تأثیر روکش آسفالتی در کاهش ضخامت روسازی بتنی به کمک روش اجزای محدود

ابوذر شفیع‌پور، دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت و دانشجوی دکتری راه و ترابری
مهرداد میرشکاریان بابکی، دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت و دانشجوی دکتری راه و ترابری
محمدرضا احدی*، استادیار، عضو هیئت علمی پژوهشکده حمل و نقل دانشگاه علم و صنعت، تهران

E-mail: ahadireza@iust.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۵/۲۳ – پذیرش: ۹۲/۰۹/۲۰

چکیده

یکی از محدودیت‌های اجرای روسازی بتن غلتکی در کشور، عدم وجود سطح نهایی مناسب برای عبور ترافیک با سرعت زیاد است. اجرای روکش آسفالتی روی روسازی بتن غلتکی یکی از روش‌های افزایش کارایی و عمکرد این نوع روسازی است. اجرای این نوع روکش در سختی سازه‌ای کل سیستم تأثیر چندانی ندارد. اما اگر سیستم دال مرکب به عنوان یک تیر در خمش قرار گیرد می‌توان تأثیر ضخامت روکش آسفالتی را بر تار خنثی بررسی کرد. جابجایی تار خنثی به معنی کاهش تنش برای گشتاور خمشی معین نسبت به حالت بدون روکش است که این موضوع می‌تواند موجب کاهش ضخامت بتن شود. در این مقاله، به کمک روش اجزای محدود، به بررسی میزان کاهش ضخامت بتن پرداخته شده است. بدین منظور، روکش‌های با ضخامت‌های معمول (٤ و ٥ سانتی‌متر) روی روسازی بتن غلتکی با ضخامت ۲۰ تا ۲۵ سانتی‌متر در نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) مدل شدند. تحلیل تنش قائم و کرنش کششی زیرلایه بتنی نشان می‌دهد که کاهش ضخامت بتن بستگی به ضخامت روسازی بتنی و ضخامت روکش آسفالتی دارد که به طور متوسط کاهش ضخامت در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد ضخامت بتن بوده است.

واژه‌های کلیدی: روکش آسفالتی، روسازی بتن غلتکی، روش اجزای محدود.

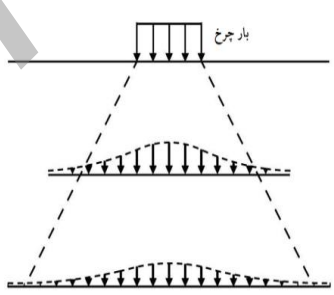
۱. مقدمه

روسازی صلب اکثراً در بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها مشاهده می‌شود. همچنین، به عنوان دال کف برای کارهای سنگین صنعتی، فرودگاه هواپیما، محوطه‌ی بنادر، روسازی پایانه‌ها و مناطقی که وسایل نقلیه‌ی زیادی توقف می‌کنند به کار می‌رود. روسازی صلب در بزرگراه‌ها مانند روسازی انعطاف‌پذیر، برای شرایط آب و هوایی مختلف طراحی می‌شود تا این سازه‌های بادوام برای سرعت آمد و شد امروزی کارآمد باشند. این روسازی‌ها، سطوح با کیفیت بالا و امنی را برای مسافرت با وسایل نقلیه فراهم می‌کنند. عملکرد آنها به صورت لایه‌های ساختاری است تا بار ناشی از چرخ وسایل نقلیه را به لایه‌ی اساس خاکی با مقدار تنش قابل قبول، منتقل کنند. با وجود اینکه هر دو شکل روسازی (صلب و انعطاف‌پذیر) از مکانیزم انتقال بار برای کاهش تنش استفاده می‌کنند اما دارای تفاوت‌های اساسی در نحوه توزیع تنش نیز می‌باشند. شکل ۱ بیانگر این است که در روسازی انعطاف‌پذیر، طراحی بر اساس فراهم کردن ضخامت مناسبی است که به موجب آن توزیع بار موجود، در عمق انجام گیرد. این در حالی است که روسازی صلب، عملکردی مبنی بر دال صلب دارد که بار را در مساحت گسترده‌تری توزیع می‌کند (دلات، ۲۰۰۸؛ فوا، ۲۰۰٦).

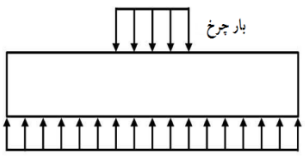
Archive of SID

www.SID.ir

بیشترین نوع مصالحی که برای ساخت روسازی دال صلب به کار می‌رود از بتن با سیمان پرتلند است که دلیل عمده‌ی آن دسترسی آسان و مسائل اقتصادی می‌باشد. دال بتنی باید برای مقاومت در مقابل بارهای متناوب ترافیکی طراحی شود. عمده‌ترین عامل در طراحی روسازی صلب، شکست ناشی از خستگی می‌باشد که به دلیل بارهای متوالی ناشی از آمد و شد روزانه اتفاق می‌افتد. شکست ناشی از خستگی زمانی اتفاق می‌افتد که بار، اگرچه مقداری کمتر از بار گسیختگی دال بتنی داشته باشد، برای دفعات کافی به صورت متوالی روی روسازی قرار گیرد. از آنجا که در یک بزرگراه، میلیون‌ها چرخ در روز در دوران بهره‌برداری از آن عبور می‌کند، عموماً این نوع گسیختگی در روسازی بزرگراه‌ها رخ می‌دهد (تام، ۲۰۰۸).



روسازی انعطاف‌پذیر



روسازی صلب

شکل ۱. مشخصات هندسی و نحوه انتقال بار در روسازی‌های انعطاف‌پذیر و صلب

علاوه بر بارهای ترافیکی، تنش‌های کششی حرارتی به وجود آمده نیز باید در طراحی مد نظر قرار گرفته شود. مهندسین طراح روسازی زمان زیادی است که تشخیص داده‌اند مقدار تنش‌های به وجود آمده از اختلاف حرارتی در روسازی بتنی، تقریباً برابر با تنش‌های ناشی از بار چرخ‌ها است. از این رو، به دلیل ضعف در مقاومت کششی مصالح بتنی، تنش‌های حرارتی از اهمیت بیشتری برخوردارند که مشکلات اضافی زیر را برای طراحی روسازی بتنی نتیجه می‌دهند: ۱) انتخاب ابعاد طرح پانل دال که تأثیر مستقیم بر مقدار تنش‌های حرارتی به وجود آمده در دال دارد، ۲) طراحی آرماتورهای حرارتی برای کنترل عرض ترک‌ها و فواصل آنها و ۳) طراحی درز و آرماتورهای درز تا بر انتقال بار بین دال‌های مجاور ارتباط برقرار کند (دلات، ۲۰۰۸).

با توجه به افزایش قیمت فرآورده‌های نفتی مثل قیر و همچنین عدم دسترسی آسان به آن، نیاز به طرح و اجرای روسازی بتنی در راه‌های کشور بیش از گذشته احساس می‌شود. روسازی‌های بتنی در انواع مختلفی طرح و اجرا می‌شوند. اما اجرای آنها نیازمند تجهیزات و تجربه خاصی می‌باشد که متأسفانه هنوز در کشور به‌دست نیامده است. گسترش اجرای روسازی بتن غلتکی در دنیا و عدم نیاز به تجهیزات خاص می‌تواند شروع مناسبی برای اجرای روسازی بتنی در کشور باشد. یکی از معایب اصلی روسازی بتن غلتکی ناهمواری سطح آن می‌باشد که امکان حرکت سریع وسایل نقلیه را میسر نمی‌کند. جهت برطرف کردن این عیب می‌توان از یک لایه روکش آسفالتی در روی روسازی بتن غلتکی استفاده کرد. در ادامه این مقاله، در ابتدا به معرفی انواع روسازی بتنی و جایگاه روسازی بتن غلتکی در انواع روسازی‌های بتنی پرداخته خواهد شد. پس از آن، به کمک روش اجزای محدود، به مدل کردن روسازی مرکب شامل روسازی بتن غلتکی به همراه روکش آسفالتی پرداخته شده است و تأثیر روکش در ضخامت کل روسازی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۲. روسازی بتن غلتکی

در ایران، اکثر روسازی‌های اجرا شده از نوع آسفالتی می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان وجود فراوان و ارزان

Archive of SID

www.SID.ir

منابع نفتی قیر دانست که استفاده از آن را توجیه‌پذیر کرده است. ولی این نوع روسازی علی‌رغم جاافتادگی و سهل‌الاجرا بودن معایبی نیز به همراه دارد. مشخصه بارز روسازی‌های آسفالتی، تغییر خواص آن با دما است. تابش آفتاب و دماهای بالا در مناطق گرمسیری و بارگذاری سنگین با توجه به خاصیت انعطاف‌پذیری آسفالت باعث به‌وجود آمدن موج‌های طولی و عرضی و تغییرشکل‌های دائم و خرابی‌های متعدد در آن می‌شود. البته توجه به‌این نکته لازم است که بخشی از این مشکلات به اجرای ضعیف این نوع روسازی مربوط می‌شود و بخشی دیگر به نبود تولید قیر مناسب در کشور ارتباط دارد.

یک راه حل برای این امر استفاده از روسازی‌های بتنی می‌باشد که خواص آن مانند روسازی‌های آسفالتی به دما بستگی ندارد. در این روسازی‌ها، تغییرشکل‌های دائمی مانند روسازی‌های آسفالتی رخ نمی‌دهد و مزایای فنی روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی‌های آسفالتی، نظیر عملکرد مناسب در برابر بارهای سنگین، جاده‌های با شیب زیاد و در عین حال مزیت اقتصادی آن نیز بسیار قابل توجه است (گریفیث و تام، ۲۰۰۷). انواع روسازی بتنی با توجه به عمکرد و خصوصیات به گروه‌های زیر طبقه‌بندی می‌شوند.

الف) روسازی بتنی درزدار ساده (JPCP)

ب) روسازی بتنی مسلح درزدار (JRCP)

ج) روسازی بتنی مسلح پیوسته (CRCP)

د) روسازی بتنی پیش‌تنیده (PCP)

علاوه بر چهار نوع روسازی بتنی که به آنها اشاره شد دو نوع دیگر از روسازی بتنی که در دنیا استفاده می‌شوند به صورت روسازی مختلط و روسازی بتن غلتکی نامیده می‌شوند. در روسازی مختلط هم از روسازی آسفالتی و هم از روسازی بتنی استفاده می‌شود. استفاده از روسازی بتنی در لایه پایینی و روسازی آسفالتی در لایه بالایی تشکیل یک روسازی ایده‌آل را می‌دهد که بیشترین مشخصات و خصوصیات مورد انتظار از یک روسازی را دارا می‌باشد. لایه روسازی بتنی، یک لایه اساس مستحکم را فراهم نموده و روسازی آسفالتی یک سطح صاف را به‌وجود می‌آورد. در هر حال، این نوع روسازی خیلی پرهزینه بوده و کمتر به‌عنوان یک روسازی جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی روسازی‌های مختلط به روش تئوری صفحه صورت می‌گیرد، به این دلیل که بتن جزء اصلی سازه‌ی باربر روسازی را تشکیل می‌دهد (PCA، ۲۰۱۰؛ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۸۸).

بزرگترین مشکل اجرای روسازی‌های بتنی معمولی در کشور، نبود امکانات اجرایی و ماشین‌آلات خاص اجرای آن می‌باشد. اما اجرای روسازی بتن غلتکی که با ماشین‌آلات متداول در روسازی آسفالتی قابل اجرا است امکان اجرای روسازی بتنی را فراهم کرده است. روسازی بتن غلتکی به‌عنوان یک نوع روسازی بتنی محسوب می‌گردد که جزو دسته اول یعنی روسازی بتنی غیرمسلح درزدار قرار می‌گیرد. در واقع، فرایند طراحی روسازی بتنی شبیه به طراحی روسازی بتنی غیرمسلح درزدار با درز انبساط یا درزهای اجرایی بدون داول می‌باشد. در عین حال باید توجه نمود که تفاوت‌های عمده‌ای بین این نوع روسازی و روسازی بتنی معمولی بدون داول در ارتباط با شیوه ساخت روسازی، فواصل درزها، عملکرد درزها از نظر انتقال بار و خصوصیات ظاهری و سطحی آنها وجود دارد که در راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راه‌های کشور (نشریه شماره ۳۵٤) ویژگی‌های روسازی‌های بتن غلتکی به تفصیل تشریح گردیده است. مخلوط بتن غلتکی دارای مشخصات مقاومتی و همچنین مصالح مشابه (سنگ، آب و سیمان) با بتن معمولی است. ولی دارای مشخصات مخلوط متفاوتی است. تفاوت اصلی میان بتن غلتکی و بتن معمولی، درصد بالای ریزدانه در مخلوط بتن غلتکی می‌باشد. مخلوط بتن غلتکی از حالت بتن معمولی با اسلامپ صفر هم سفت‌تر است که این به دلیل پایدار بودن در برابر غلتک زدن می‌باشد (PCA، ۲۰۱۰؛ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۸۸).

Archive of SID

www.SID.ir

مقاومت و پایداری مخلوط بتن غلتکی در کنار سرعت اجرای بالا و اقتصادی بودن آن موجب شده تا این روسازی امروزه در پارکینگ‌ها و مناطق دپوی مصالح، بنادر، جایگاه حمل و نقل وسایل نظامی و شانه بزرگراه‌ها و خیابان‌های شهری و بزرگراه‌ها استفاده شود. در روسازی بتن غلتکی، ترکیبی از مشخصات اجرای روسازی بتنی (مصالح و عمل‌آوری) و اجرای روسازی آسفالتی (دانه بندی و تراکم) استفاده می‌شود. بافت سطحی روسازی بتن غلتکی، در برابر دیگر انواع روسازی‌ها، ناهموار است که مخصوصاً وقتی با فینیشرهای مخصوص پخش نشود نمی‌توان از آن برای عبور وسایل نقلیه با سرعت زیاد استفاده کرد. شکل ۲ بافت سطحی انواع روسازی آسفالتی و بتنی پس از اجرا را نشان می‌دهد (PCA، ۲۰۱۰؛ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۸۸).

شکل ۲. بافت سطحی انواع روسازی‌های آسفالتی و بتنی

مزایای و محدودیت‌های اصلی استفاده از روسازی بتن غلتکی در جدول ۱ خلاصه شده است. از جمله محدودیت‌های استفاده از بتن غلتکی در راه‌های با سرعت زیاد، سطح ناهموار آن می‌باشد که یکی از راهکارهای از بین بردن آن اجرای یک لایه روکش آسفالتی در روی لایه بتنی می‌باشد. استفاده از روکش آسفالتی همچنین موجب کاهش تنش‌های حرارتی در بتن نیز خواهد شد. در ادامه، تأثیر ضخامت روکش آسفالتی در کاربرد آن بر روسازی بتنی به کمک روش اجزای محدود بررسی شده است (PCA، ۲۰۱۰؛ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۸۸).

جدول ۱. مزایا و محدودیت‌های اجرای روسازی بتن غلتکی

مزایا
اجرای سریع و بهره‌برداری آسان موجب اقتصادی بودن آن شده است.
نسبت کم آب به سیمان موجب کاهش ترک‌های انقباضی می‌شود.
نفوذپذیری کم از ورود آب به لایه‌های زیرین جلوگیری می‌کند که در شرایط چرخه ذوب و یخ به روسازی آسیبی نمی‌رسد.
به دلیل روشن بودن سطح روسازی بتن غلتکی نیاز به روشنایی راه کم می‌شود.
از ریزدانه‌هایی که برای بتن معمولی قابل استفاده نیست می‌توان در بتن غلتکی استفاده کرد.
مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخ روسازی بسیار بالا است. بنابراین برای مناطق سردسیر مناسب است.
محدودیت‌ها
سطح ایجاد شده در اتمام کار برای عبور وسایل نقلیه با سرعت بالا مناسب نیست و می‌بایست از روکش آسفالتی در ایجاد بافت و همواری سطح استفاده شود.
میزان بتن غلتکی که می‌توان در میکسر تولید کرد و انتقال داد از بتن معمولی کمتر است.
با توجه به آب نسبتاً کم در روسازی بتن غلتکی مراقبت و نگهداری در زمان اجرا در هوای گرم بسیار مهم است.
به دلیل خشک بودن مخلوط بتن غلتکی می‌بایست از بهم‌زن‌های بسیار قوی استفاده شود.
تراکم لایه‌های روسازی در لبه‌ها بسیار مشکل است.

۳. مدل‌سازی به کمک روش‌های اجزای محدود

نرم‌افزار آباکوس یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند می‌باشد که مبتنی بر روش اجزای محدود بوده و قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا

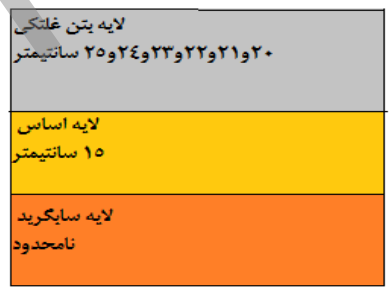
Archive of SID

www.SID.ir

پیچیده‌ترین مدل‌سازی‌های غیرخطی (ازجمله مصالح هایپرالاستیک و ویسکوالاستیک) را دارا می‌باشد. در این مقاله، برای بررسی اثر روکش آسفالتی روی بتن غیر مسلح، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است و با در نظر گرفتن ضخامت‌های متفاوت برای بتن و روکش آسفالتی مدل‌سازی انجام شده است (آباکوس، ۲۰۱۱). در ادامه، مشخصات مدل ساخته شده در آباکوس تعیین شده است.

۳-۱. هندسه مدل

در این مقاله، برای شبیه‌سازی روسازی از ساختارهای زیر استفاده شده است و اندازه طولی و عرضی کلیه لایه‌ها ٤ متر انتخاب شده است. ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها و ضخامت آنها در شکل ۳ نشان داده شده است.



الف- روسازی بتنی

ب- روسازی بتنی با روکش آسفالت

شکل ۳. ساختار لایه‌های روسازی بتنی و روسازی مرکب

به منظور بررسی اثر لایه روکش بر ضخامت دال بتنی، ابتدا روسازی بدون لایه روکش آسفالتی در نظر گرفته شده است (شکل ۳- الف). سپس، ساختار روسازی با فرض یک لایه روکش روی دال بتنی مدل گردید(شکل ۳ - ب). برای لایه روکش آسفالتی دو ضخامت ٤ و ٥ سانتی‌متر و برای دال بتنی شش ضخامت ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲٤ و ۲۵ سانتی‌متر مدل‌سازی گردید. در مجموع، ۱۳ ساختار روسازی با نرم‌افزار آباکوس بررسی و تحلیل گردید (جدول ۲).

جدول ۲. انواع مدل‌های مورد بررسی در نرم‌افزار

مدل	توضیحات
RCC(25cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر
RCC(25cm)+ HMA(4cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٤ سانتی‌متر
RCC(24cm)+ HMA(4cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲٤ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٤ سانتی‌متر
RCC(23cm)+ HMA(4cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۳ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٤ سانتی‌متر
RCC(22cm)+ HMA(4cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۲ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٤ سانتی‌متر
RCC(21cm)+ HMA(4cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۱ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٤ سانتی‌متر
RCC(20cm)+ HMA(4cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٤ سانتی‌متر
RCC(25cm)+ HMA(5cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٥ سانتی‌متر
RCC(24cm)+ HMA(5cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲٤ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٥ سانتی‌متر
RCC(23cm)+ HMA(5cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۳ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٥ سانتی‌متر
RCC(22cm)+ HMA(5cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۲ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٥ سانتی‌متر
RCC(21cm)+ HMA(5cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۱ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٥ سانتی‌متر
RCC(20cm)+ HMA(5cm)	بتن غلتکی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر + روکش آسفالت به ضخامت ٥ سانتی‌متر

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۲. مشخصات مصالح

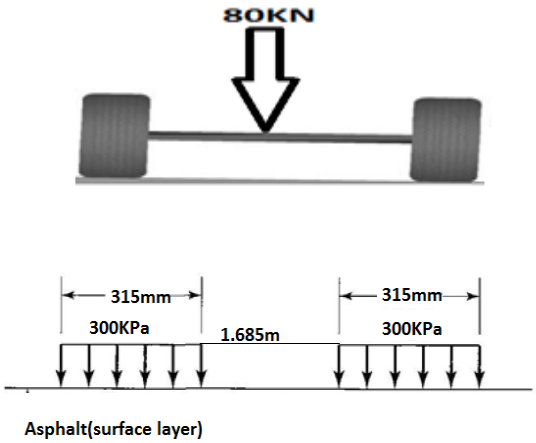
در این مدل‌سازی، کلیه لایه‌ها به‌صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات مصالح طبق جدول ۳ ارائه شده است (بک، ۲۰۱۰).

جدول ۳. مشخصات مکانیکی مصالح به کار رفته در مدل (بک، ۲۰۱۰)

نوع مصالح	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	ضریب پواسون
روکش آسفالتی	۱۷۲۰۰	۰/۲
بتن سیمانی	۲۷۵۰۰	۰/۲
اساس	۳۰۰	۰/۳
بستر	۱۴۰	۰/۴

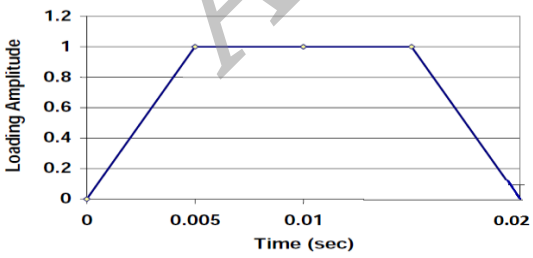
۳-۳. بارگذاری

یکی از مهمترین پارامترهای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس اختصاص صحیح بارگذاری و تطبیق آن با شرایط واقعی می‌باشد. برای مدل‌سازی اثر فشار تایر بر روسازی از بار محور منفرد با چرخ تک در هر طرف آن استفاده شده است. وزن کل محور ۸۰ کیلونیوتن می‌باشد که در شکل ٤ نشان داده شده است. شناخت سطح تماس تایر و روسازی از آن جهت مهم است که فرض می‌شود بار هر محور به صورت یکنواخت روی سطح توزیع شود. در حالی که اندازه سطح تماس تایر با روسازی به فشار تماس بستگی دارد. تحقیقات انجام شده در سال ۱۹۹۸ نشان داد که فرض توزیع تنش یکنواخت و غیریکنواخت، به‌ویژه در فصل مشترک لایه‌ها، باعث تفاوت ٦ تا ۳۰ درصدی در پاسخ‌های روسازی می‌گردد و فرض قراردادی توزیع تنش یکنواخت بجز در خصوص تنش کششی زیرلایه آسفالت، محافظه‌کارانه می‌باشد. در اینجا برای مدل‌سازی سطح تماس تایر از تنش یکنواخت استفاده شده است و سطح تماس تایر ۰/٤۲۵×۰/۳۱۵ متر در نظر گرفته شده است. همچنین، با توجه به بار محور (۸ تن)، شدت تنش روی هر چرخ ۰/۳ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است (هوانگ، ۲۰۰٤٤). مطالب فوق در شکل ٤ نشان داده شده است.



شکل ۴ . توزیع بار و میزان بار در مدل

سرعت بارگذاری چرخ روی روسازی با تعریف دامنه برای بار در نرم‌افزار آباکوس انجام می‌شود. تاکنون مطالعات زیادی به منظور شبیه‌سازی سرعت حرکت چرخ روی روسازی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است و در تحقیقات مختلف دامنه‌های بارگذاری متفاوتی ارائه شده است. در این مقاله، برای شبیه‌سازی حرکت چرخ از دامنه ذوزنقه‌ای استفاده شده است. سرعت بارگذاری چرخ روی سطح ۲۱/۵ m/s در نظر گرفته شده است. در شکل ۵، دامنه بارگذاری نمایش داده شده است (کیم و همکاران، ۲۰۱۱).



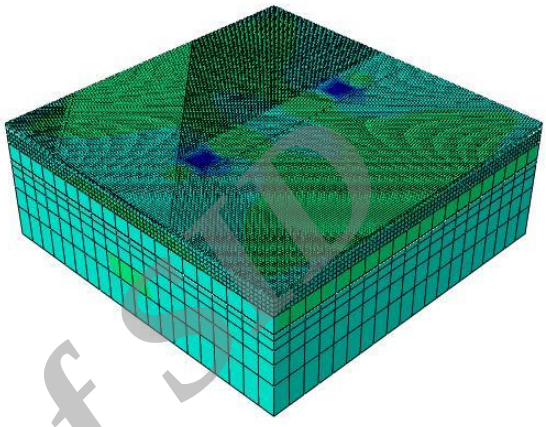
شکل ۵. دامنه بارگذاری در مدل

برای حل این مسئله در نرم‌افزار، روش تحلیل استاتیک و حلگر standard انتخاب شده است. در فصل مشترک کلیه لایه‌ها، از لغزش بین لایه‌ها صرف نظر شده و از قید Tie

Archive of SID

www.SID.ir

برای تماس بین کلیه لایه‌ها با یکدیگر استفاده شده است. المان‌های به‌کار رفته برای تمامی لایه‌ها (به‌غیر از لایه سابگرید) به‌صورت تنش سه بعدی (C3D8) در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ٦، نمایی از مونتاژ نهایی یکی از مدل‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۶. نمای نهایی روسازی مدل شده در نرم‌افزار

٤-٣. شرایط مرزی

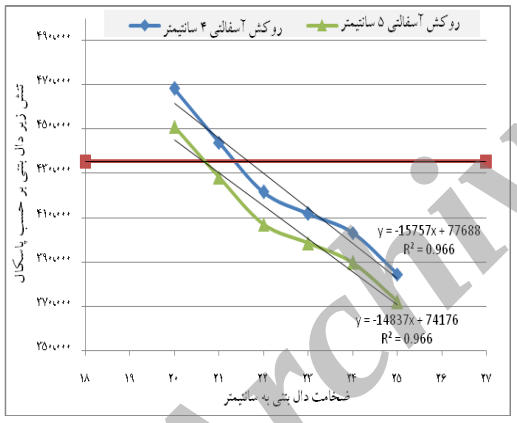
در این مدل‌سازی، برای اعمال شرایط مرزی در راستای x و y برای هر لایه، از شرط تقارن استفاده شده است. در جهت عمودی (محور z) با توجه به نامحدود بودن لایه سابگرید از المان‌های بینهایت (CIN3D8) استفاده شده است. بنابراین، نیازی به اعمال شرایط مرزی برای لایه سابگرید در جهت z نمی‌باشد.

٤. نتایج و بحث

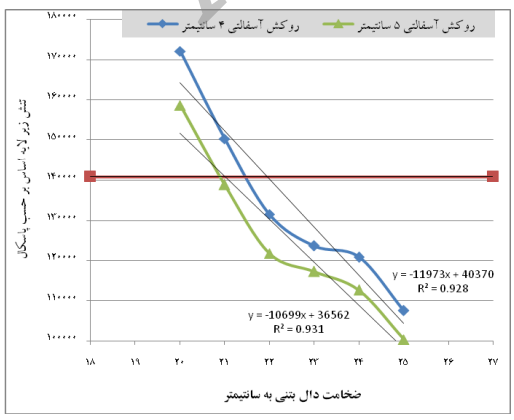
با توجه به تعریف لایه‌های روسازی در نرم‌افزار و مدل‌سازی شرایط واقعی بارگذاری، میزان تنش و کرنش زیر دال بتنی به‌دست آمد که در جدول ٤ ارائه شده است. تغییرات تنش و کرنش با افزایش ضخامت بتن و همچنین افزایش ضخامت روکش در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نمایش داده شده است.

جدول ۴. نتایج تنش و کرنش در لایه‌های روسازی

نوع مدل	تنش زیر چرخ در زیر دال بتنی(پاسکال)	تنش عمودی روی لایه اساس (پاسکال)	کرنش کششی زیر چرخ روی دال بتنی	کرنش کششی زیر چرخ زیر دال بتنی
RCC(25cm)	۴۳۵۵۱۰	۱۴۰۷۹۸	$۱/۳۲\times۱۰^{-۵}$	$۱/۲۰\times۱۰^{-۵}$
RCC(25cm)+ HMA(4cm)	۳۸۴۵۷۲	۱۰۷۴۹۱	$۸/۳۴\times۱۰^{-۶}$	$۱/۰۸\times۱۰^{-۵}$
RCC(24cm)+ HMA(4cm)	۴۰۳۲۶۹	۱۲۰۸۳۵	$۸/۶۴\times۱۰^{-۶}$	$۱/۱۳\times۱۰^{-۵}$
RCC(23cm)+ HMA(4cm)	۴۱۲۰۱۷	۱۲۳۶۵۹	$۸/۶۴\times۱۰^{-۶}$	$۱/۱۴\times۱۰^{-۵}$
RCC(22cm)+ HMA(4cm)	۴۲۱۶۸۱	۱۳۱۴۷۷	$۸/۶۵\times۱۰^{-۶}$	$۱/۱۷\times۱۰^{-۵}$
RCC(21cm)+ HMA(4cm)	۴۴۴۰۵۳	۱۵۰۲۹۰	$۸/۹۶\times۱۰^{-۶}$	$۱/۲۲\times۱۰^{-۵}$
RCC(20cm)+ HMA(4cm)	۴۶۸۴۶۹	۱۷۲۰۶۸	$۹/۲۹\times۱۰^{-۶}$	$۱/۲۷\times۱۰^{-۵}$
RCC(25cm)+ HMA(5cm)	۳۷۲۲۱۲	۱۰۰۳۷۷	$۶/۹۸\times۱۰^{-۶}$	$۱/۰۵\times۱۰^{-۵}$
RCC(24cm)+ HMA(5cm)	۳۸۹۹۲۶	۱۱۲۵۹۸	$۷/۱۱\times۱۰^{-۶}$	$۱/۱۰\times۱۰^{-۵}$
RCC(23cm)+ HMA(5cm)	۳۹۸۶۲۱	۱۱۷۲۰۶	$۷/۳۲\times۱۰^{-۶}$	$۱/۱۱\times۱۰^{-۵}$
RCC(22cm)+ HMA(5cm)	۴۰۷۲۰۶	۱۲۱۷۹۴	$۷/۴۹\times۱۰^{-۶}$	$۱/۱۳\times۱۰^{-۵}$
RCC(21cm)+ HMA(5cm)	۴۲۸۳۲۲	۱۳۸۸۷۸	$۷/۷۱\times۱۰^{-۶}$	$۱/۱۸\times۱۰^{-۵}$
RCC(20cm)+ HMA(5cm)	۴۵۱۳۱۶	۱۵۸۵۸۱	$۷/۹۵\times۱۰^{-۶}$	$۱/۲۳\times۱۰^{-۵}$



شکل ۷. تغییرات تنش زیر دال بتنی با افزایش ضخامت بتن به همراه روکش ۴ و ۵ سانتی‌متری



شکل ۸. تغییرات تنش زیرلایه اساس با افزایش ضخامت بتن به همراه روکش‌های ۴ و ۵ سانتی‌متری

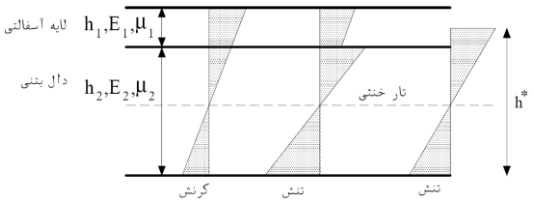
Archive of SID

www.SID.ir

با مقایسه نتایج تنش در زیر دال بتنی روسازی بتن غلتکی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر با روسازی مرکب شامل ۲۲ سانتی‌متر بتن و ٤ سانتی‌متر آسفالت می‌توان نتیجه گرفت که این دو نوع روسازی تنش یکسانی را به لایه‌های زیرین انتقال می‌دهند و می‌توانند معادل یکدیگر در نظر گرفته شوند. به عبارت دیگر، ضخامت معادل روسازی مرکب ۲۲ سانتی‌متر بتن و ٤ سانتی‌متر آسفالت برابر با ۲۵ سانتی‌متر بتن خواهد بود. این موضوع در خصوص مقایسه روسازی بتنی با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر با روسازی مرکب ۲۱ سانتی‌متر بتن و ۵ سانتی‌متر آسفالت نیز صادق است و در واقع ضخامت معادل روسازی مرکب ۲۱ سانتی‌متر بتن و ۵ سانتی‌متر آسفالت برابر با ۲۵ سانتی‌متر بتن خواهد بود. مقایسه تنش زیرلایه اساس نیز روندی مشابه تغییرات تنش زیر دال بتنی را نشان می‌دهد. این موضوع با تئوری ضخامت معادل که از تغییر تار خنثی در مقطع معادل به دست می‌آید همخوانی دارد و می‌توان برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده در این مقاله از آن استفاده کرد. ضخامت معادل از روابط زیر به‌دست می‌آید (حسنی و ثقفی، ۱۳۹۲):

$$h^* = \frac{\alpha + 2\beta + \beta^2}{\alpha + \beta} h_2$$

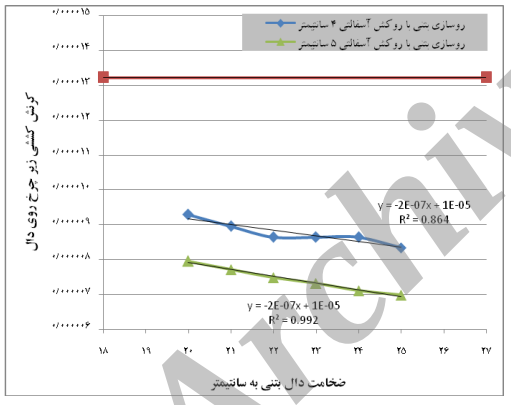
$$\alpha = \frac{E_2(1-\mu_1^2)}{E_1(1-\mu_2^2)} \qquad \beta = \frac{h_1}{h_2}$$



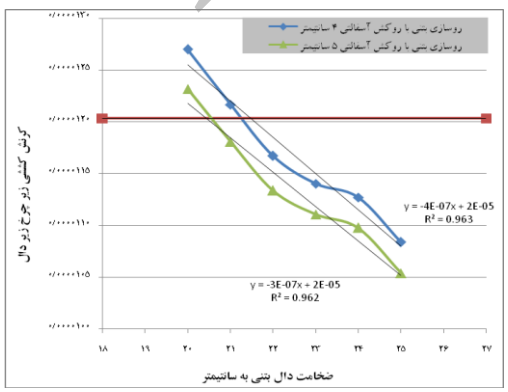
که در روابط فوق E، h و μ به ترتیب ضخامت، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون لایه‌های آسفالتی و بتنی می‌باشند. جدول ۵ ضخامت معادل روسازی مرکب بر اساس روابط فوق را نشان می‌دهد. همان طور که جدول ۵ نشان می‌دهد، می‌توان گفت روسازی بتنی به ضخامت ۲۷/٦٤ سانتی‌متر معادل ضخامت روسازی مرکب ۲۵ سانتی‌متر بتن با روکش آسفالتی ٤ سانتی‌متر است و یا برعکس. در نتیجه، اضافه کردن روکش ٤ سانتی‌متری موجب کاهش ۱۰ درصدی ضخامت بتن شده است که در ستون چهارم جدول ٤ این کاهش برای مدل‌های دیگر در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد بوده است.

جدول ۵. تعیین ضخامت معادل روسازی مرکب

نوع مدل روسازی	ضخامت معادل بتن به سانتی‌متر	درصد کاهش ضخامت بتن معادل با اجرای روکش
RCC(25cm)+ HMA(4cm)	۲۷/۶۴	۱۰
RCC(24cm)+ HMA(4cm)	۲۶/۶۴	۱۰
RCC(23cm)+ HMA(4cm)	۲۵/۶۵	۱۰
RCC(22cm)+ HMA(4cm)	۲۴/۶۵	۱۱
RCC(21cm)+ HMA(4cm)	۲۳/۶۶	۱۱
RCC(20cm)+ HMA(4cm)	۲۲/۶۷	۱۲
RCC(25cm)+ HMA(5cm)	۲۸/۳۴	۱۲
RCC(24cm)+ HMA(5cm)	۲۷/۳۴	۱۲
RCC(23cm)+ HMA(5cm)	۲۶/۳۵	۱۳
RCC(22cm)+ HMA(5cm)	۲۵/۳۶	۱۳
RCC(21cm)+ HMA(5cm)	۲۴/۳۷	۱۴
RCC(20cm)+ HMA(5cm)	۲۳/۳۸	۱۴



شکل ۹. تغییرات کرنش روی دال با افزایش ضخامت بتن به همراه روکش‌های ۴ و ۵ سانتی‌متری



شکل ۱۰. تغییرات کرنش زیر دال با افزایش ضخامت بتن به همراه روکش‌های ۴ و ۵ سانتی‌متری

Archive of SID

www.SID.ir

تغییرات کرنش کششی که یکی از عوامل اصلی خرابی روسازی است در شکل‌های ۹ و ۱۰ برای انواع مدل‌ها نشان داده شده است. مقایسه کرنش کششی زیر چرخ روی دال برای انواع مدل‌ها نشان می‌دهد که اجرای روکش آسفالتی موجب کاهش قابل توجه کرنش می‌شود. همچنین، با افزایش ضخامت بتن در روسازی مرکب، کرنش کششی زیر چرخ زیر دال کاهش یافته و کرنش روسازی مرکب با ۲۲ سانتی‌متر بتن و ٤ سانتی‌متر آسفالت معادل ۲۵ سانتی‌متر روسازی بتنی است و این شرایط برای روسازی مرکب با ۲۱ سانتی‌متر بتن و ۵ سانتی‌متر آسفالت معادل ۲۵ سانتی‌متر روسازی بتنی می‌باشد.

مقایسه کل ضخامت روسازی مرکب با ضخامت روسازی بتنی نشان می‌دهد که علی‌رغم اینکه به ظاهر بتن از مقاومت بالایی نسبت به آسفالت برخوردار است ولی نتایج نشان می‌دهد از نظر مقاومتی تفاوت چندانی ندارد. به عبارت دیگر، افزایش ٤ سانتی‌متری لایه آسفالتی معادل کاهش ۳ سانتی‌متر بتن بوده است. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که اجرای روکش آسفالتی روی روسازی بتنی در سختی سازه‌ای کل سیستم تأثیر چندانی ندارد. اما وقتی سیستم دال روسازی مرکب به عنوان یک دال عمل می‌کند می‌توان ضخامت بتن را کاهش داد. البته این زمانی درست است که اصطکاک و چسبندگی بین روکش آسفالتی و بتن تأمین شود. در این راستا در دنیا برای افزایش مقاومت برشی بین دو لایه از آسفالت و قیر پلیمری یا از یک لایه ژئوتکستایل استفاده می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

اجرای روکش آسفالتی روی روسازی بتن غلتکی یکی از روش‌های افزایش کارایی و عمکرد روسازی بتن غلتکی است. اجرای این نوع روکش در سختی سازه‌ای کل سیستم تأثیر چندانی ندارد. اما اگر سیستم دال مرکب به عنوان یک تیر در خمش قرار گیرد می‌توان تأثیر ضخامت روکش آسفالتی را بر تار خنثی بررسی کرد. جابجایی تار خنثی به معنی کاهش تنش برای گشتاور خمشی معین نسبت به حالت بدون روکش است که این موضوع می‌تواند موجب کاهش ضخامت بتن شود. در این مقاله، به محاسبه تنش و کرنش در زیرلایه‌های روسازی بر اساس روش اجزای محدود و همچنین تئوری ضخامت معادل در روسازی‌های مرکب پرداخته شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که اجرای لایه روکش آسفالتی روی روسازی بتن غلتکی موجب کاهش تنش و کرنش زیرلایه‌های روسازی می‌شود. با توجه به ضخامت‌های در نظر گرفته شده در این مقاله، با اجرای روکش ٤ سانتی‌متری آسفالت روی روسازی بتن غلتکی می‌توان ضخامت دال بتنی را ۳ سانتی‌متر کم کرد و در صورت اجرای روکش ۵ سانتی‌متری آسفالت می‌توان ضخامت دال بتنی را ٤ سانتی‌متر کاهش داد. به طور کلی، طراح می‌تواند در صورت اجرای یک لایه روکش آسفالتی ٤–۵ سانتی‌متری روی روسازی بتن غلتکی صخامت دال بتنی را ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش دهد. اما این در صورتی خواهد بود که مقاومت برشی بین لایه آسفالتی و بتنی در حد قابل قبول باشد.

٦. مراجع

ابوالفضل حسنی و بهروز ثقفی. ۱۳۹۲. "افزایش کارآیی رویه‌های بتنی با اجرای روکش آسفالتی". مرکز عمران ایران، صنعت ساخت و ساز بتن در ایران.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۸۸. "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راه‌های کشور، نشریه ۳۵۴.

وزارت راه و ترابری. ۱۳۸٤. "کاربرد بتن غلتکی در راه‌سازی". معاونت تحقیقات، آموزش و فناوری، دفتر مطالعات فناوری و ایمنی، دبیرخانه مجمع جهانی راه (پیارک).

Abaqus. 2011. Abaqus/Standard User's Manual, Version 6.11.1, Abaqus, Inc.

Al-Qadi, I. L. and Wang, H. 2009. "Pavement Damage Due to Different Tire and Loading Configurations on Secondary Roads". USDOT Region V, Regional University Transportation Center, Final Report.

Baek, G. 2010. "Modeling Reflective Cracking Development in Hot Mix-asphalt Overlay and Control

Archive of SID

www.SID.ir

Techniques". University of Illinois at Urbana-Champaign.
Delatte, N. 2008. "Concrete Pavement Design, Construction and Performance". First published by Taylor & Francis.
Fwa, T. F. 2006. "The Handbook of Highway Engineering". Taylor & Francis Group.
Griffiths, G. and Thom, N. 2007. "Concrete Pavement Guidance Notes". Taylor & Francis Group.
Huang, Y. H. 2004. "Pavement Analysis and Design". Prentice Hall, Inc., New Jersey.
Pavement Work Tips. 2013. "Polymer Modified Binders and Multigrade Bitumens". No. 6.
PCA. 2010. "Guide for Roller-Compacted Concrete Pavement". National Concrete Pavement Technology Center (PCA), Iowa State University, August.
Thom, N. 2008. "Principles of Pavement Engineering". University of Nottingham, Thomas Telford Publishing.
Kim, Y. R., Hoki, B. and Soohyok, I. M. 2011. Impact of Truck Loading on Design and Analysis of Asphaltic Pavement Structures-Phase II". A cooperative research project sponsored by the U.S. Department of Transportation Research and Innovative Technology Administration.

Archive of SID

www.SID.ir