

یادداشت پژوهشی

بررسی تاثیر دما و سرعت بار متحرک بر پاسخ روسازی انعطاف پذیر با رفتار ویسکوالاستیک با استفاده از مدل ۳ بعدی اجزای محدود

فاطمه نجفی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

محمود ملکوتی علون آبادی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

میثم سروش، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوا فضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

عبدالرضا فاضلی، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

E-mail: malakooti@pgu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۶

چکیده

این مقاله اهمیت استفاده از مدل شبیه سازی سه بعدی اجزای محدود را به منظور محاسبه پاسخ روسازی انعطاف پذیر با رفتار ویسکوالاستیک تحت بارگذاری متحرک با سرعت های متفاوت و در دماهای مختلف بارگذاری نشان می دهد. مدل سه بعدی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس ساخته شد. در مدل شبیه سازی شده، بار متحرک به صورت بارهای تکه ای در گره های متوالی در طول مسیر حرکت با توجه به سرعت حرکت بار در نظر گرفته شده است. به منظور به حداقل رساندن تاثیر لایه های مدل روسازی بر دقت نتایج از مرزهای خاموش استفاده شده است. برای شبیه سازی مرزهای خاموش از مش های بی نهایت در مرزهای بیرونی مدل استفاده شده است. رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالتی نیز به صورت مدل تعمیم یافته ماکسول در قالب سری پرونی لحاظ شده است. ابتدا دقت مدل شبیه سازی شده آباکوس در این پژوهش با استفاده از مقاله Chen و همکاران که یک روسازی ویسکوالاستیک چندلایه را به روش تحلیلی مورد مطالعه قرار داده است اعتبارسنجی شده و سپس پاسخ روسازی انعطاف پذیر تحت سرعت های متفاوت وسیله نقلیه در حال حرکت و در دماهای متفاوت بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که افزایش دما و کاهش سرعت باعث افزایش پاسخ روسازی مطالعه شده می گردد. همچنین نتایج تحلیل در امتداد مسیر بارگذاری نشان داد که کرنش های طولی به صورت کششی و کرنش های عرضی هم به صورت کششی و هم به صورت فشاری می تواند ظاهر شود.

واژه های کلیدی: سرعت بار متحرک، دما، روسازی انعطاف پذیر، اجزا محدود، رفتار ویسکوالاستیک

۱. مقدمه

در روش‌های جدید طراحی روسازی به خصوص روش‌های مکانیستیک، نیاز است که به کمک روابط تجربی، خرابی‌های ناشی از ترک خوردگی و خستگی با استفاده از پاسخهای محاسبه شده روسازی تحت بارگذاری ناشی از وسیله نقلیه تخمین زده شوند. بنابراین، محاسبه پاسخ روسازی راه و فرودگاه تحت بارگذاری ناشی از وسایل نقلیه در حال حرکت از مسائل حائز اهمیت در طرح روسازی است. در ابتدا ساخت روسازی جاده‌ها عمدتاً از طریق تجربی صورت می‌گرفت و بر پایه قضاوت مهندسین راه بود [Yoder and Witczak, 1975]. تا سال ۱۹۴۰ میلادی هیچ مرجع قابل اطمینانی برای طراحی ضخامت روسازی‌های انعطاف‌پذیر وجود نداشت. با معرفی سیستم‌های طبقه‌بندی خاک مانند AASHTO اولین قدم برای طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر برداشته شد. با توجه به اینکه روند ترافیک در بزرگراه‌ها از لحاظ حجم و وزن مسیرهای عبور و مرور همواره رو به افزایش است و همچنین از طریق معرفی روش‌های تحلیلی برای طراحی روسازی، روش‌های آزمایشگاهی بتدریج جایگزین تکنیک‌های تجربی شدند [Yang, 1972]. از زمانی که حل الاستیک لایه‌ای برای تحلیل روسازی‌های انعطاف‌پذیر توسعه داده شد، به طور گسترده مورد توجه مهندسین و طراحان روسازی راه قرار گرفت. در مدلهایی که از این طریق برای تحلیل و طراحی استفاده می‌شوند، بعضاً ساده‌سازی‌هایی مانند فرض رفتار الاستیک مصالح صورت می‌گیرد. یکی از نخستین راه‌حل‌های تحلیلی یک‌لایه، روش بوسینسک^۱ در سال ۱۸۸۵ بود که رابطه‌ای را برای اندازه تنش، کرنش و تغییر مکان در یک سازه یک‌لایه همگن، همسانگرد و با رفتار الاستیک خطی به دست آورد. تئوری الاستیک لایه‌ای برمیست^۲، نخستین راه‌حل برای سازه‌های دولایه و سه‌لایه است که در سال‌های ۱۹۴۳ و ۱۹۴۵ ارائه شده و همچنین برای نخستین بار در تحلیل روسازی، نظریه‌های مکانیک محیط‌های پیوسته به کار گرفته شده است [Zafir, Siddharthan, Sebaaly, 1994]. از

محدودیت‌های اساسی تئوری الاستیک لایه‌ای، می‌توان به در نظر گرفتن مصالح مخلوط آسفالتی گرم (HMA)^۳ به صورت مصالح الاستیک و همچنین در نظر گرفتن بارگذاری دایره‌ای به صورت استاتیکی اشاره کرد که هر دو مورد مذکور باعث ناکارآمدی تئوری گفته شده می‌شود و پاسخ‌های حاصل از این تئوری با پاسخ‌های واقعی مطابقت ندارد. قیر مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی یک ماده ویسکوز بوده و اختلاط آن با مصالح سنگی منجر به مخلوط آسفالتی با رفتار ویسکوالاستیک می‌شود. بنابراین، در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی در تحلیل پاسخ روسازی بسیار حائز اهمیت است. در سال ۱۹۶۰ میلادی، در پژوهش صورت گرفته توسط سکور^۴ و مونیس‌میت^۵ از تئوری ویسکوالاستیسیته برای پیش‌بینی رفتار نمونه بتن آسفالتی در آزمایش فشاری سه‌محوری استفاده شد و محققین دریافتند که فرض رفتار الاستیک برای مصالح آسفالتی، فرضی با دقت کافی نیست [Secor and Monismith, 1961]. مشکل اساسی در تحلیل سازه‌های با رفتار ویسکوالاستیک این است که پاسخ مکانیکی در هر زمان، وابسته به تمام پاسخ‌های تنش و کرنش قبلی است و همین مسئله باعث پیچیده‌تر شدن تحلیل می‌شود. برای فائق آمدن بر این مشکل، محققین راه‌حل‌های تحلیلی و عددی متفاوتی را پیشنهاد کرده‌اند [Ameri, Malakouti, Malekzadeh, 2014; M Malakouti, M Ameri, P Malekzadeh, 2014; Mahmoud Malakouti, Mahmoud Ameri, Parviz Malekzadeh, 2014; Eslaminia, Guddati, 2016; Kazemi, Sebaaly, Siddharthan, Hajj, Hand, Ahsanuzzaman, 2017; Liu, Wang, Oeser, 2017; Judycki, 2018; Rameshkhah, Malakouti; Olounabadi, Malekzadeh, Meraji, 2018 Malakouti Olounabadi, Ramesh Khah, Malekzadeh, Meraji, 2018;]. استفاده از حل تحلیلی برای مسائلی که شرایط مرزی نامناسب دارند و سازه نیز به صورت لایه‌ای باشد، ممکن است عملی نباشد. بنابراین، برای حل اینگونه مسائل می‌بایست از روش‌های عددی استفاده کرد.

تحقیقات گسترده‌ای به منظور بررسی تاثیر دما بر پاسخ روسازی صورت گرفته است که در این بین می‌توان به مقالات [Alkasawneh, Pan, Han, Zhu, Green, 2007; Wang, 2011; Tautou, Picoux, Petit, 2017; Huang 2017; Maadani and Halim, 2017; Bodin, Chupin and Denneman, 2016] اشاره کرد. در این پژوهش، به منظور بررسی پاسخ روسازی با رفتار ویسکوالاستیک تحت بار متحرک با اثر توام سرعت و دمای بارگذاری متفاوت، مدل سه بعدی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. در مدل شبیه سازی شده، بار متحرک به صورت بارهای تکه‌ای در گره‌های متوالی در طول مسیر حرکت با توجه به سرعت حرکت بار، تعریف شده است. سرانجام پاسخ روسازی تحت سرعت‌های متفاوت وسیله نقلیه در حال حرکت و در دماهای متفاوت بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفته است.

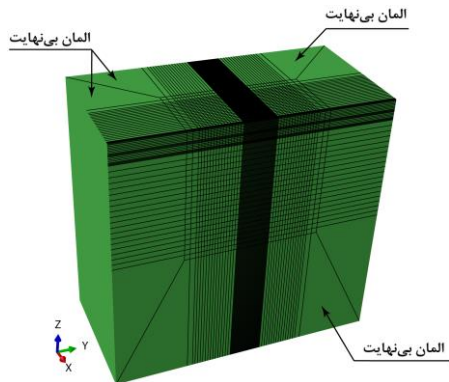
۲. روش تحقیق

به منظور بررسی پاسخ روسازی تحت بار متحرک وسیله نقلیه با سرعت و دمای متفاوت بارگذاری، مدل سه بعدی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس توسعه داده شد. در سال‌های اخیر محققین زیادی از مدل سه بعدی اجزای محدود برای تحلیل روسازی استفاده کرده‌اند [Kuo, Chou, 2004; Kim, 2007; Deng et al., 2018]. از مزیت‌های استفاده از مدل سه بعدی اجزای محدود می‌توان به در نظر گرفتن رفتار پیچیده مصالح (غیر خطی، غیر ایزوتروپیک، ویسکوالاستیک خطی و غیر خطی)، در نظر گرفتن شرایط پیچیده بارگذاری (بارگذاری با سطوح متفاوت، بار متحرک، بارگذاری غیر یکنواخت) و شرایط مرزی واقعی‌تر نسبت به روش اجزای محدود دو بعدی و سایر روش‌های تحلیلی اشاره نمود.

۳. هندسه مدل

شبیه سازی ابعاد، مش‌بندی و شرایط مرزی مدل در تحلیل اجزا محدود عواملی هستند که در خلال شبیه سازی بر روی دقت

بر اساس روش‌های عددی توسعه داده شده، نرم افزارهای تجاری متعددی نظیر آباکوس^۶، انسیس^۷ و کن‌لایر^۸ قادر به تحلیل سازه‌های با رفتار ویسکوالاستیک هستند توسعه داده شده است. روش اجزای محدود به طور گسترده برای شبیه سازی و تحلیل مسائل مرتبط با روسازی استفاده شده است. تا کنون تحقیقات زیادی بر روی سازه‌های روسازی انجام گرفته است که به عنوان مثال می‌توان به مقالات [White, Zaghoul, Anderton, Smith, 1997; Helwany, Dyer, Leidy, 1998; Kuo, Chou, 2004; Sarkar, 2016; Feng, Li, Chen, Chen, 2017; Yucheng Huang, 2017; Han, Zhu, Hu, Li, 2018] اشاره کرد. محققین زیادی از نرم افزار آباکوس که مبتنی بر روش اجزای محدود است، به منظور پژوهش بر روی روسازی با رفتار ویسکوالاستیک استفاده نموده‌اند که می‌توان به تحقیقات [Zafir, Siddharthan, Sebaaly, 1994; I. L. Al-Qadi, Wang, Yoo, Dessouky, 2008; I. Al-Qadi, Wang, Tutumluer, 2010; Sarkar, 2016; Bodin, Chupin, Denneman, 2017; Deng, Luo, Gu, Zhang, Lytton, 2018] اشاره نمود. سرعت وسیله نقلیه در حال حرکت مقادیر پاسخ روسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. محققین زیادی تاثیر سرعت وسیله نقلیه را بر روی پاسخ روسازی مورد مطالعه قرار داده‌اند [Lv, Tian, Liu, 2010; Ameri, Malakouti, Malekzadeh, 2014; M Malakouti, M Ameri, P Malekzadeh, 2014; Mahmoud Malakouti, Mahmoud Ameri, Parviz Malekzadeh, 2014; Eslaminia, Guddati, 2016; Sarkar, 2016; Rameshkhah et al., 2018; Malakouti Olounabadi et al., 2018]. هرچه سرعت وسیله نقلیه بیشتر باشد رفتار لایه آسفالتی به رفتار الاستیک نزدیک شده و رفتار روسازی در سرعت‌های پایین وسایل نقلیه بیشتر به رفتار ویسکوالاستیک نزدیک است. برخلاف مصالح الاستیک، رفتار مخلوط آسفالتی به شدت وابسته به دما نیز است. این ماده، در دمای پایین، شبیه به مصالح الاستیک و در دمای بالا، شبیه به یک ماده ویسکوز رفتار می‌کند. در دمای متوسط، این ماده، شبیه به مصالح ویسکوالاستیک رفتار می‌کند. تا کنون



شکل ۲. روسازی مدل شده در نرم افزار آباکوس به همراه مش‌های ایجاد شده

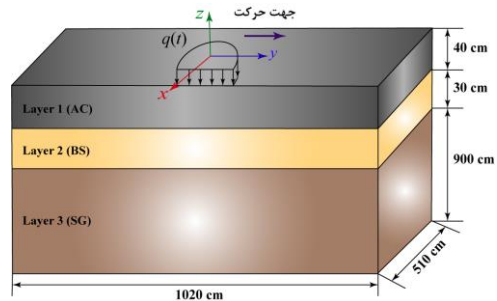
۴. نوع المان‌ها و الگوی مش‌بندی

به دلیل اهمیت مش‌بندی مدل در دستیابی به پاسخ‌های دقیق‌تر، مش‌بندی‌های متفاوتی در خلال شبیه‌سازی به منظور انتخاب بهترین مش مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۲ مش‌بندی مدل را نشان می‌دهد در این شکل مش‌ها از نوع مکعب ۸ گره‌ای (C3D8R)^۸ تعریف شدند. در این تحلیل ابعاد مش انتخابی در محل نزدیک به بارگذاری ریز و با دور شدن از محل بار افزایش می‌یابد. بر این اساس، در مسیر حرکت چرخ ابعاد مش‌ها در جهت طولی و عرضی $2/50\text{ cm}$ برای تمام لایه‌ها انتخاب شدند. این مدل از ۸۶۶۸۸ المان از نوع C3D8R و ۷۷۳۷ المان از نوع CIN3D8^{۱۲} و ۱۰۱۴۶۰ گره تشکیل شده است. تماس بین لایه‌ها بصورت اتصال کامل^{۱۳} در مدلسازی در نظر گرفته شده است. از مش بی‌نهایت (CIN3D8) در دامنه بیرونی و از مش (C3D8R) برای المان‌های درونی استفاده شده است.

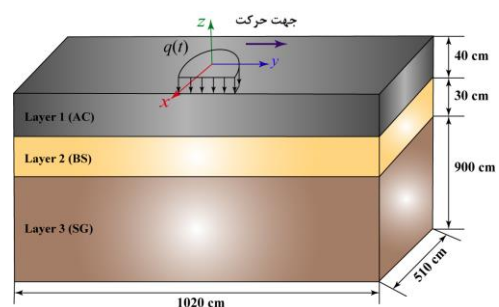
۵. بارگذاری و شرایط مرزی

در این تحقیق بارگذاری وسیله نقلیه به صورت بار متحرک با شدت ثابت در نظر گرفته شده است. در نرم افزار آباکوس یک بار متحرک را می‌توان به صورت بارهای تکه‌ای در گره‌های متوالی در طول مسیر تعریف نمود (اعمال بار به صورت سطح به سطح)

نتایج تاثیر گذار هستند. در این تحقیق، روسازی به صورت سه لایه^{۱۰} و لایه BS^۹)، لایه اساس (AC) لایه شامل لایه بتن آسفالتی (SG) در نظر گرفته شده است (SG بستر)

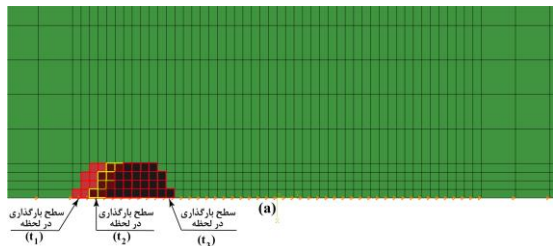


شکل ۱) بر اساس مطالعات پیشین، معمولاً مرز طولی حدود ۱۲ تا ۲۰ برابر شعاع سطح بارگذاری و مرز قائم نیز ۵۰ برابر شعاع سطح بارگذاری در نظر گرفته می‌شود [Duncan, Monismith, Wilson, 1968; I. Al-Qadi, Wang, Tutumluer, 2010; de Araújo, Soares, de Holanda, Parente, Evangelista, 2010]. در تحقیق حاضر، ابعاد مدل در جهت بار ترافیک (در جهت طولی y) 1020 cm و در جهت عمود بر بار ترافیک (در جهت عرضی x) 510 cm و در عمق (z) 970 cm در نظر گرفته شده است. این ابعاد اثرات ناشی از لبه‌ها را به حداقل می‌رساند. ضخامت لایه AC برابر 40 cm ، لایه BS برابر 30 cm و لایه SG برابر 900 cm در نظر گرفته شدند. با در نظر گرفتن شرایط تقارن در راستای حرکت، نصف روسازی مطابق با شکل ۲ مدل شده است. به دلیل اعمال بار دایره‌ای، سطح بارگذاری در آباکوس نیز به صورت نیم دایره و با شعاع 10 cm با فشار باد لاستیک 690 kPa مدل شده است.



شکل ۱. مدل شماتیک روسازی بررسی شده در این مقاله با سه لایه

خطی هشت گره ای (CIN3D8) استفاده شده است. المان های نامحدود توابع شکل مخصوصی برای هندسه در مرزهای نامحدود دارند و مختصات به سمت بی نهایت میل می کند، بنابراین، جابه جایی صفر دارند.



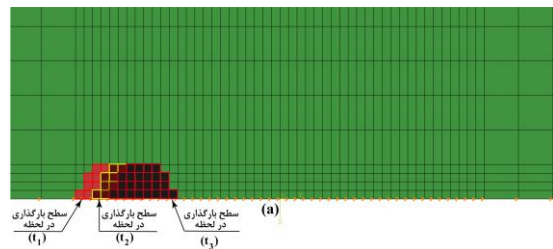
شکل ۳. بارگذاری سطح روسازی به صورت متحرک در آباکوس در سه لحظه متوالی t_1 ، t_2 و t_3

۶. مشخصات مصالح

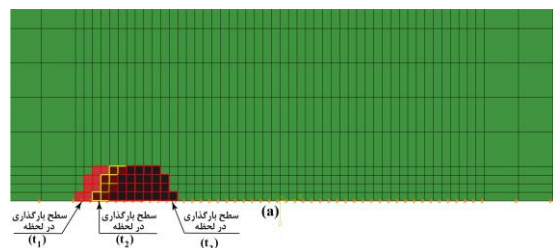
مخلوط های آسفالتی محدوده وسیعی از رفتار وابسته به زمان و دما را از خود نشان می دهند. در نظر گرفتن رفتار الاستیک برای لایه رویه، ساده ترین روش برای تحلیل روسازی ها است. رفتار لایه رویه فقط برای دمای پایین و سرعت بالای بارگذاری نزدیک به رفتار الاستیک است. بنابراین، در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک برای لایه آسفالتی، پاسخ های دقیق تر را برای پاسخ روسازی فراهم می کند. در این تحقیق، رفتار ویسکوالاستیک برای مصالح لایه رویه در نظر گرفته شده است. قانون هوک برای رفتار الاستیک خطی مصالح اساس و ساب گرید به کار گرفته شده است. برای حالت رفتار ویسکوالاستیک خطی مصالح آسفالتی رویه از مدل ماکسول^{۱۸} تعمیم یافته در قالب سری^{۱۹} پرونی استفاده شده است (شکل ۴) که در این شکل E و C به ترتیب مدول الاستیسیته و ویسکوزیته المان های سری پرونی می باشند. مقادیر سری پرونی را هم می توان به صورت زمانی و هم در دامنه فرکانس تعریف نمود. در نرم افزار آباکوس رابطه سری پرونی را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$G(t) = G_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n G_i \left(1 - e^{-t/\tau_i} \right) \right) \quad (1)$$

$$K(t) = K_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n K_i \left(1 - e^{-t/\tau_i} \right) \right) \quad (2)$$



شکل ۳ مکان بار وارده را در سه لحظه متفاوت و متوالی بر روی المان ها نشان می دهد. همانطور که از



شکل ۳ مشاهده می شود با گذشت زمان، مکان بار وارده تغییر می کند. به منظور تعریف شرایط مرزی و ایجاد مرزهای خاموش در مرزهای بیرونی از المان های بی نهایت استفاده شده است. باید اشاره گردد که جابه جایی نقاط قرار گرفته در مرزی که محور تقارن مدل است در جهت عمود بر مش بسته شده اند.

در تحلیل اجزا محدود چندین عامل از قبیل شبیه سازی رفتار ماده، شرایط مرزی مدل و اندازه المان ها وجود دارد که بر روی دقت نتایج تاثیر می گذارند. در یک مدل با هندسه مشخص مرزها نباید روی پاسخ های مدل تاثیر بگذارند. مخصوصا در تحلیل های دینامیکی مرزها باید بازتاب انرژی موج های برشی را که به مدل اجزا محدود برمی گرداند را به حداقل برسانند. این مرزهایی که موج ها را بر نمی گردانند مرزهای خاموش^{۱۴}، مرزهای جذب کننده^{۱۵}، مرزهای انتقالی^{۱۶} یا مرزهای ویسکوز دمپینگ^{۱۷} نامیده می شوند. یک ارائه خوب راجع به این مرزها توسط Mulder, 1997 و Wolf and Hall, 1988 فراهم شده است. آباکوس می تواند یک مرز خاموش را با استفاده از المان های نامحدود خطی هشت گره ای (CIN3D8) فراهم کند [Abaqus, 2008]. با در نظر گرفتن این واقعیت که اعمال شرایط مرزی صحیح در مدل در دستیابی به پاسخ های دقیق تر نقش مهمی ایفا می کند، در مرزهای بیرونی از المان های نامحدود

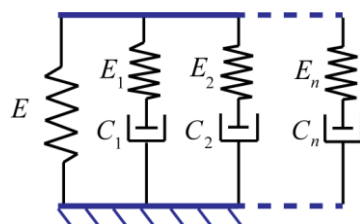
شکل ۴. مدل ماکسول تعمیم یافته در قالب سری پرونی

جدول ۱. مشخصات سازه‌ای سیستم روسازی [Al-Qadi,

Wang, Yoo, Dessouky, 2008]

نام لایه	نسبت پواسن (ν)	مدول الاستیسیته (E) (MPa)
AC	۰/۳۵	ویسکوالاستیک (جدول ۲)
BS	۰/۴	۲۶۰
SG	۰/۴۵	۵۰

در رابطه (۱) و (۲)، $G(t)$ مدول برشی، $K(t)$ مدول حجمی مصالح ویسکوالاستیک، G_0 ، K_0 ، G_i ، K_i پارامترهای بی بعد سری پرونی، τ_i پارامتر سری پرونی بر حسب زمان و t زمان استراحت و n تعداد المان‌های سری پرونی است. مشخصات سازه‌ای سیستم روسازی در جدول ۱ و پارامترهای سری پرونی لایه رویه در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد در جدول ۲ نشان داده شده است.



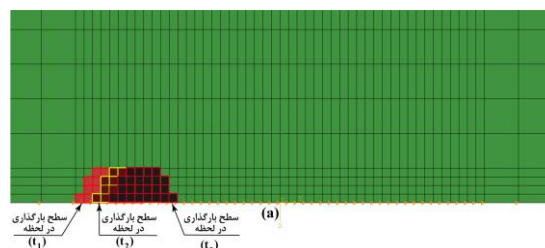
جدول ۲. پارامترهای سری پرونی [Yoo, Al-Qadi, 2007]

۵ °C			۲۵ °C			۴۰ °C			دما
G	K	τ	G	K	τ	G	K	τ	ردیف
۰/۷۲۲۶۵	۰/۷۲۲۶۵	۱۰ ^۰	۰/۷۷۴۶۵	۰/۷۷۴۷۱	۰/۰۱	۰/۶۴۱۰۷	۰/۶۴۱۰۷	۱۰ ^{-۴}	۱
۰/۲۱۰۴۵	۰/۲۱۰۴۵	۱۰ ^۱	۰/۱۶۴۹۸	۰/۱۶۴۹۳	۰/۱	۰/۲۷۵۵۴	۰/۲۷۵۶۶	۱۰ ^{-۳}	۲
۰/۰۴۶۰۹	۰/۰۴۶۱	۱۰ ^۲	۰/۰۳۹۷۹	۰/۰۳۹۷۵	۱۰ ^۰	۰/۰۴۱۴۴	۰/۰۴۱۴۸	۱۰ ^{-۲}	۳
۰/۰۱۴۸۵	۰/۰۱۴۸۵	۱۰ ^۳	۰/۰۱۳۸۳	۰/۰۱۳۸۲	۱۰ ^۱	۰/۰۱۶۵۴	۰/۰۱۶۵۴	۱۰ ^{-۱}	۴
۰/۰۰۳۵۴	۰/۰۰۳۵۴	۱۰ ^۴	۰/۰۰۲۷۴	۰/۰۰۲۷۳	۱۰ ^۲	۰/۰۱۳۰۴	۰/۰۱۳۰۷	۱۰ ^۰	۵
۰/۰۰۰۷۸	۰/۰۰۰۷۸	۱۰ ^۵	۰/۰۰۱۷۱	۰/۰۰۱۷۱	۱۰ ^۳	۰/۰۱۱۲۸	۰/۰۱۱۲۸	۱۰ ^۱	۶
۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۹۸	۱۰ ^۶	۰/۰۰۲۰۴	۰/۰۰۲۰۴	۱۰ ^۴	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۱۶	۱۰ ^۲	۷
۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۵۸	۱۰ ^۷	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۱۰ ^۵				۸
۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۱۰ ^۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۱۰ ^۶				۹
پارامترهای الاستیک									
۸۹۳۰			۴۷۵۰			۱۷۹۰			مدول الاستیسیته (E) (MPa)
۰/۲۳			۰/۳			۰/۳۵			نسبت پواسن (ν)

۷. روش حل

پس از آن که مدل شبیه سازی شده در آباکوس ایجاد شد و ویژگی های مربوط به نواحی، سطح مقطع و نحوه آرایش و قرارگیری قطعات کنار یکدیگر مشخص شد، گام بعدی، تعیین حلگر مناسب برای حل است. با استفاده از ماژول Step می توان نوع تحلیل (به عبارت بهتر حلگر مناسب) خود را مشخص نمود. همچنین اگر در یک مسئله چندین نوع بارگذاری به ترتیب انجام شود، می توان برای هر بارگذاری یک Step جداگانه تعریف کرد. باید اشاره شود که Step ها در هر مرحله می توانند دارای حلگرهای متفاوتی باشند. به شکل خلاصه، تعیین گام زمانی مناسب برای آنالیز، انتخاب نوع حلگر مناسب، تعیین خروجی های مورد نظر از آنالیز مربوطه و تعیین پارامترهای آنالیز از جمله امکاناتی است که در ماژول Step نرم افزار آباکوس، می توان از آن استفاده کرد. یک آنالیز کامل می تواند دارای بیش از یک step باشد. به این نوع آنالیزها multi step analysis گفته می شود که در آن ها مجموعه ای از حل های منفرد به صورت پی در پی (sequential) انجام می گیرد. در این نوع تحلیل ها نتایج نهایی هر step به عنوان شرایط اولیه step بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. انتخاب step یا step های درست برای انجام آنالیز نیازمند داشتن فهم فیزیکی مناسب از مسئله و قابلیت های هر یک از step های آباکوس است.

در این مدل حاضر دو step تعریف شده است. در step اول بار چرخ به صورت شدت ثابت به روسازی وارد می شود سپس در step دوم بار ثابت شروع به حرکت می کند تا زمانیکه چرخ کل مسیر را طی کند همانند آنچه که در



شکل ۳ نشان داده شده است. زمان مربوط به تحلیل step دوم

بستگی به سرعت و طول مسیر بارگذاری دارد.

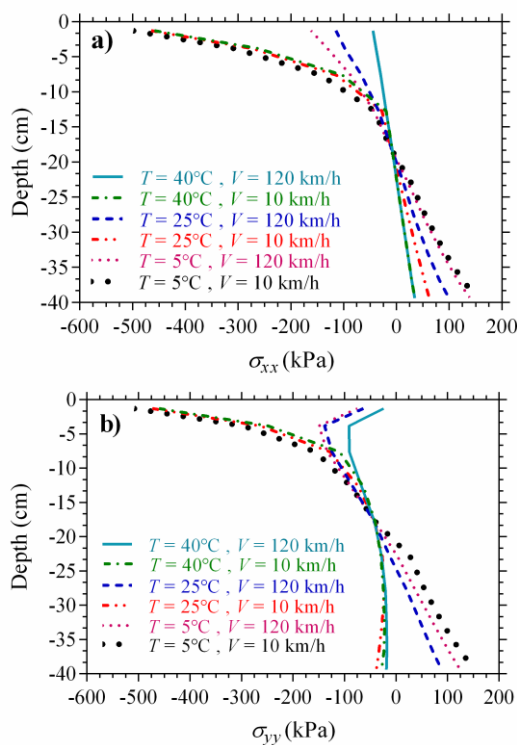
باید اشاره گردد که نرم افزار Abaqus روی کامپیوتری با 8Gbytes RAM و AMD phenome™ II X6 100T و 3.3GHZ CPU نصب شد و کامپیوتر تقریباً ۲ ساعت برای انجام هر تحلیل زمان می برد.

۸. صحت سنجی

در این قسمت به منظور اطمینان حاصل کردن از شرایط و نحوه مدل سازی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس، هندسه و شرایط شبیه سازی شده در این پژوهش شامل، خصوصیات الاستیک و ویسکوالاستیک لایه ها، نوع بارگذاری، فشار چرخ و سرعت بارگذاری، همگی مطابق با مدل شبیه سازی شده توسط [Chen, Pan, Norfolk, Wang, 2011] تعریف گردید و پس از تحلیل، نتایج دو مدل با یکدیگر مقایسه شد. خصوصیات لایه های روسازی تعریف شده در این قسمت در جدول ۱ آورده شده است. بعلاوه، سرعت بارگذاری برابر با ۱۰ km/h، فشار بارگذاری برابر با ۶۹۰ kPa و دما برابر با ۵ °C است. نتایج حاصل از این صحت سنجی برای جابه جایی قائم گره قرار گرفته روی سطح لایه آسفالتی در شروع و در مرکز مسیر بارگذاری برای دو مدل در شکل ۵ رسم شده است. در این شکل محور افقی مکان بار متحرک $y(t)$ را در لحظه t و در محور قائم جابه جایی گره ها در جهت z با W نشان داده شده است. همانطور که شکل ۵ نشان می دهد، نتایج حاصل از مدل شبیه سازی در این پژوهش با مدل شبیه سازی شده توسط [Chen, Pan, Norfolk, Wang, 2011] با دقت بسیار بالایی بر هم منطبق هستند.

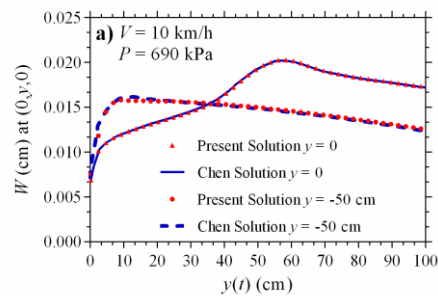
(σ_{xx}) در زیر لایه آسفالتی، تنش قائم (σ_{zz}) روی سطح لایه بستر (SG) و جابه‌جایی گره قرار گرفته در مرکز مسیر بارگذاری و روی لایه آسفالتی در جهت قائم (W) با گذشت زمان مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور درک اثرات ویسکوالاستیک بر سطح تنش در لایه آسفالتی (AC)، نتایج تحلیل برای تنش‌های طولی (σ_{yy}) و عرضی (σ_{xx}) در زیر سطح لایه آسفالتی در شکل ۶ رسم شده‌اند. نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش عمق در ضخامت لایه رویه تنش‌های افقی ماکزیمم طولی و عرضی کاهش می‌یابد. بطوریکه در اعماق بیشتر از ۱۵ cm این تنش‌های فشاری به تنش‌های کششی تبدیل می‌شوند. به ازای یک دمای خاص، افزایش سرعت باعث کاهش تنش‌های فشاری σ_{yy} و σ_{xx} و افزایش تنش‌های کششی σ_{yy} و σ_{xx} می‌گردد. به ازای یک سرعت مشخص، افزایش دما باعث کاهش تنش‌های فشاری σ_{xx} و σ_{yy} و افزایش تنش‌های کششی σ_{xx} و σ_{yy} می‌شود.



شکل ۶. توزیع تنش افقی ماکزیمم برای المان قرار گرفته در مرکز مسیر بارگذاری و در عمق لایه آسفالتی: (a) تنش عرضی

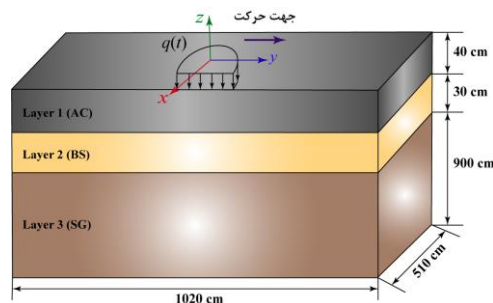
فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال یازدهم / شماره چهارم (۴۵) / تابستان ۱۳۹۹



شکل ۵. نتایج صحت سنجی مدل شبیه‌سازی شده در این پژوهش با مدل شبیه‌سازی شده توسط [Chen, Pan, Norfolk, Wang, 2011]

۹. نتایج و بحث

با استفاده از مدل شبیه‌سازی شده اجزای محدود و به منظور تشریح اثرات ویسکوالاستیک و رفتار وابسته به زمان و دمای لایه رویه، سیستم روسازی سه لایه نشان داده شده در



شکل ۱ و با مشخصات ویسکوالاستیک لایه رویه مطابق با

جدول ۱. مشخصات سازه‌ای سیستم روسازی [Al-Qadi, Wang, Yoo, Dessouky, 2008]

نام لایه	نسبت پواسن (ν)	مدول الاستیسیته (E) (MPa)
AC	۰/۳۵	ویسکوالاستیک (جدول ۲)
BS	۰/۴	۲۶۰
SG	۰/۴۵	۵۰

در نظر گرفته شد. پاسخ روسازی تحت بار متحرک دایره‌ای با سرعت‌های بارگذاری ۱۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت و در دماهای ۵°C، ۲۵°C و ۴۰°C مورد تحلیل قرار گرفت و تغییرات تنش طولی (σ_{yy}) در زیر لایه آسفالتی، تنش عرضی

ماکزیمم (b) تنش طولی ماکزیمم

۹-۱ بررسی تاثیر دما بر پاسخ روسازی

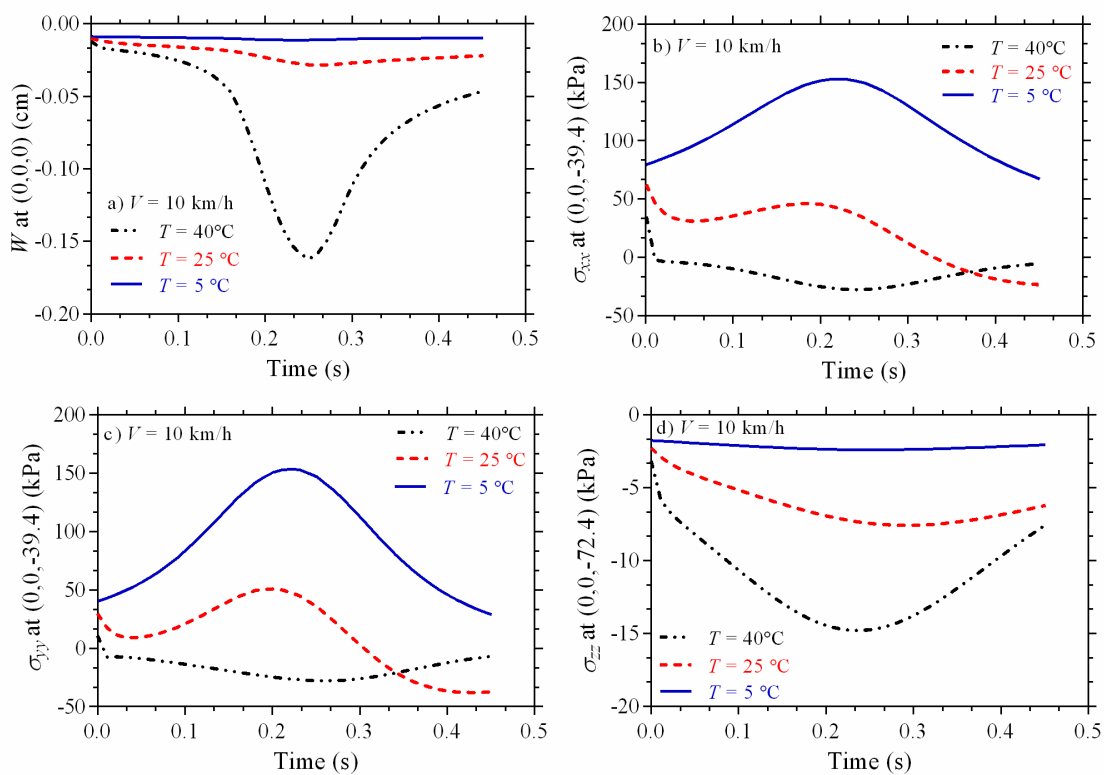
به منظور بررسی تاثیر دما و سرعت های متفاوت بر پارامترهای جابه جایی قائم (در سطح رویه)، تنش طولی (زیر لایه آسفالتی)، تنش عرضی (زیر لایه آسفالتی) و تنش قائم (روی بستر) مدل شبیه سازی شده برای حالت های مختلف دما و سرعت های مذکور مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تحلیل در شکل ۷ تا شکل ۱۰ نشان داده شده است.

نتایج شکل ۷ نشان می دهد که افزایش دما از ۵ به ۴۰ درجه سانتی گراد در سرعت پایین ۱۰ km/h باعث افزایش چشمگیر جابه جایی قائم گره قرار گرفته روی سطح لایه آسفالتی می شود. می توان بیان داشت که با افزایش دما، لایه آسفالتی رفتار ویسکوالاستیک بیشتری از خود نشان داده و منجر به افزایش جابه جایی قائم می شود. با افزایش دما از ۵ °C به ۴۰ °C جابه جایی ماکزیمم قائم گره قرار گرفته روی سطح لایه آسفالتی و در مرکز مسیر بارگذاری به ترتیب از ۰/۰۱ cm به ۰/۱۶ cm می رسد (شکل ۷a) بر عکس، با افزایش دما میزان تنش کششی برای المان قرار گرفته زیر سطح لایه آسفالت و در مرکز مسیر بارگذاری، نیز کاهش می یابد. به طور واضح تر، افزایش دما از ۵ °C به ۴۰ °C منجر به کاهش تنش کششی عرضی و طولی ماکزیمم (تقریباً برابر با ۱۷۲ kPa) می شود، بطوریکه، در دمای ۴۰ °C این تنش های کششی به تنش های فشاری تقریباً ۲۰ kPa تبدیل می گردد (شکل ۷) شکل ۷ نشان می دهد که افزایش دما باعث افزایش تنش فشاری قائم روی سطح لایه SG می گردد. در واقع، با افزایش دما از ۵ °C به ۴۰ °C میزان تنش فشاری ماکزیمم قائم از نزدیکی ۲ kPa به ۱۴ kPa می رسد. به عبارت دیگر، لایه AC در دمای پایین سخت تر شده و این منجر به ایجاد تنش کششی کمتر در زیر لایه آسفالتی می شود. برعکس، در سرعت کمتر و دمای بالاتر، لایه آسفالتی نرم تر شده و منجر به تنش کششی بیشتر در زیر لایه آسفالتی می شود. همانطور که

در شکل ۷ مشاهده می گردد با نزدیک شدن بار وسیله نقلیه به محل المان مورد نظر میزان پاسخ نیز افزایش می یابد و با دور شدن بار نیز کاهش در میزان این پاسخ ها اتفاق می افتد.

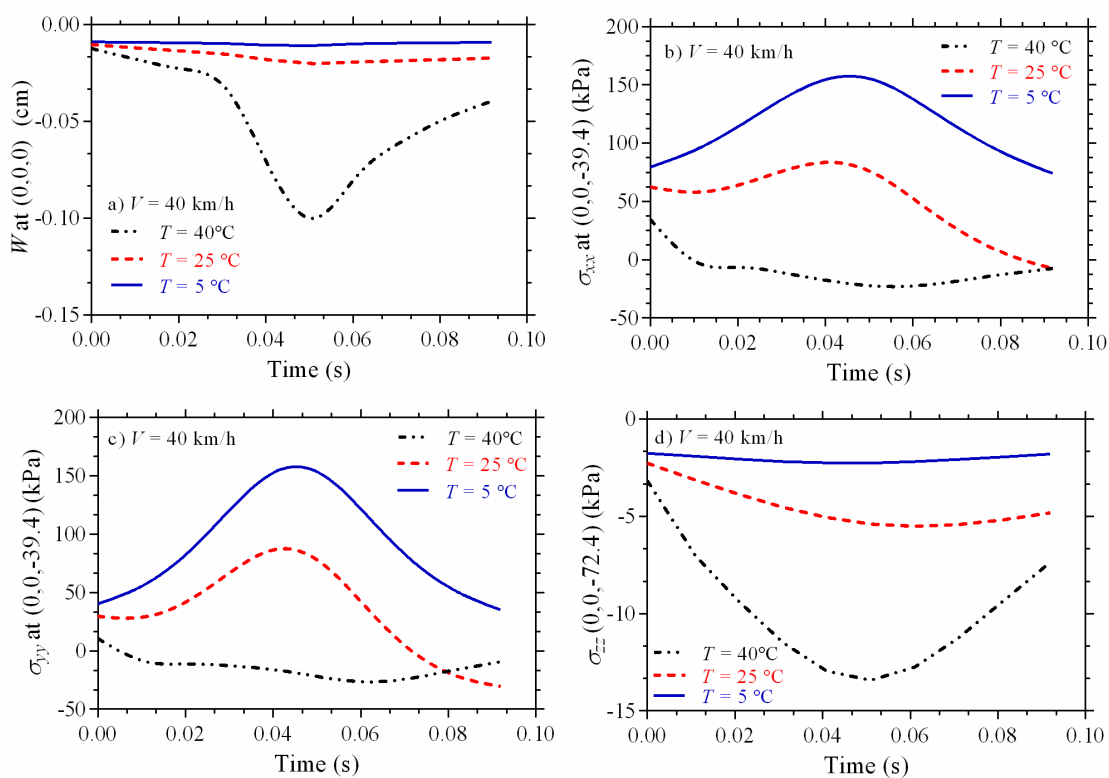
همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، افزایش دما همانند قبل باعث افزایش جابه جایی قائم گره مورد نظر می گردد. در سرعت ۴۰ km/h میزان جابه جایی قائم حداکثر برای دما ۵ °C، ۵ °C و ۲۵ °C به ترتیب برابر با ۰/۰۱ cm، ۰/۰۲ cm و ۰/۱ cm است. نتایج نشان داده شده در شکل ۸ بیانگر آن است که افزایش دما باعث کاهش تنش کششی افقی زیر سطح لایه آسفالتی می گردد. میزان ماکزیمم σ_{xy} در زیر سطح لایه آسفالتی با افزایش دما از ۵ °C به ۲۵ °C به میزان تقریباً ۵۰ درصد کاهش می یابد که کاهش کمتری نسبت به نتایج بدست آمده در سرعت ۱۰ km/h است. بعلاوه، افزایش دما باعث افزایش تنش قائم فشاری اعمال شده روی سطح لایه SG می گردد. بطوریکه، با افزایش دما از ۵ °C به ۴۰ °C منجر به افزایش میزان ماکزیمم σ_{zz} از ۱/۷ kPa به تقریباً ۱۴ kPa می گردد.

در سرعت ۸۰ km/h تاثیرات دما بر جابه جایی روی سطح لایه آسفالتی، تنش کششی زیر سطح لایه آسفالتی و تنش قائم روی لایه SG نیز همانند تاثیرات دما در سرعت های پایین تر است. با این تفاوت که میزان ماکزیمم مقادیر یاد شده در این سرعت کمتر از میزان ماکزیمم آن در سرعت های پایین تر (۴۰ km/h) و ۱۰ km/h است (شکل ۹) به عبارت دیگر، در سرعت ۸۰ km/h، افزایش جابه جایی ماکزیمم روی سطح لایه آسفالتی، به علت افزایش دما تا ۴۵ °C، به ۰/۰۶ cm محدود می گردد. در مقابل نیز کاهش تنش کششی در زیر سطح لایه آسفالتی حداکثر به میزان تقریباً ۵۰ درصد به علت افزایش دما از ۵ °C به ۲۵ °C است. که این درصد کاهش همان میزان کاهش کششی است که در سرعت ۴۰ km/h اتفاق می افتد. علاوه بر این، ماکزیمم تنش قائم روی سطح لایه SG، با افزایش دما تا نزدیکی ۱۴ kPa افزایش یافته که این مقدار به مقادیر بدست آمده به ازای سرعت های پایین تر نزدیک هست (شکل ۹)

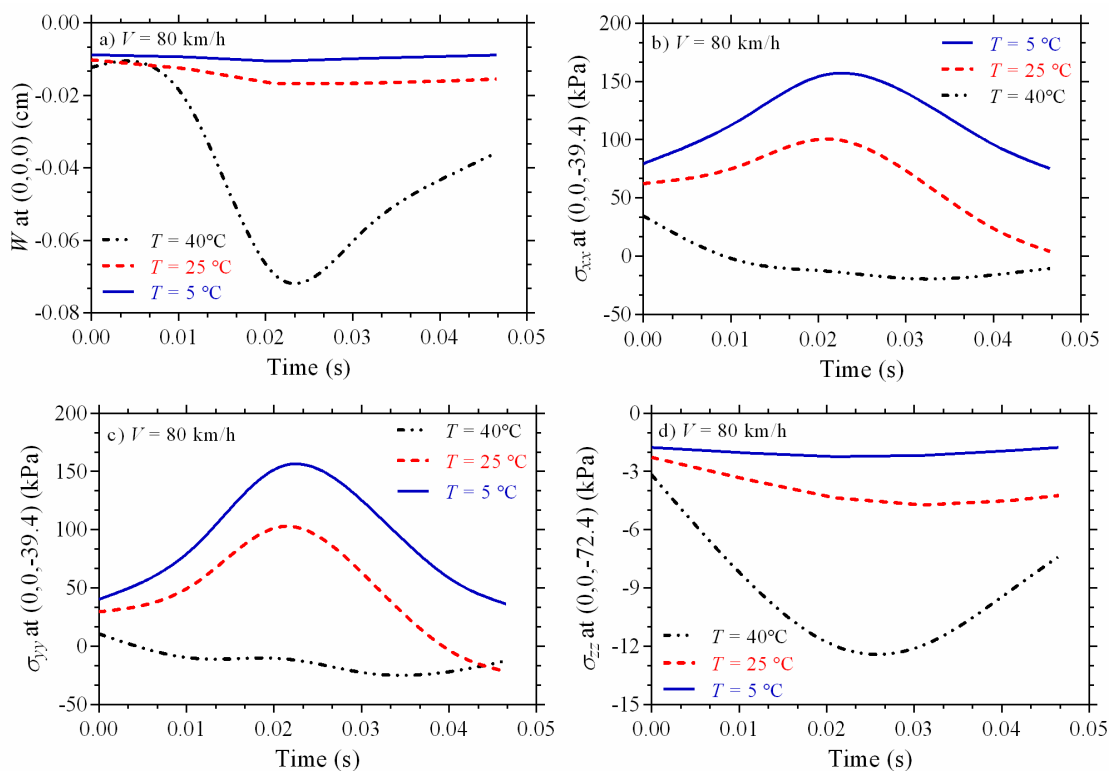


شکل ۷. تاثیر دما بر پاسخ روسازی به ازا سرعت ۱۰ km/h

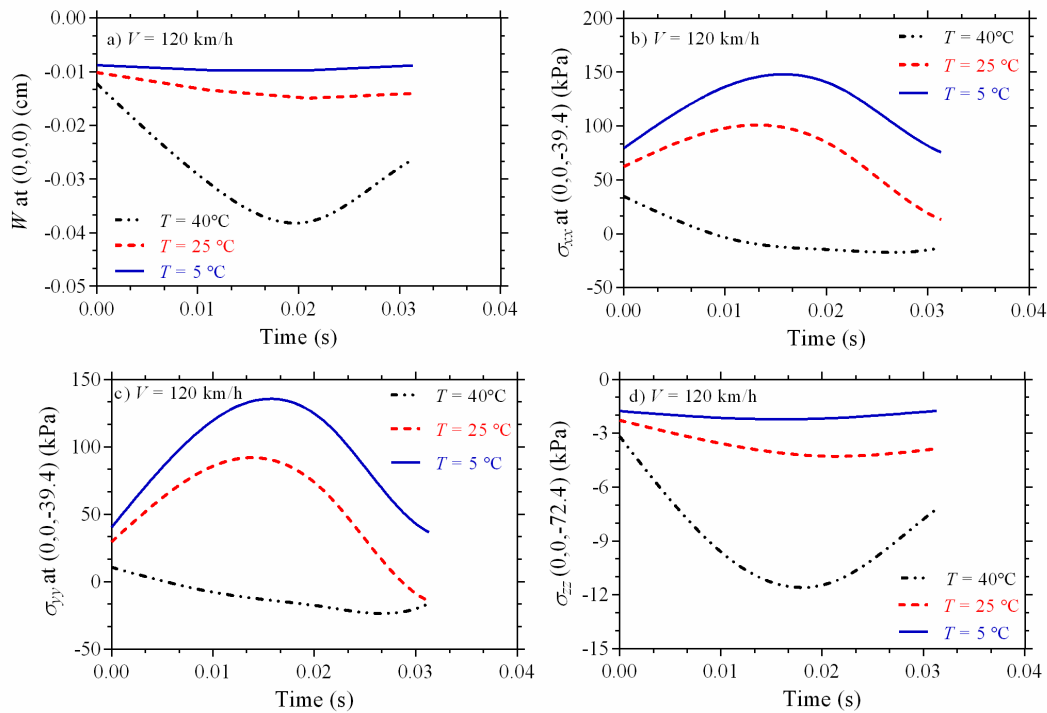
یادداشت پژوهشی: بررسی تاثیر دما و سرعت بار متحرک بر پاسخ روسازی انعطاف پذیر با رفتار...



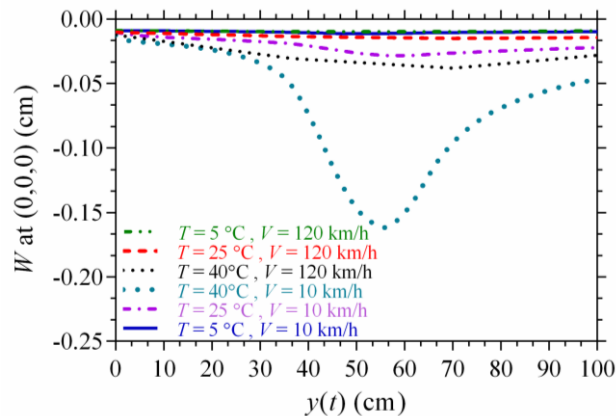
شکل ۸. تاثیر دما بر پاسخ روسازی به ازا سرعت ۴۰ km/h



شکل ۹. تاثیر دما بر پاسخ روسازی به ازا سرعت ۸۰ km/h



شکل ۱۰. تاثیر دما بر پاسخ روسازی به ازا سرعت ۱۲۰ km/h



شکل ۱۱. تاثیر سرعت بارگذاری بر میزان جابه جایی رویه آسفالتی به ازا دماهای مختلف

(شکل ۱۰) به عبارت دیگر، افزایش دما تا ۴۰ °C منجر به تغییر تنش های کششی σ_{xx} و σ_{yy} به تنش های فشاری می شود. در نهایت، افزایش دما نیز باعث افزایش میزان تنش های قائم روی سطح لایه آسفالتی می شود (شکل ۱۰)

در شکل ۱۱ نتایج مربوط به بارگذاری به ازای بیشترین و کمترین سرعت تحلیل شده در دماهای مختلف آورده شده است.

شکل ۱۰ نیز نتایج مربوط به آنالیزهای انجام شده تحت سرعت ۱۲۰ km/h را نشان می دهد. شکل ۱۰ نشان می دهد که میزان جابه جایی ماکزیم قائم روی سطح لایه آسفالتی با افزایش دما از ۵ °C به ۴۰ °C از ۰/۰۰۹۷ cm به ۰/۰۳۸ cm به ترتیب کاهش می یابد. بعلاوه، افزایش دما تا ۴۰ °C باعث کاهش ۱۰۰ درصدی تنش های کششی عرضی در زیر سطح لایه آسفالتی می شود

یادداشت پژوهشی: بررسی تاثیر دما و سرعت بار متحرک بر پاسخ روسازی انعطاف پذیر با رفتار...

۱۰ و دمای 40°C ماکزیم تنش کششی و فشاری به ترتیب برابر است با تقریباً 10^{-4} و 4×10^{-5} است. نتایج مربوط به کرنش های قائم روی بستر در شکل ۱۲ آورده شده است. با افزایش سرعت و کاهش دما رفتار لایه آسفالتی به رفتار الاستیک نزدیک می شود. بنابراین، همانطور که در شکل ۱۲ واضح است بیشترین کرنش به ازای سرعت 10 km/h و دمای 40°C ایجاد می شود.

۱۰. نتیجه گیری

در این مقاله از طریق مدل سازی سه بعدی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس پاسخ روسازی انعطاف پذیر با رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالتی تحت بارگذاری متحرک با سرعت های متفاوت و هم چنین دمای متفاوت بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس، مهم ترین نتایج به شرح زیر است:

۱. در دماهای بررسی شده، افزایش دما باعث افزایش میزان جابه جایی قائم گره قرار گرفته روی سطح لایه رویه و در مرکز مسیر بارگذاری، کاهش تنش های کششی طولی و عرضی زیر سطح لایه آسفالتی و افزایش تنش قائم روی سطح لایه SG به ازای تمامی سرعت های آنالیز شده می گردد.

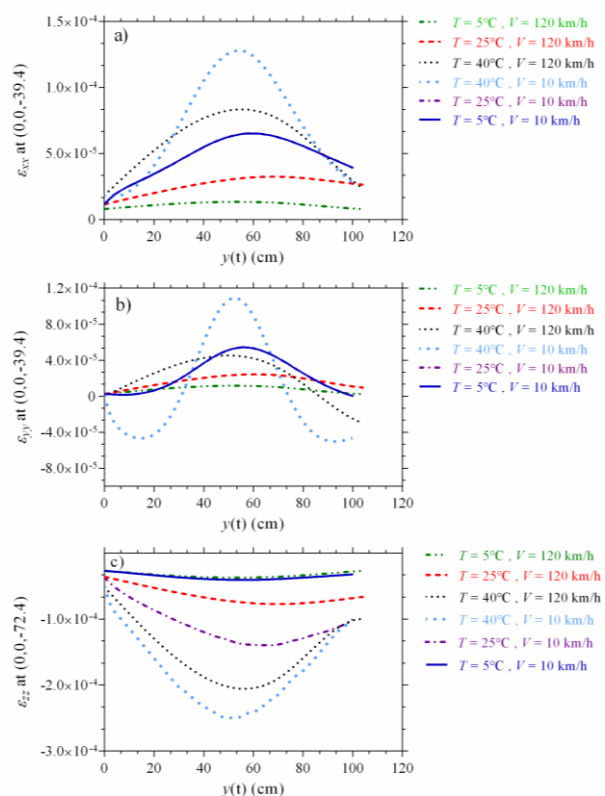
۲. به ازای یک دمای خاص، افزایش سرعت باعث کاهش پاسخ روسازی می شود.

۳. به ازای سرعت 40 km/h میزان ماکزیم σ_{yy} در زیر سطح لایه آسفالتی با افزایش دما از 5°C به 25°C کاهش می یابد که کاهش کمتری نسبت به نتایج مربوط به سرعت 10 km/h را نشان می دهد.

۴. بیشترین میزان جابه جایی گره قرار گرفته روی سطح لایه آسفالتی و در مرکز مسیر بارگذاری، به ازای کمترین سرعت آنالیز شده (10 km/h) و بیشترین دمای تحلیل شده (40°C) اتفاق می افتد.

۵. بیشینه کرنش های کششی زیر سطح لایه آسفالتی به ازای بیشترین دمای (40°C) و کمترین سرعت (10 km/h) اتفاق می افتد.

همانطور که واضح است، میزان جابه جایی در ابتدا به مکان بار متحرک وابسته است. بعلاوه، بیشترین میزان جابجایی به ازای کمترین سرعت (10 km/h) و بیشترین دمای تحلیل شده (40°C) رخ می دهد.



شکل ۱۲. تاثیر دما و سرعت بارگذاری بر: (a و b) کرنش های عرضی زیر لایه آسفالتی و (c) کرنش های قائم روی بستر

نتایج مربوط به کرنش های عرضی المان قرار گرفته در وسط مسیر بارگذاری و زیر سطح لایه آسفالتی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج تحلیل نشان می دهد که ماکزیم کرنش های کششی زیر سطح لایه آسفالتی به ازای بیشترین دما (40°C) و کمترین سرعت (10 km/h) اتفاق می افتد.

همانطور که پیداست، کرنش های ϵ_{xx} به صورت کششی و کرنش های ϵ_{yy} در طول مسیر بارگذاری هم به صورت کششی و هم به صورت فشاری است. به عنوان مثال برای سرعت 10 km/h

in situ validation of perpetual pavement response to vehicular loading” Transportation research record, Vol.2087, No. 1, pp. 29-39.

-Ameri, M., Malakouti, M. and Malekzadeh, P. (2014) “Quasi-static analysis of multilayered domains with viscoelastic layer using incremental-layerwise finite element method” Mechanics of Time-Dependent Materials, Vol.18, No. 1, pp. 275-291.

-Bodin, D., Chupin, O. and Denneman, E. (2017) “Viscoelastic asphalt pavement simulations and simplified elastic pavement models based on an “equivalent asphalt modulus” concept” Journal of Testing and Evaluation, Vol.45, No. 6, pp. 1887-1895.

-Bodin, D., Chupin, O. and Denneman, E. (2016) “Effect of temperature and traffic speed on the asphalt moduli for fatigue cracking and pavement structural design considerations” In 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, pp. 397-402, Springer, Dordrecht.

-Chen, E. Y., Pan, E., Norfolk, T. S. and Wang, Q. (2011) “Surface loading of a multilayered viscoelastic pavement: Moving dynamic load” Road Materials and Pavement Design, Vol.12, No. 4, pp. 849-874.

-de Araújo, P. C., Soares, J. B., de Holanda, Á. S., Parente, E. and Evangelista, F. (2010) “Dynamic viscoelastic analysis of asphalt pavements using a finite element formulation” Road Materials and Pavement Design, Vol.11, No. 2, pp. 409-433.

-Deng, Y., Luo, X., Gu, F., Zhang, Y. and Lytton, R. L. (2018) “3-D Simulation of Deflection Basin of Flexible Pavements Under High-Speed Moving Loads” Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington DC, United States, 2018-1-7 to 2018-1-11.

۱۱. پی‌نوشتها

1. Boussinesq
2. Burmister
3. Hot mix asphalt
3. Secor
4. Monismith
5. Abaqus
6. Ansys
7. Kenlayer
8. 8-node linear brick
9. Asphalt concrete
10. Base layer
11. Subgrade layer
12. Eight-node linear infinite element
13. Full interface bonding
14. Silent boundry
15. Absorbing boundry
16. Transmitting boundry
17. Viscous-damping boundry
18. Maxwell
19. Prony series

۱۲. مراجع

-Abaqus, I. (2008) “Analysis User's Manual Volume V, Prescribed conditions, constraints and interactions”, Journal of Biomedical Science and Engineering, Vol.6, No. 11, pp. 898.

-Alkasawneh, W., Pan, E., Han, F., Zhu, R. and Green, R. (2007) “Effect of temperature variation on pavement responses using 3D multilayered elastic analysis”, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 203-212.

-Al-Qadi, I., Wang, H. and Tutumluer, E. (2010) “Dynamic analysis of thin asphalt pavements by using cross-anisotropic stress-dependent properties for granular layer” Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board, No. 2154, pp. 156-163.

-Al-Qadi, I. L., Wang, H., Yoo, P. J., and Dessouky, S. H. (2008) “Dynamic analysis and

Railways and Airfields, Greece (Athenes): 28-06-2017 - 01-07-2017.

-Kim, M. (2007) "Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior", Dissertation, Advisor: Erol Tutumluer, University of Illinois, Urbana.

-Kuo, C. M. and Chou, F. J. (2004) "Development of 3- D finite element model for flexible pavements" Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol.27, No. 5, pp. 707-717.

-Liu, P., Wang, D., Oeser, M. (2017) "Application of semi-analytical finite element method to analyze asphalt pavement response under heavy traffic loads", Journal of traffic and transportation engineering (English edition), Vol.4, No. 2, pp. 206-214.

-Lv, P., Tian, R. and Liu, X. (2010) "Dynamic response solution in transient state of viscoelastic road under moving load and its application" Journal of Engineering Mechanics, Vol.136, No. 2, pp. 168-173.

-Maadani, O. and Abd El Halim, A. O. (2017) Impact of Asphalt Concrete Temperature and Traffic Loading Speed on Structural Behavior of Flexible Pavement. In TAC 2017: Investing in Transportation: Building Canada's Economy--2017 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada.

-Malakouti, M., Ameri, M. and Malekzadeh, P. (2014) "Dynamic viscoelastic incremental-layerwise finite element method for multilayered structure analysis based on the relaxation approach" Journal of Mechanics, Vol.30, No. 6, pp. 593-602.

-Malakouti, M., Ameri, M., Malekzadeh, P. (2014) "Incremental layerwise finite element formulation for viscoelastic response of

-Duncan, J. M., Monismith, C. L. and Wilson, E. L. (1968) "Finite element analysis of pavements", Highway Research Record, Vol.228, pp. 18-33.

-Eslaminia, M. and Guddati, M. N. (2016) "Fourier-finite element analysis of pavements under moving vehicular loading", International Journal of Pavement Engineering, Vol.17, No. 7, pp. 602-614.

-Feng, S.-J., Li, Y.-C., Chen, H., Chen, Z.-L. (2017) "Response of pavement and stratified ground due to vehicle loads considering rise of water table" International Journal of Pavement Engineering, No., pp. 1-13.

-Han, D., Zhu, G., Hu, H. and Li, L. (2018) "Dynamic simulation analysis of the tire-pavement system considering temperature fields", Construction and Building Materials, Vol.171, No., pp. 261-272.

-Helwany, S., Dyer, J. and Leidy, J. (1998) "Finite-element analyses of flexible pavements", Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, No. 5, pp. 491-499.

-Huang, Y. (2017) "Evaluating pavement response and performance with different simulative tests", Dissertation, Advisor: Linbing Wang, Virginia.

-Judycki, J. (2018) "A new viscoelastic method of calculation of low-temperature thermal stresses in asphalt layers of pavements", International Journal of Pavement Engineering, Vol.19, No. 1, pp. 24-36.

-Kazemi, S.-F., Sebaaly, P. E., Siddharthan, R. V., Hajj, E. Y., Hand, A. J. and Ahsanuzzaman, M. (2017) "Dynamic pavement response coefficient to estimate the impact of variation in dynamic vehicle load" Tenth International Conference on the Bearing Capacity of Roads,

temperature data” Journal of Transportation Engineering, Vol.138, No. 5, pp. 674-679.

-White, T., Zaghloul, S., Anderton, G. and Smith, D. (1997) “Pavement analysis for moving aircraft load” Journal of transportation engineering, Vol.123, No. 6, pp. 436-446.

-Wolf, J. and Hall, W. (1988) “Soil-structure-interaction analysis in time domain”, A Division of Simon and Schuster.

-Yang, N. C. (1972) “Design of functional pavements”, McGraw-Hill Companies.

-Yoder, E. J. and Witczak, M. W. (1975) “Principles of pavement design”, John Wiley and Sons.

-Yoo, P. J. and Al-Qadi, I. L. (2007) “Effect of transient dynamic loading on flexible pavements”, Transportation Research Record, Vol.1990, No. 1, pp. 129-140.

-Zafir, Z., Siddharthan, R. and Sebaaly, P. E. (1994) “Dynamic pavement-strain histories from moving traffic load”, Journal of Transportation Engineering, Vol.120, No. 5, pp. 821-842.

-علون آبادی، م.، رامش خواه، سینا، ملک زاده، پ.، معراجی، س. ح.، (۲۰۱۸) “پاسخ شبه‌استاتیکی روسازی آسفالتی لایه‌ای با رفتار ویسکوالاستیک به روش المان دیفرانسیل کوادرچر” فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل.

multilayered pavements” International Journal of Transportation Engineering, Vol.1, No. 3, pp. 183-198.

-Mulder, W. (1997) “Experiments with Higdon's absorbing boundary conditions for a number of wave equations” Computational Geosciences, Vol.1, No. 1, pp. 85.

-Rameshkhah, S., Malakouti Olounabadi, M., Malekzadeh, P., Meraji, S. H. (2018) “Dynamic response analysis of viscoelastic pavement using differential quadrature element method” International Journal of Pavement Engineering.

-Sarkar, A. (2016) “Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles” International Journal of Pavement Engineering, Vol.17, No. 5, pp. 377-387.

-Secor, K. E., Monismith, C. L. (1961) “Analysis of triaxial test data on asphalt concrete using viscoelastic principles” Highway Research Board Proceedings, Vol.40, pp. 295-314.

-Tautou, R., Picoux, B. and Petit, C. (2017) “Temperature Influence in a Dynamic Viscoelastic Modeling of a Pavement Structure” Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, Vol.143, No. 3.

-Wang, D. (2011) “Analytical approach to predict temperature profile in a multilayered pavement system based on measured surface

یادداشت پژوهشی: بررسی تاثیر دما و سرعت بار متحرک بر پاسخ روسازی انعطاف پذیر با رفتار...

فاطمه نجفی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی ژئوتکنیک در سال ۱۳۹۷ را از دانشگاه خلیج فارس بوشهر اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل عددی در مهندسی عمران (ژئوتکنیک و روسازی) است.



محمود ملکوتی علون آبادی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه خلیج فارس و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۸۱ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی عددی روسازی راه، مکانیک مصالح ویسکوالاستیک و مخلوطهای آسفالتی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه خلیج فارس است.



میثم سروش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک را در سال ۸۶ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک در سال ۸۹ را از دانشگاه آزاد تهران جنوب اخذ نمود. در سال ۹۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی هوافضا از دانشگاه صنعتی مالک اشتر گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ضربه، ارتعاشات و کامپوزیت است.



عبدالرضا فاضلی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۶ از دانشگاه شهید چمران اهواز و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-ژئوتکنیک را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه شیراز اخذ نمود. در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران-ژئوتکنیک از دانشگاه شیراز گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی رفتار خاک، بهسازی خاک، تحقیقات صحرایی، رفتار خاکهای غیر اشباع و مکانیک سنگ بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه خلیج فارس بوشهر است.

