

# بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزاء محدود

حسن طاهر خانی (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسین خالقی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

E-mail: taherkhani.hasan@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۲

## چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش المانهای محدود و بکارگیری نرم افزار *ABAQUS* مدل‌های سه بعدی از روسازی ترک خورده و ترک خورده ساخته شده و تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ آنها مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ‌های روسازی های ترک خورده و ترک نخورده، شامل کرنش کششی زیر لایه آسفالتی، کرنش فشاری روی بستر، تغییر شکل روسازی و ضرایب شدت تنش در مدهای مختلف تحت محور ساده با زوج چرخ، با وزن محور ۸/۲ تن و ۸ فشار باد لاستیک مختلف ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و  $150\text{psi}$  تعیین شده اند. ترکهای بکار رفته در مدل‌سازی ترکهای طولی با طول، عمق و موقعیت معین نسبت به چرخ‌ها بوده که در دو حالت بالا به پایین و پایین به بالا بررسی گردیده اند. همچنین، به منظور بررسی تاثیر وزن محور بر روی پاسخ‌ها، محور ساده با وزن‌های مختلف و فشار ثابت در تحلیل به کار رفته و پاسخ‌ها مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان می‌دهند با افزایش فشار باد لاستیک و وزن محور میزان حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و کرنش فشاری روی بستر افزایش می‌یابد. اما، مقدار پاسخ‌ها عموماً، برای روسازی‌های با ترکهای بالا به پایین بحرانی‌تر از روسازی‌های با ترک پایین به بالا هستند. مقایسه انجام یافته بین روسازی دارای ترک و روسازی بدون ترک نشان دهنده آن است که مقادیر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و کرنش فشاری روی بستر در روسازی ترک خورده ممکن است تا حدود ۶۰ درصد بیشتر از روسازی بدون ترک باشد. همچنین، نتایج بیانگر آن است که ضرایب شدت تنش با افزایش فشار باد لاستیک و وزن محور افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: روسازی آسفالتی ترک خورده، المان محدود، کرنش کششی زیر آسفالت، کرنش فشاری روی بستر، ضریب شدت تنش

۱. مقدمه

راهها جزء سرمایه ملی هرکشوری بوده و پویایی اقتصاد کشورها به مقدار بهره مندی آن از راههای با سرویس دهی مناسب بستگی دارد. قابلیت سرویس دهی راهها به مقدار زیادی به عملکرد روسازی آنها بستگی دارد. روسازی آسفالتی رایج ترین نوع روسازی است که در سراسر دنیا در ساخت راهها استفاده می شود. در ایران نیز تقریباً تمامی روسازی های مورد استفاده در راهها از این نوع هستند. یکی از عوامل موثر در قابلیت سرویس دهی روسازیهما روش بکار رفته در طراحی آنهاست. یک روش طراحی مناسب باید قابلیت ایجاد ارتباط بین عملکرد روسازی و شرایط بهره برداری از آن، شامل ترافیک، عوامل جوی، رفتار مصالح به کار رفته در آن و شرایط بستر را داشته باشد. تا مدتها روسازی ها به روش تجربی طراحی می شدند. اما، اخیراً تلاش ها در جهت طرح روسازی ها به روش های تحلیلی است، و بسیاری از موسسات روش های تحلیلی - تجربی را جایگزین روشهای تجربی نموده اند. همچنین، پیش بینی می شود که در آینده طرح روسازی ها صرفاً با روش های تحلیلی انجام گیرد که در آن خرابیها و روند رشد آنها در روسازی با روشهای تحلیلی به دست می آید. یک بخش مهم از فرآیند طراحی روسازی به روش تحلیلی، تعیین پاسخ های روسازی است. برای داشتن یک روش طراحی قابل اعتماد دقت در محاسبه پاسخ ها ضروری است. با توجه به پیچیدگی در ساختار، رفتار مصالح و بار وارده، غالباً پاسخ های روسازی با روش هایی به دست می آید که در آنها ساده سازی های زیادی انجام گرفته است. یکی از این روشها، روش الاستیک چند لایه ای است که به دلیل ساده سازی ها در منظور کردن رفتار واقعی مصالح، بارگذاری و شرایط هندسی روسازی، این روشها نمی توانند جوابهای دقیقی را از پاسخ های روسازی ارائه دهند.

یکی از مواردی که در روشهای سنتی تحلیل روسازی های آسفالتی در نظر گرفته نمی شود وجود ترک در رویه آسفالتی است. ترک خوردگی موجب نفوذ آب های حاصل از بارندگی به لایه های زیرین روسازی شده و کاهش استحکام سازه روسازی، افزایش ناهمواری، از دست رفتن ظرفیت باربری، کاهش ایمنی و

کیفیت رانندگی را به دنبال دارد [Seong, 2006, Anderson, 2005]. رویه های آسفالتی بسیار مستعد ترک خوردگی هستند و به ندرت می توان روسازی آسفالتی را یافت که هیچ ترکی در آن مشاهده نگردد. وجود ترک ها می تواند تاثیر قابل توجهی بر روی پاسخ های روسازی داشته باشد. میزان تاثیر ترکها می تواند متاثر از مشخصات هندسی آنها، امتداد و نوع آنها باشد. به طور کلی می توان از سه عامل بارهای ترافیکی، نشست در لایه های زیرین و عوامل جوی به عنوان عوامل شروع و گسترش ترک در روسازی نام برد [Abdel-Motaleb, 2007]. اختلاف بین یک قطعه ترک دار و یک قطعه دیگر، در میزان پارامتر میدان تنش  $K$  است، که ضریب شدت تنش نامیده می شود. اصولاً  $K$  به عنوان ضریب درجه بندی به کار می رود که میزان شدت تنش در لبه ترک را تعریف میکند [Hui et al., 2010; Moghadasnejad, 2008]. بزرگی ضریب شدت تنش پتانسیل ترک برای رشد و گسترش را نشان می دهد. اصولاً سه مد شکست برای تعریف رابطه تنش و تغییر مکان به کار برده می شود [Fan, 2011; Fakhri and Farokhi, 2010].

(I) مد بازشوندگی (I): گسیختگی تحت اثر کشش خالص که ناشی از گرا دیان حرارتی در عمق لایه ها و نیز وارد شدن بار ترافیکی بر راس ترک است.

(II) مد برشی (II): این مد در اثر شرایط نامتقارن اعمال بار بر روسازی موجب ایجاد ترک های کشویی می گردد که مخالف همدیگر گسترش می یابند.

(III) مد پیچشی (III): این مد شامل بارهای برشی می شود که حول یکی از محورهای اصلی می چرخند و باعث ایجاد و گسترش ترک در روسازی می شوند. هر مدی که ضریب شدت تنش بزرگتری داشته باشد گسترش ترک مطابق آن مد انجام می شود. با توجه به تحقیقاتی که بر روی روسازیهای مختلف با در نظر گرفتن مکانیک شکست انجام شده است مشخص گردیده که مد بازشوندگی و برشی بیشتر در روسازی تعیین کننده است [Sun and Duan, 2013; Fakhri and Farokhi, 2010].

در این تحقیق، به منظور بررسی پاسخ های روسازی های آسفالتی

ترک خورده به تغییرات فشار باد چرخ و وزن محورها، از روش المانهای محدود با نرم افزار ABAQUS برای مدلسازی روسازی استفاده گردیده است. دو نوع ترک طولی بالا به پایین و پایین به بالا، با عمق و طول معین در نظر گرفته شده اند و با قرار دادن آن در وسط یک جفت چرخ محور ساده با وزنهای و فشار بادهای مختلف، پاسخ های روسازی شامل، حداکثر کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی، حداکثر کرنش عمودی بر روی بستر و تغییر شکل حداکثر رویه، محاسبه شده و با روسازی ترک نخورده مقایسه شده اند. همچنین ضرایب شدت تنش در روسازی های ترک خورده محاسبه شده تا پتانسیل رشد ترک در دو نوع ترک مختلف مقایسه شده و تاثیر فشار باد و وزن بر روی آنها بررسی می گردد.

## ۲. مروری بر ادبیات فنی موضوع

لایه های روسازی آسفالتی بر اثر وارد شدن بار چرخ وسایل نقلیه تغییر شکل داده و تنش ها و کرنش های فشاری و کششی در لایه های مختلف آن ایجاد می شود. کرنش های کششی لایه آسفالتی موجب ایجاد ترک های خستگی و کرنش های فشاری در لایه ها موجب بوجود آمدن شیار شدگی می گردد. بارهای ترافیکی از مهم ترین عوامل تخریب روسازی های آسفالتی هستند. از مهم ترین مشخصات بار ترافیکی میزان فشار باد چرخ، وزن و نوع محورها، اثرات دینامیکی و سرعت بارها هستند. در سالهای اخیر استفاده از فشارهای بالای باد لاستیکهای کامیونها در سراسر دنیا گزارش می شود. همچنین، علیرغم محدودیت وزنی اعمال شده بر روی وزن محورها از انواع مختلف برخی از کامیونها دارای محورهایی با وزنی بیش از مقدار مجاز هستند. پیش بینی عملکرد واقعی روسازی نیازمند در نظر گرفتن مقادیر واقعی فشار باد لاستیک و وزن محورها کامیونهاست و مدلهای پیش بینی عملکردی که محورها استاندارد را در نظر گرفته اند دارای خطا خواهند بود. در گذشته مطالعاتی در این رابطه انجام شده است که می توان به مطالعاتی که عبدالمطلب در رابطه با تاثیر فشار باد لاستیک کامیونها بر روی طراحی روسازی ها در کشور مصر انجام داده است اشاره کرد. نتایج مطالعات نشان می دهد که فشار باد لاستیک بر روی کرنش کششی زیر لایه آسفالتی تاثیر بسیار زیادی دارد؛ این اثر در

روسازی های نازک، نسبت به روسازی های ضخیم، بیش تر بوده که نشان می دهد افزایش فشار باد لاستیک، در روسازی های نازک نسبت به روسازی های ضخیم، ترک های خستگی بیش تری ایجاد می کند. همچنین نتایج نشان می دهد با افزایش فشار باد لاستیک، رشد ترک های عرضی، نسبت به ترک های طولی، بیش تر است. طبق نتایج مطالعات عبدالمطلب، افزایش شیارشدگی، کاهش عمر خستگی و کاهش سریع کیفیت روسازی، به اثرات ناشی از افزایش فشار باد لاستیک کامیونها و همچنین افزایش بار محوری، نسبت داده شده است [Abdel-Motaleb, 2007]. این مطالعات برای روسازی های فاقد ترک و با استفاده از روش الاستیک چند لایه ای انجام گرفت. در تحقیقات دیگری رحمان و همکارانش با مدلسازی روسازی در نرم افزار ABAQUS و با استفاده از بارگذاری استاتیکی و در نظر گرفتن سطوح تماس مختلف بین لاستیک و آسفالت به بررسی تاثیر افزایش مساحت بارگذاری (افزایش بار وارد بر روسازی) پرداخته اند. نتایج بررسی ها نشان می دهد که با در نظر گرفتن سطح واقعی تماس بین لاستیک و رویه، کرنش و تنش زیر لایه آسفالتی بیشتر می شود. همچنین با افزایش تعداد المان زیر بار، تنش و کرنش زیر لایه آسفالتی به صورت تقریباً خطی افزایش می یابد که نشان دهنده تاثیر افزایش وزن محور بر روی پاسخ روسازی و کاهش عمرخستگی و شیارشدگی روسازی است [Rahman et.al. 2011].

بررسی ادبیات فنی موضوع نشان داد که مطالعات کافی بر روی تاثیر فشار باد چرخ و وزن محور بر روی روسازی هایی که دارای ترک در لایه رویه هستند انجام نگرفته است و غالباً تحقیقات در این زمینه بر روی روسازی های بدون ترک و با استفاده از تحلیل های الاستیک چند لایه ای انجام گرفته است. با توجه به عدم قابلیت روشهای الاستیک خطی در مدلسازی روسازی های ترک خورده، در این مطالعه از روشهای المان محدود برای شبیه سازی استفاده گردیده است. به ابزارهای المان محدود سه بعدی به طور فزاینده ای به عنوان بهترین روش برای پاسخ گویی به سوالات اساسی در مورد عملکرد روسازی نگریسته می شود [Zheng et.al. 2003, Chen et.al. 1990]، اما، زمان بر بودن فرآیند تحلیل برای

کار رفته در مدل وجود دارد. رفتار مصالح روسازی در مقابل بار بسیار پیچیده است. مصالح آسفالتی بسته به دما و زمان بارگذاری رفتاری الاستیک، ویسکوالاستیک تا ویسکوپلاستیک از خود نشان می دهند. همچنین، مصالح سنگدانه ای تثبیت نشده اساس و زیر اساس و خاک بستر رفتار الاستوپلاستیک تا الاستیک غیر خطی دارند. با این حال، تحلیل روسازی با لحاظ نمودن رفتار واقعی مصالح روسازی زمان بر و مشکل خواهد بود و عموماً با دقت قابل قبول تحلیل با فرض رفتار الاستیک لایه ها انجام میگیرد. با توجه به این که هدف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر وجود ترک بر پاسخ های روسازی است، به منظور کاهش یچیدگی تحلیل، تمامی لایه ها و بستر با رفتار الاستیک خطی فرض شده اند. جدول ۱ مشخصات الاستیک مصالح لایه های روسازی و بستر را که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته اند نشان می دهد.

به منظور مطالعه اثر دینامیکی بار بر روی روسازی با مصالح الاستیک از معادله اساسی المان محدود مسائل الاستودینامیک (رابطه ۱) استفاده گردیده است [Sun and Hudson, 2005].

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

که در آن،  $[M]$  ماتریس جرم روسازی،  $[C]$  ماتریس میرایی روسازی،  $[K]$  ماتریس سختی روسازی،  $\{\delta\}$  بردار جابجایی،  $\{\dot{\delta}\}$  بردار سرعت،  $\{\ddot{\delta}\}$  بردار شتاب و  $\{F(t)\}$  بار هستند.

برای حل مسائل دینامیکی نیاز به تعیین مقادیر میرایی روسازی است. در این تحقیق از مدل میرایی رایلی استفاده شده است. در این مدل  $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ ، که  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت های تناسب هستند که به فرکانس های طبیعی روسازی و نسبت میرایی ارتباط می یابند. معمولاً،  $\alpha = \lambda\omega$  و  $\beta = \lambda/\omega$  که  $\omega$  فرکانس طبیعی و  $\lambda$  نسبت میرایی است [Liao and Huang, 2008]. نسبت میرایی مصالح روسازی معمولاً ۰/۰۲ در نظر گرفته می شود [Sun and Duan, 2013]. بر همین اساس مقادیر ضرایب میرایی رایلی برای مصالح روسازی و بستر در جدول ۱ ارائه شده اند [Liao and Huang, 2008].

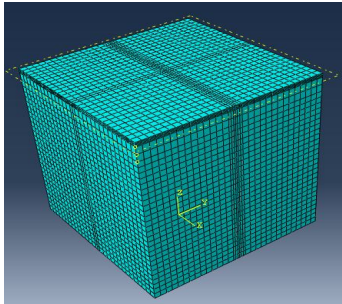
مدلسازی دقیق روسازی مانع از استفاده آنها در تحلیل گردیده است. روش المان محدود یک روش تحلیلی کاملاً تطبیق پذیر بوده و دارای قابلیت مدلسازی هندسی دو بعدی و سه بعدی است. در این روش امکان در نظر گرفتن خصوصیات خطی و غیر خطی مصالح، رفتار پلاستیک و خصوصیات پیچیده دیگر وجود دارد. نرم افزارهای مختلفی برای روش المان محدود وجود دارد که یکی از پرکاربردترین آنها برای تحلیل روسازی ABAQUS است. ABAQUS یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای شبیه سازی به روش اجزا محدود می باشد و از تحلیل های ساده تا پیشرفته را به نحو شایانی انجام می دهد. همچنین، می توان گفت این نرم افزار دارای محیطی کاربرپسند نسبت به سایر نرم افزارهای مشابه است و از این رو در سال های اخیر کاربران زیادی را به خود جذب کرده است. اساس مدلسازی و آنالیز مدل با ABAQUS، تقسیم بندی مدل به المان و گره می باشد. از ویژگی های دیگر این نرم افزار قابلیت مدل کردن و اختصاص ترک به یک قطعه و یا ساختار است که در این پژوهش از این ویژگی بهره گرفته شده است. چن و همکارانش مطالعات جامعی را بر روی برنامه های تحلیل روسازی انجام دادند و نشان دادند که نتایج نرم افزار ABAQUS هماهنگی خوبی با نتایج سایر برنامه ها دارند [Chen et al., 1990]. سوکوماران آاز تکنیکهای تحلیل المانهای محدود برای تعیین مکانیزم شکست در سیستم روسازی تحت بارهای متحرک هواپیما استفاده نموده است [Sukumaran, 2004].

### ۳. روش تحقیق

در این تحقیق، به منظور بررسی تاثیر افزایش فشار باد چرخ ها و وزن محورها بر پاسخ روسازی های ترک خورده، یک روسازی آسفالتی متشکل از لایه های رویه آسفالتی، اساس و زیراساس سنگدانه ای با ضخامت های معین و مشخصاتی مطابق با مصالح معمول در روسازی راههای ایران، توسط نرم افزار تحلیل المان محدود ABAQUS مدلسازی شده و برخی از پاسخ های مورد نظر در روسازی تحت بارگذاری دینامیکی تعیین گردیدند. در نرم افزار ABAQUS امکان تعریف رفتارهای مختلفی برای مصالح به

## بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزاء محدود

[Duan, 2013]. برای جلوگیری از حرکت افقی مدل، گره های پیرامونی مدل در برابر حرکت های افقی بسته شده اما حرکت آن در جهت قائم آزاد است. گره های کف مدل برای جلوگیری از حرکت افقی و قائم در کلیه جهت ها بسته شده است.



شکل ۱. مدل مش بندی شده

در مدلسازی این تحقیق، برای تحلیل های مربوط به بررسی فشار باد لاستیک از محور منفرد زوج چرخ با وزن ۸/۲ تن و فشار باد لاستیک های مختلف، و، برای مدلسازی مربوط به بررسی وزن از محور منفرد ساده با وزن های مختلف و یک فشار باد لاستیک ثابت استفاده شده است. برای مدلسازی سطح تماس بین لاستیک و آسفالت اشکال مختلفی از جمله سطح مستطیلی و دایره ای و بیضوی وجود دارد و از آنجا که مطالعات گذشته نشان دهنده نتایج قابل قبول برای استفاده از سطح مستطیلی دارد و همچنین، با توجه به دشواری مدل کردن و مش بندی سطوح بیضوی، در این پژوهش به منظور ساده سازی سطح مستطیل معادل در نظر گرفته شده است. [Sun and Duan, 2013; Yanjing et al., 2011]. مساحت سطح مستطیل بارگذاری  $A_c$  با تقسیم وزن وارد بر چرخ به فشار باد لاستیک محاسبه شده و طول  $L$  با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است که عرض مستطیل بارگذاری برابر  $0.6L$  و طول آن برابر  $0.8712L$  می باشد [Huang, 2004].

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0.5227}} \quad (2)$$

به منظور بررسی تاثیر فشار باد لاستیک بر روی روسازی ترک خورده، وزن محور منفرد با زوج چرخ ۸/۲ تن و سرعت حرکت

ترکها در انواع مختلف در سطح روسازی آسفالتی مشاهده می شوند. یکی از انواع رایج ترک، ترکهای طولی در مسیر عبور چرخ های وسایل نقلیه هستند که در اثر خستگی ناشی از تکرار کرنش های کششی بوجود می آیند. این ترکها به دو گروه ترکهای بالا به پایین و ترکهای پایین به بالا تقسیم می شوند که در این تحقیق نیز این دو نوع ترک مطالعه شده اند. در کلیه مدلها عمق ترک برابر نصف ضخامت رویه (۷/۵ سانتیمتر) و طول ترک برابر ۰/۵ متر لحاظ شده است. این طول بر اساس طول ترکهای خستگی که در مراحل اولیه تشکیل می گردند انتخاب شده است [Sun and Duan, 2013]. به منظور تعیین موقعیت بحرانی ترک نسبت به چرخ ها، موقعیت های مختلف ترک نسبت به زوج چرخ بررسی شده و پاسخ ها تعیین گردیدند و بحرانی ترین محل برای ادامه تحلیل ها انتخاب گردید.

در این پژوهش ساختار روسازی به صورت سه بعدی مدل گردیده و از المان های مکعبی استفاده شده است. این المان از انواع المان- های رایج است که در بیشتر مدلسازی ها و تحقیقات از آن استفاده می شود. انتخاب ابعاد مناسب برای مدل در تحلیلهای 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 برگشته و دوباره بر روی مدل تاثیر گذاشته و دقت و صحت نتایج را تحت تاثیر قرار دهد. از طرف دیگر، بزرگ بودن بیش از اندازه مدل سبب افزایش زمان تحلیل می شود. پس از ساخت مدل های متعدد و بررسی نتایج، ابعاد  $6 \times 6 \times 6$  متر برای این پژوهش انتخاب شد. به دلیل وجود تمرکز تنش در اطراف محل اعمال بار، برای افزایش صحت نتایج، ابعاد مش بندی در محل بارگذاری کوچکتر از سایر قسمتها در نظر گرفته شده که این موضوع در شکل ۱ قابل مشاهده است. در مدلسازی، برای همگرایی و دقت بیشتر نتایج از المانهای مکعبی هشت گره ای (3D8R) استفاده شده است [Rahman et al. 2011]. شرایط مرزی مدل می بایست مدل به نحوی مناسب تعریف گردد تا شبیه سازی قابل قبولی از شرایط واقعی روسازی صورت پذیرد، یعنی کناره های مدل مجاز به حرکت قائم و کف مدل بدون حرکت باشد [Sun and

$$P = p_0 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \quad 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

$$T = 12 \frac{a}{V} \quad (4)$$

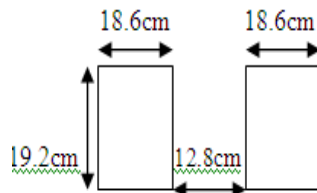
برای اعتبارسنجی، مدل‌هایی مشابه مدل‌هایی که سان و دوان در سال ۲۰۱۳ به منظور بررسی پاسخ دینامیکی روسازی آسفالتی ترک خورده تحت بارگذاری دینامیکی انجام داده اند ساخته شد [Sun and Duan, 2013]. مطابق مدلسازی‌هایی که آنها انجام دادند، مقدار بار وارده ۷۰۰ کیلو پاسکال و ناحیه بارگذاری مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده و سایر مشخصات مصالح در جدول ۳ ذکر شده است. نسبت میرایی مصالح روسازی ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است. با بررسی شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۴ که مربوط به حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر تغییر شکل رویه آسفالتی در سرعت‌های مختلف و همچنین نمودار شدت تنش است، مشخص می‌گردد که نتایج به دست آمده انطباق مناسبی با نتایج مرجع مورد نظر دارد.

کامیون ۸۰ کیلومتر در ساعت در نظر گرفته شد. همچنین، به منظور بررسی تاثیر وزن محور منفرد با چرخ تکی بر روی پاسخ روسازی سه مدل با وزن محور ۵، ۸/۲ و ۱۵ تن با فشار باد لاستیک ۱۰۰ psi و با سرعت حرکت ۸۰ کیلومتر در ساعت ساخته شد.

برای اینکه بار به صورت دینامیکی در نظر گرفته شود، از روابط ۳ و ۴ برای محاسبه زمان بارگذاری و مقدار بار در هر لحظه از بازه زمانی استفاده شده است [Sun and Duan, 2013]، که در آن  $P_0$  فشار باد چرخ،  $a$  طول مستطیل بارگذاری و  $V$  سرعت عبور وسیله نقلیه می‌باشد، که برابر ۸۰ کیلومتر در ساعت (۲۲،۲۲ متر بر ثانیه) در نظر گرفته شد.  $T$  کل زمان بارگذاری است که با توجه به طول مستطیل بارگذاری و سرعت کامیون که ۸۰ کیلومتر در ساعت است بدست آمده و در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. در این جدول، چهار ردیف اول مربوط به مدل‌های بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و ردیف‌های ۵ تا ۷ مربوط به مدل‌های بررسی تاثیر وزن محور است.

جدول ۲. زمان بارگذاری و طول مستطیل در حالات مختلف بارها

ردیف	شرح	طول مستطیل بارگذاری (cm)	زمان بارگذاری (s)
۱	مدلهای مربوط به بررسی تاثیر فشار باد لاستیک	۲۳/۲	۰/۱۲۵
۲		۲۰/۷۸	۰/۱۱۲
۳		۱۸/۹۶	۰/۱۰۲
۴		۱۷/۲	۰/۰۹۳
۵	مدلهای مربوط به بررسی تاثیر وزن محور	۲۲/۹۵	۰/۱۲۴
۶		۲۹/۳۸	۰/۱۵۹
۷		۳۹/۷۴	۰/۲۱

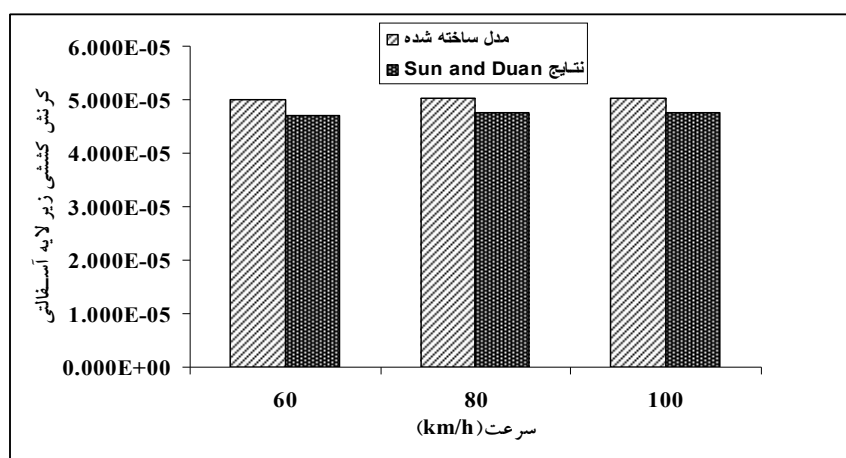


شکل ۲. سطح تماس چرخ و رویه آسفالتی [Sun and Duan, 2013]

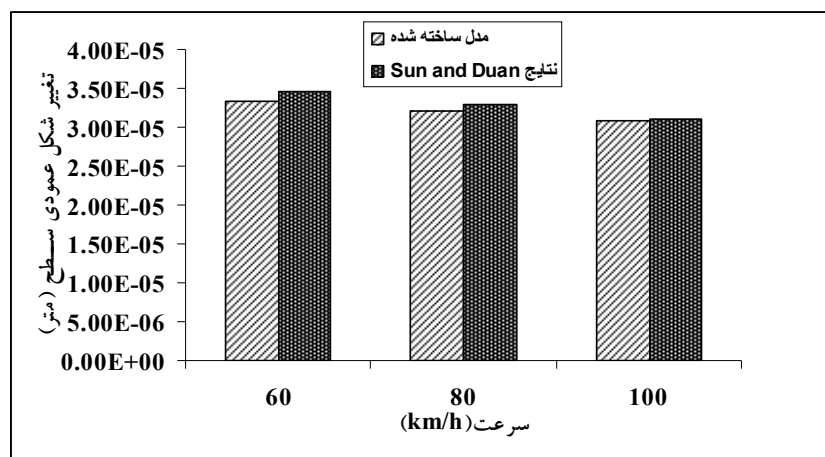
بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزاء محدود

جدول ۳. مشخصات مصالح مرجع برای اعتبارسنجی [Sun and Duan, 2013]

نسبت پواسون	ضریب ماتریس سختی $\beta$	ضریب ماتریس سختی $\alpha$	چگالی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	ضخامت (cm)	مدول الاستیسیته (Mpa)	لایه
۰/۳	۰/۰۱۱	۰/۳۷	۲/۴	۱۵	۱۸۰۰	رویه
۰/۲۵	۰/۰۱۱	۰/۳۷	۲/۱	۲۵	۱۲۰۰	اساس
۰/۲۵	۰/۰۱۱	۰/۳۷	۲	۲۵	۶۰۰	زیراساس
۰/۳۵	۰/۰۰۵	۰/۲۵	۱/۸	۵۳۵	۵۰	بستر



شکل ۳. مقایسه حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در سرعت های مختلف



شکل ۴. مقایسه حداکثر تغییر شکل رویه آسفالتی در سرعت های مختلف

جدول ۴. مقایسه ضریب شدت تنش

ضریب شدت تنش (KI) ( $kpa \cdot m^{0.5}$ )			مدل
100 (km/h)	۸۰ (km/h)	۶۰ (km/h)	
۱۰۴	۱۰۲	۱۰۲	مدل ساخته شده
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	مدل مرجع

به محل بار ساخته شد در تمامی مدلها عمق ترک برابر نصف رویه یعنی ۷/۵ سانتیمتر و طول آن برابر پنجاه سانتیمتر در نظر گرفته شد. در مدلسازی از محور منفرد زوج چرخ با وزن ۸/۲ تن و فشار باد لاستیک ۸۰ psi استفاده شده است. با استفاده از رابطه (۳) و (۴) ابعاد مستطیل بارگذاری برابر ۲۳/۲\*۱۶ سانتیمتر بدست آمده و بار ۲۰۵۰۰ نیوتن بر آن وارد میگردد. شکل ۵ موقعیتهای مختلف ترک و محل اعمال بار را نمایش می دهد همانگونه که از شکل مشخص است، در مدل اول ترک در مابین دو مستطیل بارگذاری، در مدل دوم ترک در لبه داخلی چرخ، در مدل سوم ترک در مرکز چرخ، در مدل چهارم ترک در لبه خارجی چرخ و در مدل پنجم و ششم ترک به فاصله پنجاه سانتیمتری و یک متری از لبه خارجی چرخ قرار دارد.

نمودار شکل ۶ خلاصه نتایج مربوط به مقدار کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و کرنش فشاری روی بستر را در حالتیهای مختلف موقعیت ترک بالا به پایین را نسبت به محل بار نشان می دهد. روند مشابهی برای ترکهای پایین به بالا نیز مشاهده گردید. همانگونه که مشخص است بحرانی ترین حالت مربوط به حالتی است که ترک در وسط فضای خالی بین دو مستطیل بارگذاری قرار دارد و کمترین مقادیر کرنش مربوط به حالتی است که ترک در مرکز چرخ قرار دارد. در نتیجه، در تحلیلهای مربوط به بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی، ترک در مرکز فاصله بین دو چرخ قرار گرفت.

همچنین، به منظور بررسی دقت مدلسازی در تعیین پاسخ ها، پاسخ های به دست آمده از مدلسازی المان محدود برای روسازی ترک نخورده با نتایج تحلیل با استفاده از نرم افزار Kenlayer مقایسه گردیدند. در این تحلیل، مقدار تغییر شکل سطح رویه، کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی و کرنش عمودی بر روی بستر مربوط به نقطه تقارن زوج چرخ تحت بار ۴۱۰۰۰ نیوتن و فشار باد ۵۵۰kPa مقایسه گردیدند. جدول ۵ نتایج را به طور مقایسه ای نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، نتایج مربوط به کرنش عمودی بر روی بستر و تغییر شکل رویه خیلی به هم نزدیک بوده ولی مقدار تفاوت در نتایج مربوط به کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی مشاهده می گردد. این تفاوت ها مربوط به تفاوت در نحوه مدلسازی بار در دو روش و نحوه مش بندی در روش المان محدود است. با این حال، با توجه به نزدیکی نتایج تحلیل با نتایج تحقیقات قبلی [Sun and Duan, 2013]، روش تحلیل بکار رفته در این تحقیق معتبر در نظر گرفته می شود. تحلیل هایی انجام گرفت که در آن بار به صورت استاتیکی و دایره ای در نظر گرفته شدند و نتایج به نتایج تحلیل الاستیک چند لایه ای با نرم افزار Kenlayer نزدیک تر گردید، اما، اختلاف با نتایج تحقیقات سان و دوان [2013] بیشتر می گردید.

#### ۴. نتایج تحلیل ها و بحث

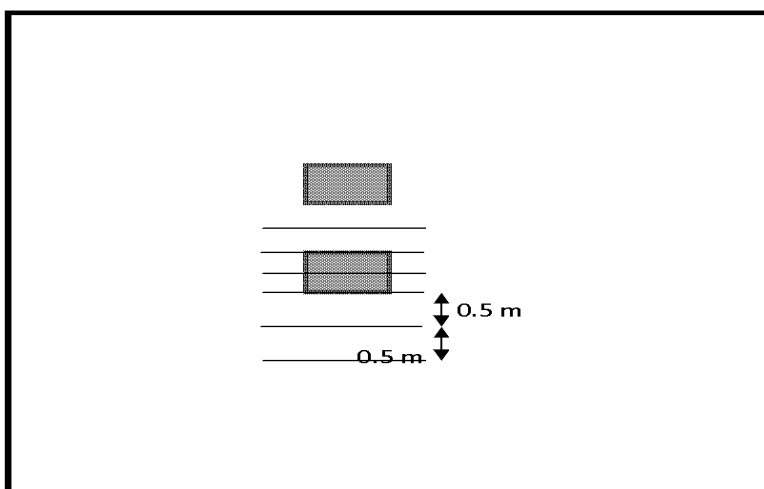
۴-۱ نتایج بررسی تاثیر محل ترک بر روی پاسخ روسازی برای بدست آوردن حالتی که در آن پاسخ روسازی بحرانی تر از حالات دیگر است، ۶ مدل مختلف با محلهای مختلف ترک نسبت



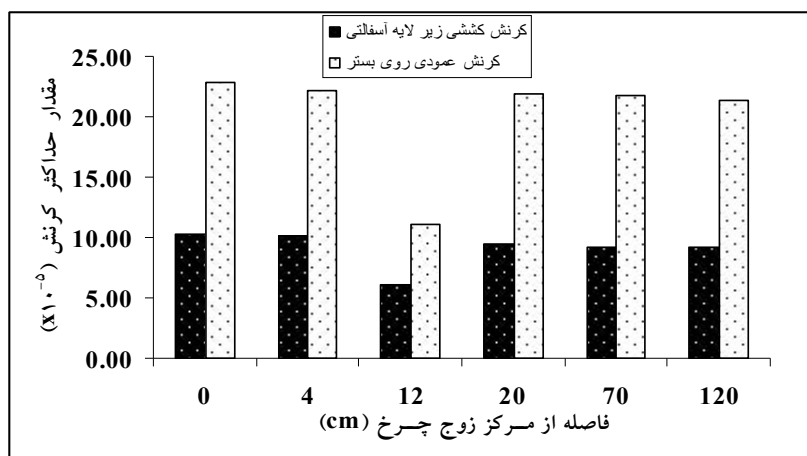
بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزاء محدود

جدول ۵. مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و روش تحلیل الاستیک خطی با Kenlayer

روش تحلیل			نوع پاسخ
Kenlayer	کرنش کششی زیر لایه آسفالتی	کرنش عمودی روی بستر	تغییر شکل عمودی بستر (cm)
	$4/936 \times 10^{-5}$	$2/32 \times 10^{-4}$	۰/۰۴۱۴۹
ABAQUS	$8/596 \times 10^{-5}$	$2/1 \times 10^{-4}$	۰/۰۳۶۲



شکل ۵. محل ترک نسبت به محل بار



شکل ۶. تاثیر موقعیت ترک نسبت به محل بار بر روی کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و کرنش فشاری روی بستر در روسازی ترک خورده

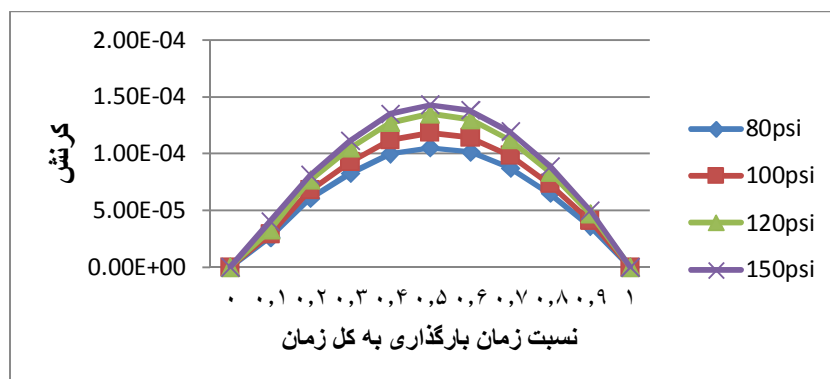
#### ۴-۲ نتایج بررسی تاثیر فشار باد لاستیک

به منظور بررسی تاثیر فشار باد لاستیک بر روی پاسخ روسازی ترک خورده و ترک نخورده، برای هر کدام، چهار مدل با در نظر گرفتن محور ساده با چرخهای زوج، وزن ۸/۲ تن و فشار باد لاستیک ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ و ۱۵۰ psi ساخته شد. در این مدلها سرعت بار ۸۰ km/h در نظر گرفته شد. بعد از تحلیل مدلها، مقدار پاسخ های مورد نظر مربوط به زمان اعمال حداکثر در تحلیل ها مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۷، برای نمونه، کرنش کششی حداکثر در لایه آسفالتی در روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین را در فشارهای مختلف لاستیک با زمان بارگذاری نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، با افزایش فشار باد لاستیک کرنش کششی زیر لایه آسفالتی افزایش می یابد و حداکثر مقدار کرنش کششی زیر لایه آسفالتی زمانی اتفاق می افتد که مقدار بار وارده به مستطیل بار به حداکثر مقدار خود می رسد، یعنی زمانی که  $\sin(\frac{\pi t}{T})$  برابر یک می شود ( $\frac{t}{T}=0.5$ ). همچنین، شکل ۸ به عنوان نمونه کانتور تغییر شکل رویه آسفالتی را در لحظه اعمال حداکثر بار با وزن محور ۸/۲ تن و فشار باد لاستیک ۸۰ psi به روسازی نشان می دهد.

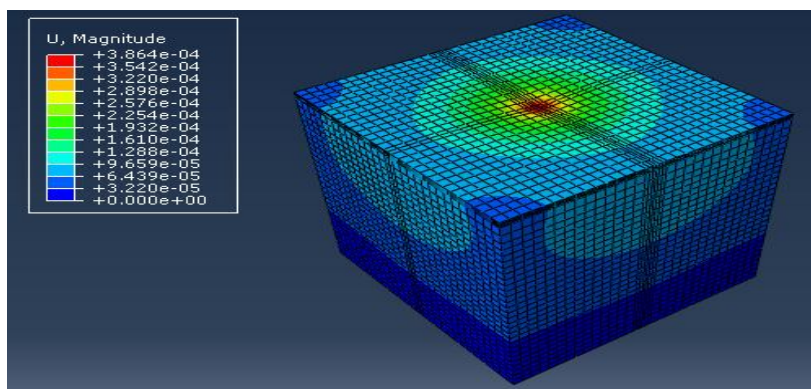
شکل ۹ کرنش کششی حداکثر در زیر لایه آسفالتی را در سه نوع روسازی بدون ترک، روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین و روسازی با ترکهای پایین به بالا در زمان اعمال حداکثر بار به

روسازی نشان می دهد. نتایج نشان داد که حداکثر کرنش های کششی در زیر لایه آسفالتی مربوط به مرکز تقارن زوج چرخ بوده که در جهت طولی هستند. به طور کلی، کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در هر سه نوع روسازی با افزایش فشار باد لاستیک افزایش می یابد. در تمامی فشارها، بیشترین مقدار کرنش مربوط به مدلهای با ترک های بالا به پایین و کمترین مقدار آن مربوط به روسازی بدون ترک است. همانگونه که در شکل نیز مشخص است شیب نمودار مربوط به کرنش کششی زیر لایه رویه در مدلهای با ترک بالا به پایین بیشتر از شیب نمودار مربوط به مدل های با ترک پایین به بالا و مدلهای بدون ترک است. این موضوع حاکی از آن است که، در روسازی با ترکهای بالا به پایین، با افزایش فشار باد لاستیک، مقدار کرنش زیر لایه رویه با شدت بیشتری افزایش می یابد، و در نتیجه، با ارتباطی که بین عمر خستگی روسازی با کرنش کششی زیر لایه آسفالتی وجود دارد، عمر روسازی با شدت بیشتری کاهش می یابد. همچنین، با توجه به شکل ۹ مشخص است که در فشار باد لاستیک ۸۰ psi کرنش کششی زیر آسفالت در روسازی ترک خورده حدود ۱۳ درصد بیشتر از کرنش کششی زیر لایه آسفالتی روسازی بدون ترک است. ولی، با افزایش فشار باد لاستیک این اختلاف بیشتر شده و در فشار باد ۱۵۰ psi این اختلاف در حدود ۳۲ درصد است. همچنین، کرنش کششی زیر آسفالت در روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین به طور متوسط حدود ۱۸ درصد بیشتر از کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در روسازی ترک خورده با ترکهای پایین به بالا است، که نشان دهنده اهمیت و بحرانی بودن ترکهای بالا به پایین نسبت به ترکهای پایین به بالا است.

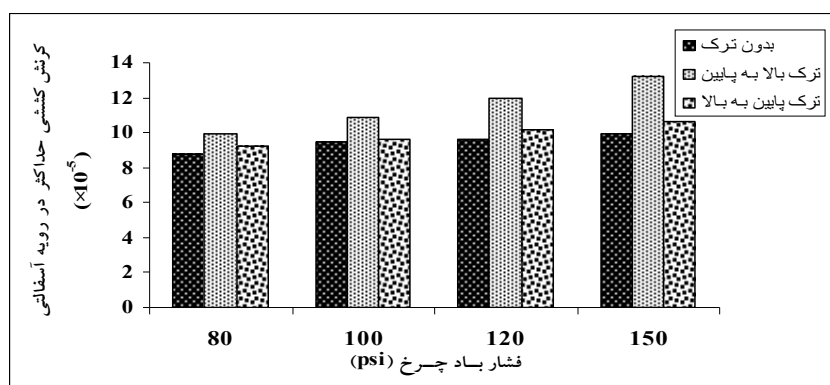
بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزاء محدود



شکل ۷. تاثیر فشار باد لاستیک بر روی کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در روسازی ترک خورده (ترک بالا به پایین)



شکل ۸. کانتور تغییر شکل رویه آسفالتی در لحظه اعمال حداکثر بار در روسازی با ترکهای بالا به پایین و فشار باد لاستیک ۸۰psi



شکل ۹. مقایسه تاثیر فشار باد لاستیک بر روی کرنش کششی زیر آسفالت در سه نوع روسازی

شکل ۱۰ تغییرات کرنش فشاری روی بستر را در سه نوع روسازی بدون ترک، روسازی با ترکهای بالا به پایین و روسازی با ترکهای پایین به بالا، در فشارهای باد لاستیک مختلف نشان می دهد. مشابه نتایج کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی، بیشترین کرنش فشاری بر روی بستر نیز مربوط به نقطه تقارن زوج چرخ است. همانگونه که ملاحظه می گردد، در هر سه نوع روسازی، به طور کلی، با افزایش فشار باد لاستیک کرنش فشاری روی بستر با افزایش فشار باد لاستیک کمتر از مقدار افزایش کرنش کششی در لایه آسفالتی است، که نشان دهنده بحرانی بودن افزایش فشار باد لاستیک در خستگی رویه آسفالتی است. در مدل‌های با ترک پایین به بالا، برخلاف کرنش کششی زیر لایه آسفالتی، کرنش فشاری روی بستر دارای بیشترین مقدار بوده و از نظر کاهش عمر شیار شدگی روسازی دارای اهمیت است. کمترین مقادیر کرنش فشاری روی بستر نیز مطابق انتظار مربوط به روسازی بدون ترک است. همچنین، با توجه به نمودار مشخص می شود که شیب منحنی در روسازی با ترکهای پایین به بالا بیشتر از روسازی با ترکهای بالا به پایین و روسازی بدون ترک است. یعنی، در روسازی با ترک پایین به بالا، با افزایش فشار باد لاستیک کرنش فشاری روی بستر با سرعت بیشتری نسبت به دو نوع روسازی دیگر افزایش می یابد. با بررسی مقادیر کرنش فشاری روی بستر مشخص می شود که کرنش فشاری روی بستر در روسازی با ترکهای پایین به بالا به طور متوسط ۳ درصد بیشتر از مقدار کرنش فشاری روی بستر در روسازی با ترکهای بالا به پایین است. همچنین، به طور کلی، می توان گفت مقدار کرنش فشاری روی بستر در روسازی های ترک خورده در حدود ۴ تا ۶ درصد بیشتر از روسازی های بدون ترک است. نکته قابل توجه در این نتایج کاهش مقدار کرنش فشاری بر روی بستر با افزایش فشار از ۸۰ به ۱۰۰ psi در روسازی های فاقد ترک و با ترک پایین به بالا است. این نتایج دور از واقعیت به نظر می رسد، اما، علیرغم تکرار تحلیل ها نتایج یکسانی به دست آمدند. دلیلی برای این موضوع یافت نشد و به نظر می رسد به تحقیق و بررسی بیشتری نیاز دارد.

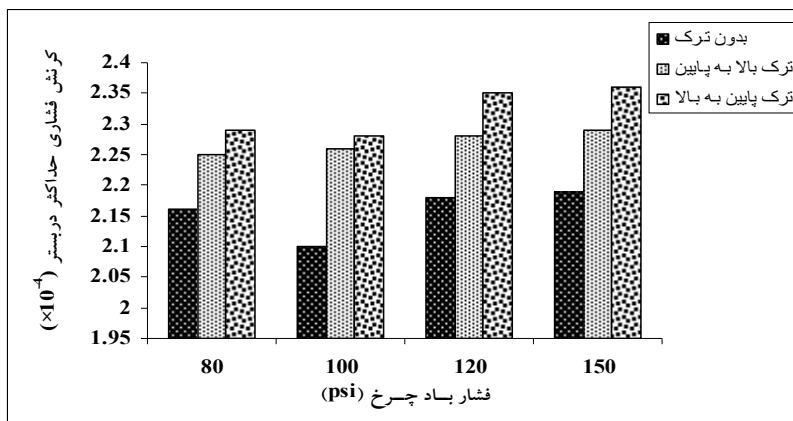
شکل ۱۱ تغییرات تغییر شکل حداکثر رویه را که در مرکز تقارن زوج چرخ رخ می دهد را با فشار باد لاستیک در سه نوع روسازی با ترک های بالا به پایین، روسازی با ترکهای پایین به بالا و روسازی بدون ترک نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، مقدار تغییر شکل رویه با افزایش فشار باد لاستیک افزایش می یابد. اما، در تمام حالات، در فشار باد ۱۰۰ psi کمترین مقدار تغییر شکل حاصل می شود. همانگونه که قبلا نیز ذکر گردید، این نتایج دور از واقعیت به نظر می رسدند و بنابراین، تحلیل ها تکرار گردیدند. اما، علیرغم تکرار تحلیل ها، این روند همواره مشاهده گردید که دلیلی برای آن یافت نشده و نیازمند بررسی بیشتر است. همچنین، با توجه به شکل ۱۱ می توان گفت اختلاف زیادی بین مقادیر تغییر شکل در دو نوع روسازی با ترکهای بالا به پایین و روسازی با ترکهای پایین به بالا وجود ندارد. بیشترین مقدار تغییر شکل مربوط به روسازی با ترکهای پایین به بالا و کمترین آن مربوط به روسازی بدون ترک است. مقایسه مقادیر تغییر شکل نشان می دهد وجود ترک در روسازی موجب افزایش تغییر شکل رویه در حدود دو درصد می شود. همچنین، نتایج نشان دهنده این است که نرخ افزایش تغییر شکل رویه با افزایش فشار باد لاستیک برای دو حالت ترک خورده بیش از روسازی بدون ترک است.

شکلهای ۱۲ و ۱۳، به ترتیب، نشان دهنده تغییرات ضریب شدت تنش در دو مد I (مد بازشوندگی) و مد II (مد برشی) با فشار باد لاستیک برای دو نوع روسازی ترک خورده هستند. با توجه به نمودارها مشخص می شود که با افزایش فشار باد لاستیک مقدار ضریب شدت تنش در هر دو مد افزایش می یابد و این به آن معنی است که افزایش فشار باد لاستیک پتانسیل ترک خوردگی و رشد ترک در روسازی را افزایش می دهد. همچنین، همانند نتایج تحقیقاتی که در گذشته بر روی ضریب شدت تنش در اطراف ترک انجام شده است، نشان داده می شود که مد I (مد بازشوندگی) بحرانی تر از مد II است [Sun and Duan, 2013; Moghaddasnejad, 2008; Xinjun and Marasteanu, 2010; Dave et.al., 2007]. حداکثر مقدار ضریب شدت تنش در هر دو مد در لحظه ای که حداکثر مقدار

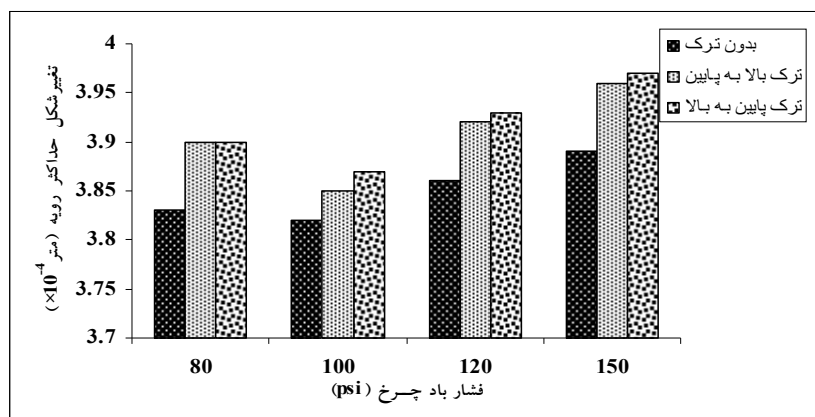
بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزاء محدود

نشان می دهد پتانسیل رشد ترک در روسازی با ترکهای بالا به پایین بیشتر از روسازی با ترکهای پایین به بالا است. با اینحال، در مد II ترکهای پایین به بالا بحرانی تر از ترکهای بالا به پایین است.

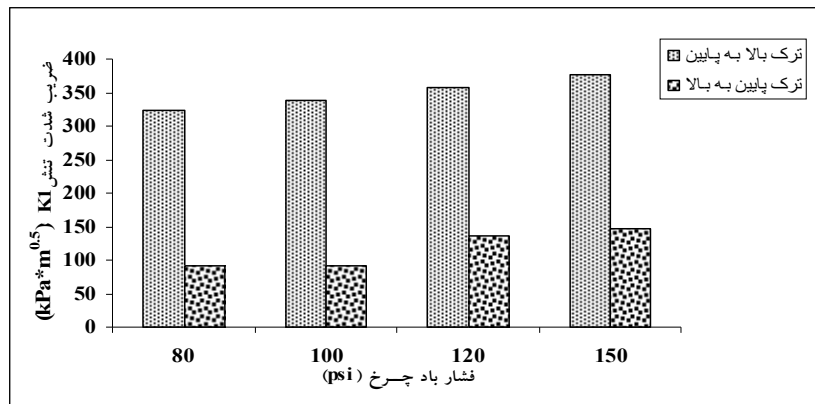
بار به روسازی وارد می شود رخ می دهد، که این موضوع در نتایج تحقیقات قبلی نیز مشاهده شده است [Sun and Duan, 2013]. همچنین، با توجه به نمودارها مشخص است که ضریب شدت تنش مد اول در ترکهای بالا به پایین در حدود ۲/۶ برابر ضریب شدت تنش در روسازی با ترک پایین به بالا است، که



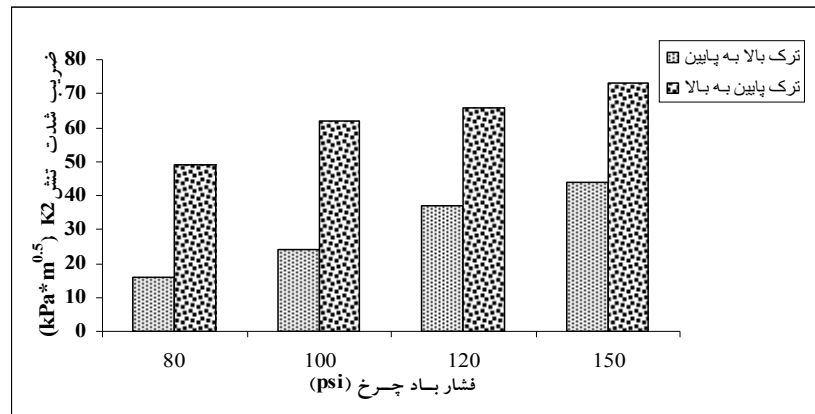
شکل ۱۰. مقایسه تاثیر فشار باد لاستیک بر روی کرنش فشاری روی بستر در سه نوع روسازی



شکل ۱۱. تاثیر فشار باد لاستیک بر روی تغییر شکل رویه در سه نوع روسازی



شکل ۱۲. تاثیر فشار باد لاستیک بر روی ضریب شدت تنش (مد I) (ترک بالا به پایین)



شکل ۱۳. تاثیر فشار باد لاستیک بر روی ضریب شدت تنش (مد II) (ترک بالا به پایین)

$$J = (K_I^2 + K_{II}^2)(1 - \nu^2) / E \quad (6)$$

که در آن  $E$  مدول یانگ و  $\nu$  نسبت پواسون است. برای بدست آوردن تعداد تکرار بار برای رشد ترک از قانون پاریس که در رابطه ۷ ارائه شده است استفاده گردید [Paris and Erdoga, 1963]

$$dc / dN = A(\Delta K)^n \quad (7)$$

که در آن  $A$  و  $n$  پارامترهای مصالح هستند. مقدار این پارامترها از نتایج آزمایشات انجام شده توسط اداره حمل و نقل ایالت فلوریدا [Research Center of Florida Transportation Department, 2002] جدول ۶ نتایج حاصل از

به منظور بررسی تاثیر ضرایب شدت تنش بر روی عمر باقیمانده روسازی از نظر تعداد بار قابل تحمل روسازی تا زمانی که یک ترک موجود رشد کرده و از یک عمق مشخص تا عمق مشخصی برسد، مدل‌هایی با عمق ترک ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴/۹ سانتیمتر ساخته و ضرایب شدت تنش در دو مد تاثیر گذار یعنی مد بازشوندگی و مد برشی  $K_{II}$  مورد بررسی قرار گرفت و مقدار  $K$  معادل با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه گردیدند. [Anderson, 2005]. در این تحلیل‌ها از محور استاندارد و با فشار باد ۵۵۰ kPa استفاده گردید.

$$K = \sqrt{JE} \quad (5)$$

## بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزاء محدود

مدلهایی به منظور بررسی تاثیر وزن محور ساده با چرخ تکی بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین و روسازی با ترکهای پایین به بالا و مقایسه آن با روسازی بدون ترک ساخته شد. وزن مجاز محور از این نوع در ایران ۸ تن است. در این تحقیق، به منظور بررسی اثر تخریبی افزایش وزن محور ساده بر روی روسازی، وزن محورهای ۵، ۷/۲ و ۱۵ تن مورد استفاده و بررسی قرار گرفته اند. فشار باد لاستیک در تمامی مدلها ۱۰۰ psi و سرعت حرکت وسیله نقلیه ۸۰ کیلومتر در ساعت لحاظ شد.

محاسبات مربوط به تعداد بار قابل تحمل روسازی برای انتشار ترک را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که تعداد بار مورد نیاز برای رشد ترک از یک عمق مشخص به عمق مشخص دیگر در روسازی با ترکهای پایین به بالا از تعداد تکرار بار در روسازی با ترکهای بالا به پایین بیشتر است. یعنی ترک های بالا به پایین با سرعت بیشتری نسبت به ترکهای پایین به بالا رشد می کند که این به دلیل بزرگی شدت تنش و اختلاف زیاد در مقادیر شدت تنش در دو روسازی با دو عمق ترک مختلف است.

### ۳-۴ نتایج بررسی تاثیر وزن محور ساده

جدول ۶. تعداد تکرار بار برای رشد ترک

نوع مقطع روسازی	تغییر عمق ترک (سانتیمتر)	تعداد محور استاندارد ۸/۲ تنی
مقطع با ترک بالا به پایین	۱۰ تا ۱۱	۲۱۴۷۳
	۱۱ تا ۱۲	۱۹۶۴۷
	۱۲ تا ۱۳	۱۵۵۶۴
	۱۳ تا ۱۴	۱۲۶۲۹
	۱۴ تا ۱۴/۹	۱۱۸۶۳
مقطع روسازی با ترک پایین به بالا	۱۰ تا ۱۱	۶۷۴۳۴
	۱۱ تا ۱۲	۵۰۶۵۲
	۱۲ تا ۱۳	۴۱۸۱۴
	۱۳ تا ۱۴	۲۳۴۶۷
	۱۴ تا ۱۴/۹	۱۱۷۶۷

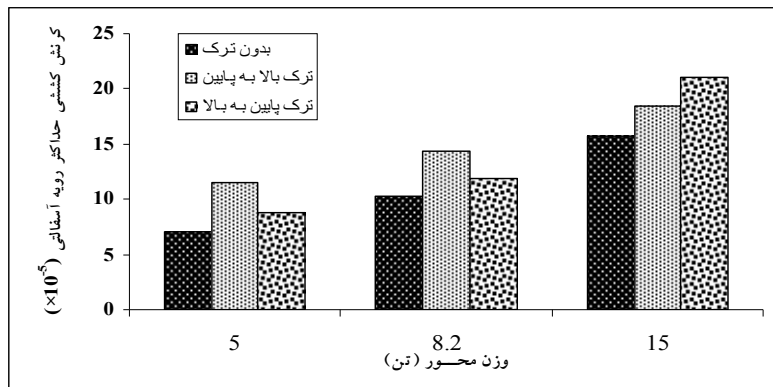
زوج چرخ بوده و جهت آن در امتداد طولی است. به طور کلی، کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در هر سه نوع روسازی با افزایش وزن محور افزایش می یابد و بیشترین مقدار کرنش مربوط به مدل های با ترک های بالا به پایین و کمترین مقدار آن مربوط به روسازی بدون ترک است. با توجه به شکل ۱۴ مشخص است که کرنش کششی زیر آسفالت در روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین حدود ۳۵ درصد بیشتر از کرنش کششی زیر لایه آسفالتی روسازی بدون ترک است. همچنین، کرنش کششی حداکثر در زیر لایه آسفالتی در روسازی ترک خورده با ترکهای

بعد از تحلیل مدل ها با نرم افزار ABAQUS مقادیر حداکثر مربوط به کرنش کششی در رویه آسفالتی، کرنش عمودی بر روی بستر، تغییر شکل رویه، ضریب شدت تنش در دو مدل I و II تعیین شده و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند.

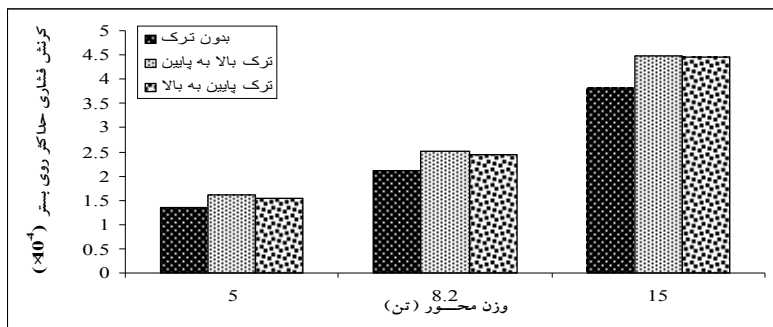
شکل ۱۴ تغییرات کرنش کششی حداکثر در زیر لایه آسفالتی در سه نوع روسازی بدون ترک، روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین و روسازی با ترکهای پایین به بالا را در زمان اعمال حداکثر بار به روسازی نشان می دهد. در این حالات نیز بالاترین کرنش های کششی در زیر لایه آسفالتی مربوط به مرکز تقارن

روی بستر در موقعیت مرکز تقارن زوج چرخ رخ می‌دهد. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌گردد، در هر سه نوع روسازی، با افزایش وزن محور، کرنش فشاری روی بستر افزایش می‌یابد. همچنین، همانگونه که ملاحظه می‌گردد، تفاوت زیادی بین مقادیر کرنش فشاری روی بستر در روسازی با ترکهای بالا به پایین و روسازی با ترکهای پایین به بالا وجود ندارد و مقادیر کرنش فشاری روی بستر در روسازی با ترک بالا به پایین به مقدار جزیی بیشتر از مقادیر کرنش فشاری مربوط به روسازی با ترکهای پایین به بالا است. همچنین روند تغییرات نمودار هر سه نوع روسازی تقریباً مشابه بوده و مقادیر کرنش فشاری روی بستر در روسازیهای ترک خورده تقریباً ۱۷ درصد بیشتر از کرنش فشاری روی بستر روسازی بدون ترک است.

پایین به بالا به طور متوسط حدود ۲۵ درصد بیشتر از حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در روسازی بدون ترک است. این نشان دهنده اهمیت و بحرانی تر بودن ترکهای بالا به پایین نسبت به ترکهای پایین به بالا است. همچنین، همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در روسازی های ترک خورده، نرخ افزایش کرنش کششی با افزایش وزن محور ثابت نبوده، و با افزایش در مقدار وزن، این نرخ افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان دهنده این است که حساسیت پاسخ ها به افزایش وزن محور در روسازی های ترک خورده بیش از روسازی بدون ترک است. شکل ۱۵ تغییرات کرنش فشاری عمودی حداکثر روی بستر را بر حسب وزن محور در سه نوع روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین، ترک خورده با ترکهای پایین به بالا و روسازی بدون ترک نشان می‌دهد. مشاهده گردید که بیشترین کرنش های عمودی بر



شکل ۱۴. تاثیر وزن محور بر روی کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در سه نوع روسازی



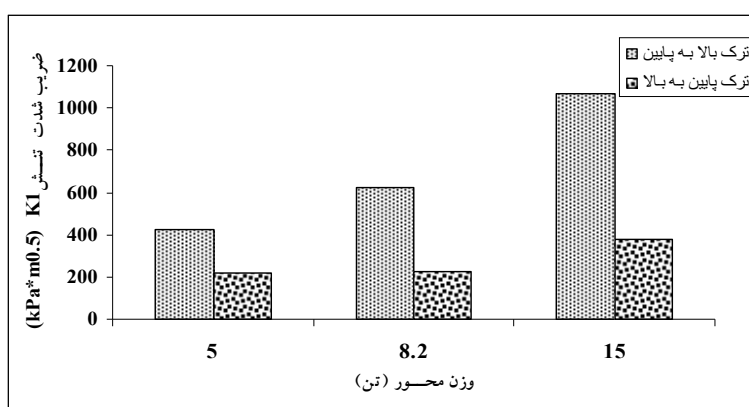
شکل ۱۵. تاثیر وزن محور بر روی کرنش فشاری روی بستر در سه نوع روسازی



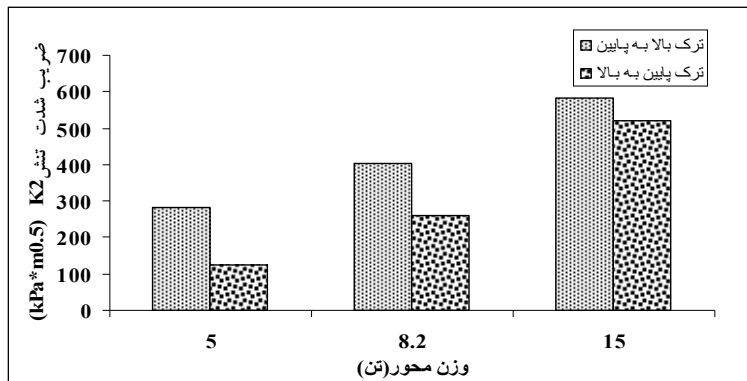
با مقایسه نسبت به درصدهای افزایش کرنش فشاری بستر با افزایش فشار باد لاستیک، مشخص می‌گردد که این پاسخ به وزن محورها حساسیت بیشتری دارد تا فشار باد لاستیک‌ها. شکل ۱۶ تغییرات تغییر شکل سطح روسازی را در سه نوع روسازی مدل شده شامل روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین، ترک خورده با ترکهای پایین به بالا و روسازی بدون ترک نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، افزایش وزن محور در هر سه نوع روسازی موجب افزایش مقدار تغییر شکل رویه می‌شود و بیشترین مقدار تغییر شکل مربوط به روسازی با ترکهای بالا به پایین و کمترین آن مربوط به روسازی بدون ترک است. در واقع، وجود ترک در روسازی موجب افزایش تغییر شکل می‌شود و می‌توان گفت مقدار تغییر شکل رویه آسفالتی در روسازی با ترکهای بالا به پایین در حدود ۱۸ درصد بیشتر از روسازی با ترکهای پایین به بالا و حدود ۵۰ درصد بیشتر از روسازی بدون ترک است. این موضوع میزان تاثیر وجود ترک بر روی تغییر شکل رویه و به دنبال آن عمر شیار شدگی روسازی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۷ و ۱۸، به ترتیب، تغییرات ضریب شدت تنش در مد I و II بر حسب وزن محور برای دو نوع روسازی ترک خورده با ترکهای بالا به پایین و روسازی ترک خورده با ترکهای پایین به بالا نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در مد I (مد

بازشوندگی) شیب نمودار ضریب شدت تنش در روسازی با ترکهای بالا به پایین تقریباً ۴ برابر شیب نمودار روسازی با ترکهای پایین به بالا است یعنی با افزایش وزن محور مقدار ضریب شدت تنش در روسازی با ترکهای بالا به پایین با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد. همچنین، به طور متوسط، در وزن محور ۸/۲ ton، ضریب شدت تنش مد I در روسازی با ترک بالا به پایین تقریباً ۲/۸ برابر ضریب شدت تنش در روسازی با ترکهای پایین به بالا است، که نشان می‌دهد پتانسیل رشد در ترکهای بالا به پایین بسیار بیشتر از ترکهای پایین به بالا است. همانگونه که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، بر خلاف ضریب شدت تنش مد اول، شیب تغییرات ضریب شدت تنش مد دوم نسبت به افزایش وزن محور در روسازی با ترکهای پایین به بالا بیشتر از روسازی با ترکهای بالا به پایین است. اما، به طور کلی، مقدار ضریب شدت تنش مد دوم در روسازی با ترکهای بالا به پایین بیشتر از روسازی با ترکهای پایین به بالا است. به طوری که در وزن محور ۸/۲ ton ضریب شدت تنش مد دوم در روسازی با ترکهای بالا به پایین تقریباً ۱/۵ برابر ضریب شدت تنش در روسازی با ترکهای پایین به بالا است که این موضوع نیز حکایت از پتانسیل بالای رشد ترک در مد دوم در روسازی با ترکهای بالا به پایین نسبت به روسازی با ترکهای پایین به بالا دارد.



شکل ۱۷. تاثیر وزن محور بر روی ضریب شدت تنش (مد I) در دو نوع روسازی



شکل ۱۸. تاثیر وزن محور بر روی ضریب شدت تنش (مد II) در دو نوع روسازی

می‌یابد و مقادیر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در روسازی با ترکهای بالا به بالا به پایین بزرگتر از روسازی با ترکهای پایین به بالا است.

• نرخ افزایش کرنش کششی با افزایش فشار باد لاستیک در روسازی با ترکهای بالا به پایین بیش از روسازی با ترکهای پایین به بالا و روسازی بدون ترک است.

• مقدار کرنش فشاری عمودی بر روی بستر و نرخ افزایش آن با افزایش فشار باد لاستیک، در روسازی با ترکهای پایین به بالا بیشتر از روسازی های ترک نخورده و با ترکهای بالا به پایین است.

• مقدار ضریب شدت تنش در مد بازشوندگی در همه حالتها بیش از مد برشی بوده و مقدار آن برای روسازی با ترکهای بالا به پایین بیش از آن در روسازی با ترکهای پایین به بالا است.

• در حالت مد برشی، ضریب شدت تنش در روسازی با ترکهای پایین به بالا بیش از ضریب شدت تنش در روسازی با ترکهای بالا به پایین است.

• با افزایش وزن محور ساده منفرد با چرخ تکی حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و کرنش قائم روی بستر و همچنین تغییر شکل رویه افزایش می‌یابد و بطور کلی مقادیر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و کرنش فشاری روی بستر در روسازی با ترکهای بالا به پایین بزرگتر از روسازی با ترکهای پایین به بالا است.

• به طور کلی ضریب شدت تنش با افزایش وزن محور و افزایش

همچنین، با توجه به مقادیر ضریب شدت تنش در دو مد I (مد بازشوندگی) و مد II (مد برشی) مشخص می‌شود که مد I (مد بازشوندگی) مد بحرانی بوده و حداکثر مقدار آن در لحظه ای که حداکثر مقدار بار به روسازی وارد می‌شود رخ می‌دهد که این موضوع مطابق یافته های قبلی است [Fakhri et.al. 2010].

## ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق، با استفاده از روش المان محدود و مدلسازی در نرم افزار ABAQUS اثرات تغییرات فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی حداکثر کرنش کششی در رویه آسفالتی، کرنش عمودی بر روی بستر و تغییر شکل رویه روسازی آسفالتی ترک خورده و بدون ترک بررسی گردید. دو نوع ترک طولی ترک بالا به پایین و پایین به بالا با طولی برابر با ۰/۵ متر و عمقی برابر با نصف ضخامت رویه مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین، به منظور بررسی پتانسیل رشد ترکها و حساسیت آنها به مقدار فشار باد لاستیک و وزن محور، ضریب شدت تنش در دو مد باز شوندگی (مد I) و مد برشی (مد II) برای روسازی های ترک خورده با ترکهای بالا به پایین و پایین به بالا مورد بررسی قرار گرفته اند. خلاصه نتایج این تحقیق را می‌توان به شرح زیر ارائه نمود:

• با افزایش فشار باد لاستیک، حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش قائم روی بستر و تغییر شکل رویه افزایش

پایین به بالا هستند.

• این تحقیق برای یک ساختار روسازی با ضخامت های معین لایه ها، جنس و خصوصیات خاص انجام گردیده است. در سایر ساختارها با ابعاد و خصوصیات مختلف لایه ها و بستر باید مورد بررسی قرار گیرد.

فشار باد لاستیک افزایش می یابد و ضریب شدت تنش در ترکهای بالا به پایین تقریبا ۳ برابر ترکهای پایین به بالا است که نشان می دهد پتانسیل رشد در ترکهای بالا به پایین بسیار بیشتر از ترکهای پایین به بالا است.

• نتایج این تحقیق نشان دهنده این است که ترکهای بالا به پایین در عملکرد روسازی و گسترش خرابی بحرانی تر از ترک های

## ۶. مراجع

-Hui, L., Hong-ping Z., Yu M. and Chuan-yao, C. (2010) "Simulation of top-down crack propagation in asphalt pavements", Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering) vol. 3, pp.52-63.

-Huang, Y. (2004) "Pavement analysis and design", Prentice Hall, New York, USA.

-Liao, G. and Huang, X. (2008) "Application of ABAQUS finite element software in road engineering", Southeast University Press, Nanjing.

-Muhammad N. S. and Bodhinayake, B. C. (2003) "Non-Linear finite element analysis of flexible pavements", Advances in Engineering Software 34, pp. 657-662.

-Paris, P. and Erdogan, F. (1963) "A critical analysis of crack propagation laws", Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, December, pp. 528-53

-Rahman M. T. , Mahmud K. and Ahsan S. (2011) "Stress strain characteristics of flexible pavement using Finite Element Analysis" International Journal of Civil and Structural Engineering, Volume 2, No 1, pp. 352-364.

- Seong, H. S., Glaucio, H. P. and William, G. B. (2006) "Simulation of crack propagation in asphalt concrete using an intrinsic cohesive zone model", Journal of Engineering Mechanics © ASCE / November 2006.

-Sun, L. and Duan, Y. (2013) "Dynamic response of top-down cracked asphalt concrete pavement under a half-sinusoidal impact load" , Springer-Verlag Wien vol. 2, pp.16-25.

-Abdel-Motaleb, M.E., (2007) "Impact of high-pressure truck tires on pavement design in Egypt", Emirates Journal for Engineering Research, Vol. 12, No. 2, pp. 65-73.

-Anderson, B. (2005) "Fracture mechanics: fundamentals and applications", CRC, London, UK.

-Beena Sukumaran, B. (2004) "Three dimensional finite element modeling of flexible pavement", FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference Atlantic City, New Jersey, USA

- Chen, H. H., Marshek, K. M. and Saraf, C. L. (1990) "Effects of truck tire contact pressure distribution on the design of flexible pavements: a three dimensional finite element approach", Transportation Research Record, No. 1095, pp.7278

-Dave, E. V., Song, S. H., Buttlar, W. G. and Paulino, G. H. (2007) "Reflective and thermal cracking modeling of asphalt concrete overlays" Proc., Advance Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, pp. 1241-1252.

-Fan, Z. (2011) "Load and temperature on the asphalt pavement top-down cracking of finite element analysis". Ph.d Thesis, Changsha University of Science and Technology, China.

Florida Department of Transportation. Research Center (2002) "Implementation of SHRP indirect tension tester to mitigate cracking in asphalt pavements and overlays", Reynaldo Roque.

- Zheng, C. and Xie, S. (2003). "Effects of the tire-pavement contact pressure on asphalt pavement". Proceedings of the eastern asia society for transportation studies, (4), 401-407.

م. و فرخی، م. (۱۳۸۹)، "بررسی نحوه گسترش ترک - فخری، های بالا به پایین در روسازی های آسفالتی با فرضیه مکانیک شکست"، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، پاییز ۱۳۸۹.  
- مقدس نژاد، ف. (۱۳۸۶)، "کاربرد ژئوستتیکها در روسازی آسفالتی جهت کنترل ترکهای انعکاسی"، پژوهشکده حمل و نقل، وزارت راه و شهرسازی.

-Sun, L. and Hudson, W.R. (2005) "Probabilistic approaches for pavement fatigue cracking prediction based on cumulative damage using Miner's law" J. Eng. Mech. ASCE 131, 546-549.

-Xinjun, L. and Marasteanu, M. (2010) "The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature" Engineering Fracture Mechanics, vol. 77, no. 7, pp. 1175-1190.

-Yanjing, Z., Fujian, N. and Lan, Z. (2011) "Viscoelastic response of reflective cracking under dynamic vehicle loading in asphalt concrete pavements", ASCE, (5), pp.1021-1033.