



بررسی انواع حالت‌های مدل کردن بار چرخ در سطح روسازی به کمک آنالیز المان محدود و مقایسه با نتایج میدانی

یوسف امجدیان^{۱*}، نادر طباطبایی^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد، مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

*Youssefamjadyan32410@gmail.com

ارسال: دی ماه ۹۷ پذیرش: بهمن ماه ۹۷

چکیده

در مطالعات مختلف به منظور مدل کردن بار چرخ در سطح روسازی از حالت‌های مختلف استفاده شده است. حال آنکه هر یک از این مدل‌ها چه مقدار به واقعیت نزدیک هستند جای سوال دارد. در این مطالعه سعی شده چند حالت متداول برای مدل کردن بار چرخ بررسی و بهترین حالت معرفی شود. پنج حالت مختلف شامل بار متحرک بدون همپوشانی، بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی، بار لحظه‌ای، بار نیم سینوسی و بار استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. با شبیه‌سازی روسازی و بار چرخ در سطح روسازی در نرم افزار آباکوس و تقسیم روسازی به المان‌های کوچک، هر یک از این مدل‌ها به روش آنالیز المان محدود ارزیابی شده‌اند. در نهایت خروجی مربوط به آنالیز هر مدل با خروجی آزمایش میدانی موجود مقایسه گردید. این نتایج نشان می‌دهند که بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی بسیار به آزمایش میدانی نزدیک است در حالی که بار لحظه‌ای خطای زیادی دارد.

کلمات کلیدی: بار چرخ، المان محدود، آزمایش میدانی، بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی.

۱- مقدمه

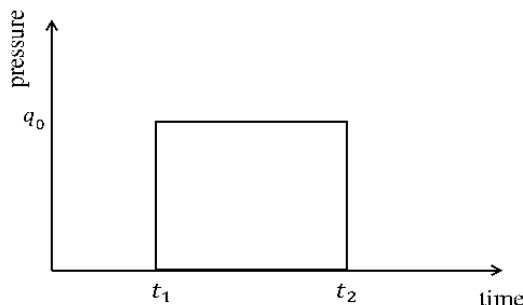
روسازی آسفالتی یک سیستم چند لایه است که وظیفه انتقال و توزیع بار چرخ را به سطح بستر به عهده دارد. لذا اتصال لایه‌های مختلف باید به اندازه‌ای قوی باشد که بتواند انتقال بار را به خوبی انجام دهد و روسازی به عنوان یک سیستم یکپارچه عمل کند. در غیر این صورت انتقال بار به خوبی صورت نخواهد گرفت و هر لایه جداگانه تغییر شکل می‌دهد و سبب بروز خرابی‌هایی از جمله شیارشدگی و لغزش برشی لایه آسفالتی می‌شود. همچنین اتصال ضعیف بین لایه‌ی آسفالت با لایه زیرین سبب افزایش تنش کششی در زیر لایه رویه آسفالتی شده و منجر به کاهش عمر خستگی این لایه می‌شود [۱-۳]. به منظور ایجاد اتصال بین لایه آسفالت با لایه زیرین می‌توان از یک اندود قیری با ضخامت کم استفاده نمود که بسته به محلی که قیر استفاده می‌شود نام و خصوصیات متفاوتی دارد. اگر این اندود قیری روی لایه اساس و برای اتصال این لایه با لایه آسفالت استفاده شود به آن اندود نفوذی، و اگر بین دو لایه آسفالت زیرین و رویه استفاده شود به آن اندود سطحی گفته می‌شود. به منظور تعیین مقاومت برشی

اندود سطحی تحقیق‌های متعددی صورت گرفته که پارامترهای تاثیر گذاری از جمله نوع اندود سطحی، نرخ پخش اندود سطحی، ویژگی‌های سطوح تماس و دما مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۴-۸]. همچنین تعدادی دیگر از پژوهش‌ها به بررسی عددی اندود سطحی با شبیه‌سازی به کمک روش المان‌های محدود پرداخته‌اند که در آن‌ها بارگذاری به روش‌های مختلفی مدل شده‌است. در یکی از این حالت‌ها تنش ۷۲۴ کیلو پاسکال به صورت لحظه‌ای در مدت زمان ۰/۱ ثانیه به سطح روسازی اعمال شده‌است [۴]. در برخی از پژوهش‌های دیگر بار به صورت متحرک مدل شده، بدین صورت که سطح روسازی به قطعات مختلفی تقسیم شده که مساحت هر یک از این قطعات برابر مساحت سطح تماس چرخ با روسازی است. سپس هر قطعه در مدت زمان محدودی (متناسب با سرعت حرکت بار) تحت تنش قرار می‌گیرد و بار به صورت پیوسته روی سطح حرکت می‌کند [۲، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۳]. حالت دیگر بارگذاری استفاده از رابطه نیم سینوسی وابسته به زمان است که شدت تنش را با توجه به سرعت حرکت بار در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد [۱۰]. برای آنکه نتایج مدل‌سازی قابل قبول باشد باید مدل ساخته شده به گونه‌ای باشد که حتی‌الامکان به آنچه که در عمل اتفاق می‌افتد شبیه باشد. از جمله مواردی که در شبیه‌سازی مدل باید مورد توجه قرار گیرد عبارتند از ابعاد مدل، شرایط تکیه‌گاهی و سنگ بستر، نحوه اتصال لایه‌ها، و نوع اعمال بار. یکی دیگر از مواردی که می‌تواند در نتایج تحلیل بسیار تاثیر گذار باشد چگونگی مدل کردن بار چرخ در سطح روسازی است به گونه‌ای که با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف اعمال بار نتایج آنالیز بسیار تغییر می‌کند. هدف این پژوهش بررسی الگوهای مختلف و مقایسه نتایج با بارگذاری واقعی در سطح جاده است.

۲- معرفی انواع حالت‌های بارگذاری

۲-۱- بار لحظه‌ای

در بعضی کارهای تحقیقاتی جهت مدل کردن بار از این نوع بارگذاری استفاده شده‌است [۴]. در این حالت فشار ناشی از بار چرخ به مدت محدود (متناسب با سرعت حرکت بار) به سطح روسازی وارد می‌شود (شکل ۱).



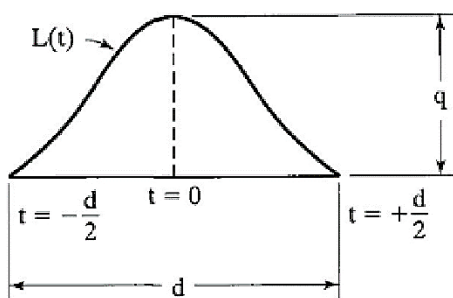
شکل ۱- فشار وارده به سطح روسازی در زمان‌های مختلف در بار لحظه‌ای

۲-۲- بار نیم سینوسی

این بارگذاری وابسته به زمان بوده و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. در این رابطه پارامتر d به سطح تماس بارگذاری و سرعت حرکت بار وابسته است (رابطه ۲). بر اساس این رابطه می‌توان مقدار تنش فشاری وارده به سطح روسازی ناشی از عبور بار با سرعت مشخص را در زمان‌های مختلف محاسبه کرد [۱۰]. شکل ۲ فشار وارده به سطح روسازی در زمان‌های مختلف را در این نوع بارگذاری نشان می‌دهد.

$$L(t) = q \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi \cdot t}{d}\right) \quad (1)$$

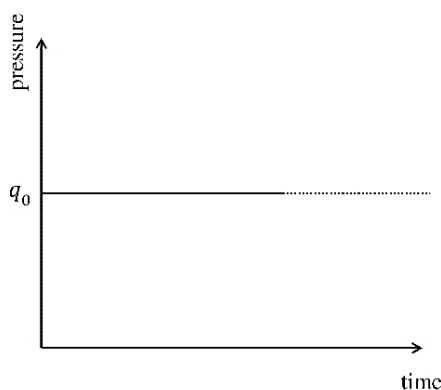
$$d = \frac{12 \cdot a}{s} \quad (2)$$



شکل ۲- فشار وارده به سطح روسازی در زمان‌های مختلف در بار نیم سینوسی [۱۰]

۲-۳- بار استاتیکی

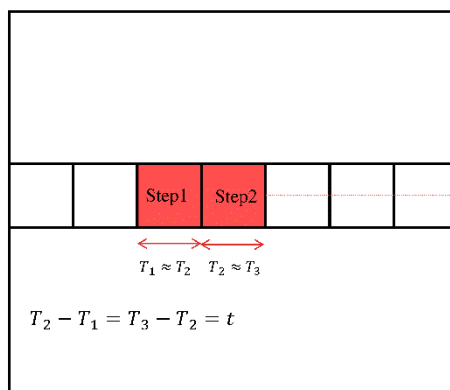
در این حالت از بارگذاری، تنش به صورت ثابت و بدون توجه به زمان (به صورت دائم) به سطح روسازی وارد شده و برای لایه آسفالت خواص الاستیک در نظر گرفته می‌شود. شکل ۳ فشار وارده به سطح روسازی در زمان‌های مختلف را در این نوع بارگذاری نشان می‌دهد.



شکل ۳- فشار وارده به سطح روسازی در زمان‌های مختلف در بار استاتیکی

۲-۴- بار متحرک

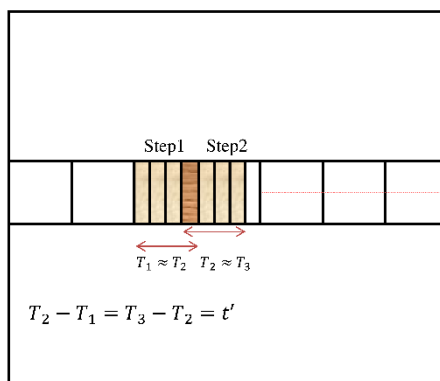
در این حالت از بارگذاری، بر خلاف حالت ۳ قبل که تنش به یک سطح ثابت از روسازی وارد می‌شود، تنش بر روی سطح روسازی حرکت می‌کند. در این حالت سطح روسازی با توجه به مساحت اعمال بار، به قطعات مختلفی تقسیم شده و هر قطعه در یک زمان خاصی (متناسب با سرعت حرکت وسیله نقلیه) تحت تنش قرار می‌گیرد. شکل ۴ شماتیک بار متحرک را در سطح روسازی نشان می‌دهد.



شکل ۴- شکل شماتیک بار متحرک در سطح روسازی

۲-۵- بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی

این بارگذاری شبیه بارگذاری متحرک بوده با این تفاوت که در هر مرحله، تنش وارده ۲۵ درصد از سطحی که در مرحله قبل تحت تنش واقع شده را در بر می گیرد. شکل ۵ شماتیک بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی را در سطح روسازی نشان می دهد.



شکل ۵- شکل شماتیک بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی در سطح روسازی

۳- بارگذاری میدانی

روند انجام کار بدین صورت است که نتایج مدلسازی هر یک از انواع حالت های بارگذاری با نتیجه بارگذاری واقعی (میدانی) مقایسه می شود. لذا در ابتدا لازم است که نتایج بارگذاری میدانی در دست باشد. بدین منظور از نتایج ارائه شده در پژوهش های پیشین استفاده می شود [۱۱]. روند انجام کار در پژوهش مذکور بدین صورت بوده که در زیر لایه آسفالتی در یک روسازی سه لایه ای، کرنش سنج قرار گرفته و کرنش طولی ناشی از یک بار عبور HVS^۱ اندازه گیری شده است. فشار ناشی از عبور چرخ برابر ۶۸۹ کیلو پاسکال و سرعت عبور چرخ برابر ۱۲ کیلومتر در ساعت است. در این مطالعه به کمک FWD^۲ خواص الاستیک لایه های دانه ای (جدول ۱) و به کمک آزمایش مدول دینامیکی (AASHTO TP 79) خواص ویسکوالاستیک لایه آسفالتی (جدول ۲) تعیین شده است [۱۱]. این بارگذاری برای دو حالت استفاده و عدم استفاده از اندود نفوذی (اتصال خوب و اتصال ضعیف) انجام شده که در ادامه نتایج میدانی اندازه گیری شده برای هر دو حالت آورده شده است (شکل ۶).

جدول ۱- خواص الاستیک لایه های دانه ای [۱۱]

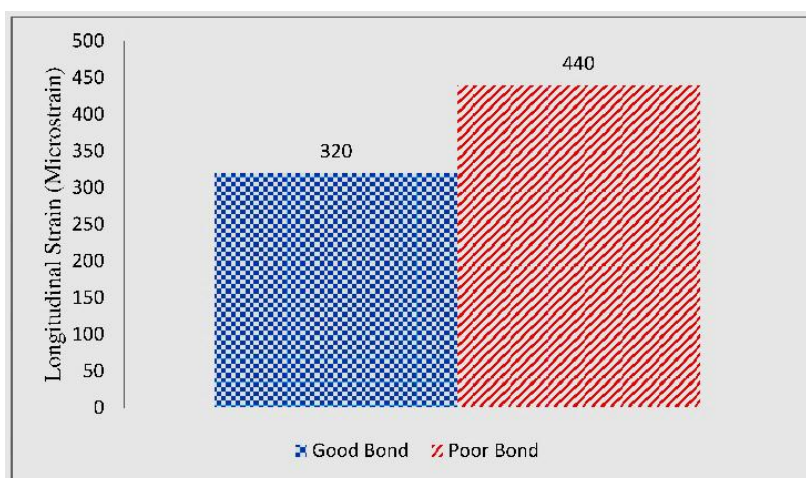
ضخامت (cm)	ضریب پواسون	مدول (مگاپاسکال)	لایه
۲۵/۴	۰/۴	۱۸۹/۵	اساس
۳۰/۵	۰/۴	۱۲۷/۹	زیراساس
۲۵۴/۰	۰/۴۵	۸۸/۳	بستر

^۱ Heavy Vehicle Simulator

^۲ Falling Weight Deflectometer

جدول ۲- پارامترهای سری پرونی^۳ برای معرفی خواص ویسکوالاستیک لایه آسفالتی [۱۱]

مرحله	τ (s)	E (Mpa)	G (Mpa)	K (Mpa)
۱	۵e-۲/۰۰	+۳e۳/۶۱	+۳e۱/۳۴	+۳e۴/۰۱
۲	۴e-۲/۰۰	+۳e۲/۳۶	+۲e۸/۷۶	+۳e۲/۶۳
۳	۳e-۲/۰۰	+۳e۱/۱۵	+۲e۴/۲۵	+۳e۱/۲۸
۴	۲e-۲/۰۰	+۲e۴/۵۸	+۲e۱/۷۰	+۲e۵/۰۸
۵	۱e-۲/۰۰	+۲e۱/۷۳	+۱e۶/۴۱	+۲e۱/۹۲
۶	+۰e۲/۰۰	+۱e۶/۸۹	+۱e۲/۵۶	+۱e۷/۶۵
۷	+۱e۲/۰۰	+۱e۳/۰۷	+۱e۱/۱۴	+۱e۳/۴۱
۸	+۲e۲/۰۰	+۱e۱/۴۶	+۰e۵/۴۱	+۱e۱/۶۳
۹	+۳e۲/۰۰	+۰e۷/۳۸	+۰e۲/۷۳	+۰e۸/۲۰
۱۰	+۴e۲/۰۰	+۰e۳/۵۷	+۰e۱/۳۲	+۰e۳/۹۶



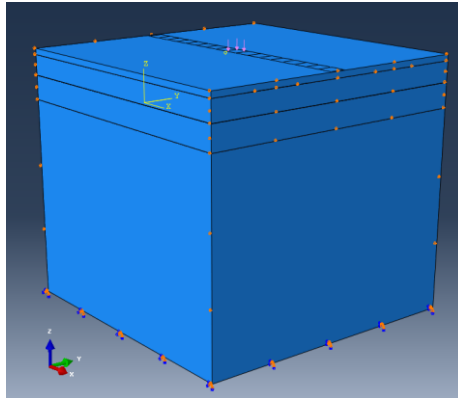
شکل ۶- نتایج بارگذاری میدانی برای دو حالت اتصال خوب و ضعیف [۱۱]

۴- مدل سازی روسازی به روش المان محدود

با داشتن ضخامت و ویژگی لایه‌های روسازی [۱۱] می‌توان روسازی را در برنامه آباکوس مدل کرد. اساس کار این برنامه، تحلیل به روش المان‌های محدود است. در این پژوهش از مدل ۳ بعدی استفاده شده است. علاوه بر ضخامت و ویژگی لایه‌های روسازی، موارد دیگری نیز باید به درستی مدل شود تا در نتایج تحلیل، خطا ایجاد نشود. این موارد عبارتند از: طول و عرض مدل که باید به اندازه‌ای بزرگ در نظر گرفته شود که تنش فشاری وارد به سطح روسازی قبل از رسیدن به صفحات کناری مستهلک شود. همچنین باید به این نکته توجه گردد که اگر این ابعاد بیش از اندازه بزرگ در نظر گرفته شود، زمان لازم برای انجام محاسبات خیلی طولانی خواهد شد. لذا برای محقق شدن این امر، طول و عرض مدل برابر ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. همچنین در اطراف صفحات جانبی یک‌سری قید تعریف شده که از حرکت جانبی روسازی جلوگیری کند. در قدم بعد لایه‌های روسازی روی ۲/۵ متر خاک بستر قرار گرفته و در زیر خاک بستر تکیه‌گاه گیردار مدل شده است که از حرکت قائم جلوگیری کند. بدین ترتیب می‌توان تاثیر سنگ بستر را مدل کرد. پارامتر بعدی که باید بررسی شود نحوه اتصال لایه‌های روسازی است، از آنجا که تنش برشی ناشی از بار عبوری به لایه‌های زیر اساس و خاک بستر ناچیز بوده، لذا در مرز بین لایه‌های مذکور تغییر شکل بسیار ناچیز است. به همین منظور

³ Prony Series Parameters

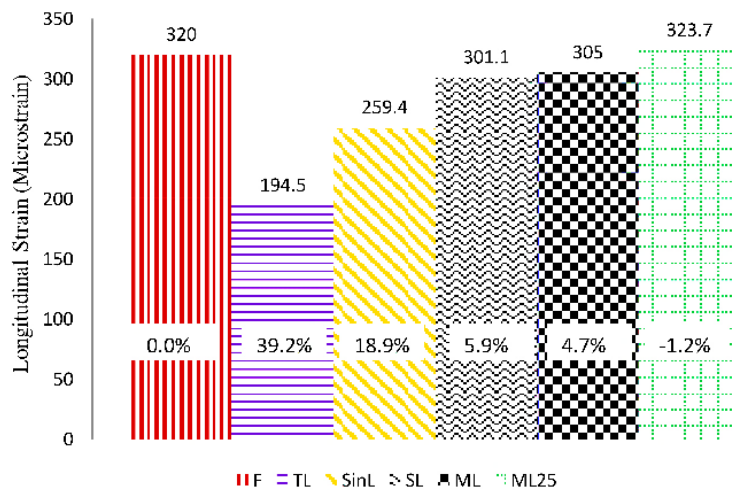
اتصال بین لایه اساس و زیراساس و همچنین اتصال بین لایه زیراساس و خاک بستر از نوع اتصال کامل^۴ در نظر گرفته شده است. اما بین لایه آسفالتی و لایه اساس، تغییر شکل قابل توجه بوده، لذا بر اساس نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم و به کمک مدول K، اندود نفوذی مطابق با واقعیت در آباکوس مدل شده است. شکل ۷، مدل ساخته شده در محیط برنامه آباکوس را نشان می دهد.



شکل ۷- مدل ساخته شده در محیط برنامه آباکوس

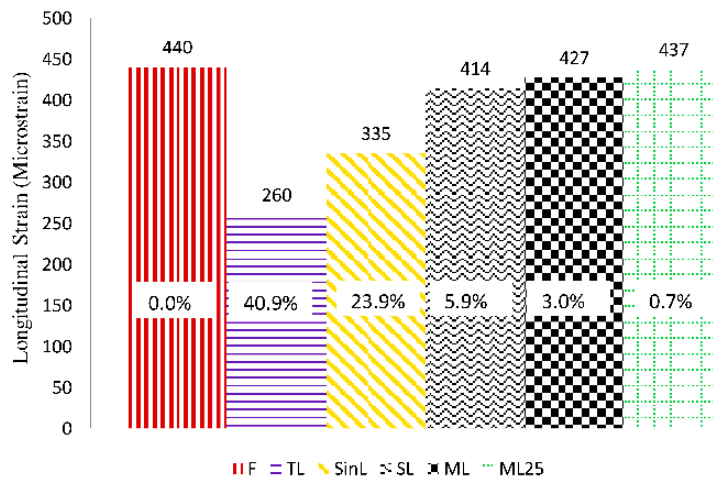
۵- نتایج آنالیز انواع حالت های بارگذاری

با در نظر گرفتن آنچه در قسمت مدل سازی گفته شد و اعمال بارهای مختلف که معرفی شدند، کرنش طولی ناشی از هر یک از حالت های بارگذاری مختلف در دو حالت اتصال خوب و اتصال ضعیف محاسبه و با نتایج میدانی مقایسه شده است (شکل ۸ و ۹). اعداد نوشته شده روی هر یک از نمودارها، مقدار خطای هر بارگذاری را نشان می دهد. نماد هر یک از حالت های بارگذاری بدین ترتیب است: بارگذاری میدانی F، بار لحظه ای TL، بار نیم سینوسی SinL، بار استاتیکی SL، بار متحرک ML، بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی ML25.



شکل ۸- مقایسه کرنش طولی حاصل از نتایج آنالیز انواع بارگذاری در حالت اتصال خوب

^۴ Full Bond



شکل ۹- مقایسه کرنش طولی حاصل از نتایج آنالیز انواع بارگذاری در حالت اتصال ضعیف

۶- نتیجه گیری

بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی به نتایج میدانی [۱۱] بسیار نزدیک است و حدود ۰/۷ الی ۱/۲ درصد خطا دارد. بار متحرک با ۳ الی ۴/۷ درصد و بار استاتیکی با ۵/۹ درصد خطا به نتایج میدانی نسبتاً نزدیک هستند. اگرچه بار استاتیکی نسبت به بار متحرک و بار متحرک با ۲۵ درصد همپوشانی خطای بیشتری دارد، اما مدل کردن بار استاتیکی بسیار ساده تر بوده و زمان کمتری برای انجام آنالیز نیاز دارد. بار لحظه‌ای و بار نیم سینوسی خطای بالایی دارند.

۷- مراجع

- Collop, A. C., Sutanto, M. H., Airey, G. D., & Elliott, R. C. (2009), "Shear Bond Strength Between Asphalt Layers for Laboratory Prepared Samples and Field Cores." *Construction and Building Materials* 23.6: 2251-2258.
- Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Wang, H., & Leng, Z. (2012), "Characterisation of Interface Bonding Between Hot-mix Asphalt Overlay and Concrete Pavements: Modelling and in-situ Response to Accelerated Loading." *International Journal of Pavement Engineering* 13.2: 181-196.
- Mohammad, L., Raqib, M., & Huang, B. (2002), "Influence of Asphalt Tack Coat Materials on Interface Shear Strength." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1789: 56-65.
- Mohammad, L. N., Hassan, M., & Patel, N. (2011), "Effects of Shear Bond Characteristics of Tack Coats on Pavement Performance at the Interface." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2209: 1-8
- Huang, W., Lv, Q., & Tian, J. (2015), "Effects of Tack Coat Type and Surface Characteristics on Interface Bond Strength." *New Frontiers in Road and Airport Engineering*. 25-36.
- Li, S., Huang, Y., & Liu, Z. H. (2016), "Experimental Evaluation of Asphalt Material for Interlayer in Rigid-flexible Composite Pavement." *Construction and Building Materials* 102: 699-705.
- Kim, H., Arraigada, M., Raab, C., & Partl, M. N. (2010), "Numerical and Experimental Analysis for the Interlayer Behavior of Double-layered Asphalt Pavement Specimens." *Journal of materials in civil Engineering* 23.1: 12-20.
- Destrée, A., De Visscher, J., Piérard, N., & Vanelstraete, A. (2016), "Field Study to Investigate the Impact of Conditions of Application of Tack Coats on the Interlayer Bond Strength." *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*. Springer, Dordrecht.

9. Al-Qadi, I. L., & Wang, H. (2009), "Full-depth Pavement Responses under Various Tire Configurations: Accelerated Pavement Testing and Finite Element Modeling." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 78: 721-760.
10. Huang, Huang, Y. H. (2004) *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, NJ, 2nd edition.
11. Chun, S., Kim, K., Greene, J., & Choubane, B. (2015), "Evaluation of Interlayer Bonding Condition on Structural Response Characteristics of Asphalt Pavement Using Finite Element Analysis and Full-scale Field Tests." *Construction and Building Materials* 96: 307-318.
12. Williamson, M. J. (2015) "Finite Element Analysis of Hot-mix Asphalt Layer Interface Bonding". Kansas State University.
13. Huang, C. W., Abu Al-Rub, R. K., Masad, E. A., & Little, D. N. (2010), "Three-dimensional Simulations of Asphalt Pavement Permanent Deformation Using a Nonlinear Viscoelastic and VY. H. (1993), "Pavement Analysis and Design".iscoplastic Model" *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(1), 56-68.