

بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک با تحلیل ویسکوالاستیک به روش المانهای محدود

با استفاده از نرم افزار ABAQUS

حسن طاهرخانی، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

امیرجواد مرادلو، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

مسعود جلالی جیرندهی (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

E-mail: masoud.jalali@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۰۴ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۴

چکیده

افزایش فشار باد چرخ کامیون‌ها عاملی است که بر فرآیند برهم‌کنش بین چرخ و روسازی تاثیرگذار خواهد بود. این پدیده موجب کاهش سطح تماس بین چرخ و روسازی شده و می‌تواند خرابی‌هایی را در روسازی‌های آسفالتی ایجاد کند. یکی از روش‌های تقویت روسازی‌های آسفالتی در برابر این خرابی‌ها، استفاده از ژئوسنتتیک است. در این تحقیق سعی شده است تا به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدلی سه بعدی از روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران ساخته شود و تاثیر افزایش فشار باد چرخ بر این روسازی، در حالت مسلح شده و غیرمسلح، مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. در مدلسازی روسازی، رفتار ویسکوالاستیک برای رویه آسفالتی لحاظ گردیده و با استفاده از مشخصات بتن آسفالتی مورد استفاده در روسازی‌های ایران، روشی برای تعیین ثابت‌های پرونی مورد نیاز در تحلیل ویسکوالاستیک ارائه گردیده است. سه نوع ژئوسنتتیک با مدول الاستیسیته مختلف در سه محل متفاوت (زیر لایه آسفالتی، زیر لایه اساس و زیر لایه زیراساس) استفاده شده و تاثیر سه فشار باد چرخ ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ کیلوپاسکال بر حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل از این تحقیق، افزایش فشار باد چرخ عمدتاً بر کرنش‌های کششی زیر لایه آسفالتی اثرگذار است و تاثیر چندانی بر کرنش‌های فشاری روی بستر ندارد. علاوه بر این، مشخص شد که موقعیت بهینه ژئوسنتتیک برای کاهش حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر، به ترتیب، زیر لایه آسفالتی و روی لایه بستر است. همچنین، نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات فشار باد چرخ بر عملکرد ژئوسنتتیک‌ها تاثیری ندارد.

واژه‌های کلیدی: روسازی آسفالتی، فشار باد چرخ، ژئوسنتتیک، ویسکوالاستیک، المان محدود

۱. مقدمه

راه‌ها کمک می‌کند. بنابراین، استفاده از روش المان محدود^۱ می‌تواند به‌عنوان روشی دقیق و مناسب برای انجام این‌گونه تحقیقات پیشنهاد شود.

در این مطالعه، به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار ABAQUS، مدلی سه بعدی از روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران ساخته خواهد شد و تاثیر سه فشار باد چرخ مختلف (شامل ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ کیلوپاسکال) بر این روسازی، در حالت مسلح شده (با ژئوستتیک) و غیرمسلح، مورد بررسی و مقایسه قرار خواهد گرفت. علاوه بر این، تاثیر انواع ژئوستتیک با مدول الاستیسیته مختلف در سه موقعیت متفاوت (زیر لایه آسفالتی، زیر لایه اساس و زیر لایه زیراساس) بر عملکرد روسازی بررسی شده است.

۲. مروری بر مطالعات انجام شده

یکی از عوامل بسیار تاثیرگذار بر فرآیند برهم‌کنش بین چرخ و روسازی، فشار باد چرخ است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، طی سال‌های اخیر فشار باد چرخ کامیون‌ها افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین پیامدهای افزایش فشار باد چرخ، کاهش سطح تماس بین چرخ و روسازی است به طوری که با افزایش ۵۰ درصدی فشار باد چرخ، سطح تماس بین چرخ و روسازی بین ۸ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. براساس مطالعات انجام شده در کشور ایرلند، با افزایش فشار باد چرخ از ۳۵۰ به ۷۵۰ کیلوپاسکال، سطح تماس بین چرخ و روسازی برای چرخ‌های محور راهنما^۲ ۳۵/۲ درصد و برای چرخ‌های زوج ۲۲/۴ درصد، کاهش می‌یابد. همچنین، برای چرخ‌های عریض^۳ رایج در اروپا، نتایج مشابهی گزارش شده است. این پدیده (کاهش سطح تماس بین چرخ و روسازی) می‌تواند منجر به افزایش تنش تماسی بین چرخ و روسازی شده و خرابی‌های روسازی آسفالتی را افزایش دهد [Wang, 2005].

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که پاسخ‌های روسازی به نحوه توزیع تنش تماسی (یکنواخت یا غیریکنواخت) و ترکیبی از بار و فشار باد چرخ وابسته است. به عبارت دیگر، بسته به اینکه، توزیع فشار تماسی به صورت یکنواخت یا غیر یکنواخت در نظر گرفته شود، پاسخ‌های روسازی متفاوت خواهد بود. براساس مقایسه صورت گرفته، بین توزیع فشار یکنواخت دایره-ای و توزیع فشار غیریکنواخت (براساس آج لاستیک)، مشخص

از آنجایی که، کامیون‌ها سنگین‌ترین بارها را به سطح روسازی وارد می‌کنند، به عنوان اصلی‌ترین گروه از کاربران شبکه راه‌ها شناخته می‌شوند [Chatti et al. 2004]. خسارت‌های ناشی از کامیون‌ها، به عوامل متفاوتی همچون بار محور، آرایش محور^۱، نوع چرخ^۲، فشار باد چرخ^۳، سرعت کامیون و نوع سیستم تعلیق^۴ مرتبط می‌شود [Al-Qadi et al. 2005]. در سال‌های اخیر با هدف افزایش بهره‌وری، تغییراتی در مشخصات محورهای وسایل نقلیه سنگین ایجاد شده است که افزایش فشار باد چرخ کامیون‌ها از جمله این تغییرات است. این پدیده بر فرآیند برهم‌کنش بین چرخ و روسازی تاثیر گذاشته و موجب کاهش سطح تماس بین چرخ و روسازی می‌شود و می‌تواند خرابی‌هایی را در روسازی‌های آسفالتی ایجاد کند [Wang, 2005].

ایران به عنوان کشوری در حال توسعه و دارای موقعیت راهبردی و ترانزیتی بسیار مناسب قطعاً تحت تاثیر تحولات ایجاد شده در فشار باد چرخ کامیون‌ها قرار خواهد گرفت و با توجه به اینکه، بخش قابل توجهی از راه‌های ارتباطی کشور دارای رویه آسفالتی هستند، این تحولات موجب می‌شود که راه‌های کشور عمدتاً با مشکل کاهش عمر مواجه شوند. یکی از روش‌های تقویت روسازی‌های آسفالتی در برابر این خرابی‌ها، استفاده از ژئوستتیک^۵ است.

ژئوستتیک‌ها صفحات نازک و انعطاف پذیری هستند که می‌توانند به‌عنوان المان‌های مسلح کننده در بخش‌های مختلف روسازی بکار روند و تا حد زیادی در افزایش طول عمر روسازی موثر باشند. البته، نوع، ویژگی و محل قرارگیری ژئوستتیک از جمله عواملی هستند که بر عملکرد آن تاثیر خواهند گذاشت [Pożarycki and Garbowski, 2013]. بنابراین، بررسی اثرات ناشی از تغییرات ایجاد شده در فشار باد چرخ وسایل نقلیه سنگین بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی و چگونگی استفاده از ژئوستتیک به‌عنوان راهکاری در جهت کاهش اثرات منفی این تحولات، از مسائلی هستند که در این زمینه مطرح شده و نیاز به مطالعه و بررسی دارند. البته باید به این نکته توجه داشت که انجام چنین مطالعاتی به روش‌های آزمایشگاهی و میدانی، علیرغم دقت بالایی که دارند، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است. از طرفی، مدلسازی رفتار و عملکرد بتن آسفالتی، درک مکانیزم خرابی‌های روسازی را راحت‌تر نموده و به طراحی اقتصادی‌تر و مقاوم‌تر

بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...

که شیارشدگی مد اصلی خرابی است، مقدار ضریب بار هم‌ارز محوری نسبت به تغییرات فشار باد چرخ حساسیت چندانی ندارد [Abdel-Motaleb, 2007].

با کاهش فشار باد چرخ خودروها می‌توان از خرابی‌های روسازی جلوگیری نمود، اما از سوی دیگر کاهش فشار باد چرخ موجب افزایش مصرف سوخت در خودروها شده و هزینه‌ها را افزایش خواهد داد [Shafabakhsh and Talebsafa, 2014]. بنابراین ارائه راهکاری مناسب در این زمینه می‌تواند از خرابی‌های زودرس روسازی‌ها جلوگیری کرده و موجب کاهش هزینه‌ها شود.

یکی از راهکارهایی که می‌تواند جهت کاهش اثرات منفی افزایش فشار باد چرخ بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد، استفاده از ژئوستتیک در لایه‌های روسازی است. ژئوستتیک‌ها صفحاتی نازک و انعطاف‌پذیر از جنس مواد پلیمری هستند که می‌توانند جهت تقویت روسازی و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر خستگی و شیارشدگی، مورد استفاده قرار گیرند. البته میزان اثرگذاری ژئوستتیک بر پاسخ‌های روسازی، به عواملی همچون نوع (مثل مشخصات مصالح)، ویژگی (مثل هندسه و ابعاد چشمه‌ها) و موقعیت آن در لایه‌های روسازی بستگی دارد. به همین خاطر، تاثیر این پارامترها بر عمر خستگی و شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی، همواره مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [Ferrotti et al. 2012].

به دلیل تاثیر موقعیت ژئوستتیک بر پاسخ‌های روسازی، مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. نتایج تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد، تاثیر تغییر محل ژئوستتیک بر پاسخ‌های روسازی، به کیفیت و ضخامت لایه‌ها و همچنین، نوع پاسخ‌های روسازی، مرتبط است [Saad et al. 2006, Al-Qadi et al. 2008, 2011].

القادی^۱ و همکاران، مطالعاتی را در خصوص چگونگی به حداکثر رساندن مزایای استفاده از ژئوستتیک و افزایش بازدهی آن در روسازی‌ها، انجام داده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق آزمایشی که در آن ضخامت لایه آسفالتی و اساس متغیر در نظر گرفته شده بود، مشخص شد که ضخامت لایه‌های روسازی بر عملکرد آن بسیار تاثیرگذار است. البته، ژئوستتیک می‌تواند در کاهش خرابی روسازی بسیار موثر باشد، به شرط آنکه، در موقعیت بهینه قرار داده شود. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مکان بهینه ژئوستتیک در روسازی‌های با اساس

شده است که، فرض توزیع یکنواخت دایره‌ای بار، محافظه‌کارانه است [Xie and Zheng, 2003]. همچنین، براساس نتایج مطالعات صورت گرفته، اختلاف بین پاسخ‌های محاسبه شده با توزیع یکنواخت و غیریکنواخت تنش‌های تماسی، در محدوده بین ۶ تا ۳۰ درصد خواهد بود. البته، باید به این نکته اشاره شود که تاثیر نحوه توزیع تنش تماسی، عمدتاً بر پاسخ‌های نزدیک به سطح لایه آسفالتی خواهد بود و با افزایش عمق تاثیر آن کاهش می‌یابد به طوری که در توزیع غیریکنواخت تنش، بسته به میزان بار مورد آزمایش، کرنش کششی زیر لایه آسفالتی تا ۳ درصد و کرنش فشاری روی بستر تا ۷ درصد بیشتر از حالتی است که توزیع تنش‌ها به صورت یکنواخت فرض می‌شود. علاوه بر این، نتایج این مطالعات نشان می‌دهند که کرنش کششی عرضی نسبت به کرنش کششی طولی، حساسیت بیشتری به نحوه توزیع تنش‌ها از خود نشان می‌دهد. [Al-Qadi and Wang, 2011, Wang and Al-Qadi, 2009].

براساس مطالعات تحلیلی صورت گرفته، تغییرات فشار باد چرخ ارتباط مشخصی را با کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و تنش‌های ایجاد شده در نزدیکی سطح روسازی (هم در روسازی‌های ضخیم و هم در روسازی‌های نازک) نشان می‌دهد، به طوری که با افزایش فشار باد چرخ، خرابی خستگی لایه آسفالتی افزایش می‌یابد. اما تاثیر تغییرات فشار باد چرخ بر کرنش قائم سطح بستر (به خصوص در روسازی‌های ضخیم) ناچیز است. به عبارت دیگر، تغییرات فشار باد چرخ و نحوه توزیع تنش‌های تماسی، روی پاسخ‌های لایه آسفالتی تاثیر چشمگیر و قابل توجهی دارد، درحالی که پاسخ‌های بخش‌های زیرین روسازی، بیشتر متأثر از مقدار بار محور وسایل نقلیه و مساحت سطح تماس بین چرخ و روسازی خواهد بود [Shafabakhsh and Talebsafa, 2014, Al-Qadi and Wang, 2011, Abdel-Motaleb, 2007].

عبدالمطلب^۹ تحقیقاتی را در جهت بررسی تاثیر فشار باد چرخ روی ضریب بار هم‌ارز محوری انجام داده است. بر پایه نتایج حاصل از این تحقیقات مشخص شده است که میزان اثرگذاری فشار باد چرخ روی عملکرد روسازی‌های آسفالتی، به مقدار بار محور وسایل نقلیه بستگی دارد. به این معنی که، در بارهای کم و متوسط، هنگامی که خستگی مد اصلی خرابی محسوب می‌شود، تغییرات فشار باد چرخ به طور قابل ملاحظه‌ای موجب تغییر در ضریب بار هم‌ارز محوری می‌شود. اما در بارهای سنگین

بیشترین کاهش در حداکثر کرنش فشاری روی بستر ایجاد شود [Saad et al. 2006].

مدول الاستیسیته ژئوسنتتیک، عامل مهم دیگری محسوب می-شود که بر نحوه عملکرد آن تاثیرگذار است، به طوری که با افزایش مدول الاستیسیته ژئوسنتتیک، تاثیر آن در بهبود عملکرد روسازی، بیشتر می شود. [Nazzal et al. 2010, Kwon et al. 2008, Abu-Farsakh et al. 2013]. البته مطالعات صورت گرفته در این زمینه نشان می دهد، ژئوسنتتیک های با مدول الاستیسیته رایج (در محدوده بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ مگاپاسکال براساس آزمایش مقاومت کششی ژئوگرید -ASTM D 6637 01) تاثیر بسیار اندکی را در بهبود عملکرد روسازی از خود نشان می دهند [Kwon et al. 2008].

ابوفرسخ^{۱۲} و همکاران مطالعاتی را به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام دادند. آن ها در مطالعاتشان از یک مدل دو بعدی استفاده کردند که در آن رفتار لایه آسفالتی به صورت ارتجاعی و خمیری کامل^{۱۳} و رفتار لایه اساس به صورت الاستوپلاستیک^{۱۴} مدل سازی شد. همچنین، رفتار خاک بستر به صورت Cam Clay در نرم افزار مدل شد و رفتار ژئوسنتتیک، الاستیک خطی فرض شد. در این تحقیق، سه نوع ژئوسنتتیک با مدول الاستیسیته مختلف در بین لایه اساس و بستر قرار گرفتند و در نهایت نتایج حاصل از روسازی های مسلح و غیرمسلح، با هم مقایسه شد که نشان می داد، افزایش مدول الاستیسیته ژئوسنتتیک به صورت چشمگیری عمر شیارشدگی روسازی آسفالتی را افزایش می دهد. البته، با افزایش ضخامت لایه اساس و افزایش مقاومت بستر، تاثیر تغییرات مدول الاستیسیته بر پاسخ های روسازی، کاهش می یابد. [Abu-Farsakh et al. 2013].

۳. روش تحقیق

در این تحقیق رفتار لایه آسفالتی به صورت ویسکوالاستیک و رفتار سایر لایه ها و ژئوسنتتیک ها به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. با توجه به این موضوع، روش المان محدود به عنوان یک روش مناسب، دقیق و اقتصادی، برای تحلیل روسازی های آسفالتی انتخاب شده است. در این روش، مشخصات مصالح، نوع تحلیل، نحوه بارگذاری، شرایط مرزی، برهم کنش بین لایه های روسازی و تعداد و ابعاد المان ها از جمله پارامترهایی هستند که

نازک، بین لایه اساس و بستر، است درحالی که، در روسازی های با اساس ضخیم، توصیه می شود از دو ژئوسنتتیک (یکی در ارتفاع $\frac{1}{3}$ از بالای لایه اساس و دیگری بین لایه اساس و بستر) استفاده شود [Al-Qadi et al. 2008].

همچنین در تحقیقی مشابه توسط القادی و همکاران که با هدف تعیین مکان بهینه ژئوسنتتیک در لایه اساس انجام شد، مشخص شد که در روسازی های با اساس ضخیم، قرار دادن ژئوسنتتیک در ارتفاع $\frac{1}{3}$ از بالای لایه اساس، کرنش های برشی در جهت طولی و عرضی را کاهش خواهد داد. علاوه بر این، براساس نتایج به دست آمده، در روسازی های ضعیف، قرار دادن ژئوسنتتیک بین لایه اساس و بستر منجر به کاهش تغییرشکل های قائم خواهد شد [Al-Qadi et al. 2011].

مطالعاتی توسط سعد^{۱۱} و همکاران انجام شده است که در آن به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار ADINA، تاثیر موقعیت ژئوسنتتیک بر پاسخ های شش نوع روسازی مختلف (که در آن ها کیفیت لایه های اساس و بستر و همچنین ضخامت لایه اساس متغیر فرض شده است) بررسی شده است و در آن تاثیر ژئوسنتتیک در سه مکان مختلف (شامل زیر لایه آسفالتی، زیر لایه اساس و در ارتفاع $\frac{1}{3}$ از کف لایه اساس) بر حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که بیشترین کاهش در حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی، زمانی ایجاد می شود که ژئوسنتتیک بین لایه آسفالتی و لایه اساس قرار داده شود درحالی که، تعیین موقعیت بهینه ژئوسنتتیک برای کاهش حداکثر کرنش فشاری روی بستر، به کیفیت و ضخامت لایه های روسازی بستگی دارد، به طوری که، کمترین کرنش فشاری روی بستر در روسازی دارای اساس با کیفیت پایین، زمانی اتفاق می افتد که ژئوسنتتیک در زیر لایه آسفالتی قرار گیرد. اما، در روسازی هایی که لایه اساس آن ها دارای کیفیت مناسبی است، بهترین محل ژئوسنتتیک برای کاهش حداکثر کرنش فشاری روی بستر، بین لایه اساس و بستر خواهد بود. همچنین، در روسازی های با لایه اساس نازک، قرارگیری ژئوسنتتیک در ارتفاع $\frac{1}{3}$ از کف لایه اساس سبب می شود تا

بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستنتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...

این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روابط تئوری و بدون انجام آزمایش، پارامترهای لازم، محاسبه و تعیین شوند در این تحقیق، از معادله ویتزاک (به دلیل همخوانی با نتایج واقعی حاصل از آزمایش تعیین مدول دینامیکی) برای پیش‌بینی مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است این معادله در رابطه (۱) آورده شده است [Witczak and Bari, 2004].

که در این رابطه، $|E^*|$ مدول دینامیکی لایه آسفالتی برحسب 10^5 psi، f فرکانس بارگذاری برحسب هرتز، η ویسکوزیته قیر برحسب 10^6 Poise، V_a درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، V_{beff} درصد حجمی قیر موثر، p_{34} درصد تجمعی مصالح مانده روی الک ۱۹ میلی‌متر، p_{38} درصد تجمعی مصالح مانده روی الک ۹/۵ میلی‌متر، p_4 درصد تجمعی مصالح مانده روی الک ۴/۷۶ میلی‌متر و p_{200} درصد مصالح عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر است.

در این تحقیق از مشخصات قیر ۷۰-۶۰ استفاده شده است. همچنین، دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی مورد مطالعه در این تحقیق، براساس استانداردهای موجود در نشریه شماره ۲۳۴ تعیین شده است. این دانه‌بندی که بیشترین کاربرد را براساس استانداردهای موجود در ایران دارد، در جدول ۱ آورده شده است.

مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در ۵ دما (شامل ۱۰-، ۴/۴، ۲۱/۱، ۳۷/۸ و ۵۴/۴ درجه سانتی‌گراد) و ۶ فرکانس مختلف (شامل ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰، ۲۵ هرتز) به روش ویتزاک محاسبه گردید، که نتایج حاصل از آن در نمودار شکل ۱ قابل مشاهده است.

همان‌طور که در این نمودار مشخص است، افزایش دما باعث کاهش مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در یک دمای ثابت، با افزایش فرکانس بارگذاری، مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد.

با استفاده از نمودار شکل ۱ می‌توان مدول الاستیسیته لحظه‌ای مخلوط آسفالتی را در دمای مورد نظر تعیین نمود. مدول مخلوط آسفالتی در یک دمای مشخص و در فرکانس بارگذاری بالا، به‌عنوان مدول الاستیسیته لحظه‌ای آن در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق، مقدار مدول الاستیسیته لحظه‌ای مخلوط آسفالتی در دمای مرجع (که در این تحقیق ۲۱/۱ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است) برابر با ۱۰۶۹۳ مگاپاسکال تعیین شد.

تأثیر بسیار زیادی بر نتایج دارند. بنابراین، این پارامترها باید به گونه‌ای تعریف شوند تا بتوانند رفتار واقعی روسازی آسفالتی را توصیف کنند. نرم‌افزار ABAQUS از ابزارهایی است که می‌تواند مبتنی بر روش المان‌های محدود و با در نظر گرفتن همه پارامترهای تعیین‌کننده، رفتار روسازی‌های آسفالتی را شبیه‌سازی نماید.

۳-۱ مشخصات مصالح

روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران از چهار لایه رویه آسفالتی، اساس، زیراساس سنگدانه‌ای، و بستر، که از خاک طبیعی مترکم است، تشکیل شده‌اند که مصالح مورد استفاده در هر کدام از این لایه‌ها خصوصیات رفتاری مخصوص به خود را دارند. در دماهای پایین و بارگذاری سریع، فرض رفتار الاستیک خطی مخلوط‌های آسفالتی، منطقی بوده و به صورت عمومی پذیرفته شده است. اما، نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده آن است که فرض رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی، نزدیکی بیشتری با واقعیت داشته و آسفالت در بیشتر شرایط دمایی و بارگذاری که در معرض آن قرار می‌گیرد، رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهد [Kavussi and Babazadeh, 2008, Taherkhani and Solatian, 2011]. همچنین، از آنجایی که تحت بارهای عبوری از روی روسازی، در لایه‌های اساس، زیراساس و بستر تغییرشکل‌های بزرگ (در محدوده پلاستیک) رخ نمی‌دهد، فرض رفتار الاستیک خطی برای این لایه‌ها واقع بینانه به نظر می‌رسد [Keymanesh et al. 2014]. در نرم‌افزار ABAQUS، خصوصیات الاستیک مصالح با استفاده از مدول الاستیسیته و نسبت پواسون تعریف می‌شود و خصوصیات ویسکوالاستیک مصالح را می‌توان به کمک سری پرونی^{۱۵} تعریف نمود.

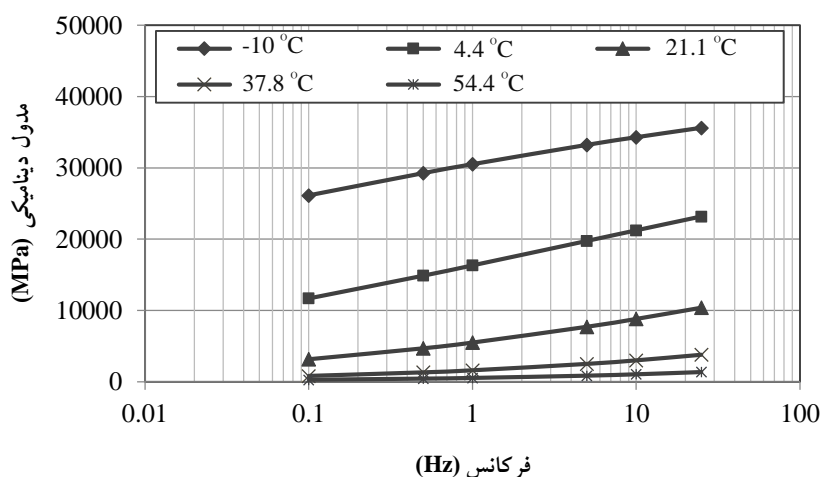
۳-۱-۱ لایه آسفالتی

برای تعریف مشخصات لایه آسفالتی در نرم‌افزار ABAQUS، نیاز است تا ثابت‌های پرونی، مدول الاستیسیته لحظه‌ای^{۱۶} و نسبت پواسون مخلوط آسفالتی مشخص شود. از طرفی، تعیین این پارامترها از طریق آزمایش، علاوه بر پرهزینه بودن و زمان‌بر بودن، نیاز به تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی دارد. بنابراین، در

$$\log|E^*| = -1.249937 + 0.02923\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34}}{1 + e^{-0.603313 - 0.393532 \log(\eta) - 0.313351 \log(f)}} \quad (1)$$

جدول ۱. مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی [Iran Highway Asphalt Paving Code, 2011]

محدوده مجاز (براساس نشریه شماره ۲۳۴)	درصد عبوری از هر الک	اندازه الک
۱۰۰	۱۰۰	۱۹ میلی‌متر
۹۰ - ۱۰۰	۹۵	۱۲/۵ میلی‌متر
۴۴ - ۷۴	۶۳	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۲۸ - ۵۸	۳۹	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۵ - ۲۱	۹	۰/۳ میلی‌متر (شماره ۵۰)
۲ - ۱۰	۵	۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)



شکل ۱. مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در دما و فرکانس‌های بارگذاری مختلف

با داشتن مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در دماها و فرکانس‌های مورد نظر، می‌توان فرکانس‌های تبدیل‌شده^{۱۷} را در دمای مرجع (۲۱/۱) درجه سانتی‌گراد، جهت ترسیم منحنی مرجع^{۱۸} مدول دینامیکی، محاسبه نمود. برای این منظور (محاسبه فرکانس‌های تبدیل‌شده در دمای مرجع)، معادله ویتزاک را می‌توان به شکل رابطه (۲) بازنویسی کرده و مورد استفاده قرار داد. این رابطه در زیر آورده شده است [Witczak and Bari, 2004]. همچنین، منحنی مرجع مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در نمودار شکل ۲ نمایش داده شده است. در روابط بالا، f_r فرکانس تبدیل‌شده برحسب هرتر است و η_{Tr} ویسکوزیته قیر در دمای مرجع برحسب 10^6 Poise است. سایر پارامترها مشابه با رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f_r)}} \quad (2)$$

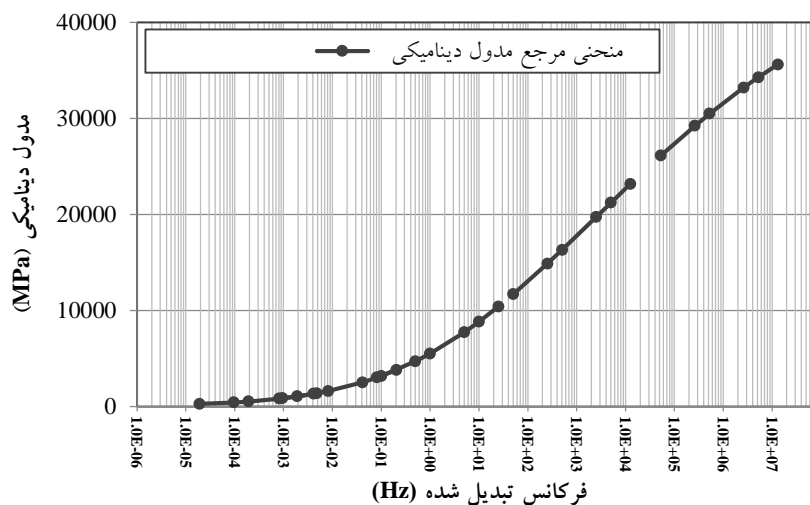
$$\delta = -1.249937 + 0.02923\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \quad (2-الف)$$

$$\alpha = 3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34} \quad (2-ب)$$

$$\beta = -0.603313 - 0.393532 \log(\eta_{Tr}) \quad (2-پ)$$

$$\gamma = -0.313351 \quad (2-ت)$$

بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...



شکل ۲. منحنی مرجع مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در دمای مرجع (۲۱/۱ درجه سانتی‌گراد)

- محاسبه مدول ذخیره^{۲۱} مخلوط آسفالتی براساس مدول دینامیکی و زاویه فاز آن با استفاده از رابطه (۴) که در زیر آورده شده است [Liao, 2007].

$$E'(f) = |E^*| \cdot \cos(\varphi) \quad (۴)$$

که در این رابطه، $E'(f)$ مدول ذخیره مخلوط آسفالتی بوده و همان‌طور که مشخص است تابعی از فرکانس بارگذاری است. همچنین، $|E^*|$ نشان دهنده مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی است و پارامتر φ زاویه فاز مخلوط آسفالتی را برحسب درجه بیان می‌کند.

- پس از تعیین مدول ذخیره، باید تابع تنظیم^{۲۲} را تعیین شود. برای این منظور از رابطه (۵) استفاده می‌شود. [Liao, 2007]

$$\lambda' = \Gamma(1-n) \cdot \cos(n\pi/2) \quad (۵)$$

$$n = \left(\frac{d \log(E'(f))}{d \log(f)} \right) \quad (\text{الف.۵})$$

در روابط بالا، λ' تابع تنظیم و $\Gamma(1-n)$ تابع گاما می‌باشند. سایر پارامترها در بخش‌های قبلی شرح داده شده‌اند. لازم به توضیح است که برای محاسبه مقدار n ، لازم است تا مقادیر مدول ذخیره در فرکانس‌های مورد نظر تعیین و منحنی مرجع آن ترسیم شود. سپس، بایستی تابع زیگموید^{۲۳} را به منحنی مرجع مدول ذخیره انطباق داده و ضرایب رگرسیونی آن را مشخص نمود. برای این کار (تعیین ضرایب رگرسیونی تابع زیگموید)، از دستور Solver در نرم‌افزار Excel 2010 استفاده شده است. در شکل ۳ منحنی مرجع مدول ذخیره و تابع زیگموید مربوط به آن نشان داده شده است. پس از مشتق‌گیری از تابع زیگموید به دست آمده نسبت

برای محاسبه زاویه فاز مخلوط آسفالتی، از رابطه (۳) استفاده شده است. این رابطه، یک معادله تقریبی است که می‌توان با استفاده از آن زاویه فاز مخلوط آسفالتی را در فرکانس‌های تبدیل‌شده و در دمای مرجع محاسبه نمود [Yang and You, 2014].

$$\varphi(f_r) = c \frac{\pi}{2} \frac{a\gamma}{(1+e^{\beta-\gamma \log(f_r)})^2} e^{(\beta-\gamma \log(f_r))} \quad (۳)$$

که در این رابطه، $\varphi(f_r)$ زاویه فاز مخلوط آسفالتی برحسب رادیان است و همان‌طور که مشاهده می‌شود تابعی از فرکانس تبدیل‌شده است. همچنین، پارامتر c به‌عنوان ضریب اصلاحی در نظر گرفته شده است که با استناد به مطالعات انجام شده در گذشته و دقت قابل قبول گزارش شده، مقدار آن برابر با ۱ فرض می‌شود [Yang and You, 2014]. سایر پارامترهای موجود در این رابطه مشابه با رابطه (۲) تعریف می‌شود.

برای محاسبه ثابت‌های پرونی نیاز است تا ابتدا مدول استراحت^{۱۹} مخلوط آسفالتی تعیین شود. مدول استراحت، رفتار مخلوط آسفالتی را تحت کرنش ثابت بیان می‌کند و تابعی از زمان بارگذاری است [Liao, 2007]. بنابراین، با استفاده از این مفهوم (مدول استراحت) می‌توان وابستگی زمانی پاسخ‌های مخلوط آسفالتی را بیان نمود. در این تحقیق برای تبدیل مدول دینامیکی به مدول استراحت، از روش تقریبی پیشنهاد شده توسط اسکاپری و پارک^{۲۰} استفاده خواهد شد. برای این منظور مطابق با مراحل زیر عمل می‌شود:

از طی مراحل ذکر شده و محاسبه مدول استراحت مخلوط آسفالتی از طریق رابطه (۶)، نتایج حاصل، به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. همان طور که در جدول ۲ مشخص است، با افزایش مدت زمان بارگذاری، مدول استراحت مخلوط آسفالتی کاهش خواهد یافت که این موضوع بیانگر رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی است و وابستگی زمانی آن را به خوبی نشان می دهد. لازم به ذکر است که زمان های ارائه شده در جدول ۲ معادل فرکانس های تبدیل شده بوده و با استفاده از رابطه (۶.الف) قابل محاسبه است.

سری پرونی یک سری نمایی است که رابطه تنش- کرنش

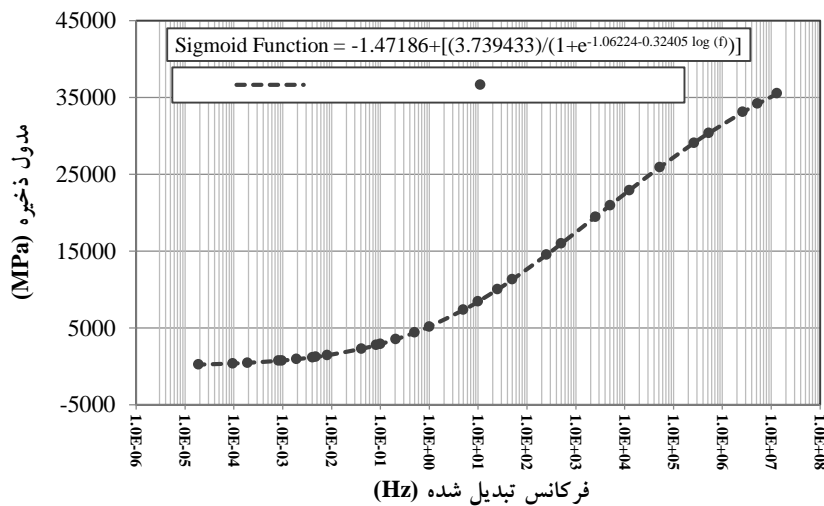
به فرکانس، می توان مقادیر n را در فرکانس های مختلف (فرکانس های تبدیل شده) تعیین نمود.

• در نهایت مدول استراحت مخلوط آسفالتی به صورت تابعی از زمان و با استفاده از رابطه (۶) که در زیر آورده شده است، محاسبه خواهد شد [Liao, 2007].

$$E(t) = E'(f) / \lambda' \quad (6)$$

$$t = 1/f \quad (6.الف)$$

در روابطه بالا، $E(t)$ مدول استراحت مخلوط آسفالتی است و همان طور که نشان داده شده است، تابعی از زمان بارگذاری است. همچنین، رابطه بین زمان و فرکانس بارگذاری به صورت معادله (۶.الف) تعریف می شود. پس



شکل ۳. منحنی مرجع مدول ذخیره و تابع مربوط به آن

جدول ۲. مدول استراحت مخلوط آسفالتی در زمان های مختلف

t (s)	E' (MPa)	t (s)	E' (MPa)	t (s)	E' (Mpa)
$7/61 \times 10^{-8}$	35627/18	$3/98 \times 10^{-3}$	14908/19	$2/44 \times 10^1$	2528/03
$1/90 \times 10^{-7}$	34300/82	$1/99 \times 10^{-2}$	11726/39	$1/22 \times 10^2$	1617/61
$3/81 \times 10^{-7}$	33228/94	$4/00 \times 10^{-2}$	10440/40	$2/10 \times 10^2$	1382/96
$1/90 \times 10^{-6}$	30516/42	$1/00 \times 10^{-1}$	8864/95	$2/44 \times 10^2$	1323/91
$3/81 \times 10^{-6}$	29256/23	$2/00 \times 10^{-1}$	7765/16	$5/25 \times 10^2$	1057/16
$1/90 \times 10^{-5}$	26141/52	1/00	5544/51	$1/05 \times 10^3$	858/37
$7/95 \times 10^{-5}$	23197/96	2/00	4736/13	$1/22 \times 10^3$	820/53
$1/99 \times 10^{-4}$	21255/75	4/88	3825/15	$5/25 \times 10^3$	527/27
$3/98 \times 10^{-4}$	19773/06	$1/00 \times 10^1$	3194/49	$1/05 \times 10^4$	427/35
$1/99 \times 10^{-3}$	16348/44	$1/22 \times 10^1$	3034/79	$5/25 \times 10^4$	264/07

بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...

این کار، نرم‌افزار ABAQUS 6.11 انتخاب شده است که به کمک آن یک مدل سه بعدی از روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران ساخته شد.

با استناد به مطالعات گذشته، و از آنجایی که، در این تحلیل‌ها، نصف محور کامیون مد نظر قرار گرفته است، طول و عرض همه لایه‌ها در مدل ساخته شده، ۲۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا آثار لبه^{۲۵} در آن به حداقل برسد [Liao, 2007]. همچنین ضخامت لایه‌های روسازی مطابق با جدول ۵ و براساس ضخامت‌های معمول در ایران انتخاب شده است [Ameri et al. 2011].

برای تحلیل مدل ساخته شده از روش تحلیل دینامیکی استفاده شده است که برای این منظور، قید Dynamic Implicit با گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه مورد استفاده قرار گرفت. در این تحلیل، از یک بار مثلی با مدت زمان ۰/۱ ثانیه بارگذاری و ۰/۹ ثانیه استراحت با تعداد ۲۵ تکرار بار استفاده شد. لازم به توضیح است که سطح تماس بین چرخ و روسازی به صورت مستطیلی معادل در نظر گرفته شد.

این مقطع تحت تاثیر بار محور استاندارد با سه فشار باد چرخ مختلف شامل ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفت و پاسخ‌های آن در حالت مسلح شده و غیرمسلح مورد مقایسه قرار گرفت. برای مسلح کردن روسازی، از سه نوع ژئوستتیک مختلف (مطابق با جدول ۴) در سه محل متفاوت (زیر لایه آسفالتی، بین لایه اساس و زیراساس و همچنین روی لایه بستر)، استفاده شد.

در این تحقیق، حرکت افقی لایه‌های روسازی به گونه‌ای محدود شده است که لایه‌های روسازی نمی‌توانند در راستای محورهای X و Y حرکتی داشته باشند. همچنین، فرض می‌شود که در زیر مدل ساخته شده، هیچگونه حرکت افقی (در راستای محور X یا Y) یا قائم (در راستای محور Z) وجود ندارد و برای این منظور، شرایط مرزی زیر لایه بستر به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. همچنین، برهم‌کنش بین لایه‌ها به گونه‌ای فرض می‌شود که تحت بارگذاری و باربرداری، هیچگونه جدا شدگی در راستای قائم (محور Z) بین لایه‌های مختلف روسازی ایجاد نشود. برای این منظور، رفتار قائم لایه‌ها با قید Hard Contact تعریف شده است. در اینجا، براساس تحقیقات گذشته، ضریب اصطکاک بین لایه‌های روسازی، برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است. در مورد برهم‌کنش بین ژئوستتیک و لایه‌های روسازی

را برای یک سیستم ویسکوالاستیک خطی (که به وسیله یک مدل فنر-میراگر نمایش داده می‌شود) بیان می‌کند. شکل کلی معادله سری پرونی توسط رابطه (۷) ارائه شده است [Liao, 2007].

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (7)$$

$$g(t) = \frac{G(t)}{G(t=0)} \quad (7-f)$$

در روابط بالا، $g(t)$ به عنوان نسبت مدول برشی تعریف می‌شود. همچنین، پارامترهای τ_i و g_i ثابت‌های پرونی هستند که وابسته به مشخصات مصالح می‌باشند و پارامتر نشان‌دهنده زمان است و N تعداد جملات سری پرونی را نشان می‌دهد که معمولاً کمترین مقدار آن را 4 در نظر می‌گیرند. البته، مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که یک سری پرونی 5 جمله‌ای می‌تواند نسبت مدول برشی را با دقت مناسبی تقریب بزند [Liao, 2007]. بنابراین در این تحقیق، در جهت اطمینان، یک سری پرونی 6 جمله‌ای انتخاب شده است. همچنین، $G(t)$ مدول برشی در لحظه t و $G(t=0)$ مدول برشی لحظه‌ای^{۲۴} هستند.

لازم به ذکر است که مقدار نسبت پواسون مخلوط آسفالتی مطابق با روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران، برابر با ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است [Ameri et al. 2011]. مشخصات لایه آسفالت و ثابت‌های پرونی به صورت خلاصه در جدول ۳ آورده شده است.

۳-۱-۲ لایه اساس، زیر اساس، بستر و ژئوستتیک‌ها

در این تحقیق، سایر لایه‌های روسازی (شامل لایه‌های اساس، زیراساس و بستر) به صورت همگن و با خصوصیت رفتاری الاستیک خطی مدلسازی شدند. مشخصات لایه‌های اساس، زیراساس و بستر که معمولاً در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرند، در جدول ۴ ارائه شده است [Ameri et al. 2011]. همچنین، سه نوع ژئوستتیک با مدول الاستیسیته مختلف مورد استفاده قرار گرفت و خصوصیت رفتاری آن‌ها نیز، الاستیک خطی فرض شد. مشخصات انواع مختلف ژئوستتیک‌های مورد استفاده، در جدول ۴ آورده شده است.

۳-۲ مدلسازی در نرم‌افزار

پس از تعیین مشخصات مصالح، می‌توان با استفاده از نرم‌افزار به ساخت مدل نهایی با ویژگی‌های مورد نظر پرداخت. برای انجام

استفاده شد. ابعاد نمونه در شکل ۵ و ضخامت لایه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

نمونه مورد آزمایش تحت یک بار دایره‌ای به شعاع ۵ سانتی‌متر و به بزرگی ۵/۵ کیلو نیوتون قرار گرفت. بار وارده به صورت تجمعی و به مدت ۲۰۰۰ ثانیه (شامل ۱۰۰۰ ثانیه بارگذاری و ۱۰۰۰ ثانیه استراحت) به نمونه اعمال شد. در این تحقیق، مدلی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و تحت شرایط مشابه بارگذاری قرار گرفت. در شکل ۶ تصویر مدل ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS جهت اعتبارسنجی، همراه با الگوی مش-بندی آن نشان داده شده است.

پس از ساخت مدل و تحلیل آن، پاسخ‌های مورد نظر، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. برای این منظور، کرنش‌های افقی سطحی آسفالت در اطراف ناحیه بارگذاری، مد نظر قرار گرفت. این کرنش‌ها، که در نمونه آزمایشگاهی به وسیله گیج‌های^{۳۰} نصب شده در نمونه اندازه‌گیری شده، با مقادیر به‌دست آمده از مدل المان محدود مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد که پاسخ‌های حاصل از مدل المان محدود ساخته شده (به‌خصوص در حالت مسلح شده که به عنوان معیار اعتبارسنجی مدنظر قرار گرفته است) سازگاری قابل قبولی با پاسخ‌های آزمایشگاهی دارد. در جدول ۷ نتایج حاصل از مقایسه مدل المان محدود و مدل آزمایشگاهی ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، اختلاف نتایج در حالت مسلح شده ۸ درصد و در حالت غیرمسلح ۱۷ درصد است.

هم باید به این موضوع اشاره شود که، از لغزش بین ژئوسنتتیک و لایه‌های روسازی صرف‌نظر شده است و ژئوسنتتیک‌ها به صورت مدفون در این لایه‌ها مدل شده‌اند و برای این کار، از قید Embedded استفاده شده است [Rota, 2011].

در این تحقیق، ابعاد مش‌ها طوری انتخاب شده است که در نواحی نزدیک بارگذاری (به‌علت دقت بالای مورد نیاز در پاسخ‌ها)، مش‌ها ریزتر بوده و با دور شدن از این ناحیه، ابعاد مش‌ها بزرگ‌تر خواهد شد. به‌طورکلی، از دو نوع المان برای مش‌بندی مدل‌های ساخته شده استفاده شده است. به‌طوری‌که، تمامی المان‌های به‌کار رفته برای لایه‌های مختلف روسازی از نوع C3D8R و المان‌های مورد استفاده برای ژئوسنتتیک‌ها از نوع S4R تعریف شده‌اند. نمونه‌ای از مدل ساخته شده و مش‌بندی در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده، ابتدا مدلی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و پاسخ‌های آن با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. برای این کار، از آزمایشات انجام شده در دانشگاه پارما^{۳۱} استفاده شد و مدل‌سازی، بر مبنای مطالعات صورت گرفته در این زمینه، انجام شد. در این آزمایش، یک نمونه روسازی آسفالتی سه لایه‌ای شامل لایه‌های رویه^{۲۷}، بیندر^{۲۸} و اساس ساخته شد و بر روی یک لایه از جنس نئوپرن^{۲۹} (که رفتار لایه زیراساس را شبیه‌سازی می‌کند) قرار گرفت. همچنین، از یک لایه ژئوسنتتیک در زیر لایه بیندر، جهت تقویت روسازی

جدول ۳. مشخصات مصالح لایه آسفالتی در دمای مرجع (۲۱/۱ درجه سانتی‌گراد)

مشخصات الاستیک		مشخصات الاستیک	
ثابت‌های پرونی		نسبت پواسون	مدول الاستیسیته لحظه‌ای (MPa)
g _i	τ _i		
۰/۴۴۹۰۴۳	۰/۰۰۰۶۰۶	۰/۳۵	۱۰۶۹۳
۰/۲۴۴۵۵۳	۰/۰۰۱۵۱۴		
۰/۱۲۳۹۲۲	۰/۰۷۶۷۹۵		
۰/۰۹۵۵۶۹	۱/۳۳۴۰۶۱		
۰/۰۴۵۹۰۷	۳۶/۳۷۵۵۲		
۰/۰۰۶۲۵۷	۹۸/۰۴۷۹۲		

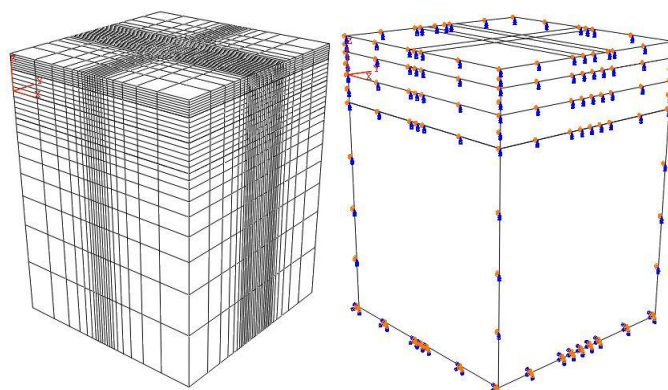
بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...

جدول ۴. مشخصات لایه‌های اساس، زیراساس، بستر و ژئوستتیک‌ها [Nazzal et al. 2010, Kwon et al. 2008, Ameri et al. 2011, Rota, 2011]

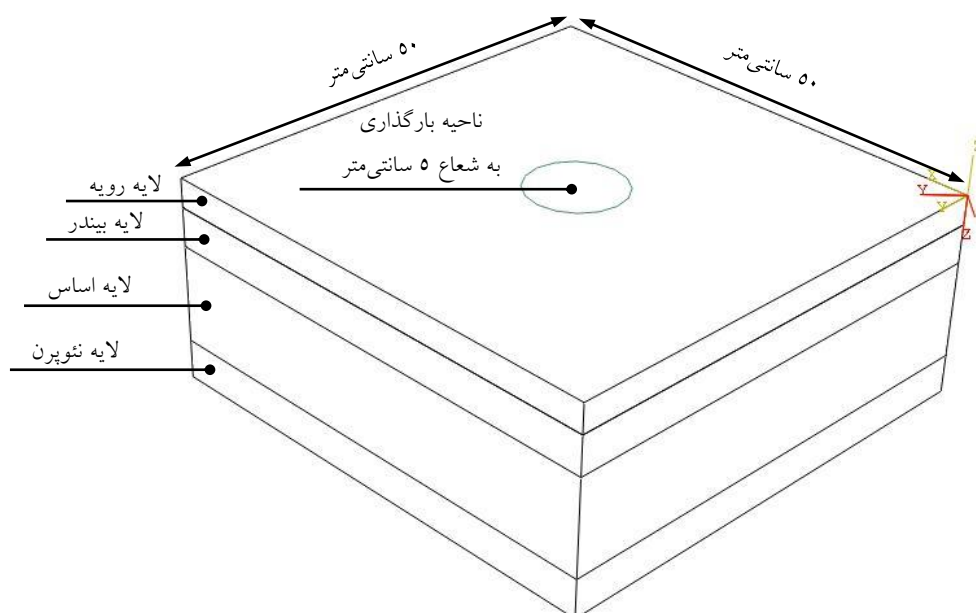
نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)		
۰/۳۵	۲۷۶	اساس	لایه‌های روسازی
۰/۳۵	۱۰۴	زیراساس	
۰/۴۵	۳۴/۵	بستر	
۰/۲۲	۷۶۰۰۰	I	ژئوستتیک‌ها
۰/۳۰	۵۵۱۶	II	
۰/۲۵	۴۲۶	III	

جدول ۵. ضخامت لایه‌های روسازی [Ameri et al. 2011]

بستر	زیراساس	اساس	آسفالت	لایه ضخامت (cm)
۲۰۰	۲۵	۲۰	۱۴	



شکل ۴. نمونه‌ای از مدل ساخته شده به همراه نحوه مش‌بندی و شرایط مرزی مدل

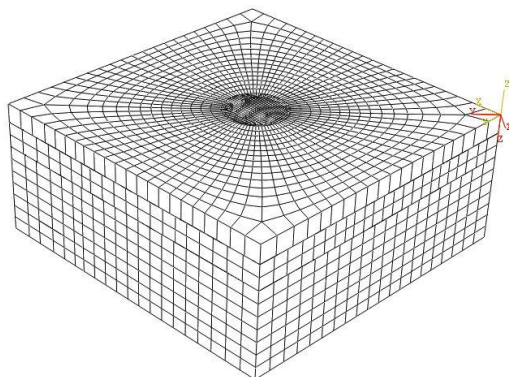


شکل ۵. مشخصات هندسی و ابعاد نمونه آزمایشگاهی

حسن طاهرخانی، امیرجواد مرادلو، استادیار، مسعود جلالی جیرندهی

جدول ۶. ضخامت لایه‌های مدل آزمایشگاهی [Rota, 2011]

لایه	رویه	بیندر	اساس	نئوپرن
ضخامت (cm)	۳	۴	۱۰	۴



شکل ۶. مدل المان محدود ساخته شده جهت اعتبارسنجی

جدول ۷. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و مدلسازی

غیرمسلح	مسلح شده	
-۴۰۸	-۲۴۲	نتایج حاصل از آزمایش (μstrain) [Rota, 2011]
-۳۳۹	-۲۶۱	نتایج حاصل از مدلسازی (μstrain)
۱۷	۸	اختلاف (درصد)

۴. نتایج و تفسیر آنها

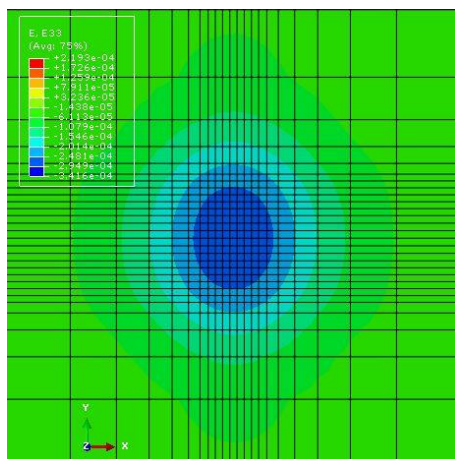
در تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، دو نوع پاسخ شامل، حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی به‌عنوان معیاری برای سنجش عمر خستگی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر به‌عنوان معیاری جهت سنجش عمر شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی، در نظر گرفته شدند و تاثیر تغییرات فشار باد چرخ روی این پاسخ‌ها در روسازی‌های مسلح شده و غیرمسلح مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق مربوط به روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران (با مشخصات و ضخامت-های ارائه شده) است که در دمای مرجع (۲۱/۱) درجه سانتی-گراد) محاسبه شده‌اند. با توجه به این موضوع بدیهی است که برای سایر روسازی‌ها در مناطق مختلف، نیاز است تا تحلیل‌ها در شرایط مشابه دمایی و با مشخصات روسازی مورد نظر تکرار شود. در شکل ۷ توزیع کرنش‌های بحرانی برای حالت کنترل (روسازی غیرمسلح تحت بار چرخ با فشار باد ۶۰۰ کیلوپاسکال) نشان داده شده است.

از آنجایی که رفتار لایه آسفالتی به‌صورت ویسکوالاستیک فرض شده است بنابراین، پاسخ‌های روسازی وابسته به زمان بارگذاری خواهد بود، به‌طوری‌که با افزایش تعداد تکرار بار، مقادیر پاسخ-های مورد نظر تغییر خواهد کرد. این موضوع در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد. در این شکل، تغییرات پاسخ‌های مورد نظر با زمان بارگذاری، برای روسازی آسفالتی غیرمسلح تحت بار محور استاندارد با فشار باد چرخ ۶۰۰ کیلوپاسکال، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد تکرار بار، مقادیر پاسخ‌ها افزایش می‌یابد. از این رو، جهت تحلیل و تفسیر نتایج، حداکثر مقدار پاسخ‌ها که در ۲۵امین تکرار بار حاصل می‌شود، در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۸-الف قابل مشاهده است، حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی با افزایش تعداد تکرار بار، افزایش می‌یابد که این موضوع ناشی از رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالتی است. لازم به توضیح است که حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در ۲۵امین تکرار بار برابر با ۲۱۳ μs خواهد بود در حالی‌که، در اولین تکرار بار ۱۵۳ μs است. قابل ذکر است که حداکثر کرنش کششی زیر لایه

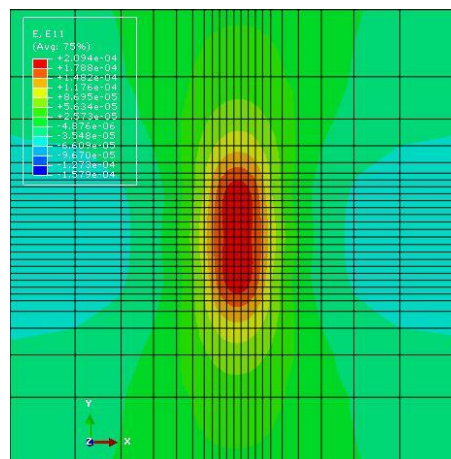
بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...

شده است که مستقل از زمان است. به عبارت دیگر، مقدار حداکثر کرنش فشاری روی بستر علاوه بر خصوصیات ویسکوالاستیک لایه آسفالتی، متأثر از رفتار الاستیک لایه‌های زیرین روسازی نیز خواهد بود. مطابق با نتایج به دست آمده، حداکثر کرنش فشاری روی بستر در ۲۵امین تکرار بار برابر با $289 \mu s$ است درحالی‌که، در اولین تکرار بار برابر با $289 \mu s$ است.

آسفالتی، در راستای طولی (در جهت جریان ترافیک) می‌باشد. در شکل ۸- ب مشاهده می‌شود که حداکثر کرنش فشاری روی بستر با افزایش تعداد تکرار بار افزایش می‌یابد. البته، همان‌طور که مشخص است، حداکثر کرنش فشاری روی بستر، نسبت به حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی، حساسیت کمتری به تعداد تکرار بار دارد. علت این موضوع آن است که رفتار لایه-های اساس، زیراساس و بستر به صورت الاستیک خطی فرض

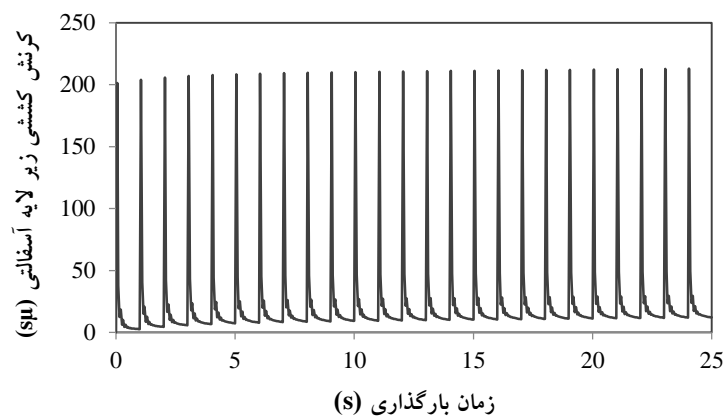


ب. توزیع کرنش فشاری روی لایه بستر

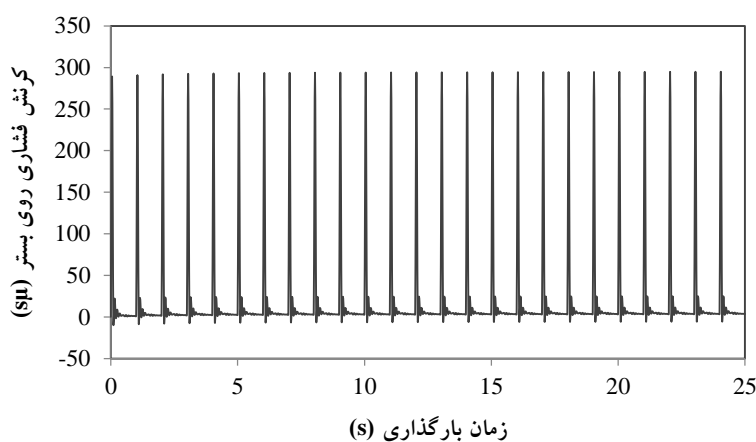


الف. توزیع کرنش کششی زیر لایه آسفالتی

شکل ۷. توزیع الف) کرنش کششی زیر لایه آسفالتی ب) کرنش فشاری روی لایه بستر برای حالت کنترل



الف. تغییرات کرنش کششی زیر لایه آسفالتی با افزایش زمان بارگذاری



ب. تغییرات کرنش فشاری روی لایه بستر با افزایش زمان بارگذاری

شکل ۸. تغییرات الف) کرنش کششی زیر لایه آسفالتی ب) کرنش فشاری روی لایه بستر با افزایش زمان بارگذاری تحت بار محور استاندارد با

فشار باد چرخ ۶۰۰ کیلوپاسکال

روسازی در برابر خرابی خستگی، حالتی است که در آن از ژئوستتیک نوع I در زیر لایه آسفالتی استفاده شود. در این حالت، مقدار کاهش در حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی نسبت به حالت غیرمسلح، در روسازی‌های تحت محور با فشار باد چرخ ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب برابر با ۳۶، ۳۵ و ۳۶ درصد خواهد بود. همچنین، استفاده از ژئوستتیک نوع I بر روی لایه بستر، بیشترین کاهش را در حداکثر کرنش فشاری روی بستر ایجاد می‌کند که این مقدار کاهش، نسبت به حالت غیرمسلح، در روسازی‌های تحت محور با فشار باد چرخ ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب برابر با ۲۷، ۲۹ و ۲۸ درصد خواهد بود.

در نمودار شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تاثیر افزایش فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی در حالت مسلح شده (با ژئوستتیک نوع I) و غیرمسلح، نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است، با افزایش فشار باد چرخ از ۶۰۰ به ۹۰۰ کیلوپاسکال، مقدار حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی افزایش می‌یابد، به طوری که در روسازی غیرمسلح، حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی از $213 \mu s$ به $232 \mu s$ می‌رسد که رشدی برابر با ۹ درصد خواهد بود. در روسازی‌های مسلح، تغییرات حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی ناشی از افزایش فشار باد چرخ، تفاوت چندانی با حالت غیرمسلح نخواهد داشت.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودارهای مربوط به تاثیر نوع و محل ژئوستتیک بر پاسخ‌های روسازی (حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر) در فشار بادهای مختلف (۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ کیلوپاسکال) نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، استفاده از ژئوستتیک بر عملکرد روسازی تاثیر مثبت داشته و کرنش‌های بحرانی روسازی را در همه فشار بادهای مورد نظر، کاهش می‌دهد، که این موضوع، عمر خستگی و عمر شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی را افزایش خواهد داد. در این نمودارها مشخص است که مدول الاستیسیته ژئوستتیک در میزان اثرگذاری آن‌ها بر پاسخ‌های روسازی تاثیرگذار است. به طوری که، ژئوستتیک نوع I (که بالاترین مدول الاستیسیته را دارد) بیشترین کاهش را در کرنش‌های روسازی ایجاد می‌کند در حالی که، استفاده از ژئوستتیک نوع III (که پایین‌ترین مدول الاستیسیته را دارد) در کاهش این کرنش‌ها، تقریباً بی‌تاثیر است. در نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌شود که در همه فشار بادهای مورد نظر، تغییر محل ژئوستتیک بر میزان تاثیرگذاری آن در کاهش کرنش‌های بحرانی موثر است. البته، همان‌طور که مشخص است، تاثیر تغییر محل ژئوستتیک در کاهش کرنش‌ها، با افزایش مدول الاستیسیته ژئوستتیک، افزایش خواهد یافت به طوری که، تاثیر تغییر محل ژئوستتیک نوع III بر کاهش کرنش‌های بحرانی بسیار اندک و تاثیر تغییر محل ژئوستتیک نوع I بر این کرنش‌ها کاملاً مشهود است. براساس نتایج حاصل از این نمودارها می‌توان گفت، در همه فشار بادهای مورد مطالعه، مناسب‌ترین گزینه برای تقویت

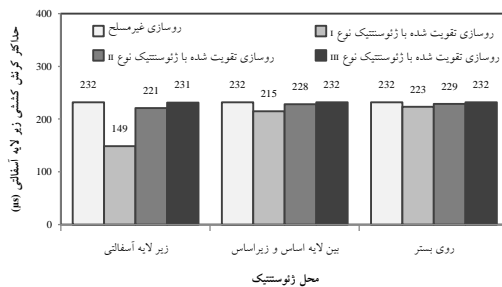
بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...



ب. روسازی تحت بار محور استاندارد با فشار باد چرخ

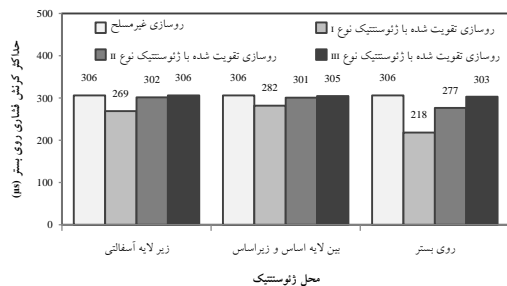
الف. روسازی تحت بار محور استاندارد

۶۰۰ کیلوپاسکال با فشار باد چرخ ۷۵۰ کیلوپاسکال



ب. روسازی تحت بار محور استاندارد با فشار باد چرخ ۹۰۰ کیلوپاسکال

شکل ۹. تاثیر نوع و محل ژئوستتیک بر حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی تحت بار محور استاندارد با فشار باد چرخ (الف ۶۰۰ ب ۷۵۰ پ ۹۰۰ کیلوپاسکال)



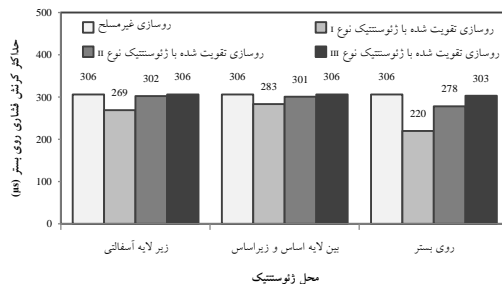
ب. روسازی تحت بار محور استاندارد

با فشار باد چرخ ۷۵۰ کیلوپاسکال



الف. روسازی تحت بار محور استاندارد

با فشار باد چرخ ۶۰۰ کیلوپاسکال



ب. روسازی بستر تحت بار محور استاندارد با فشار باد چرخ ۹۰۰ کیلوپاسکال

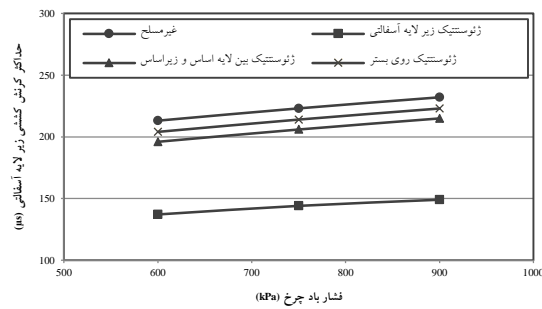
شکل ۱۰. تاثیر نوع و محل ژئوستتیک بر حداکثر کرنش فشاری روی بستر تحت بار محور استاندارد با فشار باد چرخ (الف ۶۰۰ ب ۷۵۰ پ ۹۰۰ کیلوپاسکال)

حداکثر کرنش فشاری روی بستر بسیار ناچیز است و در فشار بادهای بالا (بالتر ۷۵۰ کیلوپاسکال)، این تاثیر تقریباً از بین می‌رود و به صفر می‌رسد. در تحلیل این پدیده، می‌توان گفت تغییرات فشار باد چرخ عمدتاً بر نحوه توزیع تنش‌های تماسی بین چرخ و روسازی، تاثیرگذار خواهد بود که این امر بیشتر بر تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در نزدیکی سطح روسازی اثر خواهد گذاشت حال آن‌که، پاسخ‌های بخش‌های زیرین روسازی (همچون حداکثر کرنش فشاری روی بستر) بیشتر متاثر از مقدار بار محور وسایل نقلیه و مساحت سطح تماس بین چرخ و روسازی است [Shafabakhsh and Talebsafa, 2014, Al-Qadi and Wang, 2011]. مطلب مهم دیگری که با توجه به نمودار شکل ۱۲ می‌توان به آن اشاره کرد آن است که، ژئوستتیک قرار گرفته در زیر لایه اساس نسبت به سایر حالت‌ها (ژئوستتیک زیر لایه آسفالتی و ژئوستتیک روی لایه بستر)، تاثیر کمتری در کاهش حداکثر کرنش فشاری روی بستر دارد. علت این پدیده را می‌توان به کیفیت و ضخامت لایه‌های روسازی ارتباط داد زیرا، بسته به کیفیت ضخامت لایه‌های روسازی، تاثیر ژئوستتیک در موقعیت‌های مختلف، متفاوت خواهد بود [Saad et al. 2006].

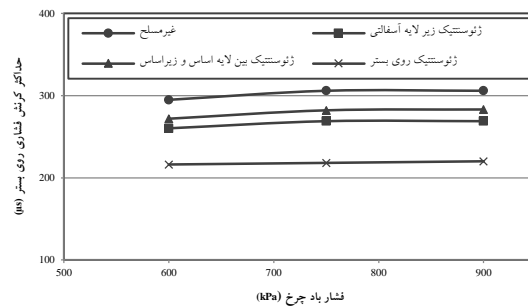
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمودارهای مربوط به میزان اثرگذاری ژئوستتیک نوع I بر پاسخ‌های روسازی، در فشار بادهای مختلف، آورده شده است. در این نمودارها، اثرگذاری ژئوستتیک در یک فشار باد مشخص به این صورت محاسبه می‌شود که ابتدا، اختلاف بین پاسخ روسازی‌های مسلح شده (با ژئوستتیک نوع I) و غیرمسلح تعیین شده و سپس مقدار آن نسبت به حالت غیرمسلح برحسب درصد بیان می‌شود. در این نمودارها مشاهده می‌شود که افزایش فشار باد چرخ از ۶۰۰ به ۹۰۰ کیلوپاسکال، تاثیر چندانی بر عملکرد ژئوستتیک‌ها نخواهد گذاشت و می‌توان گفت، با افزایش فشار باد چرخ، تاثیرگذاری ژئوستتیک‌ها در کاهش کرنش‌های بحرانی روسازی، تقریباً ثابت خواهد ماند.

در روسازی‌های مسلح و در حالتی که ژئوستتیک بین لایه اساس و زیراساس قرار گرفته باشد، حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی به ازای افزایش فشار باد چرخ، از $196 \mu\text{s}$ به $215 \mu\text{s}$ می‌رسد که رشدی برابر با ۱۰ درصد است اما در سایر حالت‌ها (ژئوستتیک زیر لایه آسفالتی و ژئوستتیک روی بستر)، مقدار افزایش این کرنش‌ها با تغییرات فشار باد چرخ، برابر با ۹ درصد خواهد بود، به طوری که با افزایش فشار باد چرخ، حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی، در حالتی که ژئوستتیک زیر لایه آسفالتی قرار گرفته باشد، از $137 \mu\text{s}$ به $149 \mu\text{s}$ و در حالتی که ژئوستتیک روی بستر قرار داده شود، از $204 \mu\text{s}$ به $223 \mu\text{s}$ می‌رسد. اما، در نمودار شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که افزایش فشار باد چرخ تاثیر چندانی بر حداکثر کرنش فشاری روی بستر ندارد به طوری که، با افزایش فشار باد از ۶۰۰ به ۷۵۰ کیلوپاسکال، حداکثر کرنش فشاری روی بستر، در روسازی غیر مسلح، از $295 \mu\text{s}$ به $306 \mu\text{s}$ افزایش می‌یابد که رشدی برابر با ۴ درصد را نشان می‌دهد، اما برای فشار بادهای بالاتر (تا ۹۰۰ کیلوپاسکال)، تغییری در حداکثر کرنش فشاری روی بستر مشاهده نمی‌شود. روند این تغییرات برای روسازی‌های مسلح شده نیز، تقریباً مشابه است. در حالتی که ژئوستتیک بین لایه اساس و زیراساس قرار داده شود، با افزایش فشار باد چرخ از ۶۰۰ به ۷۵۰ کیلوپاسکال، حداکثر کرنش فشاری روی بستر از $272 \mu\text{s}$ به $282 \mu\text{s}$ می‌رسد که افزایشی ۴ درصدی را نشان می‌دهد و اگر ژئوستتیک در زیر لایه آسفالتی قرار گیرد، با افزایش فشار باد چرخ به همین مقدار، کرنش‌ها از $260 \mu\text{s}$ به $269 \mu\text{s}$ افزایش می‌یابد که رشدی ۳ درصدی است. در این حالت‌ها (ژئوستتیک زیر لایه آسفالتی و زیر لایه اساس)، با افزایش فشار باد چرخ از ۷۵۰ به ۹۰۰ کیلوپاسکال تغییری در حداکثر کرنش فشاری روی بستر ایجاد نمی‌شود. در حالتی که ژئوستتیک بر روی لایه بستر قرار گرفته باشد، با افزایش فشار باد چرخ از ۶۰۰ به ۹۰۰ کیلوپاسکال، حداکثر کرنش فشاری روی بستر از $216 \mu\text{s}$ به $220 \mu\text{s}$ افزایش می‌یابد که رشدی برابر با ۲ درصد است. با توجه به این نتایج، مشخص می‌شود که تاثیر افزایش فشار باد چرخ بر

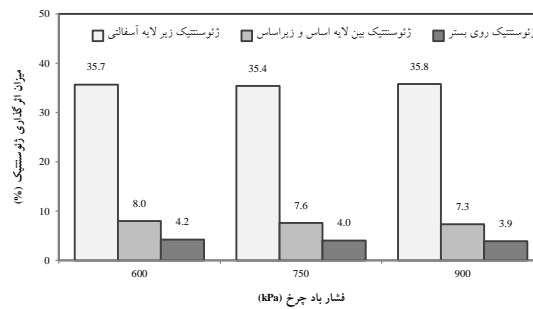
بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...



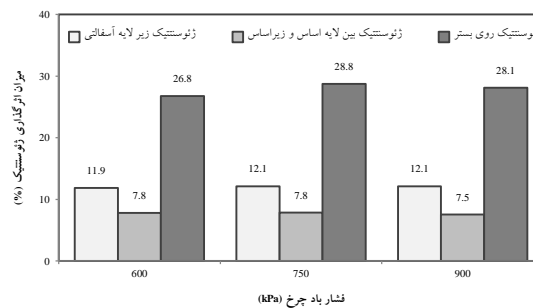
شکل ۱۱. تاثیر افزایش فشار باد چرخ بر حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی در روسازی‌های غیرمسلح و مسلح شده با ژئوستتیک نوع I



شکل ۱۲. تاثیر افزایش فشار باد چرخ بر حداکثر کرنش فشاری بر روی بستر در روسازی‌های غیرمسلح و مسلح شده با ژئوستتیک نوع I



شکل ۱۳. تاثیر افزایش فشار باد چرخ بر میزان اثرگذاری ژئوستتیک نوع I در کاهش حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی



شکل ۱۴. تاثیر افزایش فشار باد چرخ بر میزان اثرگذاری ژئوستتیک نوع I در کاهش حداکثر کرنش فشاری روی بستر

۵. نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- با توجه به رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالتی، پاسخ های روسازی (شامل حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر) وابسته به زمان بارگذاری است، به طوری که با افزایش زمان بارگذاری مقدار کرنش ها افزایش می یابد. البته، کرنش های فشاری روی بستر حساسیت کمتری به زمان بارگذاری دارند که علت این موضوع، رفتار الاستیک لایه های زیرین روسازی (شامل اساس، زیراساس و بستر) است که مستقل از زمان بارگذاری است.
- براساس نتایج حاصل از این تحقیق، با افزایش مدول الاستیسیته ژئوسنتتیک ها، تاثیر آن ها در بهبود عملکرد روسازی های آسفالتی افزایش می یابد... همچنین، نتایج نشان می دهند که استفاده از ژئوسنتتیک نوع III (با مدول الاستیسیته ۴۲۶ مگاپاسکال) در بهبود عملکرد روسازی های آسفالتی تقریباً بی تاثیر است.
- در روسازی مورد مطالعه (روسازی های آسفالتی رایج در ایران)، بهترین موقعیت ژئوسنتتیک به منظور افزایش عمر خستگی (یا کاهش حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی)، زیر لایه آسفالتی است حال آن که، بهترین محل ژئوسنتتیک برای افزایش عمر شیارشدگی (یا کاهش حداکثر کرنش فشاری روی بستر)، روی لایه بستر است.
- براساس نتایج حاصل از این تحقیق، تغییرات فشار باد چرخ وسایل نقلیه سنگین تأثیری در تعیین نوع و محل بهینه ژئوسنتتیک ها ندارند و در همه حالت های مورد مطالعه، نوع و محل بهینه ژئوسنتتیک مشابه بوده است.
- تغییرات فشار باد چرخ (از ۶۰۰ تا ۹۰۰ کیلوپاسکال) عمدتاً بر کرنش های کششی زیر لایه آسفالتی اثرگذار است و تأثیر چندانی بر کرنش های فشاری روی بستر ندارد.

- همچنین، نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که تغییرات فشار باد چرخ بر عملکرد ژئوسنتتیک ها تأثیری ندارند به طوری که، افزایش فشار باد چرخ وسایل نقلیه سنگین بر میزان اثرگذاری ژئوسنتتیک ها در کاهش حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر، تأثیری نخواهد داشت.

۶. مراجع

- 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.
- Abu-Farsakh, M., Gu, J., Voyiadjis, G. and Chen, Q. (2013) "Numerical study of the benefits of geogrid base reinforcement on the rutting performance of flexible pavements", Proceedings of the Geo-Congress, San Diego, California, March 3-7, 2013, pp. 371-382.
- Al-Qadi, I. L., Dessouky, S., Kwon, J. and Tutumluer, E. (2008) "Geogrid in flexible pavements: validated mechanism", Journal of the Transportation Research Board, No. 2045, pp. 102-109.
- Al-Qadi, I. L., Dessouky, S., Tutumluer, E. and Kwon, J. (2011) "Geogrid mechanism in low volume flexible pavements: accelerated testing of full scale heavily instrumented pavement sections", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 121-135.
- Al-Qadi, I. L. and Wang, H. (2011) "Prediction of tire-pavement contact stresses and analysis of asphalt pavement responses: a decoupled approach", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 80, pp. 289-316.
- Al-Qadi, I. L., Yoo, P. J., Elseifi, M.A. and Janajreh, I. (2005) "Effects of tire configurations on pavement damage (with discussion)", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74, pp. 921-962.
- Ameri, M., Mansourian, A., HeidaryKhavas, M., Aliha, M. R. M. and Ayatollahi, M. R. (2011) "Cracked asphalt pavement under traffic loading –

بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ‌های روسازی‌های مسلح شده با ژئوستتیک با تحلیل ویسکوالاستیک...

dimensional contact stresses on perpetual pavement responses", *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2095, pp. 53-61.

-Witczak, M.W. and Bari, J. (2004) "development of a master curve (e*) database for lime modified asphaltic mixtures", Research Project, Arizona State University.

-Xie, S. and Zheng, C. (2003) "Effects of the tire-pavement contact pressure on asphalt pavement", *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, October, Vol. 4, pp. 401-407.

-Yang, X. and You, Z. (2014) "New predictive equations for dynamic modulus and phase angle using a nonlinear least-squares regression model", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 0899-1561/04014131(8).

-آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران- نشریه شماره ۲۳۴ (۱۳۹۰) تجدید نظر اول، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور.

-شفابخش، غلامعلی و طالب‌صفا، محسن (۱۳۹۳) "ارزیابی تحلیلی تاثیر توزیع تنش غیریکنواخت و فشار باد چرخ بر تحلیل روسازی آسفالتی"، مجموعه مقالات هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، اردیبهشت ۱۷-۱۸، ۱۳۹۳.

-طاهرخانی، حسن و صولتیان، احسان (۱۳۹۰)، "تحلیل و طراحی روسازی"، انتشارات دانشگاه زنجان، ایران.

-کاوسی، امیر و بابازاده، علی (۱۳۸۷) "بررسی روش‌های تجربی تعیین مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی در روسازی-های کشور جهت طراحی روسازی در سطوح مختلف"، مجموعه مقالات چهارمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، آبان ۲۱-۲۲، ۱۳۸۷، ص ۱۱۱-۱۲۷.

-کی‌منش، محمودرضا، میرشکاریان بابکی، مهرداد و شفیع‌پور مرجی، ابوذر (۱۳۹۳) "ارزیابی تحلیلی اثر اضافه بار بر خرابی-های روسازی آسفالتی با استفاده از روش اجزا محدود"، مجموعه مقالات هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، اردیبهشت ۱۷-۱۸، ۱۳۹۳.

A 3D finite element analysis", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, No. 8, pp. 1817-1826.

-Chatti, K., Salama, H. and El Mohtar, C. (2004) "Effect of heavy trucks with large axle groups on asphalt pavement damage", the 8th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, March 14-18, 2004 Johannesburg, South Africa.

-Ferrotti, G., Canestrari, F., Pasquini, E. and Virgili, A. (2012) "Experimental evaluation of the influence of surface coating on fiberglass geogrid performance in asphalt pavements", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 34, pp. 11-18.

-Kwon, J., Tutumluer, E. and Konietzky, H. (2008) "Aggregate base residual stresses affecting geogrid reinforced flexible pavement response", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 275-285.

-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.

-Nazal, M., Abu-Farsakh, M. and Mohammad, L. (2010) "Implementation of a critical state two-surface model to evaluate the response of geosynthetic reinforced pavements," *International Journal of Geomechanics*, Vol. 10, No. 5, pp. 202-212.

-Pożarycki, A. and Garbowski, T. (2013) "Laboratory testing of fatigue crack growth in geosynthetically reinforced large scale asphalt pavement samples", *Procedia Engineering*, Vol. 57, pp. 922-928.

-Rota, V. (2011) "Finite element analysis and laboratory investigation of reinforced road pavements," Ph. D. Thesis, University of Parma, Parma.

-Saad, B., Mitri, H. and Poorooshab, H. (2006) "3D FE analysis of flexible pavement with geosynthetic reinforcement", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, No. 5, pp. 402-415.

-Wang, F. (2005) "Mechanistic-empirical study of effects of truck tire pressure on asphalt pavement performance", Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.

-Wang, H. and Al-Qadi, I. L. (2009) "Combined effect of moving wheel loading and three-

۷. پی نوشتها

- 14- Elastoplastic
 - 15- Prony Series
 - 16- Instantaneous Modulus
 - 17- Reduced Frequency
 - 18- Master Curve
 - 19- Relaxation Modulus
 - 20- Schapery and Park
 - 21- Storage Modulus
 - 22- Adjustment Function
 - 23- Sigmoid Function
 - 24- Instantaneous Shear Modulus
 - 25- Edge Effects
 - 26- University of Parma
 - 27- Wearing
 - 28- Binder
 - 29- Neoprene
 - 30- Guage
- 1- Axle Configuration
 - 2- Tire Type
 - 3- Tire Pressure
 - 4- Suspension Type
 - 5- Geosynthetic
 - 6- Finite Element Method
 - 7- Steering Tires
 - 8- Wide Base Tires
 - 9- Abdel-Motaleb
 - 10- Imad Al-Qadi
 - 11- Bassam Saad
 - 12- Murad Abu-Farsakh
 - 13- Elastic- Perfectly Plastic