

تحلیل سه بعدی رفتار روسازی های انعطاف پذیر تحت بارگذاری های دینامیکی

فاضل فصیحی^۱، محمودرضا کی منش^۲، سید علی صحاف^۳، سهیل قره^۴

۱- دانش پذیر دکترای راه و ترابری، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران

۲- استادیار، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد

۴- دانشیار، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران

چکیده

یکی از مشکلات مهندسين عمران در زمینه روسازی راه ها، عدم شناخت دقیق رفتار روسازی تحت بارهای عبوری و در نتیجه عدم امکان پیش بینی عملکرد آن در بروز خرابی ها است. از آنجایی که روسازی ها به دلیل هزینه بالای ساخت و نگهداری در زمره سازه های زیرساخت و به عنوان سرمایه ملی به حساب می آید، لذا شناخت بهتر و تحلیل دقیق تر رفتار آن ها باعث طرح یک روسازی بهینه با عمر بهره برداری طولانی تر خواهد شد. در گذشته روسازی ها به دلیل پیچیدگی توزیع تنش و عدم تقارن در آن، به صورت استاتیک مدل سازی شده، در حالی که بار چرخ عبوری در واقع به صورت دینامیکی می باشد. در مدل سازی دینامیکی پاسخ های روسازی به دلیل رفتار ویسکوالاستیک آسفالت، وابسته به دما و زمان بارگذاری بوده که نیازمند دریافت اطلاعات دقیق تر از نحوه و جزئیات بارگذاری است. در این راستا به منظور شبیه سازی رفتار واقعی روسازی تحت بارگذاری های دینامیکی، از مدل سازی عددی سه بعدی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS استفاده گردید و به بررسی شرایط بارگذاری دینامیکی و تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار روسازی در سرعت های مختلف پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان می دهد با تغییرات سرعت، پاسخ های بحرانی کاملاً وابسته به هندسه محور و ضخامت رویه بوده و کرنش فشاری قائم روی خاک بستر با نسبت تاثیر ۵ درصد نسبت به سایر پاسخ های بررسی شده دارای حساسیت کمتری نسبت به تغییرات سرعت می باشد.

واژگان کلیدی: اجزای محدود، بارگذاری دینامیک، روسازی انعطاف پذیر، نرم افزار ABAQUS

مقدمه

هدف اصلی طرح و ساخت رو سازی راه‌ها، ایجاد مسیری جهت تردد ایمن و راحت خودروها و انتقال بارها از لایه‌های فوقانی به خاک بستر است. یکی از پیچیده‌ترین متغیرهای طراحی روسازی، خصوصیات بارهای ناشی از ترافیک عبوری در سطح راه و نحوه انتقال تنش‌های ناشی از آن است. در این راستا شناخت هر چه بیشتر مشخصات این بارها می‌تواند در بهینه کردن طرح رو سازی کمک کند. وزن کل خودرو، هند سه محور (سطح تماس و طول محور)، نحوه توزیع بار در چرخ‌ها، ویژگی‌های چرخ، مدت زمان بارگذاری، ماهیت دینامیکی بارها و میزان تکرار آن مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در مقدار تنش وارده به رو سازی هستند. جهت تحلیل نیروها و تغییر مکان‌ها در رو سازی ابتدا روش‌هایی مبتنی بر فرضیات ساده کننده‌ای به وجود آمد که با افزایش نرخ بارهای ترافیکی و لزوم وجود راه‌هایی با رو سازی با کیفیت، به تدریج و بر پایه مطالعه‌های انجام شده توسط محققین این نظریه‌ها توسعه و بهبود یافت.

دو روش اساسی عددی که میتوان در تجزیه و تحلیل رو سازی‌ها از آنها استفاده کرد عبارتند از: تفاضل محدود و المان‌های محدود. روش المان‌های محدود با ویژگی‌های زیر تهیه شده است (Yoder & Witczak, 1975):

- ۱- مدول ارتجاعی مصالح لایه‌ها غیر خطی است.
 - ۲- جسم دارای محور تقارن است.
 - ۳- محدودیت در تنش‌های اصلی وارده به مصالح دانه‌ای بیش از تئوری گسیختگی موهر-کلمب نشود.
- پس از ابداع روش اجزای محدود، نرم افزارهای متفاوتی متولد شد که از این روش استفاده می‌کردند. در میان نرم افزارهای موجود، نرم افزار تحلیلی ABAQUS به دلیل محیط کاربری ساده و جامع بودن پارامترهای ورودی دارای محبوبیت بیشتری جهت مدل سازی است که در این پژوهش از آن استفاده شده است.

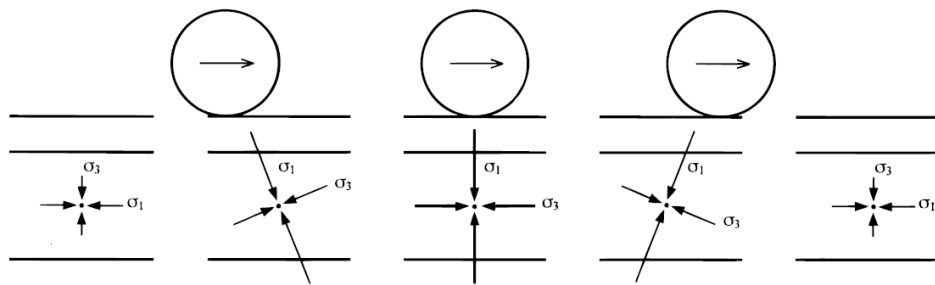
تاریخچه و مروری بر تحقیقات پیشین

پس از انجام آزمایشات جامع موسسه آشتو در دهه ۶۰ میلادی بر رو سازی‌ها، با گذشت سالها و ایجاد تغییرات در مشخصات محورها و بار آنها، مطالعات مختلفی بر روی بارهای و تنش‌های ایجاد شده ناشی از ترافیک عبوری انجام شد. یان و چتی در سال ۱۹۹۶ تأثیر تغییرات سرعت و سیله نقلیه عبوری بر واکنش‌های روسازی‌های آسفالتی را مطالعه کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که افزایش تدریجی سرعت و سیله نقلیه تا ۶۴ کیلومتر بر ساعت، باعث کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی کرنش طولی ماکزیمم لایه آسفالتی می‌شود (Chatti et al, 1996). در سال ۲۰۰۵ ساد و همکاران تغییر شکل خمشی ناشی از بارگذاری دینامیکی در شرایط اساس و زیراساس الاستوپلاستیک را کوچک تر از بارگذاری استاتیک دانستند (Saad et al, 2005). مطالعات القادی و یونشان داد که کرنش‌های گذرا و پسماند در بارگذاری دینامیکی بزرگتر از حالت شبه استاتیک است (Al-qadi & Yoo, 2007). القادی و همکاران در سال ۲۰۰۸ مدل سازی بر مبنای بارگذاری دینامیک و خصوصیات ویسکوالاستیک آسفالت انجام دادند که دقت بالای مدل سازی باعث انتخاب مدل به عنوان مرجع مدل سازی‌های اجزای محدود شده است (Al-qadi et al, 2008). پس از آن،

مدلسازی‌هایی بر مبنای سطح واقعی تماس چرخ و روسازی توسط وانگ و القادی انجام شد. در نهایت مشخص گردید با افزایش مقدار بار، اختلاف نتایج بین پا سخ در حالت بارگذاری در سطح تماس واقعی و ساده شده کاهش می‌یابد (Wang & Al-qadi, 2009). اولوآ و همکاران در سال ۲۰۱۳ فرکانس بار در مدلسازی روسازی تحت بارگذاری دینامیک در نرم‌افزار 3D-Move را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که مقدار آن رابطه مستقیم با عمق شیار شدگی دارد (Ulloa et al, 2013). احمد و همکاران نیز مدلسازی‌هایی با فرض بار دینامیکی و در دماهای مختلف انجام دادند. در این مطالعه با تعریف ضریب n که مقدار آن نسبت مدول افقی به قائم است، تاثیر همگنی و ناهمگنی مدل در پا سخ روسازی بررسی شد و مشخص گردید با نزدیک شدن به فضای همگن ($n=1$) کرنش کششی افقی در زیر لایه آسفالت کاهش پیدا می‌کند (Ahmed et al, 2015). هرناندز و همکارانش در سال ۲۰۱۶ مطالعاتی در خصوص تاثیر چرخ‌های نسل جدید با عرض زیاد (چرخ‌های پهن جایگزین چرخ‌های زوج) بر روسازی‌ها انجام دادند. نتایج آنها نشان می‌داد این چرخ‌ها تنش‌ها و کرنش‌های بیشتری را به سطح روسازی وارد می‌کنند که با افزایش ضخامت روسازی اختلاف آن با چرخ‌های دبل کاهش می‌یابد (Hernandez et al, 2016). در سال ۲۰۱۷ روسازی تحت بار FWD توسط لی و همکاران مدلسازی شد. در این مطالعه مشخص شد مدلسازی لایه‌های آسفالت بطور جداگانه باعث محاسبه کرنش بیشتر از مقدار واقعی می‌گردد. سپس از این مدل در پیش‌بینی عملکرد روسازی استفاده شده است (Li et al, 2017). رام‌شخواه و همکاران در سال ۲۰۱۸ برنامه‌ای جهت تحلیل شبه استاتیکی و دینامیکی روسازی با المان‌های مربعی تهیه و نتایج آن را با نتایج مدل سازی نرم افزار ABAQUS بررسی کردند. دقت بالا و سرعت تحلیل از مزایای برنامه تهیه شده است (Rameshkhah et al, 2018). وانگ و همکاران میزان تاثیر سرعت بر پا سخ روسازی با استفاده از نرم افزار ABAQUS بررسی کرده و نتیجه گرفتند میزان تاثیر سرعت بر پاسخ‌های بحرانی روسازی با افزایش سرعت افزایش می‌یابد (Liu et al, 2019).

تعریف مساله

با پی شرف علم و توسعه روش اجزای محدود، محققین به مدل سازی تاثیر شرایط مختلف چرخ‌ها و بارگذاری بر روی روسازی‌ها پرداختند. در اکثر مطالعات پیشین، جهت دستیابی سریع‌تر به نتایج و آسانی فرآیند مدلسازی، مدل‌ها مبتنی بر تحلیل‌های استاتیکی انجام شده است. اما همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، عبور بارهای متحرک از روسازی‌ها عامل تولید تنش‌های قائم، برشی و مماسی در هر المان روسازی می‌شود که در طول هر دوره بارگذاری جهت آنها به طور پیوسته و لحظه‌ای تغییر می‌کند. این تغییر بارگذاری و صرفنظر از آن در مطالعات استاتیکی، خود باعث ایجاد انحراف در نتایج در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می‌گردد.



شکل ۱ - تغییرات جهت تنش های اصلی در شرایط بار دینامیک در یک المان (Nilsson et al, 1996)

مهم ترین مزیت مدل سازی بارها به صورت دینامیکی علاوه بر دقت قابل قبول تری نتایج نسبت به شرایط واقعی؛ امکان مدل مصالح و بارها در شرایط پیچیده، در نظر گرفتن اینرسی جرم، نو سانات نیروها و پاسخ سازی بر مبنای زمان و تغییرات بارگذاری است (Han et al, 2018). در همین خصوص، در این پژوهش با هدف بررسی عکس العمل رو سازی ها در نرم افزار اجزای محدود (ABAQUS)، ابتدا به بررسی نحوه مدل سازی سه بعدی رو سازی مبتنی بر بارگذاری دینامیکی و شرایط مدل پرداخته شده است. پس از آن با مقایسه نتایج خروجی نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی، صحت مدل سازی بررسی شده و در پایان نتایج مدل سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

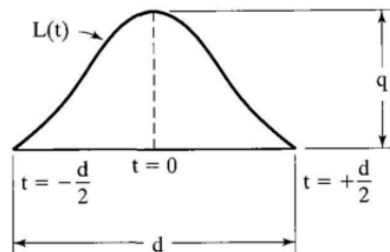
مدل سازی

از سال ۱۹۶۰ که روش های اجزای محدود به وجود آمد، نرم افزارهای متفاوتی همچون Ansys، Diana TNO، ABAQUS و ... متولد شدند که بر پایه این روش بنا نهاده شده اند. از آنجا که نرم افزارها بازاری کاملاً رقابتی دارند؛ کلیه آنها دارای پاسخ هایی نزدیک به هم و با دقت بالایی هستند. از میان نرم افزارهای موجود، در این پژوهش نرم افزار ABAQUS به دلیل سهولت در استفاده، تنوع بالای المان های مدل سازی، امکان مدل سازی با هر نوع هندسه، دارای مدل های مواد بسیار زیاد با خواص و رفتار گوناگون، هو شمند بودن نرم افزار در تعیین مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی سه ساله و نمودار و نرخ های همگرایی؛ به عنوان نرم افزار مدل سازی انتخاب گردید (Dassault Systems, 2017). در ادامه جهت بررسی شرایط، جزئیات مدل و بارگذاری به تشریح خصوصیات بارگذاری، سطح تماس چرخ با روسازی، مشخصات رفتاری آسفالت و هندسه مدل پرداخته شده است.

بارگذاری

بار وارده در شرایط دینامیکی به پارامترهای مختلفی وابسته است که مهم ترین آنها خصوصیات مصالح روسازی، سرعت خودرو، جرم و سیستم تعلیق خودرو است (Beskou & Theodorakopoulos, 2011). البته به دلیل پیچیدگی و بلندی ناشی از ناهمواری در سطح راهها، مقدار بار در هر لحظه متفاوت است که در مدل سازی ها مقدار متوسط آن در نظر گرفته می شود (Qian et al, 2016). مدل سازی بار دینامیکی به روش های مختلفی انجام می شود که مرسوم ترین

آنها روش ساده (شبه مثلی، مستطیلی و یا دوزنقه‌ای) و چکشی (ضربه ای) است (Yoo & Al-qadi, 2007). هوانگ بارگذاری دینامیکی شبه مثلی که بر مبنای معادله نیمه سینوسی و مطابق شکل ۱۲ است، را پیشنهاد داد که روابط آن به شرح زیر است (Huang, 2004):



شکل ۲ - بارگذاری نیم سینوسی

$$d = \frac{12a}{v} \quad (۱)$$

$$L(t) = q \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d}\right) \quad -\frac{d}{2} \leq t \leq \frac{d}{2} \quad (۲)$$

در روابط فوق d : مدت بارگذاری (ثانیه)، a : شعاع بارگذاری، v : سرعت خودرو، $L(t)$: مقدار بار دینامیکی در زمان t ، q : بار وارده و t : زمان است. به دلیل اینکه در این پژوهش از بارگذاری دینامیکی جهت بررسی رفتارهای آنی (کوتاه مدت) استفاده می شود، لذا مدول دینامیکی مصالح که شامل دو بخش مدول الاستیک و میرایی است، باید تعریف شود. منظور از میرایی مقدار جذب انرژی بار بوده که با خاصیت ویسکوز یا نسبیتی از سرعت بارگذاری بیان می گردد و مقدار انرژی جذب شده در مدل را بدون نیاز به مدل سازی تاثیرات آن، محاسبه می کند (Leiben et al., 2018). مقدار این ضریب در خاک در محدوده ۲ تا ۵ درصد بوده که بستگی به فشار محدود شده و سطح کرنش برشی که از آزمایش سه محوره دوره ای یا ستون تشدید تعیین می شود، دارد (Zhong et al, 2002). در این پژوهش مقدار میرایی برابر با ۵ درصد فرض شده است (Chopra, 2012). علاوه بر موارد فوق، وابستگی مصالح به فرکانس بارگذاری نیز بر نتایج تحلیل های دینامیکی روسازی ها تاثیر گذار است که مقدار آن در محدوده ۶ تا ۱۴ پیشنهاد شده است (Uddin & Garza, 2004).

در نهایت در نرم افزار ABAQUS، معادله اصلی حرکت یک جسم تحت یک بار دینامیک نیم سینوسی بصورت زیر است:

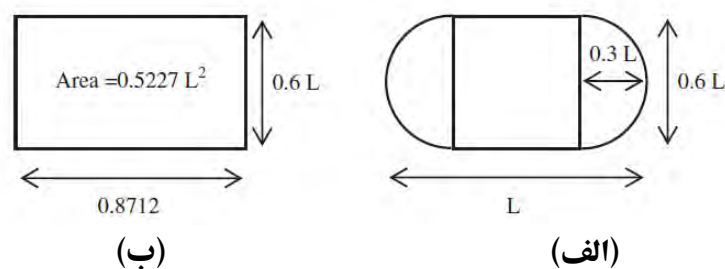
$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (۳)$$

در رابطه فوق $[M]$: ماتریس جرم، $[C]$: ماتریس میرایی، $[K]$: ماتریس سختی، $\{\ddot{u}\}$: بردار شتاب، $\{\dot{u}\}$: بردار سرعت، $\{u\}$: بردار جابجایی و $\{P\}$: بردار نیروی خارجی (دینامیکی) است (Dassault Systems, 2017). برای تحلیل دینامیکی در نرم افزار ABAQUS استفاده از بارگذاری بصورت پیوسته رایج است. در این روش معادله حرکت پیوسته وابسته به زمان بصورت مرحله ای بوده که در نرم افزار به دو حالت *implicit* و *explicit* قابل مدلسازی می باشد. در مدلسازی به صورت *implicit* جابجایی بار در زمانهای $t-1$ و t به وسیله حل یک سری معادلات غیرخطی بصورت همزمان انجام می شود، در حالیکه در روش *explicit* جابجایی بین زمانهای t و $t-1$ توسط معادلات دوتایی شتاب است. در میان این دو روش استفاده از حالت *implicit* در مدلسازی های دینامیکی بدلیل پایداری تحت هر شرایط و امکان تحلیل در بارگذاری های طولانی تر نسبت به حالت *explicit* رواج بیشتری دارد (Dassault Systems, 2017). در این مطالعه بارگذاری بصورت *implicit* مدلسازی شده است.

جزئیات تماس چرخ با جاده

در مطالعات مختلف سطح تماس چرخ ها با سطح روسازی ها به صورت های مختلف دایره، مستطیل و یا ترکیب مستطیل و دو نیم دایره است که در میان آنها سطح مقطع ترکیبی نزدیک ترین جواب به واقعیت را به دست می آورد (Nahi et al, 2011- Rahman et al, 2011). با فرض طول و عرض سطح تماس به ترتیب معادل L و $0.6L$ ، مقدار سطح تماس معادل از رابطه ۴ بدست می آید (Huang, 2004):

$$A_c = \pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227L^2 \quad (4)$$



شکل ۳ - سطح تماس چرخ با روسازی (الف) واقعی، (ب) معادل شده (Huang, 2004)

در سطح مقطع مذکور، فشار در واقعیت در تمام سطح تماس یکنواخت نبوده و ۶۰ درصد بار در منطقه مستطیل میانی و مابقی در باقی سطح مقطع به طور مساوی تقسیم می شود (Rahman et al., 2011). لازم به ذکر است در این پژوهش، سطح تماس بصورت یکپارچه و سرعت محور در طول مدل سازی ثابت فرض شده است؛ لذا از تغییرات نامتقارن توزیع وزن محور بر روی چرخ ها ناشی از تغییرات سرعت صرف نظر شده است. بر همین اساس بار هر محور بطور

یک سان بین چرخ‌ها تقسیم و از طریق سطح تماس به رو سازی منتقل می شود که مقدار آن در محدوده ۴۰۰ تا ۹۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است (Filho et al, 2016).

مشخصات رفتاری مصالح

در مدل سازی برای تعیین پاسخ رو سازی تحت بارهای عبوری، لایه‌های اساس، زیر اساس و خاک بستر به صورت الاستیک خطی مدل شده است. البته فرض الاستیک مصالح لایه‌های زیرین آسفالت، خود باعث حذف تغییر شکل‌های دائمی تحت بارهای ساکن می‌شود. اما از آنجایی که روسازی تحت بارهای عبوری است، بیشتر این تغییر شکل‌ها بازگشت پذیر بوده؛ پس فرض الاستیک لایه‌ها می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد (Huang, 2004). لایه آسفالت بدلیل وجود قیر، همواره رفتاری ویسکوالاستیک را از خود نشان می‌دهد. رفتار ویسکوالاستیک ترکیبی از پاسخ‌های جامد کشسان و سیال لزج است. آسفالت در دمای بالا و یا تحت بارهای با سرعت پایین ممکن است یک رفتار کاملاً ویسکوالاستیک را از خود بروز دهد که باعث ایجاد خرابی‌هایی هم‌چون شیارافتادگی شود. با این حال، در دمای پایین و یا در بارگذاری سریع آسفالت سخت‌تر و شکننده بوده که عامل بروز خرابی‌های غیربارگذاری همچون ترک خوردگی در دمای پایین است.

در حالت کلی، کرنش ایجاد شده هنگام عبور خودروها از سطح روسازی، ناشی از سه کرنش الاستیک، ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک می‌باشد که در رابطه ۵ نمایش داده شده است:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} \quad (5)$$

در رابطه فوق؛ ε_T ، ε_e ، ε_{ve} و ε_{vp} به ترتیب کرنش کلی، کرنش الاستیک، کرنش ویسکوالاستیک قابل بازگشت و کرنش ویسکوپلاستیک است. رابطه کلی شبیه سازی رفتار یک ماده ویسکوالاستیک خطی به صورت زیر است (Demir et al, 2014):

$$p_0 \sigma + \sum_{k=1}^{N_{KV}} p_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = q_0 \varepsilon + \sum_{k=1}^{N_{KV}} q_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k} \quad (6)$$

که در آن t : زمان، σ : تنش، ε : کرنش و ضرایب p و q توابعی از مدل الاستیسیته فزونی ویسکوزیته میراگر مربوط به المان‌ها می‌باشد که با اندیس ۱ تا N_{KV} شماره گذاری شده‌اند. برای محاسبه خصوصیات ویسکوالاستیک لایه آسفالت باید مدول استراحت آن تعیین شود که در این پژوهش برای مدل سازی آن از مدل توسعه یافته ماکسول مطابق با روابط زیر استفاده شده است (Yoo & Al-qadi, 2007):

$$G(t) = G_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n G_i (1 - e^{\frac{-t}{\tau_i}}) \right) \quad (7)$$

$$K(t) = K_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n K_i (1 - e^{\frac{-t}{\tau_i}}) \right) \quad (8)$$

در روابط فوق G : مدول برشی، K : مدول حجمی، t : دوره استراحت کاهش یافته، G_0 و K_0 : مدول الاستیک آنی، G_i ، K_i و τ_i : پارامترهای سری پرونی بوده و n : تعداد مرتبه در معادله است. بر اساس مطالعات القادی و همکاران مشخصات مصالح مدل سازی شده در لایه های روسازی مطابق با جدول ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است (Wang & Al-qadi, 2010; Yoo & Al-qadi, 2007).

جدول ۱- مشخصات مصالح الاستیک

نام لایه	مدول الاستیک (مگاپاسکال)	ضریب پواسن
اساس	۳۰۰	۰/۳
زیراساس	۲۰۰	۰/۳
خاک بستر	۱۴۰	۰/۴

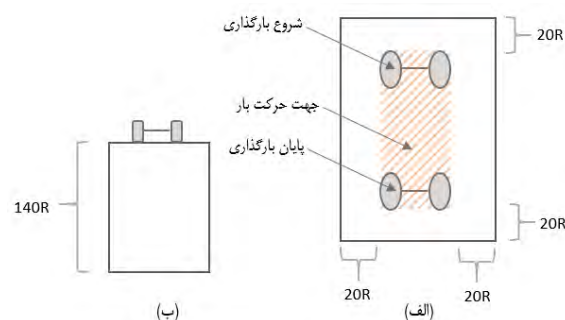
جدول ۲- مشخصات لایه آسفالت

ویسکو الاستیک					الاستیک	
τ	i (s)	K_i	G_i	n	۹۸۴۰	مدول الاستیک (مگاپاسکال)
۰/۰۲۰۶	۰/۰۷۸	۰/۶۳۱	۰/۶۳۱	۱		
۰/۱۷۳	۰/۸۱۶	۰/۲۵۱	۰/۲۵۱	۲		
۱/۲۹	۵/۶۸	۰/۰۸۴۷	۰/۰۸۴۷	۳	۰/۳۵	ضریب پواسن
۵/۳۵	۱۳۹	۰/۰۲۶۶	۰/۰۲۶۶	۴		
۰/۰۱۰۶	۳۴۴	۰/۰۰۶۶۶	۰/۰۰۶۶۶	۵		

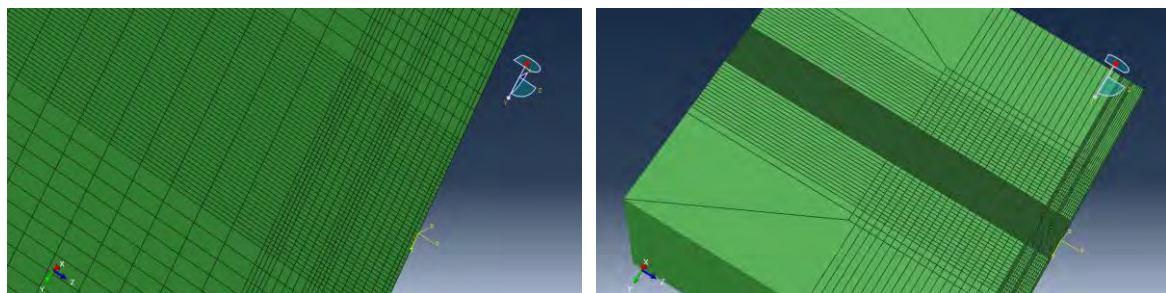
هندسه مدل

برخی از مهم ترین پارامترهای تاثیرگذار در دقت نتایج مدل سازی اجزای محدود را می توان شرایط مرزی، اندازه مدل و مش بندی، المان انتخاب شده دانست. در یک مدل سازی دینامیکی، شرایط مرزی باید بتواند انعکاس انرژی امواج ناشی از بارگذاری را به حداقل برساند (Al-qadi et al, 2010). در مدل سازی این پژوهش در نرم افزار ABAQUS در اطراف مدل، از المان های نامحدود خطی با ۸ گره (CIN3D8) استفاده شده است. المان های نامحدود دارای تابع شکل

خاصی بوده که هندسه مدل را به سمت بی نهایت سوق می دهد تا حدی که تغییر شکل ها در آن برابر با صفر می باشد (Dassault Systems, 2017). در سایر بخش های مدل نیز از المان های ۸ گره ای مکعبی دارای فرمول بندی کاهش یافته و دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر نقطه (C3D8R) استفاده شده است (Alkaissi, 2020). ابعاد مدل نیز مطابق شکل ۴، در محیط نرم افزار در راستای افقی به $20R$ در هر سمت از سطح بارگذاری و در راستای قائم $140R$ محدود شده است (فصیحی، ۱۳۹۰). از آنجایی که در مدل سازی ها از سرعت کمتر از ۳۰ کیلومتر بر ساعت، بارگذاری مشابه حالت استاتیکی فرض می شود و سرعت رایج در بیشتر جاده های کشور در محدوده ۸۰ تا ۹۰ کیلومتر بر ساعت است؛ لذا در این مطالعه سرعت حرکت بار در بازه ۳۰ تا ۹۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. شکل ۵



شکل ۴- نمایی از هندسه روسازی مدل شده در نرم افزار: الف) حالت تک محور در صفحه x و y، ب) حالت صفحه z

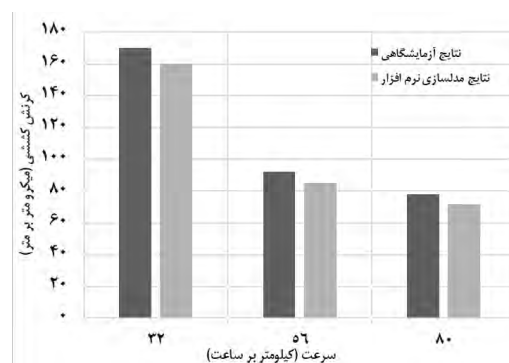


شکل ۵- هندسه روسازی مدل شده در نرم افزار

۵-۴- اعتبارسنجی

نرم افزار ABAQUS بر پایه روش اجزای محدود، دارای کاربرد عمومی بوده و جهت استفاده اختصاصی در تحلیل روسازی ها ایجاد نشده است، پس انتخاب نوع المان و خصوصیات مدل سازی همواره یکی از تاثیرگذارترین پارامترها در میزان دقت پاسخ مدل در روش اجزای محدود است، لذا قبل از استفاده از اطلاعات بدست آمده از مدل سازی های عددی، بایستی از صحت مدل سازی در مقایسه با نتایج واقعی اطمینان حاصل کرد.

در این پژوهش از نتایج آزمایش‌های میدانی انجام شده در دانشگاه پنسیلوانیا برای اعتبار سنجی مدل سازی عددی انجام شده، استفاده گردید (Sebaaly et al, 1991). در پژوهش مذکور، سیبالی و همکاران آزمایش‌های میدانی جامعی را بر روی سازی‌های انعطاف پذیر جهت بررسی تاثیر سرعت و مقدار بار بر مقدار کرنش‌ها در زیر لایه آسفالتی انجام دادند، که در آن بار چرخ با سرعت‌های ۳۲، ۵۶ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت از مسیر عبور داده شد و ابزارهای دقیق نصب شده در زیر لایه آسفالت و مسیر عبور چرخ‌ها، مقادیر کرنش را ثبت می‌کردند. لذا قبل از انجام مطالعات تحلیلی این پژوهش، آزمایش‌های انجام شده توسط سیبالی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل سازی عددی سه بعدی گردید، که از مقایسه نتایج آزمایش‌های میدانی و مدل سازی‌های عددی سه بعدی، همخوانی و تطابق مناسبی مشاهده می‌شود. در شکل ۶ مقایسه نتایج مطالعات میدانی سیبالی و همکاران با نتایج بدست آمده از مدل سازی‌های عددی سه بعدی آورده شده است.



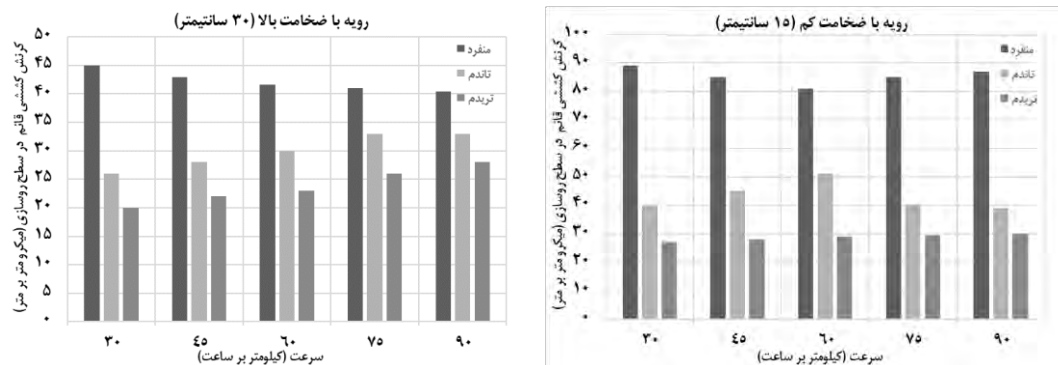
شکل ۶- مقایسه نتایج مطالعات میدانی سیبالی و همکاران با نتایج بدست آمده از مدل سازی‌های عددی سه بعدی

بحث و نتیجه گیری

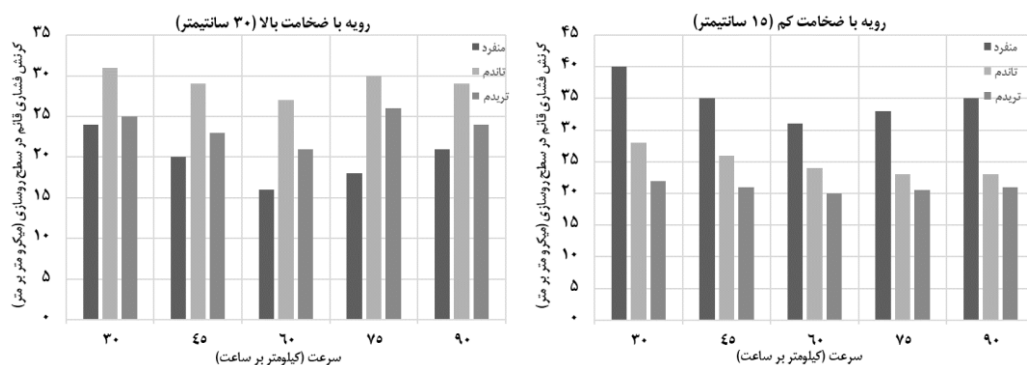
در این پژوهش با هدف بررسی عکس العمل روی سازی‌ها تحت بارگذاری دینامیکی ناشی از عبور خودروها و پس از اطمینان از صحت مدل سازی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، مدل سازی در سرعت‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ کیلومتر بر ساعت در دو حالت رویه با ضخامت کم (۱۵ سانتی‌متر) و ضخامت بالا (۳۰ سانتی‌متر) انجام شد. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود در سرعت ثابت و ضخامت رویه کم، محور منفرد و تاندم به ترتیب بیشترین مقدار کرنش را بر روی روسازی وارد می‌کند.

همان‌گونه که شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد، روند تغییر کرنش روی سطح رویه تا سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت مشابه است. همچنین کرنش فشاری قائم تا سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت با افزایش سرعت کاهش یافته، اما در سرعت‌های بیشتر از آن روسازی رفتاری متفاوت را دارد. در حالت کلی، می‌توان گفت با افزایش سرعت، میزان تاثیر مشخصات دینامیکی بار مانند کاهش زمان بارگذاری بر پاسخ روسازی بیشتر است. به عبارت دیگر، می‌توان سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت را

نقطه مرزی پاسخ روسازی دانست و این بدان معنی است که در سرعت‌های بیشتر از مقدار فوق، آرایش محور و ضخامت رویه تاثیر بیشتری بر پاسخ روسازی دارد.

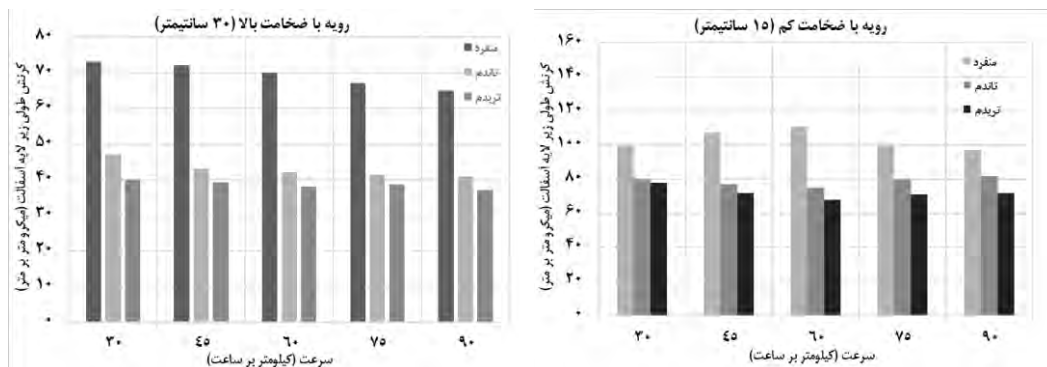


شکل ۷- حداکثر کرنش کششی قائم در سطح روسازی

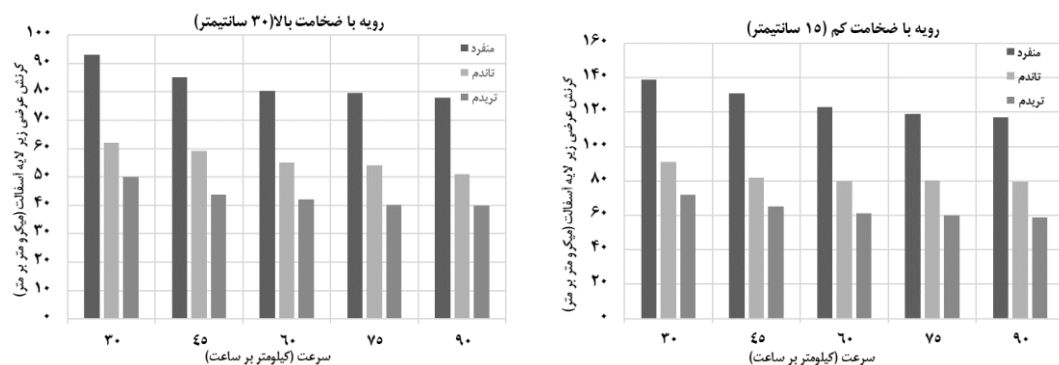


شکل ۸- حداکثر کرنش فشاری قائم در سطح روسازی

پس از انجام مدل سازی‌های عددی سه بعدی حداکثر کرنش طولی و عرضی در زیر لایه آسفالت برای محورهای منفرد، تاندم و تریدم در سرعت‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است، همان گونه که ملاحظه می گردد مقدار کرنش بحرانی به ضخامت رویه و سرعت حرکت وابستگی دارد. در رویه با ضخامت بالا، کرنش عرضی در تمام محورهای عبوری در محدوده ۲۰ درصد از کرنش طولی بزرگتر است. اما در رویه با ضخامت کم، بیشترین تاثیر را نوع آرایش محور دارد. این مقدار اختلاف در محورهای منفرد ۱۹ درصد بوده که در محورهای تاندم با افزایش سرعت به تدریج از میزان آن کاسته می شود و در سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت مقدار کرنش طولی ۳ درصد بزرگتر از کرنش عرضی می باشد. در محور تریدم نیز کرنش طولی ۷ درصد بزرگتر از کرنش عرضی بوده و همانند محور تاندم با افزایش سرعت این ضریب تا مقدار ۱۸ درصد افزایش می یابد.

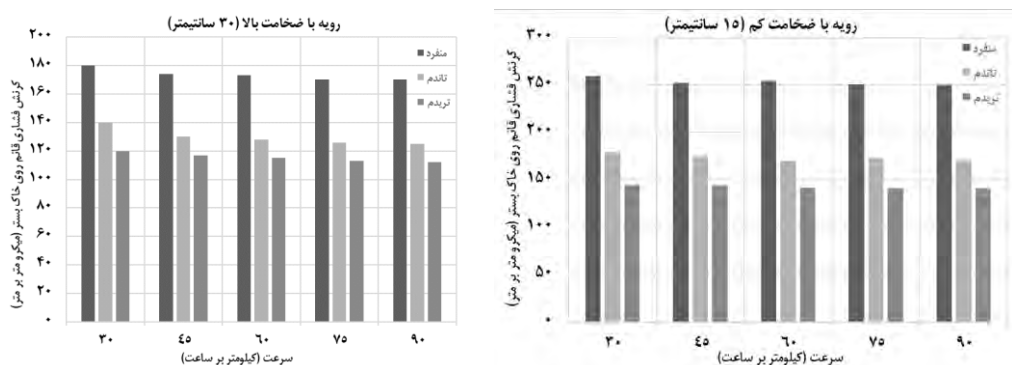


شکل ۹- حداکثر کرنش طولی در زیر لایه آسفالت



شکل ۱۰- حداکثر کرنش عرضی در زیر لایه آسفالت

همانطور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌شود، شیب تغییرات کرنش با تغییرات سرعت در دو حالت رویه کاملاً متفاوت بوده و مقدار این شیب به ضخامت وابستگی ندارد. در دو نوع روسازی با ضخامت کم و زیاد رویه این دو مقادیر به صورت تابعی از سرعت با افزایش مقدار آن، کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- حداکثر کرنش فشاری قائم روی خاک بستر

در نهایت با بررسی تاثیر تغییرات سرعت مشاهده می شود، در روسازی با ضخامت رویه ۳۰ سانتیمتر با افزایش سرعت، کرنش عرضی در زیر لایه آسفالت و کرنش فشاری قائم روی خاک بستر کاهش می یابد. چنین رفتاری در سایر کرنش های بررسی شده بطور منظم وجود ندارد، به همین دلیل می توان گفت میزان تاثیر سرعت حرکت بر مقدار کرنش به نوع کرنش، آرایش چرخ ها و ضخامت رویه بستگی دارد.

نتایج

مطالعات در راستای تعیین رفتار روسازی تحت بارهای عبوری جهت پیش بینی عملکرد آن ها در بروز خرابی ها است و شناخت بهتر و تحلیل دقیق تر رفتار آن ها باعث طرح یک روسازی با عمر بهره برداری طولانی تر خواهد شد. نرم افزارهای مختلفی جهت مدل سازی روسازی به کار گرفته می شوند، که نرم افزار اجزای محدود ABAQUS یکی از نرم افزارهای توانمند به منظور شبیه سازی رفتار واقعی روسازی راه می باشد، لذا در این پژوهش با استفاده از این نرم افزار به بررسی شرایط بارگذاری دینامیکی و تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان تنش و کرنش بحرانی پرداخته شده است. در نهایت نتایج زیر مشاهده شد:

- ۱- در روسازی های با رویه با ضخامت بالا کرنش عرضی مقدار بحرانی تری را نسبت به کرنش طولی دارد. این رفتار در روسازی با رویه های نازک کاملاً متغیر و وابسته به آرایش محور است.
- ۲- در راستای این پژوهش نرم افزار ABAQUS به دلیل امکان مدل سازی شرایط مختلف روسازی و دقت بالای نتایج، ابزاری مناسب برای ارزیابی رفتار روسازی های انعطاف پذیر تحت بارگذاری های دینامیکی می باشد.
- ۳- کرنش فشاری قائم روی خاک بستر نسبت به سایر پاسخ های بررسی شده، به تغییرات سرعت وابستگی کمتری را داشته و مقدار تاثیر آن کمتر از ۵ درصد است.
- ۴- پاسخ های بحرانی با تغییرات سرعت کاملاً وابسته به آرایش محور و ضخامت رویه است و پاسخ های بحرانی همواره با افزایش سرعت روند یکسانی را ندارد. از طرفی دیگر با تغییر ضخامت رویه در مدل سازی های عددی سه بعدی، رفتار روسازی با تغییر همراه بوده و به عنوان مثال در روسازی های با رویه ضخیم، کرنش ها به جز کرنش فشاری قائم در محور تاندم کاهش می یابد.

منابع

فصیحی، فاضل، ۱۳۹۰، مطالعه عددی تحلیل و طراحی روسازی های انعطاف پذیر راه ها و استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، دانشگاه سمنان.

- Ahmed, M. U., Rahman, A., Islam, M. R., & Tarefder, R. A. (2015). Combined effect of asphalt concrete cross-anisotropy and temperature variation on pavement stress – strain under dynamic loading. *Construction and Building Materials*, 93, 685–694.
- Al-qadi, I. L., Wang, H., & Tutumluer, E. (2010). Dynamic Analysis of Thin Asphalt Pavements by Using Cross-Anisotropic Stress-Dependent Properties for Granular Layer. *Transportation Research Board*, 2154.1, 156–163.



- Al-qadi, I. L., Wang, H., Yoo, P. J., & Dessouky, S. H. (2008). Dynamic Analysis and In Situ Validation of Perpetual Pavement Response to Vehicular Loading. *Transportation Research Journal*, 29–39.
- Al-qadi, I. L., & Yoo, P. J. (2007). Effect of surface tangential contact stresses on flexible pavement response. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 76, 663–692.
- Alkaissi, Z. A. (2020). Effect of High Temperature and Traffic Loading on Rutting Performance of Flexible Pavement. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(1), 1–4.
- Beskou, N. D., & Theodorakopoulos, D. D. (2011). Dynamic effects of moving loads on road pavements : A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(4), 547–567.
- Chatti, K., Kim, H., Yun, K., Mahoney, J., & Monismith, C. (1996). Field investigation into effects of vehicle speed and tire pressure on asphalt concrete pavement strains. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1539), 66–71.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures* (4th editio). Pearson Education.
- Dassault Systems. (2017). *Getting Started with Abaqus: Interactive Edition*.
- Demir, D. D., Bildik, N., & Sinir, B. G. (2014). Linear dynamical analysis of fractionally damped beams and rods. *Journal of Engineering Mathematics*, 85(1), 131–147.
- Filho, P. B., Raymundo, H., Machado, S. T., Leite, A. R. C. A. P., & Sacomano, J. B. (2016). Configurations of tire pressure on the pavement for commercial vehicles: calculation of the n number and the consequences on pavement performance. *Independent Journal of Management & Production*, 7, 584–605.
- Han, D., Zhu, G., Hu, H., & Li, L. (2018). Dynamic simulation analysis of the tire-pavement system considering temperature fields. *Construction and Building Materials*, 171, 261–272.
- Hernandez, J. A., Gamez, A., & Al-qadi, I. L. (2016). Effect of wide-base tires on nationwide flexible pavement systems numerical modeling. *Transportation Research Record*, 104–112.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (Second Edi). Pearson Education.
- Leiben, Z., Wang, X., Wang, Z., Yang, B., Tian, Y., & He, R. (2018). Damping characteristics of cement asphalt emulsion mortars. *Construction and Building Materials*, 173, 201–208.
- Li, M., Wang, H., Xu, G., & Xie, P. (2017). Finite element modeling and parametric analysis of viscoelastic and nonlinear pavement responses under dynamic FWD loading. *Construction and Building Materials*, 141, 23–35.
- Liu, X., Zhang, X., Wang, H., & Jiang, B. (2019). Laboratory testing and analysis of dynamic and static resilient modulus of subgrade soil under various influencing factors. *Construction and Building Materials*, 195, 178–186.
- Nahi, M. H., Ismail, A., & Ariffin, A. K. (2011). Analysis of asphalt pavement under nonuniform tire-pavement contact stress using finite element method. *Journal of Applied Sciences*, 11(14), 2562–2569.
- Nilsson, R. N., Oost, I., & Hopman, P. C. (1996). Viscoelastic analysis of full-scale pavements: validation of VEROAD. *Transportation Research Record*, 1539, 81–87.
- Qian, J., Wang, Y., Lin, Z., Liu, Y., & Su, T. (2016). Dynamic shakedown analysis of flexible pavement under traffic moving loading. *Procedia Engineering*, 143(Ictg), 1293–1300.
- Rahman, M. T., Mahmud, K., & Ahsan, S. (2011). Stress-strain characteristics of flexible pavement using finite element analysis. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(1), 233.
- Rameshkhah, S., Olounabadi, M. M., & Malekzadeh, P. (2018). Dynamic response analysis of viscoelastic pavement using differential quadrature element method. *International Journal of Pavement Engineering*, 0(0), 1–15.



- Saad, B., Mitri, H., & Poorooshab, H. (2005). Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 460–469.
- Sebaaly, P. E., Tabatabaee, N., Kulakowski, B., & Scullion, T. (1991). Instrumentation for flexible pavements—Field performance of selected sensors. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Uddin, W., & Garza, S. (2004). 3D-FE modeling and simulation of airfield pavements subjected to FWD impact load pulse and wheel loads. In *Airfield Pavements: Challenges and New Technologies* (pp. 304–315).
- Ulloa, A., Hajj, E. Y., Siddharthan, R. V., & Sebaaly, P. E. (2013). Equivalent loading frequencies for dynamic analysis of asphalt pavements. 25(September), 1162–1170.
- Wang, H., & Al-qadi, I. L. (2009). Combined Effect of Moving Wheel Loading and Three-Dimensional Contact Stresses on Perpetual Pavement Responses. *Transportation Research Board*, 53–61.
- Wang, H., & Al-qadi, I. L. (2010). Evaluation of surface-related pavement damage due to tire braking. *Road Materials and Pavement Design*, (December 2012), 101–121.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. (1975). *Principles of pavement design* (2nd Editio). New York: John Wiley.
- Yoo, P. J., & Al-qadi, I. L. (2007). Effect of transient dynamic loading on flexible pavements. *Transportation Research Record*, 1990, 129–140.
- Zhong, X. G., Zeng, X., & Rose, J. G. (2002). Shear modulus and damping ratio of rubber-modified asphalt mixes and unsaturated subgrade soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 496–502.