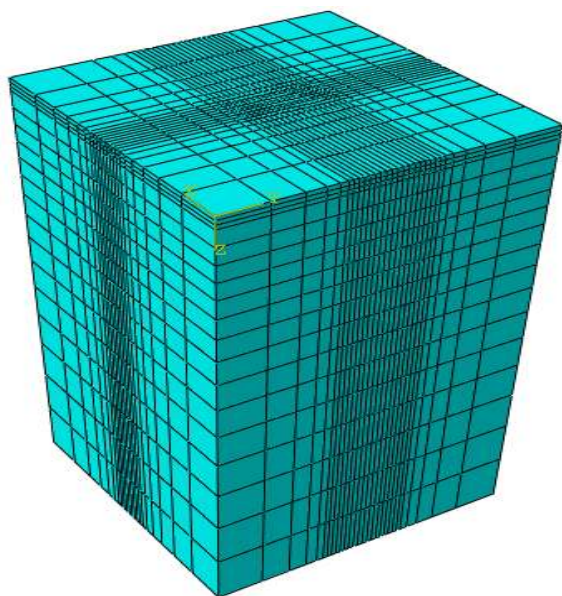
شکل ۳. نحوه بارگذاری مدل‌های روسازی با استفاده از محور استاندارد

جدول ۴. مقاومت برشی اندود سطحی (Rith et al., 2016)

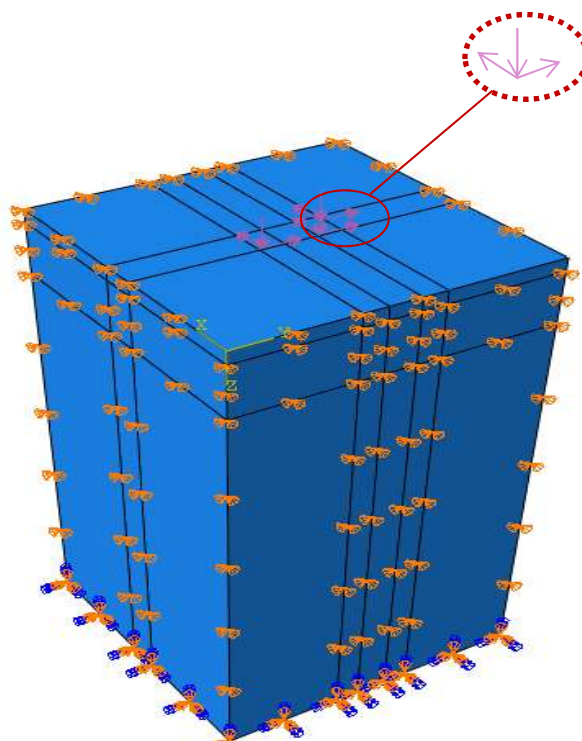
نوع تک کت	مقدار قیر باقی مانده (gsy)	مقاومت برشی (MPa)
SSI-h	۰/۱۵۵	۰/۳۸
Trackless	۰/۱۵۵	۰/۵۹

همراه داشته باشند (Liao, 2007). تعداد کل المان‌ها ۱۰۵۸۴ است. همچنین، در این تحقیق، از حرکت لایه‌ها در صفحه در راستای محورهای (X و Y) جلوگیری شده است و شرایط مرزی لایه بستر، گیردار فرض شده است. شکل‌های (۴ و ۵) مش بندی به کار گرفته شده و شرایط مرزی بین لایه‌ها را، به ترتیب، برای زوج چرخ و چرخ عریض نمایش می‌دهند.

در مدل‌سازی، برای همگرایی و دقت بیشتر نتایج از المان‌های مکعبی هشت گره ای (3D8R) استفاده شده است. هر چه تعداد مش‌های موجود در مدل بیشتر و ریزتر باشد، نتایج به دست آمده نزدیکی بیشتری به واقعیت دارند، درحالی‌که با افزایش تعداد مش، به شدت زمان تحلیل افزایش می‌یابد. برای همین منظور، در این مطالعه، ابعاد و تعداد مش‌ها در محدوده ۲ تا ۳ سانتی‌متر انتخاب شده‌اند که کارآمدی و نتایج دقیق را به

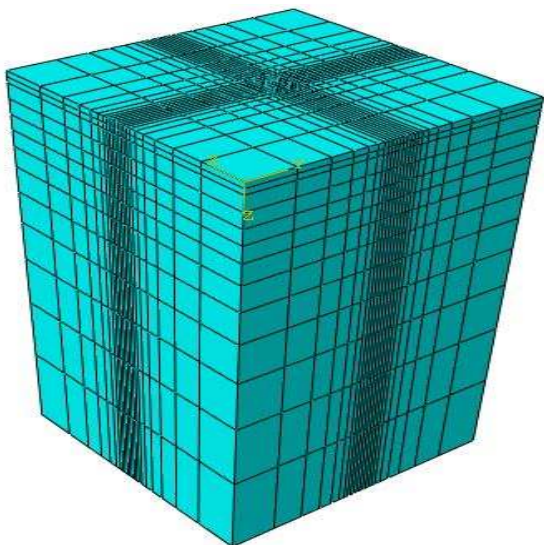


شکل ۴ (ب). نمایی از نحوه مش بندی

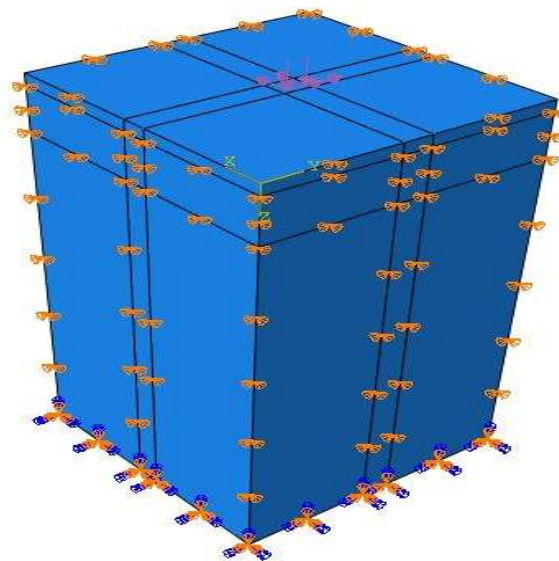


شکل ۴ (الف). نمایی از شرایط مرزی بین لایه‌ها

شکل ۴. نمایی از نحوه مش بندی و شرایط مرزی بین لایه‌ها برای زوج چرخ



شکل ۵ (ب). نمایی از نحوه مش بندی



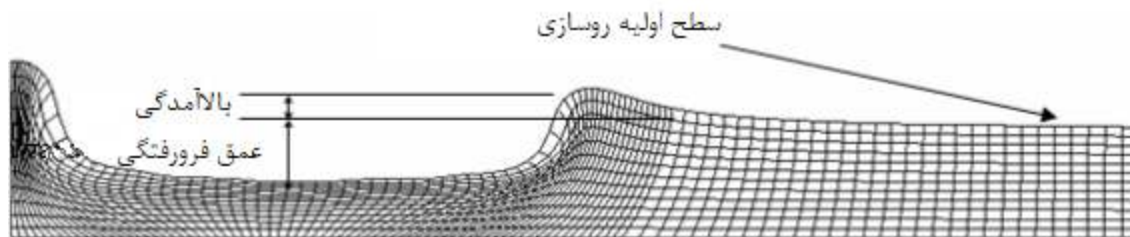
شکل ۵ (الف). نمایی از شرایط مرزی بین لایه‌ها

شکل ۵. نمایی از نحوه مش بندی و شرایط مرزی بین لایه‌ها برای چرخ عریض

۳-۲- اعتبارسنجی

صورت است که سطح زیرین و سطح سمت راست گیردار فرض شد و سطح سمت چپ روسازی فقط در جهت قائم تغییر شکل خواهد داشت. نوع المان CPE4R مطابق آنچه در تحقیق گفته شده است در نرم‌افزار وارد شد. پس از انجام مش بندی، مدل تحلیل شد و خروجی‌ها به دست آمد. در تحقیق انجام گرفته، عمق شیارشدگی مخلوط آسفالتی طبق شکل زیر تعیین گردیده است (Uzarowski, 2006).

با توجه به عدم وجود نتایج آزمایشگاهی بر روی عملکرد روسازی مرکب تحت بارهای افقی یا جانبی، اعتبار مدل‌سازی در این تحقیق با مقایسه نتایج شیار شدگی با نتایج به دست آمده از تحقیقات قبلی انجام گرفته است (Uzarowski, 2006). مقادیر مربوط به پارامترهای مدل خزش برای آسفالت رویه و خصوصیات الاستیک لایه بتنی و لایه‌های اساس و بستر از تحقیق انجام گرفته به دست آمدند. بار محوری ۸۰ کیلو نیوتن برای محور با چرخ‌های زوج انتخاب گردید که به مقدار ۲۰ کیلو نیوتن به هر چرخ اعمال می‌گردد. شرایط مرزی به این



شکل ۱۰. عمق شیار فرورفته لایه رویه + میانگین بالآمدگی اطراف رد چرخ نسبت به حالت اولیه = عمق شیارشدگی

نتایج شیار شدگی حاصل از مدل‌سازی با نتایج حاصل از
 تحقیق قبلی در جدول ۷ آمده است. مقایسه نتایج اختلاف
 حدود ۴ درصد را نشان می‌دهد؛ بنابراین مدل اعتبار سنجی
 انطباق بسیار خوبی با نتایج تحقیق دارد.

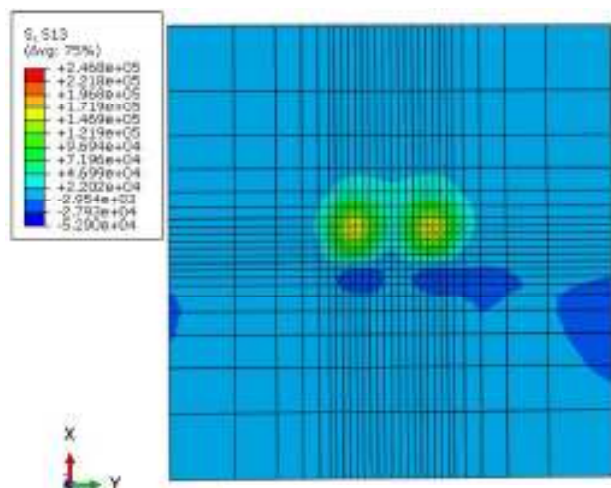
جدول ۷. مقایسه شیار شدگی برای اعتبار سنجی مدل

شیارشدگی پیش‌بینی شده با آباکوس			بارگذاری ترافیک (ESAL)	
عمق شیارشدگی (میلی‌متر)	میانگین بال‌آمدگی رد چرخ نسب به حالت اولیه (U+)	عمق شیار فرورفته لایه روی (U-)		
۷/۲۵	۳/۵۳	۳/۷۲	۴۰۰۰۰۰۰	نتایج حاصل از اعتبارسنجی
۷/۶	۳/۶	۴		نتایج رساله مرجع

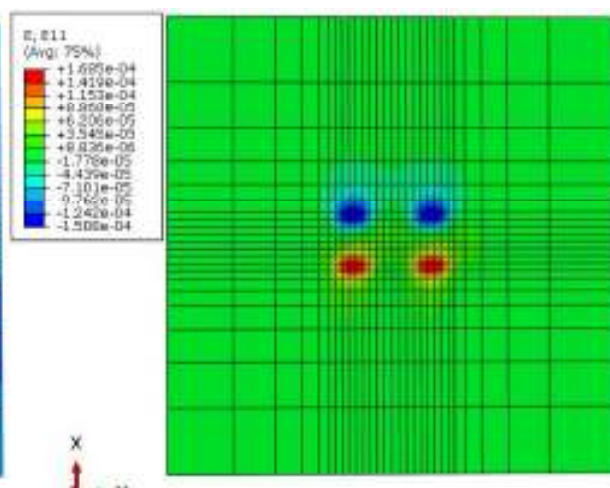
۳- نتایج مدل‌سازی

کششی حداکثر در عقب هر تایلر اتفاق می‌افتد. همچنین، در
 شکل ۱۱ (ب) ملاحظه می‌شود که تنش برشی حداکثر در جلو
 هر تایلر اتفاق می‌افتد. در شکل‌های ۱۱-ج و د نیز ملاحظه
 می‌گردد که حداکثر جابه‌جایی‌های طولی و جانبی در
 قسمت‌های مرکزی چرخ‌ها رخ می‌دهند.

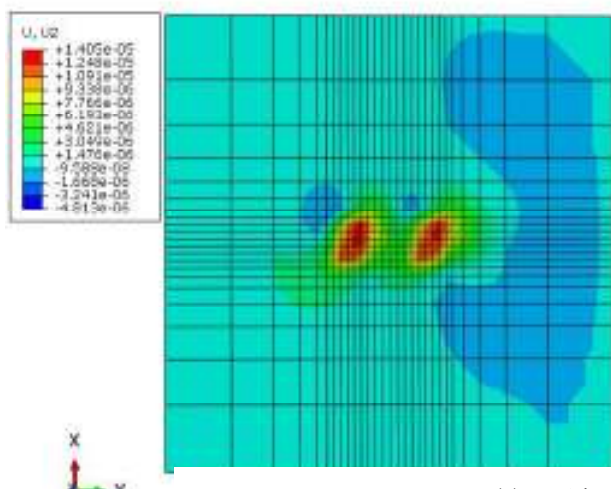
شکل ۱۱-الف تا د، به ترتیب، نمایی از کرنش کششی در
 سطح، تنش برشی بین دو لایه رویه و اساس، جابه‌جایی طولی
 و جانبی سطح رویه آسفالتی را بعد از آخرین تکرار بارگذاری
 در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای زوج چرخ در حالتی که بار
 قائم، افقی و جانبی همزمان اعمال می‌شود را نشان می‌دهند.
 همان‌طور که در شکل ۱۱-الف ملاحظه می‌گردد، کرنش



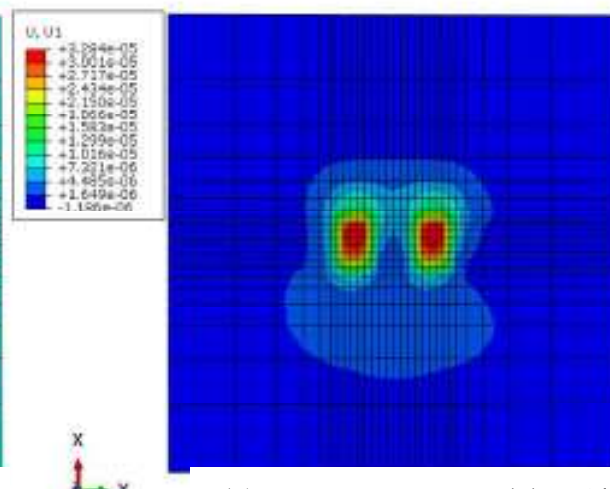
شکل ۱۱ (ب). نمایی از تنش برشی بحرانی



شکل ۱۱ (الف). نمایی از کرنش کششی بحرانی



شکل ۱۱ (د). نمایی از حداکثر جابه‌جایی جانبی



شکل ۱۱ (ج). نمایی از حداکثر جابه‌جایی طولی

شکل ۱۱. نمایی از کرنش کششی بحرانی، تنش برشی بحرانی، حداکثر جابه‌جایی طولی و حداکثر جابه‌جایی جانبی

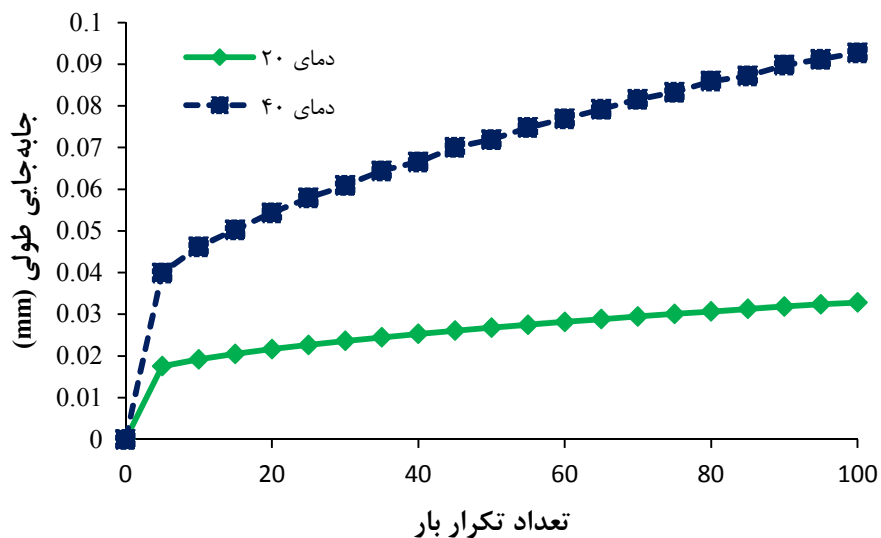
۱-۱- تأثیر دما بر پاسخ‌های روسازی مرکب

بیانگر این است که جابه‌جایی طولی دارای مقادیر بیشتری از جابه‌جایی جانبی است که این موضوع به دلیل بیش‌تر بودن مقدار نیروی افقی است. اگرچه مقدار جابه‌جایی‌ها بعد از ۱۰۰ تکرار بار خیلی کم می‌باشد، اما این تغییر شکل‌ها تحت تعداد زیاد تکرار بار می‌تواند منجر به تغییر شکل‌های بحرانی گردند. تنش برشی حداکثر بین لایه رویه آسفالتی و اساس بتنی تحت شرایط بارگذاری ذکرشده در دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱۴ نشان داده شده است. تنش برشی بیش‌تر از مقاومت برشی اندود سطحی در فصل مشترک دو لایه می‌تواند منجر به لغزش رویه گردد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد،

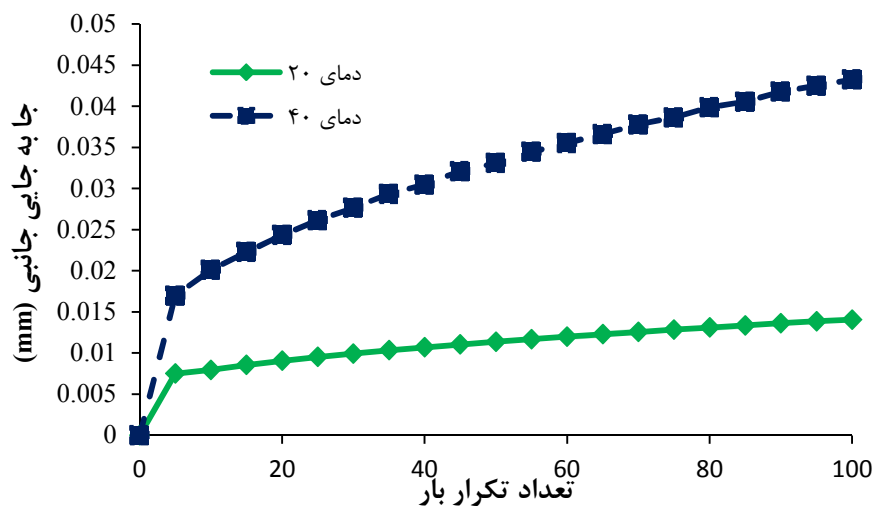
شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب، تغییرات جابه‌جایی طولی و جانبی حداکثر سطح رویه آسفالتی را با تعداد تکرار بارگذاری تحت زوج چرخ با اعمال همزمان بار قائم، جانبی و افقی در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در هر دو دما، به دلیل رفتار الاستو ویسکو پلاستیک رویه آسفالتی، مقدار جابه‌جایی‌ها با افزایش تعداد تکرار بارگذاری افزایش می‌یابد؛ اما نرخ افزایش جابه‌جایی به تدریج کاهش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که نرخ افزایش جابه‌جایی برای دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بیش‌تر از دمای ۲۰ درجه است. علاوه بر این، نتایج

رویه آسفالتی تحت شرایط بارگذاری مذکور بعد از ۱۰۰ تکرار بار نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، حداکثر کرنش کششی طولی روی سطح آسفالت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، حدوداً ۲/۵ برابر کرنش در دمای ۲۰ درجه است که بیانگر این است که برخلاف تنش برشی بین لایه رویه و اساس، حداکثر کرنش کششی در سطح به مقدار زیادی به دما وابسته است.

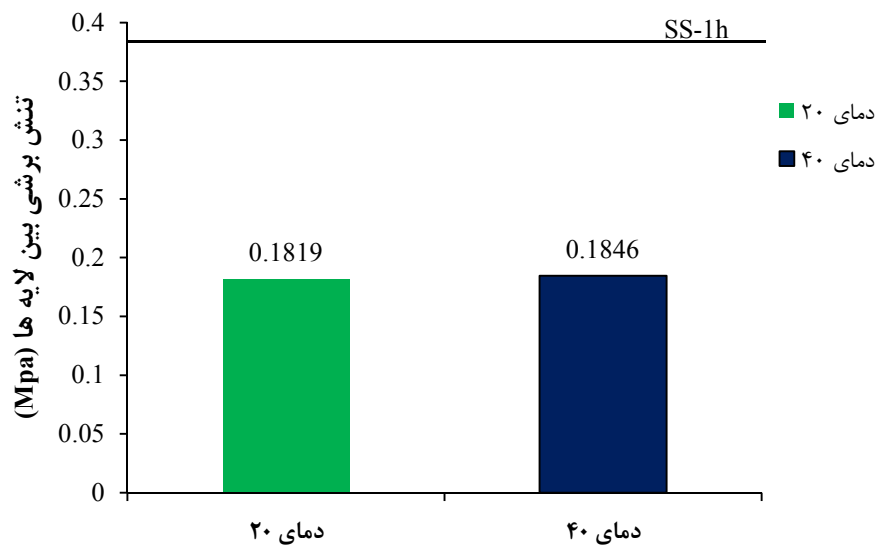
مقدار تنش برشی در دو دمای مختلف به یکدیگر بسیار نزدیک بوده و این بیانگر این است که دما بر روی تنش برشی تأثیر قابل‌توجهی نخواهد داشت. در این شکل همچنین مقاومت برشی اندود سطحی از نوع SS-1h نیز نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مقدار تنش برشی از مقدار مقاومت برشی اندود کمتر بوده و خطر لغزش رویه وجود نخواهد داشت. در شکل ۱۵، حداکثر کرنش کششی در سطح



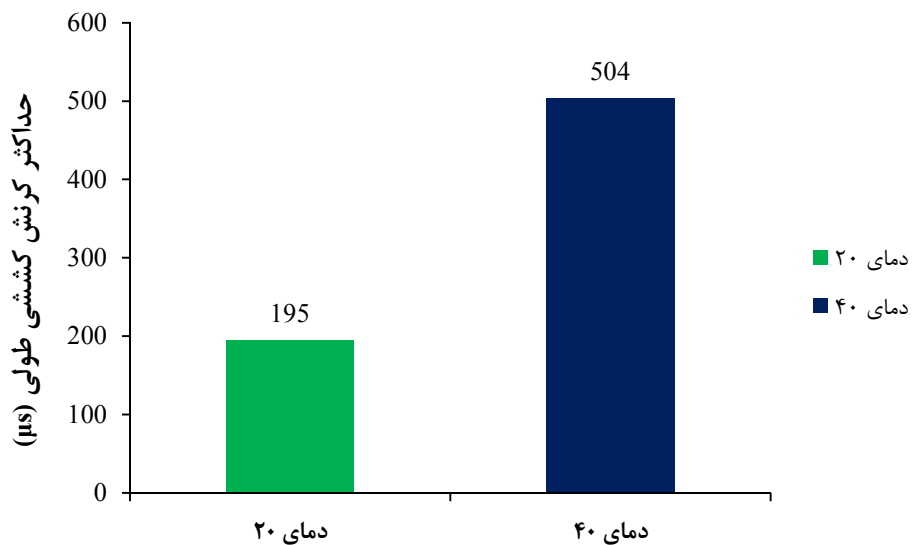
شکل ۱۲. تأثیر تعداد تکرار بار بر جاب‌جایی طولی در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۳. تأثیر تعداد تکرار بار بر جاب‌جایی جانبی در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد



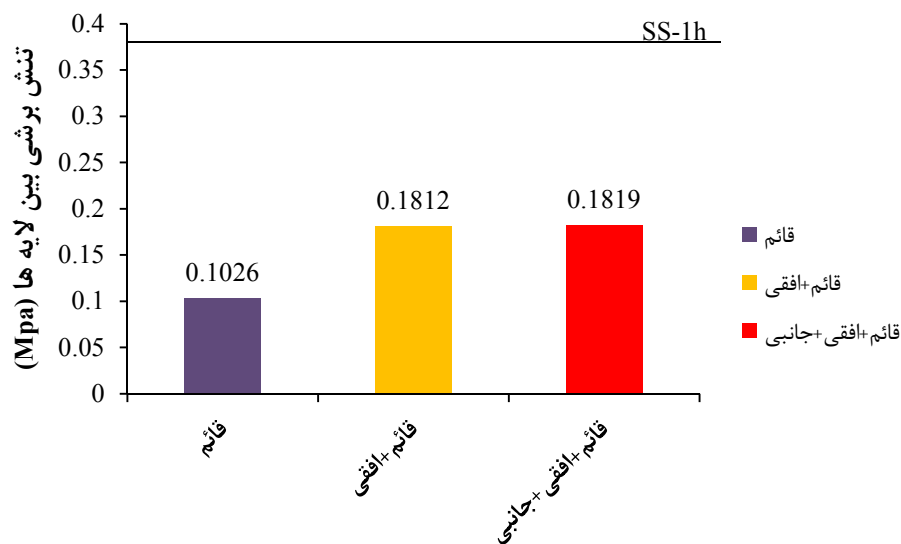
شکل ۱۴. تأثیر دما بر تنش برشی بحرانی بین لایه‌ها در زوج چرخ



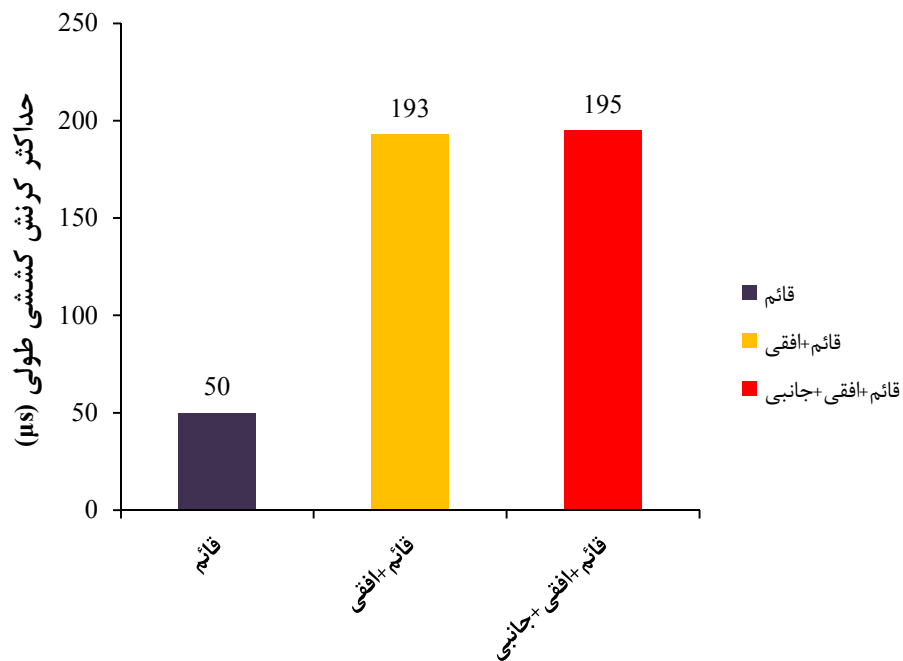
شکل ۱۵. تأثیر دما بر حداکثر کرنش کششی طولی روی سطح آسفالت در زوج چرخ

۷۶، ۲۸۶، ۳۲۹ و ۱۵/۵٪ نسبت به حالتی که تنها بار قائم اعمال می‌شود بیشتر می‌شود؛ بنابراین، نقاطی که در آن‌ها تغییرات سرعت وسایل نقلیه صورت می‌گیرد مستعد شدت یافتن خرابی‌ها خواهد بود. این نتایج نشان می‌دهند که بیشترین تأثیر اعمال بار افقی بر روی جابه‌جایی طولی بوده و کمترین تأثیر آن بر روی جابه‌جایی جانبی است. همچنین، این نتایج نشان می‌دهند که وقتی بار جانبی علاوه بر بار افقی اعمال شود، تغییر چندانی در مقدار پاسخ‌های تنش برشی، کرنش کششی در سطح و جابه‌جایی طولی رخ نمی‌دهد و تنها تأثیر قابل توجه آن بر روی جابه‌جایی جانبی است. اعمال بار جانبی به مقدار ۲۰٪ بار قائم به همراه بار افقی و قائم باعث می‌شود که جابه‌جایی جانبی به میزان ۸۲٪ افزایش یابد.

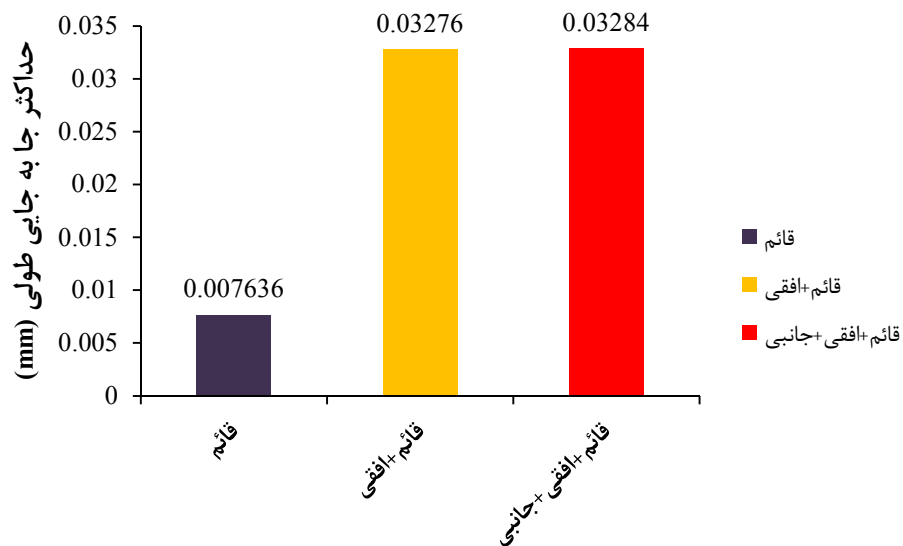
۲-۲- تأثیر نوع بارگذاری بر پاسخ‌های روسازی مرکب
به منظور بررسی تأثیر اعمال بار افقی و جانبی بر پاسخ‌های مدنظر در این تحقیق، شامل تنش برشی در فصل مشترک، کرنش کششی در سطح رویه، جابه‌جایی طولی و جابه‌جایی جانبی، برای نمونه، نتایج این پاسخ‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد تحت بار محوری با زوج چرخ در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ نشان داده شده است. این پاسخ‌ها حداکثر مقادیر آن‌ها بعد از ۱۰۰ تکرار بار می‌باشند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، اعمال بار افقی و جانبی باعث افزایش در مقدار این پاسخ‌ها نسبت به حالت اعمال بار قائم خواهد شد. با اعمال بار افقی به میزان ۵۰٪ بار قائم، تنش برشی، حداکثر کرنش کششی در سطح، جابه‌جایی طولی و جابه‌جایی جانبی حداکثر، به ترتیب،



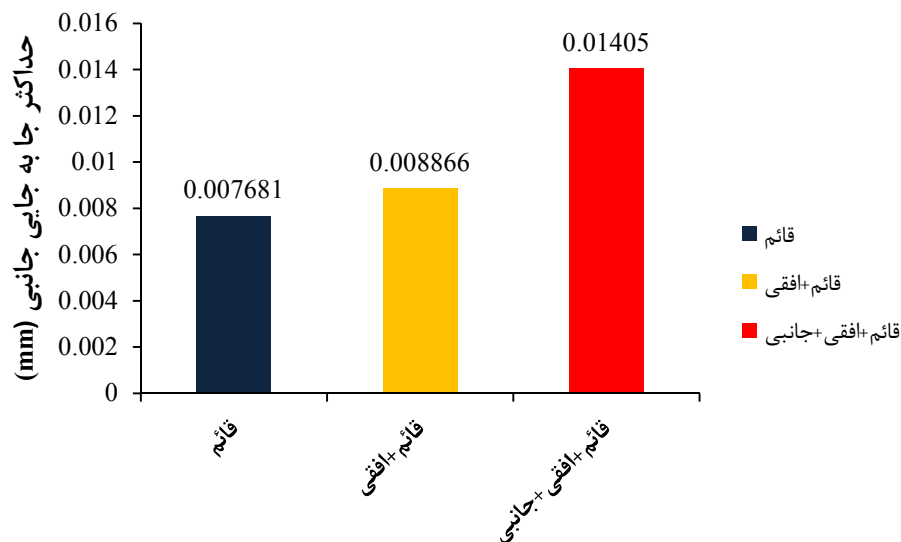
شکل ۱۶. حداکثر تنش برشی نسبت به نوع بارگذاری برای زوج چرخ در دمای ۲۰°C



شکل ۱۷. حداکثر کرنش کششی روی سطح آسفالت نسبت به نوع بارگذاری برای زوج چرخ در دمای ۲۰°C



شکل ۱۸. حداکثر جابه‌جایی طولی نسبت به نوع بارگذاری برای زوج چرخ در دمای ۲۰°C



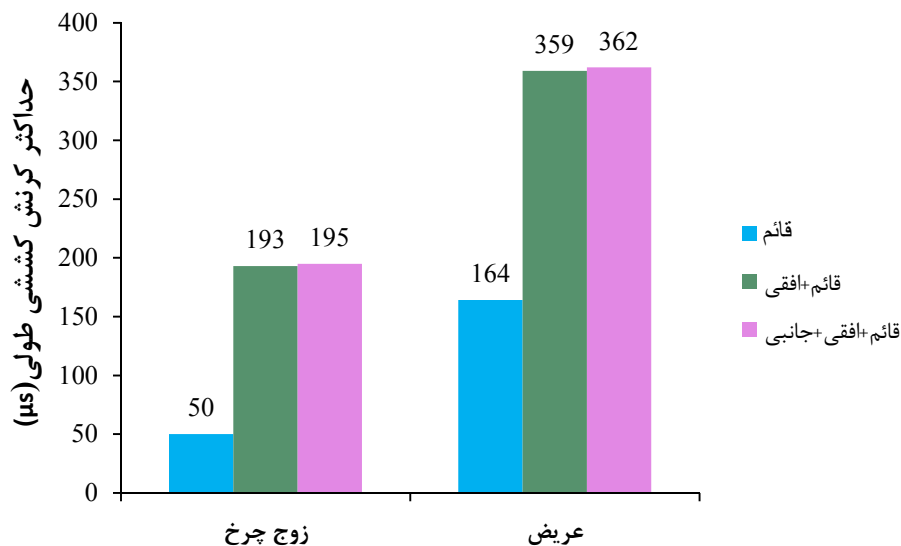
شکل ۱۹. حداکثر جابه‌جایی جانبی نسبت به نوع بارگذاری برای زوج چرخ در دمای ۲۰°C

۳-۳- تأثیر نوع چرخ‌ها

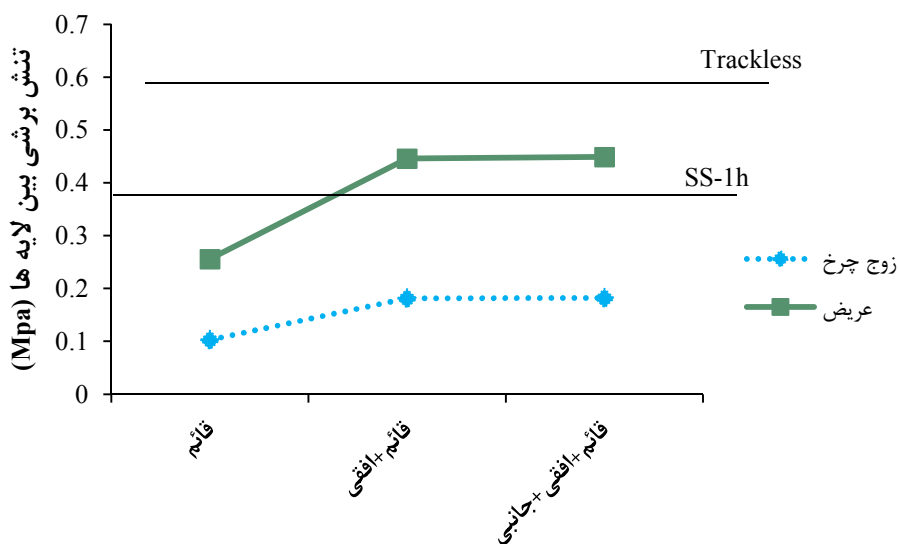
افقی بر روی کرنش کششی سطح رویه در چرخ عریض کمتر از زوج چرخ می‌باشد. طبق نتایجی که در شکل ۲۱ ارائه گردیده‌اند، چرخ عریض تنش برشی قابل‌توجهی را نسبت به زوج چرخ در بین دولایه ایجاد کرده است. به طوری که در حالت بارگذاری قائم و افقی و همچنین در بارگذاری قائم، افقی و جانبی؛ تنش برشی ایجاد شده توسط چرخ عریض بیش‌تر از مقاومت برشی اندود سطحی SS-1h (بیش‌تر از ۰/۳۸ مگا پاسکال) می‌باشد. نسبت به حالت اعمال بار قائم، تنش برشی حداکثر بین لایه رویه و اساس بتنی تحت بار چرخ عریض و زوج چرخ با اعمال همزمان بار افقی و قائم حدود ۰/۷۶٪ بیش‌تر می‌باشد؛ اما مقدار تنش برشی حداکثر تحت چرخ عریض حدود ۲/۵ برابر آن تحت چرخ زوج می‌باشد؛ بنابراین، استفاده از اندود سطحی با مقاومت برشی بیشتر (مثلاً از نوع Trackless) می‌تواند برای مقابله با اثرات مخرب چرخ عریض مناسب باشد. در شکل ۲۲ نیز ملاحظه می‌گردد که جابه‌جایی طولی تحت چرخ عریض

به‌منظور مقایسه تأثیر ترکیب زوج چرخ و چرخ عریض بر پاسخ‌های مدنظر، مقدار این پاسخ‌ها تحت حالت‌های مختلف اعمال بار قائم، قائم + افقی و قائم + افقی + جانبی در زوج چرخ و چرخ عریض در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳ نشان داده شده‌اند. این پاسخ‌ها مربوط به دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد تحت وزن ۸/۲ تن می‌باشند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مقدار پاسخ‌ها تحت چرخ عریض بیش‌تر از زوج چرخ است که بیانگر اثر تخریبی بالاتر چرخ‌های عریض نسبت به چرخ‌های زوج در روسازی‌های مرکب است. بر اساس این نتایج، در هر دو حالت زوج چرخ و چرخ عریض، اعمال بار جانبی تغییر چندانی را در پاسخ‌ها نسبت به زمانی که بار افقی و قائم اعمال می‌شود ایجاد نمی‌کند. همان‌گونه که در شکل ۲۰ ملاحظه می‌شود، تحت بار قائم یکسان، مقدار کرنش کششی حداکثر در سطح رویه تحت چرخ عریض بیش از سه برابر آن تحت زوج چرخ است که نشان دهنده پتانسیل زیاد بروز ترک‌های بالا به پایین تحت چرخ‌های عریض است. همچنین، مقدار این کرنش تحت اعمال مقدار یکسان بار افقی و قائم، در چرخ عریض ۱/۸۶ برابر زوج چرخ می‌باشد که بیانگر این است که اثر بار

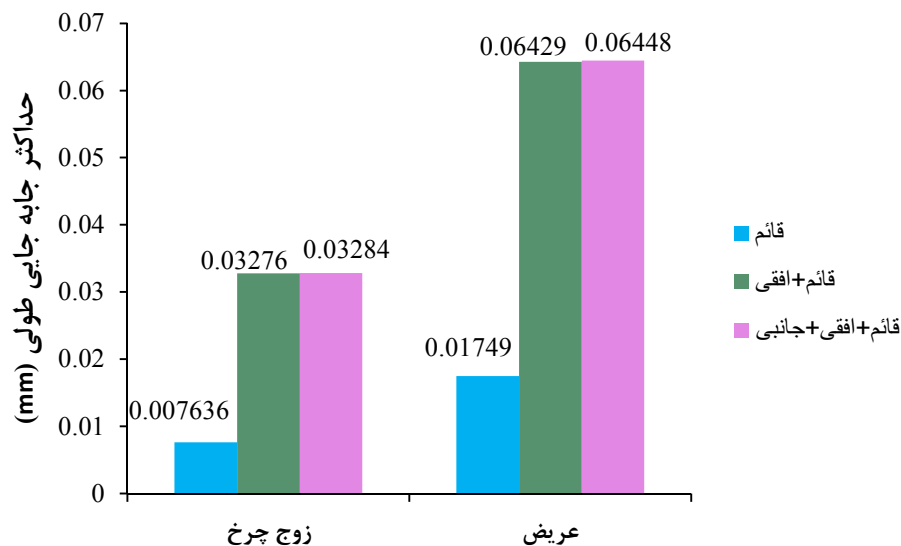
بیش از زوج چرخ می‌باشد. به طوری که مثلاً تحت بار قائم یکسان، جابه‌جایی طولی حداکثر تحت بار چرخ عریض ۲/۲۹ برابر مقدار زوج چرخ است. باین‌حال، در صورت اعمال بار قائم و افقی به صورت یکسان در دو ترکیب چرخ، مقدار جابه‌جایی طولی تحت چرخ عریض ۱/۹۶ برابر حالت زوج چرخ است.



شکل ۲۰. حداکثر کرنش کششی روی سطح آسفالت نسبت به نوع چرخ در دمای ۲۰ °C



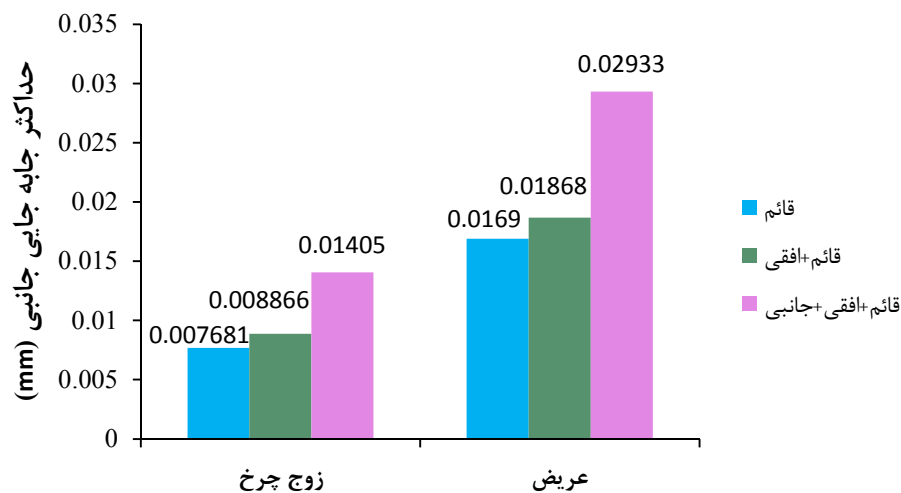
شکل ۲۱. حداکثر تنش برشی بین لایه آسفالتی و RCC نسبت به نوع چرخ در دمای ۲۰ °C



شکل ۲۲. حداکثر جابه‌جایی طولی روی سطح آسفالت نسبت به نوع چرخ در دمای ۲۰ °C

افقی + جانبی، حداکثر جابه‌جایی جانبی تحت چرخ عریض، به ترتیب، ۲/۲، ۲/۱ و ۲/۱ برابر آنها تحت زوج چرخ است. این موضوع بیانگر این است که چرخ‌های عریض اثر بیشتری در جابه‌جایی‌های رویه آسفالتی دارند.

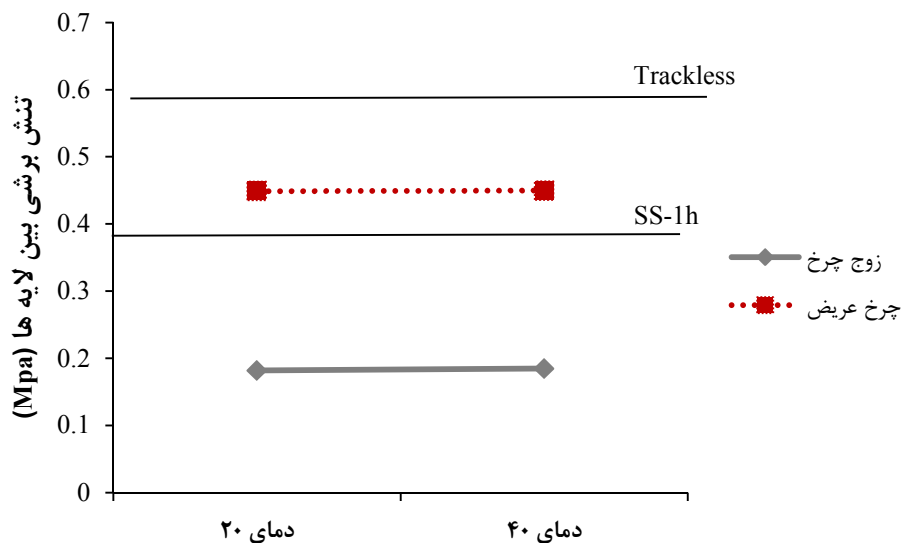
شکل ۲۳ نیز نتایج حداکثر جابه‌جایی جانبی را تحت دو نوع چرخ عریض و زوج چرخ نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، چرخ عریض حداکثر جابه‌جایی جانبی بیشتری را نسبت به زوج چرخ در سطح آسفالت ایجاد می‌کند. به طوری که تحت سه حالت بارگذاری شامل قائم، قائم + افقی و قائم +



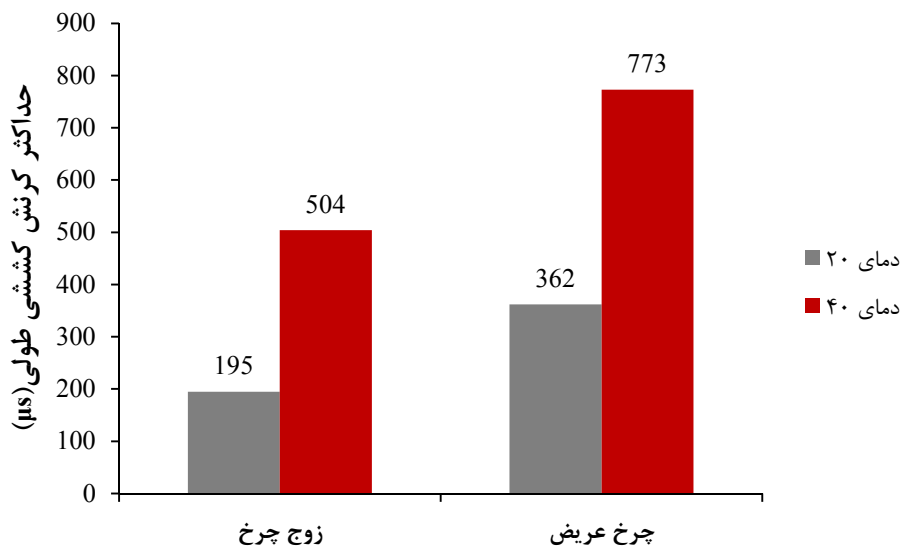
شکل ۲۳. حداکثر جابه‌جایی طولی روی سطح آسفالت نسبت به نوع چرخ در دمای ۲۰ °C

۴۰ درجه سانتی‌گراد در هر دو چرخ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته به‌طوری‌که در زوج چرخ حدوداً ۲/۵ برابر و در چرخ عریض ۲/۱ برابر شده است. مقدار این کرنش تحت چرخ عریض در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب، ۱/۸۵ و ۱/۵۳ برابر مقدار آن تحت زوج چرخ است. شکل‌های ۲۶ و ۲۷ نیز، به ترتیب، حداکثر جابجایی طولی و جانبی را در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای دو چرخ (عریض و زوج) نشان می‌دهند. ملاحظه می‌گردد که با افزایش دما مقادیر هر دو تغییر شکل افزایش یافته و در هر دو شکل اعداد مربوط به چرخ عریض بیش‌تر از زوج چرخ می‌باشند. به‌طوری‌که جابجایی طولی و جانبی در دمای ۴۰ درجه در چرخ عریض به ترتیب ۱/۷ و ۱/۸ برابر آن‌ها تحت زوج چرخ هستند. با این‌حال، افزایش مقدار جابه‌جایی‌ها در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد تحت زوج چرخ بیشتر از چرخ تکی عریض است که نشان می‌دهد حساسیت این پاسخ‌ها به دما تحت چرخ عریض کمتر می‌باشد.

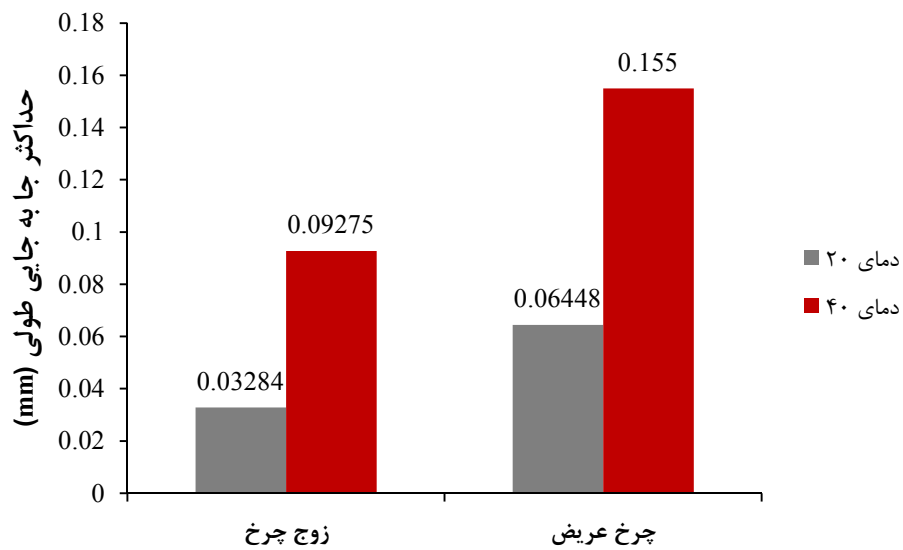
به‌منظور بررسی تأثیر دما در پاسخ‌های مورد مطالعه تحت دو نوع چرخ، نتایج مربوط به آن‌ها تحت چرخ عریض منفرد و زوج چرخ در دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد در شکل‌های ۲۴ تا ۲۷ ارائه گردیده‌اند. این پاسخ‌ها تحت اعمال همزمان بار قائم، افقی و جانبی می‌باشند. همان‌گونه که در شکل ۲۴ ملاحظه می‌شود، تنش برشی بین دو لایه تحت هر دو ترکیب چرخ در دو دمای متفاوت تغییر خاصی نکرده و تقریباً ثابت بوده است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت تغییرات دما تأثیری بر روی تنش برشی بین دولایه آسفالتی و صلب در دو ترکیب چرخ مورد بررسی نخواهد داشت. همچنین، به دلیل آنکه مقدار تنش‌های برشی به‌دست‌آمده در هر دو دما در چرخ عریض بزرگ‌تر از مقاومت برشی اندود سطحی SS-1h است پس جدایی در اتصال بین دولایه در آن اتفاق خواهد افتاد؛ اما با استفاده از اندود سطحی اصلاح‌شده با پلیمر با عنوان Trackless می‌توان از بروز این خرابی در بین لایه‌های روسازی جلوگیری به عمل آورد. طبق نتایج شکل ۲۵، حداکثر کرنش کششی طولی روی سطح آسفالت با تغییر دما از ۲۰ به



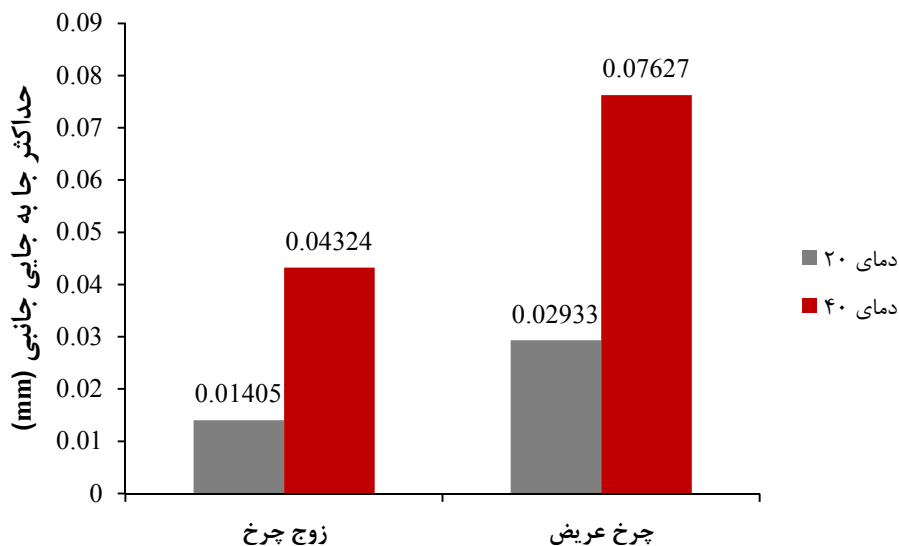
شکل ۲۴. حداکثر تنش برشی بین لایه‌ها نسبت به نوع چرخ در دو دمای متفاوت



شکل ۲۵. حداکثر کرنش کششی روی سطح آسفالت نسبت به نوع چرخ در دو دمای متفاوت



شکل ۲۶. حداکثر جابه جایی طولی روی سطح آسفالت نسبت به نوع چرخ در دو دمای متفاوت



شکل ۲۷. حداکثر جابه‌جایی جانبی روی سطح آسفالت نسبت به نوع چرخ در دو دمای متفاوت

۴- نتیجه‌گیری

- افزایش دما تأثیر قابل‌توجهی بر روی تنش برشی بین لایه رویه آسفالتی و اساس بتنی ندارد.
- اعمال بار توسط چرخ‌های عریض پاسخ‌های به مراتب بزرگ‌تری در روسازی نسبت به چرخ‌های زوج ایجاد می‌کنند. با این حال، مقدار این تأثیر بر پاسخ‌های مختلف متفاوت است.
- نتایج نشان داد که در بعضی از حالات بارگذاری مقدار تنش برشی از مقاومت برشی اندود سطحی از نوع SS-1h بیشتر است؛ بنابراین در صورت استفاده از این نوع اندود خرابی اتصال بین لایه‌ها اتفاق خواهد افتاد و برای جلوگیری از این اتفاق می‌توان از اندود سطحی با مقاومت برشی بالاتر Trackless استفاده شد.
- با تکرار بار، جابه‌جایی طولی و جانبی افزایش می‌یابد که نرخ افزایش با افزایش دما بیشتر می‌شود.
- در این تحقیق اثر عواملی مانند دما، نوع بارگذاری و نوع چرخ بر روی خرابی ترک‌خوردگی خستگی بالا به پایین، جداسازی اتصال بین لایه آسفالت و بتن غلتکی و خرابی ناشی از جابه‌جایی‌های طولی و جانبی در روسازی مرکب با اساس بتن غلتکی، با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی با روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. به طور خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر بیان می‌شوند:
- کرنش کششی در سطح، جابه‌جایی‌های افقی و تنش برشی بین رویه آسفالتی و اساس بتن غلتکی با اعمال بار افقی و جانبی افزایش می‌یابند؛ اما حساسیت به اعمال بارهای افقی برای کرنش کششی در سطح بیشتر از تنش برشی بین لایه‌ای است.
- اعمال بار جانبی همزمان با بار قائم و افقی تأثیر قابل‌توجهی در مقدار کرنش کششی سطح، تنش برشی و حداکثر جابه‌جایی طولی نسبت به حالت اعمال بار قائم و افقی ندارد.
- حداکثر کرنش کششی طولی روی سطح آسفالت به مقدار زیادی با افزایش دما افزایش می‌یابد.

Canadian Journal of Civil Engineering, 35, (2), pp, 119-128.

-Krishna Rao, S., Sravan, P., Chandrasekhar Rao, T. (2016), "Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS", Construction and Building Materials, Vol. 114, pp. 925-933.

-Li, S., Liu, X., Liu, Z. (2014), "Interlaminar shear fatigue and damage characteristics of asphalt layer for asphalt overlay on rigid pavement", Construction and Building Materials, Vol. 68, pp. 341-347.

-Liao, Y. (2007), "Viscoelastic FE Modeling of Asphalt Pavements and its Application to U.S. 30 Perpetual Pavement", Ph.D. Thesis, Faculty of the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University.

-Liu, Li., Hao, P. (2011), "ABAQUS Program-based Numerical Analysis on U-shaped Cracking of Asphalt Pavement", Nation West traffic science and technology construction Project, IEEE, pp. 2861-2864.

-Lushing, N. (2014), "Effect of vertical and horizontal loading on pavement interface shear stress", Int. J. Eng. Res. Technol, (IJERT) 3 (10), pp. 1295-1299.

-NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), (2012), " Optimization of Tack Coat for HMA Placement", NCHRP Report 712, Washington, USA.

- Novak, M., Birgisson, B., Roque, R. (2003), "Near surface stress states in flexible pavements using measured radial tire contact stresses", ADINA. Computers & Structures, 81(8-11), pp. 859-870.

- Nunez, O. (2007), "Composite Pavements: A Technical and Economic Analysis during the Pavement Type Selection Process", Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

- 1-Creep
- 2-Time hardening
- 3-Strain hardening

۶-مراجع

- طاهرخانی، ح. و مرادلو، الف. و جلالی جیرندهی، م.، (۱۳۹۵)، "بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک به روش المان‌های محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS"، مجله مهندسی حمل‌ونقل، دوره ۸، شماره ۲، ص. ۳۴۲-۳۲۳.

- Al-Qadi, Imad L., Jun Yoo, Pyeong., Elseifi, Mostafa A., Nelson, Susan. (2009), "Creep Behavior of Hot-Mix Asphalt due to Heavy Vehicular Tire Loading", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 135, pp. 1265-1273.

- Gideon, C.S., Kishnan, J. (2012), "Influence of horizontal traction on top-down cracking in asphalt pavements", in: 7th RILEM Int. Conf. on Cracking in Pavement, Springer, Netherlands, pp. 1069-1079.

- Hazaree, C., Ceylan, H., Wang, K. (2011), "Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC", Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 313-319.

- Hua, J. (2001), "Finite Element Modeling and Analysis of Accelerated Pavement Testing Devices and Rutting Phenomenon", Ph.D. Thesis, Purdue University, USA.

- Huang, Y.H. (2004), "Pavement analysis and design", 2nd Ed Upper Saddle River, NJ Prentice Hall.

- Kim, D. (2008), "Super-single tire loadings and their impacts on pavement design ",

Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Pennsylvania.

-SHRP (Strategic Highway Research Program), (2013), "Composite Pavement System–HMA/PCC Composite Pavement, Vol. 1", Transportation Research Board (TRB), Washington, DC.

-Simulia, (2016), "Abaqus Ver 6.14 Analysis User's Manual",

-Smith, R. J. (1963), "Definition of composite pavement structures", Highway Research Record, 37, pp. 1-4.

-Sun, Lu., Duan, Y. (2013), "Dynamic response of top-down cracked asphalt concrete pavement under a half-sinusoidal impact load", Springer-Verlag Wien, pp. 1865–1877.

-Uzarowski, L. (2006), "The Development of Asphalt Mix Creep Parameters and Finite Element Modeling of Asphalt Rutting", Ph.D. Thesis, University of Waterloo. Canada.

-Von Quintus H.L. (1994), "Performance Prediction Models In the Superpave Mix Design System", Strategic Highway Research Program, SHRP-A-699, Washington, D.C.

-Zhao, Y.; Alae, M.; Fu, G. (2017), "Investigation of mechanisms of top-down fatigue cracking of asphalt pavement", Road Materials and Pavement Design, pp. 1-12.

-Nunn, M. (2004), "Development of a more versatile approach to flexible and flexible composite pavement design", TRL Report TRL615, Highways Agency, Berkshire, U.K.

-Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, D., Gagne, R. (2017), "Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study", Construction and Building Materials, Vol, 133, pp 450-458.

-Perl, M., Uzan, J., Sides, A. (1983), "Visco-Elasto-Plastic Constitutive Law for a Bituminous Mixture under Repeated Loading", Transportation Research Record 911, National Research Council, Washington, D.C, pp 20-27.

-Rith, M., Kim, Y. K., Hong, S. J., Lee, S. W. (2016), "Effect of horizontal loading on RCC-base composite pavement performance at heavy duty area", Construction and Building Materials, Vol. 131, pp.741-745.

-Romanoschi, S.A., Metcalf J.B, (2001), "Effects of Interface Condition and Horizontal Wheel Loads on the life of flexible pavement structure", Design. Rehabil. Pave., TRB, TRR No. 1778, pp. 123–131.

-Salama, H., Chatti, K. (2006), "Evaluating Flexible Pavement Rut Damage Caused by Multiple Axle and Truck Configurations", Proceedings of the 9th International