آنالیز عددی روسازی راه آسفالتی تحت ترافیک عبوری مختلف به روش اجزای محدود (مطالعه موردی محور بابل- شیرگاه)

مقاله علمی - پژوهشی

*محسن عموزاده عمرانی (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران
رضوان باباگلی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران
سودابه مهری، استادیار، گروه معماری، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران
حمیده ذوالفقاری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mo.omrani@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۳۱۲-۲۹۱

چکیده

روسازی‌های آسفالتی متداول‌ترین نوع روسازی می‌باشند. بیشتر راه‌های موجود در کشور از نوع روسازی انعطاف پذیر است، که در اثر رفت وآمد خودروها تنش‌های متفاوتی به آن اعمال می شود. این تفاوت در تنش‌ها همراه با تنوع ترافیک عبوری از محورها سبب ایجاد خرابی در روسازی می گردد. در این پژوهش، با انجام یک مطالعه موردی در محور بابل-شیرگاه به بررسی آرایش چرخ های مختلف انواع خودروهای عبوری از این محور پرداخته شده است. بدین منظور، پاسخ روسازی‌های انعطاف پذیر که تحت تاثیر بار چرخ قرار دارند، با کمک نرم افزار المان محدود ABAQUS تحلیل شده است. خصوصیات مصالح، الاستیک در نظر گرفته شده و میزان تنش‌ها، کرنش‌ها و جابجایی‌ها تحت بارهای وارد شده توسط خودروهای عبوری از مسیر مورد نظر، بدست آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که بیشترین تنش کششی در خودروهای تک محور با چرخ منفرد مربوط به مینی بوس و کمترین مربوط به سواری است و در بین خودروهای چند محور با چرخ دوبل، بیشترین مربوط به تریلی ۵ محور و کمترین مربوط به اتوبوس می‌باشد. در بررسی کرنش و جابجایی، در خودروهای تک محور، بیشترین مربوط به مینی بوس و کمترین مربوط به سواری است. در خودروهای چند محور نیز، بیشترین مربوط به کامیون ۲ محور و کمترین مربوط به اتوبوس می باشد.

واژه‌های کلیدی: روسازی انعطاف پذیر، روش اجزای محدود، آنالیز عددی، ABAQUS

۱- مقدمه

راه‌ها از اجزای جدایی ناپذیر زیر ساخت‌های یک کشور محسوب می شوند نقش مهمی در بازدهی فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی هر کشور دارند. به همین علت است که توجه بسیار زیادی به ارزیابی رفتار و عملکرد روسازی‌های راه‌ها می‌گردد. از سوی دیگر هزینه‌های اجرای روسازی آسفالتی زیاد است و با کمی تغییر در نحوه ی اجرا، تغییرات قابل توجهی در هزینه‌های مصرفی

حاصل می گردد؛ از این رو حساسیت در طراحی مناسب و مقرون به صرفه روسازی بسیار زیاد بوده که منجر به تحقیقات زیاد و دامنه داری در این زمینه گشته است (Tahmouresi et al, 2025).در چند دهه اخیر، در بسیاری از کشورها، از روش‌های متنوعی برای طراحی عملکرد روسازی مبتنی بر نتایج آزمایش بزرگ آشتو جهت طراحی استفاده می شود. این روش‌ها دارای محدودیت و ناکارآیی‌هایی در رابطه با نحوه اعمال اثر بارهای ترافیکی و مشخصات محورهای عبوری و مشخصات مکانیکی مصالح لایه های روسازی بوده، قادر به ارزیابی دقیق خرابی‌های سازه‌ای روسازی و کنترل این خرابی‌ها نیستند. با گذشت زمان و پیشرفت و توسعه علم و رایانه در هر دو بخش سخت افزار و نرم افزار و گسترش و تکامل روش‌های آزمایشگاهی از سوی دیگر، محدودیت‌های موجود در تحلیل سازه‌ای مقاطع روسازی به تدریج از بین رفت (Amoozadeh and Babagoli, 2023). پیدایش و توسعه روش‌های نوین محاسبات عددی امکان ایجاد بررسی کارایی نظریه‌های جدید را در علوم مهندسی به محققین داد. روش‌های طرح روسازی از حالت تجربی خارج شده به تدریج روش‌های نیمه تجربی و روش‌های مبتنی بر اصول و تئوری دقیق علمی (روش‌های مکانستیک) جایگزین روش‌های تجربی گردیدند. یکی از این روش‌ها، مبحث اجزا محدود است که قدرت تحلیل و دقت نتایج در مسایل مهندسی را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.(فصیحی، ۱۳۹۰)

از الزامات یک طراحی مناسب در روسازی شناسایی اثرات محیطی و ترافیکی گوناگون و تاثیر آن‌ها بر عملکرد لایه‌های آسفالتی است. در این تحقیق به بررسی بارهای وارده بر عملکرد لایه‌های آسفالتی با ابزار مورد استفاده در آنالیز به روش المان محدود پرداخته شد. برای این منظور نرم افزار المان محدود سه بعدی ABAQUS به کار گرفته شد.

نرم افزار ABAQUS می‌تواند انواع گوناگون و متنوعی از شبیه سازی‌ها را انجام دهد. تمامی لایه‌های رویه آسفالتی، اساس، زیراساس، بستر به طور جداگانه مدل شوند؛ شرایط تکیه گاهی، نحوه بارگذاری و المان‌بندی لایه‌ها مورد بررسی قرار گیرد.(عالی،۱۳۹٤) خصوصیات لایه‌های روسازی بایستی به گونه‌ای باشد که علاوه بر ضخامت کافی جهت کاهش تنش های اعمال شده و انتقال آنها به بستر طبیعی، در مقابل عوامل جوی و فیزیکی نیز از مقاومت کافی برخوردار باشد که تنش‌های فشاری قائم حاصل از بارگذاری بر روی بستر با افزایش نسبت مدول لایه‌ها و ضخامت روسازی کاهش یابد. این عمل بواسطه افزایش سطح موثر تحمل کننده بار است. شدت این تنش‌ها در زیر سطح بار وارده حداکثر می‌باشد. فخری و غنی زاده، به منظور تحلیل خطی و غیر خطی روسازی‌های انعطاف پذیر، برنامه‌ای به نام Nonpas را توسعه دادند. برنامه توسعه داده شده علاوه بر تحلیل ارتجاعی خطی، امکان تحلیل غیرخطی روسازی را با استفاده از ۵ مدل K-A، NCHRP1-37A، Universal، Uzan و همچنین دو مدل خطی فراهم می سازد .توسعه برنامه Nonpas با هدف برداشتن نخستین گام در توسعه یک نرم افزار تحلیل و طراحی روسازی در داخل کشور مطرح بوده است و با توجه به کد مرجع قابل دسترسی در این برنامه، امکان توسعه در آینده فراهم است. ساده ترین روش برای بررسی رفتار روسازی انعطاف پذیر تحت اثر بار دایره ای، در نظر گرفتن این روسازی‌ها به صورت نیم فضای همگن و سپس تحلیل روسازی با استفاده از نظریه بوسینسک است.(فخری و غنی زاده،۱۳۹۱)

کی منش و همکارانش در سال ۱۳۹٤، در تحقیق خود عامل خرابی را مورد بررسی قرار دادند. خرابی یک فاکتور مهم در طراحی روسازی می‌باشد که عدم شناخت کافی از عوامل ایجاد آن می‌تواند به گسترش خرابی ها، شکست و حتی اضمحلال کامل روسازی منجر شود. یکی از عوامل موثر در خرابی‌های روسازی آسفالتی وزن محورهای وسایل نقلیه می‌باشد. در این مقاله اثر وزن محورهای مختلف وسایل نقلیه موجود در ایران بر روی خرابی‌های آسفالتی با استفاده از نرم افزار ABAQUS بررسی شده است. از تحلیل نتایج بدست آمده برای نسبت خرابی انواع محورها نتیجه شد که محور تاندم با چرخ تک در هر سمت بیشترین سهم را در خرابی خستگی در جاده‌های کشور دارد و خرابی آن ۳ برابر محور استاندارد است. این محور مربوط به کامیون ۳ محور با وزن محور عقب ۲۰ تن است. باتوجه به نتایج حاصل از این مقاله ان پیشنهاد شد که برای کاهش خرابی خستگی در راه های کشور از کامیون‌های با محور منفرد با چرخ دوبل و محور تاندم با چرخ دوبل در جابجایی بار استفاده شود. همچنین از نتایج

آن در قانون مقررات حداکثر وزن ابعاد وسایل نقلیه در کشور استفاده شود. (کی منش و همکاران،۱۳۹٤)

مطالعه چان و همکارانش در سال ۲۰۱۵، بر روی ارزیابی تاثیر شرایط پیوند بین لایه ای مختلف بر روی تغییرات در پاسخ‌های بحرانی برای روسازی ها مرتبط با عملکرد و عمر سرویس دهی آنها با استفاده از نتایج حاصله از آنالیز المان محدود و تست‌های میدانی در مقیاس حقیقی تمرکز کرده است. نتایج نشان داد که مدل روسازی بسط داده شده قادر است تا تغییر در پاسخ بحرانی روسازی در اثر شرایط اتصال بین لایه ای متفاوت را با دقت زیادی پیش بینی کند و مقادیر پیش بینی شده با مقدارهای اندازه‌گیری از آزمایش‌های میدانی مقیاس بزرگ تطابق خوبی نشان می‌دهند. همچنین مشاهده شد که یک شرایط پیوند بین لایه‌ای خوب می‌تواند به طور مثبت بر روی پاسخ سازه‌ای روسازی آسفالت تاثیر بگذارد که منجر به مزایای سازه‌ای بالقوه برای عملکرد روسازی تقویت شده می‌گردد. بر اساس مشاهدات مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و تحلیلی، تایید شد که شرایط اتصال بین لایه‌ای نقش مهمی در ویژگی‌های پاسخ سازه‌ای سیستم روسازی انعطاف پذیر لایه‌ای و در نتیجه عمر سرویس روسازی دارد. (chun et al , 2015)

در مطالعه ای که توسط یاهو و همکاران انجام شد (۲۰۲٤)، با استفاده از روش اجزای محدود، تأثیر شرایط مختلف چسبندگی در فصل مشترک بین لایه‌های آسفالتی (AC–AC) و بین لایه آسفالتی و اساس (AC–Base) بر پاسخ سازه‌ای و الگوی خرابی روسازی آسفالتی بررسی شد. نتایج نشان داد که کاهش چسبندگی بین لایه‌ها موجب افزایش کرنش کششی طولی در پایین لایه‌های آسفالتی و کرنش فشاری قائم در بالای بستر می‌شود. همچنین، اثرات نامطلوب ضعف چسبندگی در دو فصل مشترک می‌تواند یکدیگر را تشدید کند و در نتیجه، عمر پیش‌بینی‌شده روسازی کاهش یابد. از سوی دیگر، جداشدگی در فصل مشترک –AC AC یا به‌صورت هم‌زمان در هر دو فصل مشترک می‌تواند مکانیزم و محل شروع خرابی روسازی را تغییر دهد؛ به‌ویژه، در حالت عدم چسبندگی کامل AC–AC، محل بحرانی آغاز ترک در لایه‌های آسفالتی نیز تغییر می‌کند.

در مطالعه‌ای که توسط شی و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد، یک مدل عددی پیشرفته مبتنی بر روش اجزای محدود در نرم‌افزار BAQUS برای پیش‌بینی روند شیارشدگی روسازی آسفالتی توسعه داده شد. در این مدل، رفتار حرارتی–ویسکوالاستیک–پلاستیک مخلوط آسفالتی با استفاده از زیرروال UMAT و بارگذاری واقعی ناشی از اندرکنش تایر و روسازی با زیرروال DLOAD شبیه‌سازی شد. همچنین، میدان دمایی روسازی پیش از تحلیل مکانیکی محاسبه و به‌عنوان شرط مرزی وارد مدل شد. نتایج نشان داد که شدت شیارشدگی در محل‌هایی مانند تقاطع‌ها و پارکینگ‌ها علاوه بر افزایش مدت بارگذاری، به گسترش ناحیه تغییرشکل پلاستیک نیز وابسته است. همچنین، مدل امکان تعیین کمی دمای بحرانی آغاز افزایش سریع شیارشدگی را فراهم کرد که می‌تواند در ارزیابی و کنترل این خرابی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱-نحوه ایجاد یک مدل تحلیلی

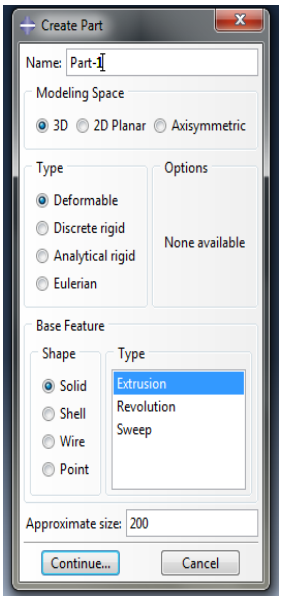
برای ایجاد یک مدل تحلیلی در چند مرحله مشخصات طرح بایستی تعیین گردد. در مرحله نخست باید حالت عمومی سازه جهت مدل شدن مشخص گردد و به دنبال آن رفتار مصالح تشکیل دهنده سازه برای برنامه تعریف گردد. از جمله مسائل مهم ومرتبط با رفتار مصالح معیارهای تسلیم و سخت شوندگی و حالت الاستیک مصالح می باشد. در مرحله بعد اجزای تشکیل دهنده سازه با توجه به هندسه جنس مشخص تعریف می گردند. نوع اجزا مشخص کننده و بیانگر عملکرد سیستم خواهد بود. انتخاب نوع اجزا باید بر اساس آشنایی کامل با هر یک از اجزا تعریف شده در برنامه، رفتار هر یک از آنها تحت بارهای اعمالی، محل استفاده جزء در مدل، ابعاد نسبی اجزاء مختلف و تجربه کاربرد نتایج حاصل از تحلیل‌های مشابه باشد. پس از ایجاد اجزای مدل، اجزا را جهت تشکیل یک سازه همگذاری نموده و مش بندی کرده و در نهایت شرایط مرزی لازم را برای مدل تعریف کرده و بارگذاری نموده و برای تحلیل آماده می‌گردد.

نحوه مدل سازی

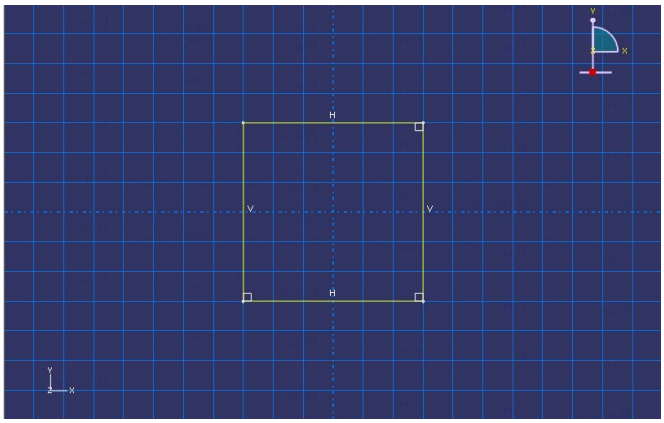
در این پژوهش برای تحلیل خطی روسازی‌های انعطاف پذیر، مدل سه بعدی طراحی گردید. جهت مدل سازی ۳ بعدی مراحل ذیل صورت گرفت.

ایجاد قطعات تشکیل دهنده روسازی

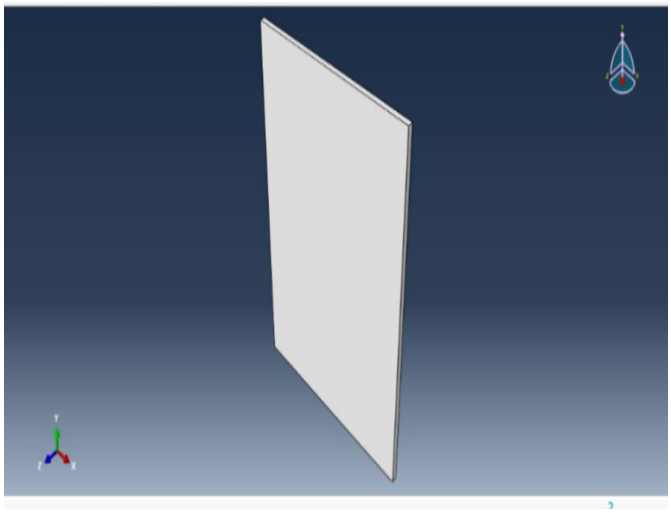
تمام قطعات بکار رفته در مدل (لایه اسفالتی، اساس ، زیر اساس و بستر) بوسیله Solid ایجاد می‌گردد. برای نحوه ساختن دال به صورت زیر عمل می‌کنیم. از منوی Part و زیر شاخه create part مطابق شکل عمل کرده و به دنبال آن مطابق شکل‌های ۱ الی ٤ ترسیم می‌گردد.



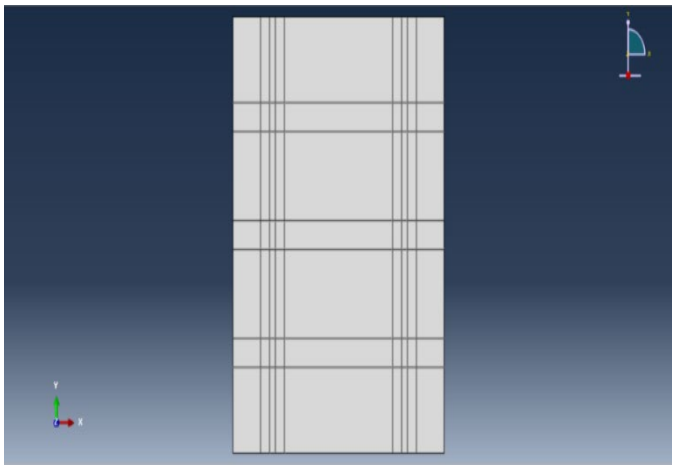
شکل ۱. نحوه تعریف مقطع روسازی آسفالتی



شکل ۲. ترسیم روسازی



شکل۳. شکل لایه آسفالتی

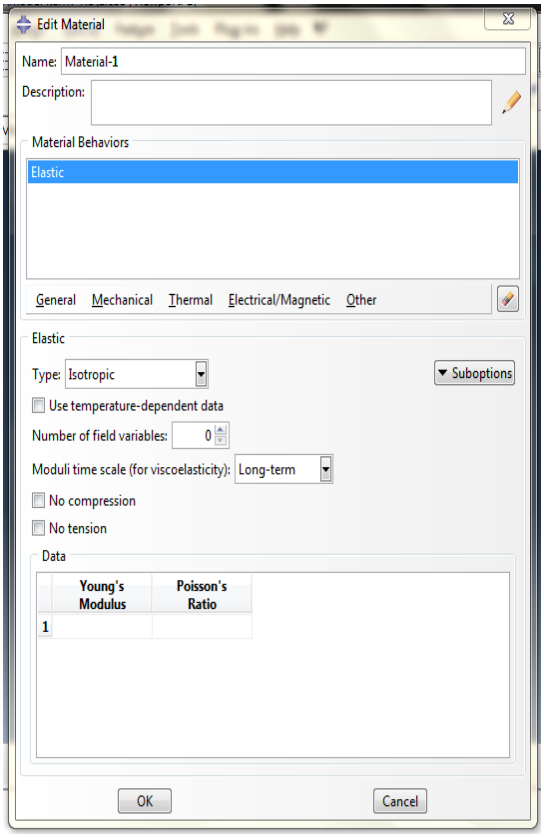


شکل ٤. پارتیشن بندی

برای مدل کردن سایر مصالح در لایه‌های اساس، زیراساس و بستر روسازی به همین نحو عمل کرده و ضخامت های مورد نظر وارد می‌شود.

تعریف جنس و ضخامت اجزا

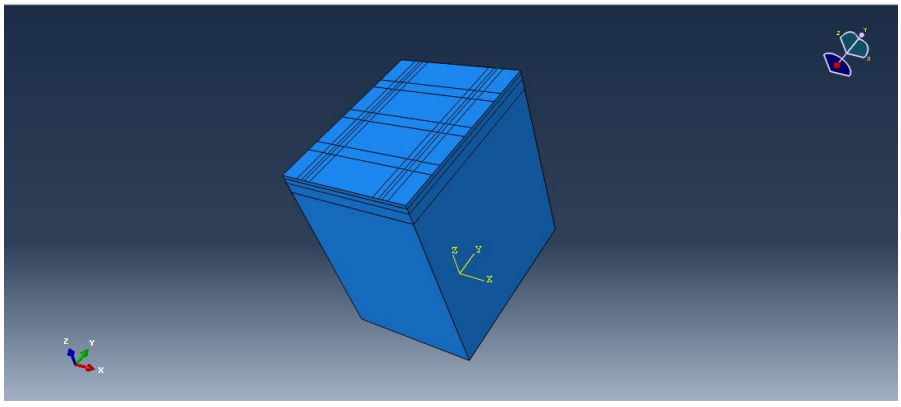
در این قسمت چگالی جسم و خواص الاستیک مصالح در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۵ نحوه وارد کردن حالت الاستیک ماده نشان داده شده است.



شکل ۵. تعریف خواص الاستیک مصالح

همگذاری (مونتاژ) اجزا

در این قسمت اجزای ساخته شده با یکدیگر مونتاژ می‌شود. این کار با استفاده از گزینه Assembly صورت می‌گیرد. نمونه مونتاژ شده در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل ٦. نمونه روسازی انعطاف پذیر همگذاری شده

بارگذاری و ایجاد شرایط مرزی

بارها سازه را دچار تغییر شکل می‌کنند، بنابراین باعث ایجاد تنش در سازه می‌شوند. معمول‌ترین انواع بارگذاری عبارتند از:

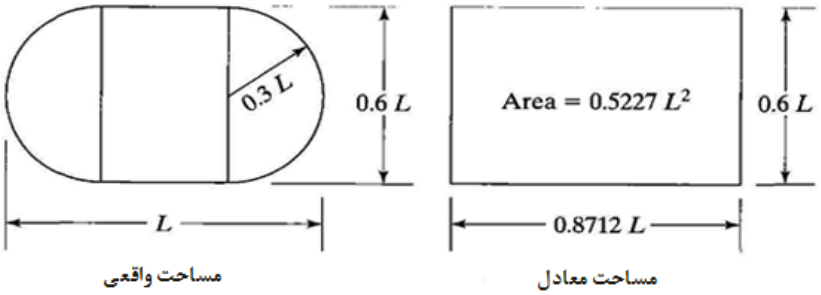
-بارهای متمرکز

-بارهای کششی و انقباضی گستره بر روی سطوح

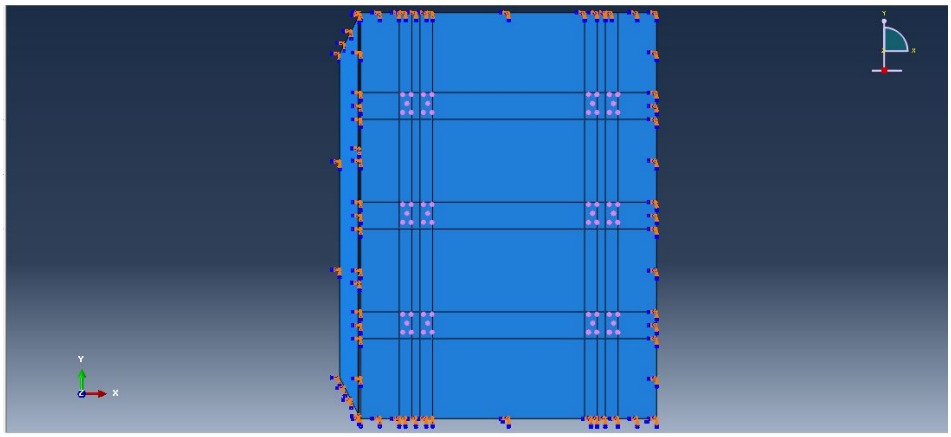
-بارها و لنگرهای خطی بر لبه‌های پوسته

-نیروهای حجمی مانند جاذبه

بار وارده به صورت فشاری در زیر هر چرخ بر روسازی وارد شده و سطح اثر چرخ‌ها بر روسازی به صورت بیضوی می‌باشد که به مستطیلی معادل تبدیل می‌شود. در شکل ۷ نحوه مصاحبه مستطیل معادل قابل مشاهده است.

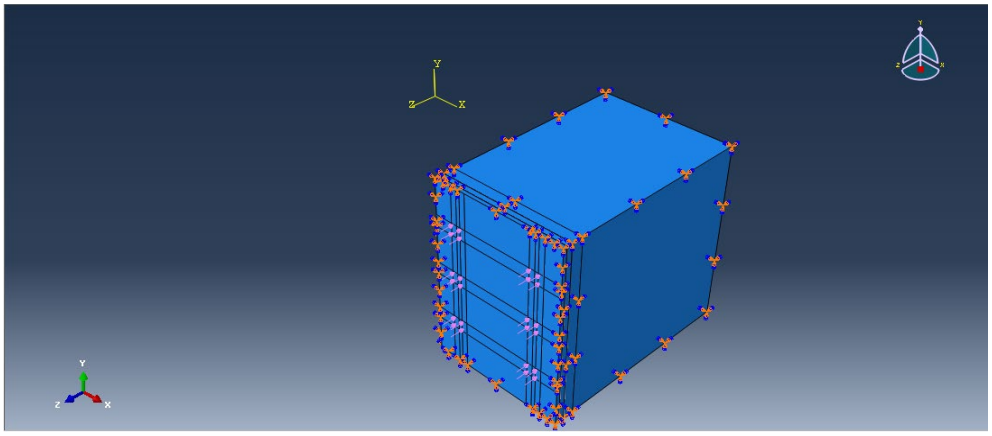


شکل ۷. نحوه محاسبه مستطیل بارگذاری معادل (نخعی، ۱۳۹۳)

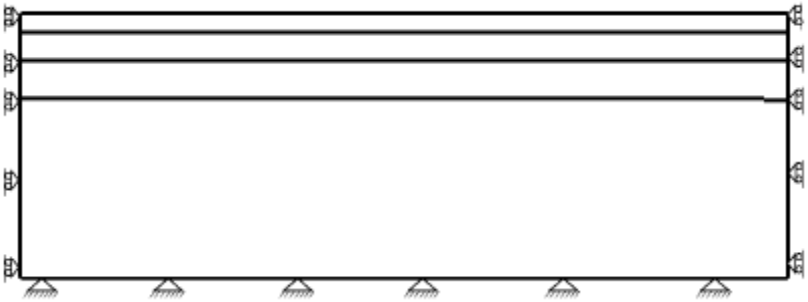


شکل ۸. نحوه بارگذاری

شرایط مرزی برای ایجاد قیود در بخش‌هایی از مدل به کار گرفته می‌شوند تا مدل ثابت باقی مانده یا به مقدار از پیش تعیین شده ای حرکت کند. تکیه گاه‌ها یکی از بخش‌های مهم در هنگام مدل سازی می‌باشند، زیرا اگر تکیه گاه تعریف شده برای مدل با شرایط واقعی تفاوت داشته باشد، در نهایت تمامی پارامترها به صورت اشتباه تحلیل می‌شوند. به همین دلیل، ابتدا باید شرایط واقعی و نحوه رفتار لایه‌های روسازی در هنگام بارگذاری را درک کرد و سپس تکیه‌گاه‌های متناسب با شرایط واقعی را انتخاب نمود. با توجه به مطالعات گذشته محققین، نحوه رفتار لایه بستر به صورت گیردار است و همچنین اطراف لایه‌های رویه آسفالتی، اساس، زیراساس و بستر به گونه‌یی عمل می‌کنند که لایه‌ها در راستای قائم آزادی عمل دارند و در دیگر راستاها ثابت می‌باشند. در این پژوهش نیز برای تعریف تکیه‌گاه شکل‌های ۸ الی ۱۰ از مطالب فوق استفاده شد.



شکل ۹. اعمال شرایط مرزی

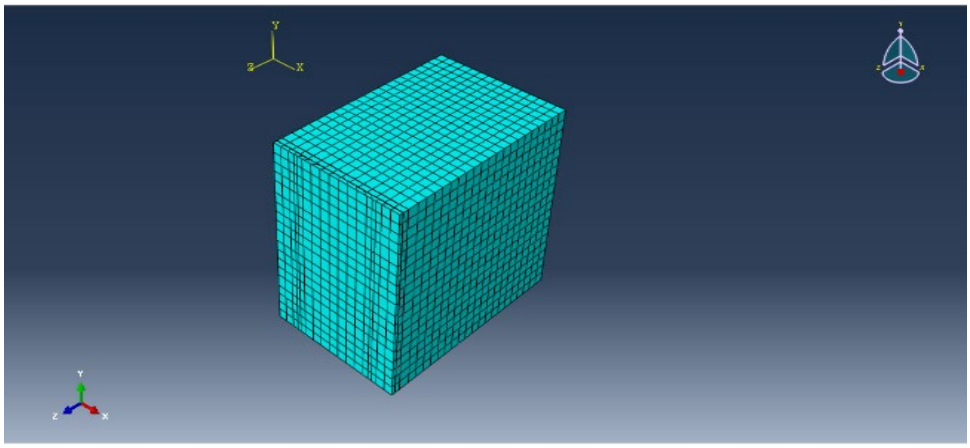


شکل ۱۰. تصویر شماتیک اعمال شرایط تکیه گاهی لایه های مختلف روسازی

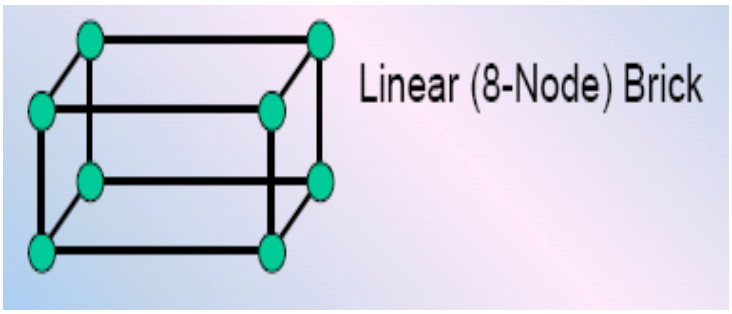
هندسه مجزا (المان‌های بکار رفته و مش بندی)

المان های محدود و گره‌ها، زیر بنای هندسه سازه‌ای را که قرار است تحلیل شود، می‌سازند. هر المان در مدل بیانگر بخش مجزایی از سازه است که به نوبه خود از المان‌های متعدد و متصل به یکدیگر تشکیل شده است. المان‌ها توسط گره‌های مشترک به یکدیگر متصل می‌شوند. مختصات گره‌ها و نحوه اتصال المان‌ها (که نشان می‌دهد کدام گره به کدام گره تعلق دارد) هندسه مدل را تشکیل می‌دهد. تمامی المان‌ها و گره‌ها در یک مدل از مش بندی اعضا در آن مدل بوجود می‌آیند. معمولاً مش‌بندی تنها تقریبی از شکل واقعی سازه را بوجود می‌آورد. نوع المان، شکل، موقعیت و تعداد المان های استفاده شده در مش بندی، جواب‌های حاصل از تحلیل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هر چه مش بندی ریزتر (یعنی تعداد المان بیشتر) باشد، در اثر مش بندی (شکل ۱۱) نتایج حاصل از تحلیل دقیق تر خواهند بود. در این پژوهش، تمامی لایه‌های رویه آسفالتی، اساس، زیراساس و بستر بطور جداگانه مدل شده و سطح تماس بین لایه‌ها دارای پیوستگی کامل می‌باشند.

نوع المان‌های بکار رفته به صورت المان‌های سه بعدی مکعبی ۸ گره‌ای در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۱. مش بندی



شکل ۱۲. شکل المان‌های بکار رفته در برنامه

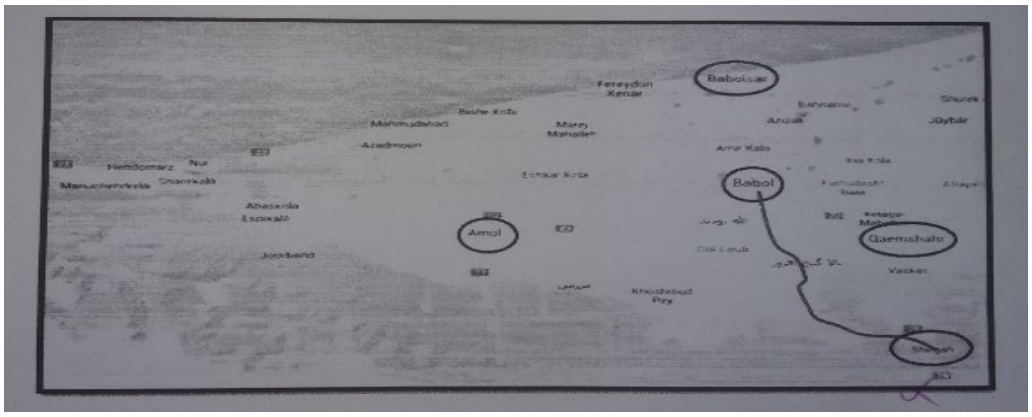
۲-۲-منطقه مورد نظر (محور بابل-شیرگاه)

محور بابل- شیرگاه تاثیر زیادی بر روی منطقه طرح که شمال و شمال شرقی استان مازندران می‌شود، خواهد داشت و موجب جذب ترافیک از محورهای زیر می‌شود که نقشه محور مورد نظر در شکل ۱۳ قابل مشاهده می‌باشد.

الف- بابل- قائم شهر

ب- قائم شهر- شیرگاه

ج-بابل-آمل



شکل ۱۳. نقشه محور راه بابل- شیرگاه (شرکت مهندسین مشاور عمران دشت فراساز)

با بررسی میدانی و تردد شماری که در مسیر فوق انجام گرفت، وسایل نقلیه عبوری از این مسیر شامل سواری– وانت– مینی بوس– اتوبوس– کامیون دو محور– کامیون سه محور– کامیون بالای سه محور (تریلی پنج محور) است.

۳-نتایج

۳-۱- اعتبار سنجی مدل با نتایج میدانی

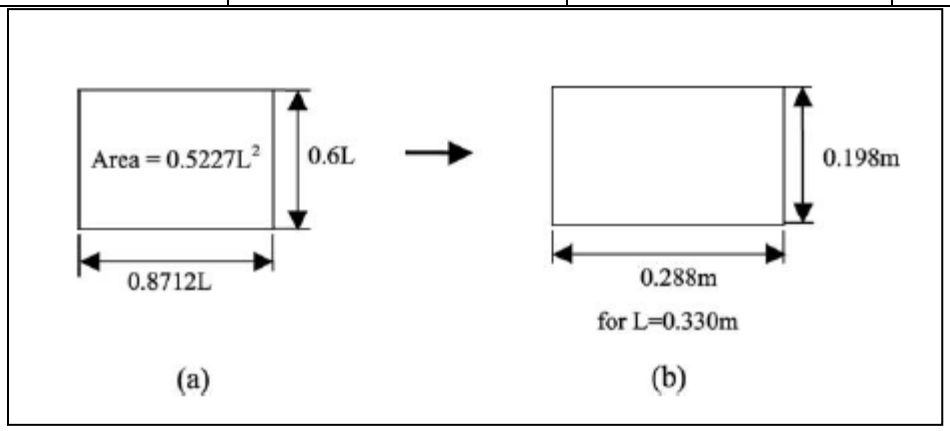
یک مطالعه تحقیقاتی به منظور ترکیب خواص واقعی مواد لایه‌های روسازی و بار متحرک ترافیکی در آنالیز روسازی‌های انعطاف پذیر با استفاده از تئوری المان محدود انجام شده است.

به عنوان یک گام اولیه در این راستا، یک ساختار روسازی که در آن اندازه‌گیری‌های میدانی به هنگام اعمال یک بارگذاری انجام شده بود، انتخاب و به عنوان یک مدل المان محدود شبیه‌سازی شد. مقطع روسازی مورد نظر برای مطالعه موردی در یکی از سایت‌های callington در استرالیا جنوبی می‌باشد. هنگامی که این مدل روسازی تحت بارگذاری استاتیک و دوره‌ای قرار دارد با در نظر گرفتن خواص خطی و غیرخطی مصالح لایه‌های روسازی، آنالیز المان محدود با استفاده از بسته کامپیوتری المان محدود ABAQUS/STANDARD صورت گرفت.

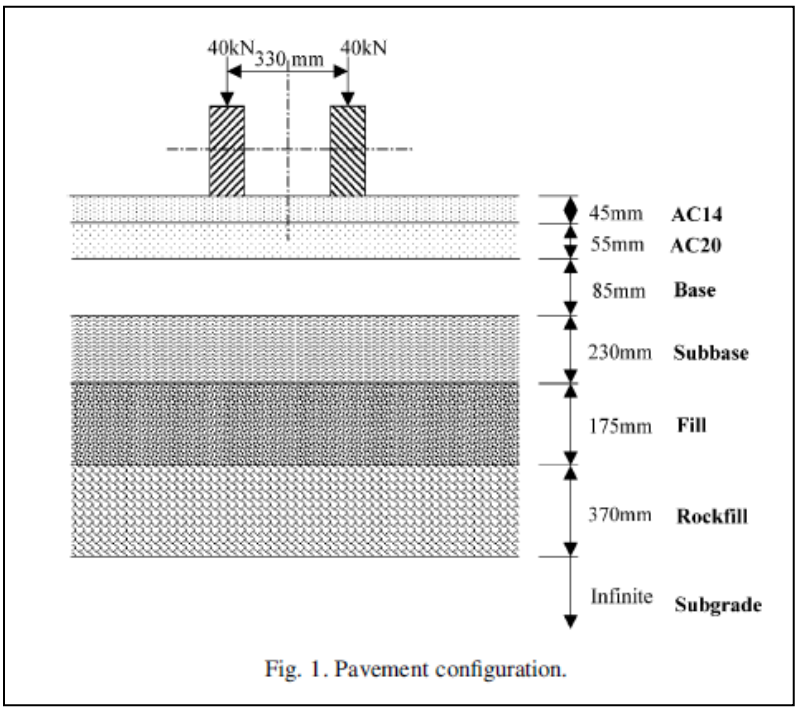
مشخصات لایه‌های روسازی در جدول ۱ و مشخصات مربوط به نحوه بارگذاری و سطح اثر بارها در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ قابل مشاهده می باشند. (S.N,Mahmud et al , 2003)

جدول ۱. مشخصات لایه های روسازی و ضخامت لایه مطالعه موردی (S.N,Mahmud et al , 2003)

نوع لایه	ضخامت لایه mm	مدول الاستیسیتهPa	ضریب پواسون
Asphalt (AC14)	۴۵	۱۸×۱۰^۸	۰,۳
Asphalt (AC20)	۵۵	۱۷۲۵×۱۰^۶	۰,۳
Base	۸۵	۱۳۸×۱۰^۶	۰,۳۵
Sub-Base	۲۳۰	۹۶۶×۱۰^۵	۰,۳۵
Fill	۱۷۵	۷۲۴۵×۱۰^۴	۰,۳۵
Rock fill	۳۷۰	۶۲۱×۱۰^۴	۰,۳۵
Subgrade	۵۰۰۰	۱۷۲۵×۱۰^۵	۰,۳۵

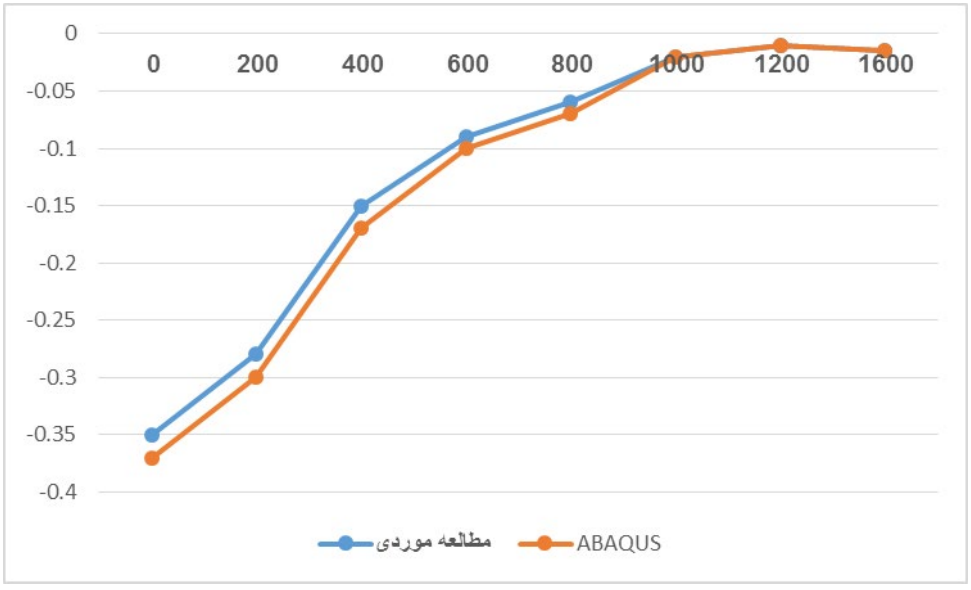


شکل ۱۴. اثر بار و مساحت چرخ (S.N,Mahmud et al , 2003)



شکل ۱۵. ضخامت لایه‌ها و نحوه بارگذاری مطالعه موردی(S.N,Mahmud et al , 2003)

مقایسه بین نتایج مطالعه موردی و نرم افزار ABAQUS در شکل ۱۶ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۶. مقایسه نتایج مطالعه موردی و نرم افزار ABAQUS

٤-مطالعه عددی تحلیل روسازی انعطاف‌پذیر با نرم افزار ABAQUS

در این بخش همانگونه که عنوان شد به منظور تحلیل روسازی انعطاف پذیر محور بابل- شیرگاه، به بررسی انواع بارگذاری ۷ خودروی عبوری از این محور پرداخته می شود. برای مدل کردن لایه آسفالتی یک المانی از جاده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این مدلسازی کلیه لایه‌ها بصورت الاستیک خطی درنظرگرفته شده است. ابعاد مدل ۵×۵×۳/٦۵ می‌باشد. مشخصات لایه‌های مورد استفاده در محور مورد مطالعه در جداول ۲ و ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

دراین مدل خصوصیات لایه‌ها مشابه لایه‌های اجرا شده روسازی درنظرگرفته شده است. امتداد این مسیر دقیقا مشابه امتداد سنسورهای اندازه‌گیری تغییر شکل در روسازی است. همانطور که ملاحظه می‌گردد میزان تغییرات تقریبا مطابق با مطالعه صورت گرفته می‌باشد که نشان‌دهنده دقت خوب تحلیل است. همانطور که مشاهده گردید مدل المانهای محدود ایجاد شده از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد. به همین دلیل برای مدل سازی و آنالیز روسازی در این تحقیق از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. (S.N,Mahmud et al , 2003)

جدول ۲. مشخصات لایه های روسازی محور بابل-شیرگاه دوره ۱۵ ساله (شرکت مهندسین مشاور عمران دشت فراساز)

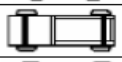
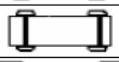
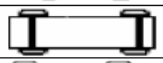
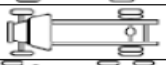
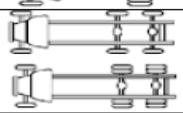
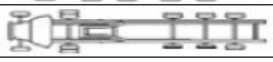
نوع لایه	ضخامت لایه m	مدول الاستیسیته Kg/m^2	ضریب پواسون
رویه آسفالتی	۰,۱	۳۱۵×۱۰^{٦}	۰,۳۵
اساس	۰,۱۵	۲۳۷×۱۰^{۵}	۰,۳
زیر اساس	۰,۳	۱۹۲۵×۱۰^{٤}	۰,۳
بستر	۵	۱٤۰۵×۱۰^{٤}	۰,٤۵

جدول۳. مشخصات لایه های روسازی محور بابل-شیرگاه دوره ۲۰ ساله (شرکت مهندسین مشاور عمران دشت فراساز)

نوع لایه	ضخامت لایه m	مدول الاستیسیته Kg/m^2	ضریب پواسون
رویه آسفالتی	۰,۱۲	۳۱۵×۱۰^{٦}	۰,۳۵
اساس	۰,۱۵	۲۳۷×۱۰^{۵}	۰,۳
زیر اساس	۰,۳	۱۹۲۵×۱۰^{٤}	۰,۳
بستر	۵	۱٤۰۵×۱۰^{٤}	۰,٤۵

طبقه بندی وسایل نقلیه در محورهای مختلف کشور در جدول ۳ و مشخصات وسایل نقلیه عبوری از محور مورد مطالعه در جدول ٤ قابل مشاهده می باشد.

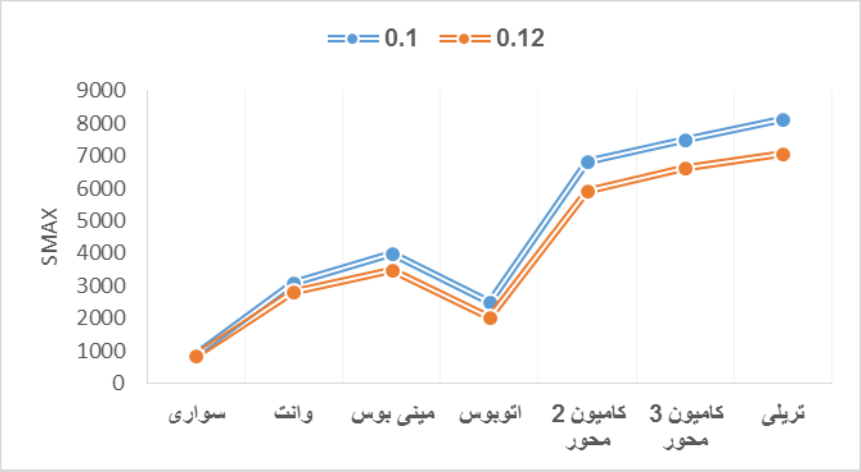
جدول ۳. طبقه بندی وسایل نقلیه مشخصات محور و وزن آنها (شرکت مهندسین مشاور عمران دشت فراساز)

نوع وسیله نقلیه	تعداد محور	آرایش چرخ‌ها	محور جلو		محور وسط		محور عقب		وزن کل (تن)
			نوع	وزن (تن)	نوع	وزن (تن)	نوع	وزن (تن)	
سواری	۲		ساده	۱			ساده	۱	۲
وانت	۲		ساده	۱			ساده	۲	۳
مینی‌بوس	۲		ساده	۳			ساده	۳	۶
اتوبوس	۲		ساده	۳			ساده	۶	۹
کامیون دو محور سبک	۲		ساده	۶			ساده	۹	۱۵
کامیون دو محور سنگین	۲		ساده	۶			ساده	۱۳	۱۹
کامیون سه محور	۳		ساده	۶			مرکب	۲۰	۲۶
تریلی چهار محور	۳		ساده	۶	ساده	۱۰	ساده	۱۰+۱۰	۳۶
					ساده	۱۰	مرکب	۱۶	۳۲
تریلی پنج محور	۵		ساده	۶	مرکب	۱۶	مرکب	۱۸	۴۰
تریلی پنج محور	۵		ساده	۶	ساده	۱۰	مرکب	۲۴	۴۰

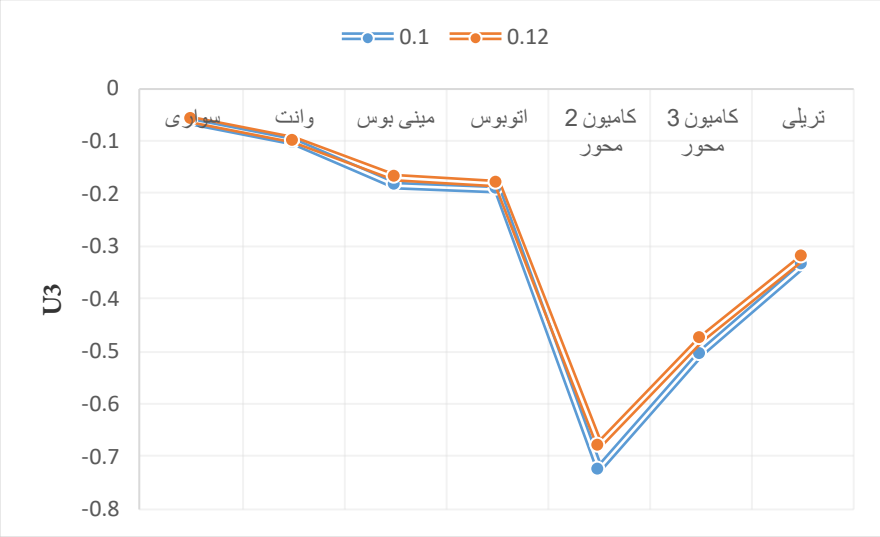
جدول ٤. مشخصات خودروهای محور بابل-شیرگاه

کلاس خودرو	فاصله بین چرخهای محور(mm)	فاصله بین تاندوم (mm)	ابعاد سطح اثر تایر (mm)	فشار تایر (Kg/m^2)
سواری	۱٤٥۰	–	۱٤۰×۲۲۰	۳۱۲٥۰
وانت	۱٤٥۰	–	۱٤۰×۲۲۰	٦۲٥۰۰
مینی بوس	۱۸٦۰	–	۲۰۰×۲٤۰	٦۰۰۰۰
اتوبوس	۲۲٦۸	–	۲٤۰×۳٤۰	۳٥۲۱۱,۲٦
کامیون محور	۱۸٤۲	–	۲۲۰×۲٦۰	۱۰۹۰٦۰,٤۰
کامیون محور	۱۸۹۰	۱۳٥۰	۲٦۰×۳۸۰	۸۳۸۹۲,٦۱
تریلی	۲٥٤۲	۱۳٥۰	۲٦۰×۳۸۰	۳۹۲۱٥,٦۸

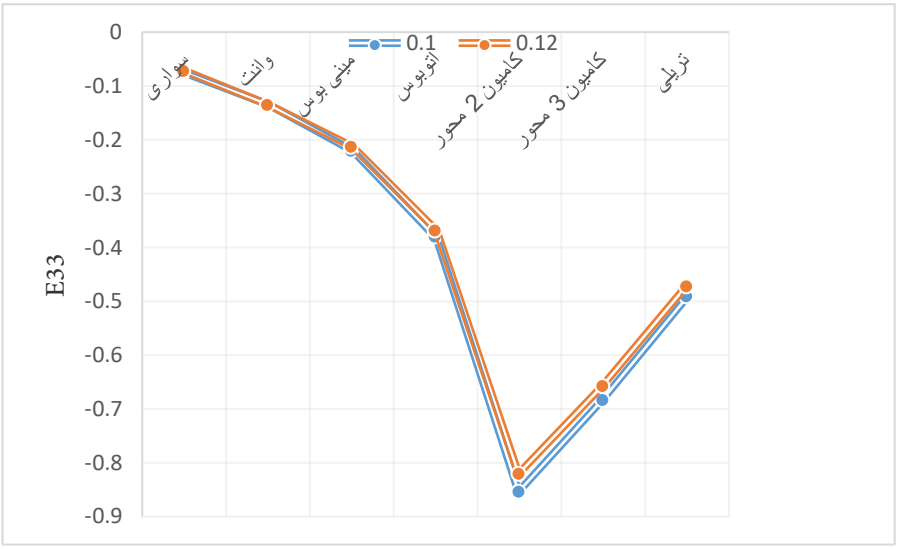
مدل سازی براساس محور عقب خودروها انجام شده و نتایج ماکزیمم تنش کششی در لایه آسفالتی(Smax)، تغییر شکل‌ها و کرنش های قائم در لایه آسفالتی(E33 و U3) برای ۲ دوره طرح ۱۵ و ۲۰ ساله به صورت اشکال ۱۷ الی ۱۹ می‌باشد.



شکل ۱۷. ماکزیمم تنش کششی در لایه اسفالتی بر حسب Kg/m^2



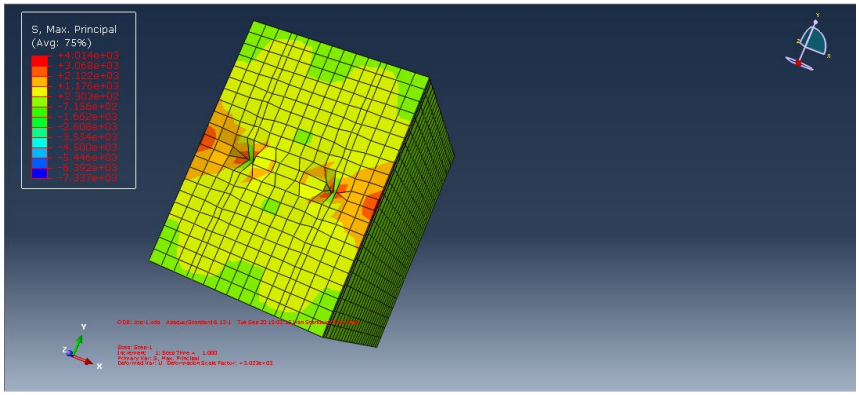
شکل ۱۸. جابجایی زیر سطح بار چرخ



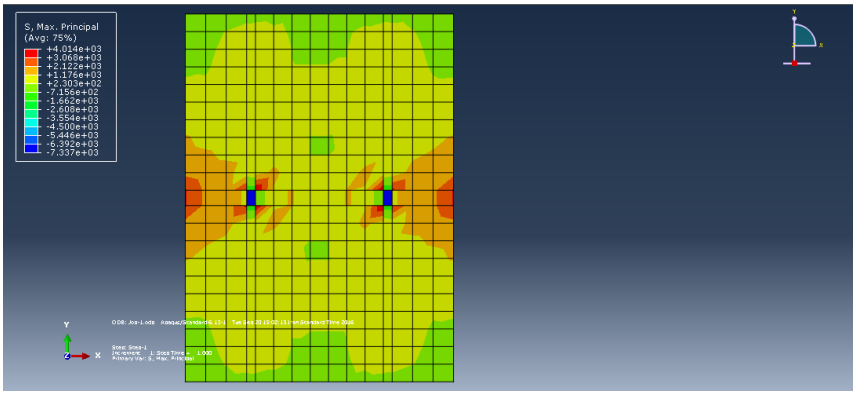
شکل ۱۹. کرنش وارده زیر بار چرخ

بیشترین تنش از میان خودرو با محور و چرخ منفرد مربوط به مینی بوس می‌باشد. سطح اثر بزرگتر و فشار بیشتر تایرها باعث ایجاد مقدار تنش بر روسازی می‌گردد. در میان وسایل نقلیه با آرایش تاندوم در محورهای عقب و چرخ‌های دوبل مربوط به تریلی ۵ محور است. سطح بزرگ چرخها، فشار بالای تایرها، آرایش زوج چرخ محورها و اثر توالی محورها سبب بالا بودن تنش وارده بر روسازی آسفالتی تحت بارگذاری تریلی می‌شود. توالی محورها در این کلاس مهمترین عامل افزایش تنش می‌باشد. آرایش دوبل محور، سبب همپوشانی بین چرخ‌ها و ایجاد یک نوار به صورت بارگذاری بین زوج چرخ‌ها شده و توالی محورها اثر همپوشانی را مضاعف کرده و در نتیجه تنش زیادی بر روسازی تحمیل می‌کنند که نهایتا منجر به افزایش میزان خرابی بر روسازی انعطاف پذیر می‌شوند. همچنین بیشترین کرنش و جابجایی زیر بار چرخ مربوط به کامیون ۲ محور است و بین خودروهای چرخ منفرد، مینی بوس بیشترین کرنش و جابجایی را به سطح روسازی وارد می‌کند.

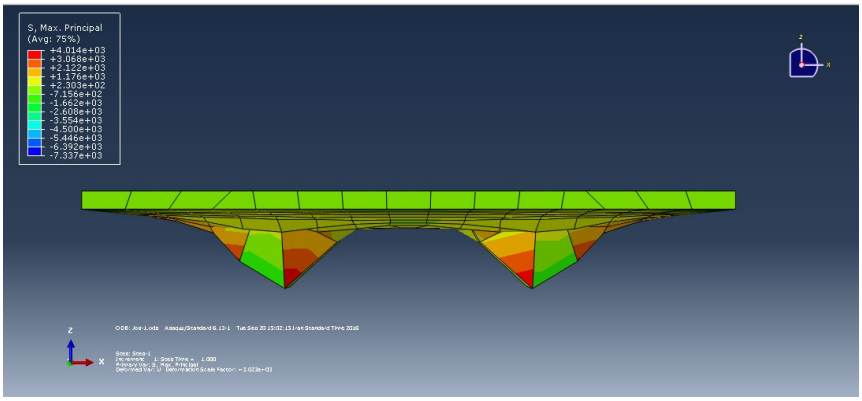
مدل شبیه سازی شده مینی بوس که بیشترین تنش کششی را در خودروهای تک محور بر سطح لایه آسفالتی وارد می‌کند در شکل‌های ۲۰ الی ۲۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲۰. مدل شبیه سازی تحت بارگذاری مینی بوس

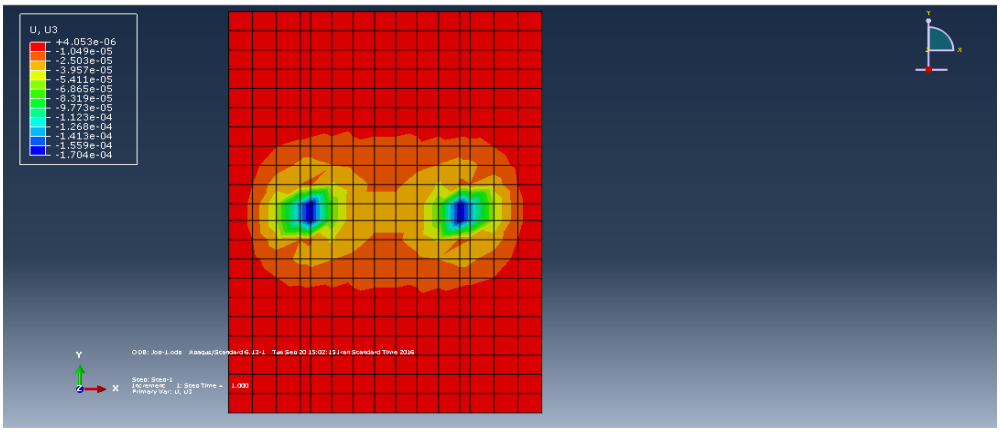


شکل ۲۱. تنش ماکزیمم روی لایه آسفالتی مینی بوس

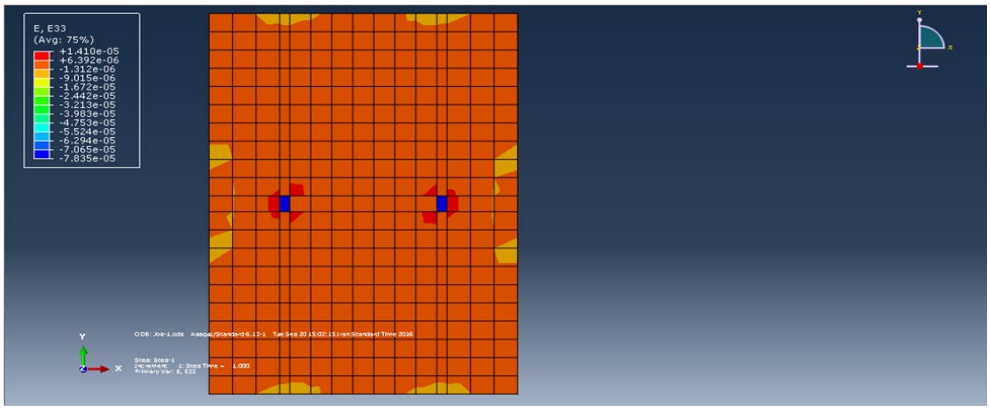


شکل ۲۲. تنش ماکزیمم زیر لایه آسفالتی مینی بوس

و همچنین بیشترین کرنش و جابجایی (تغییر مکان عمودی) در خودروهای تک محور مربوط به مینی بوس می‌باشد، که نمونه شبیه سازی شده در شکل ۲۳ و ۲٤ مشاهده می‌شود.

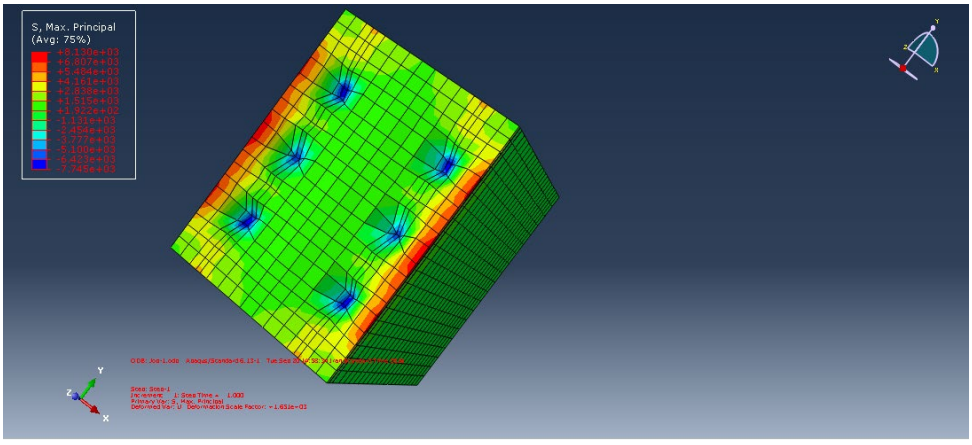


شکل ۲۳. تغییر مکان عمودی مینی بوس

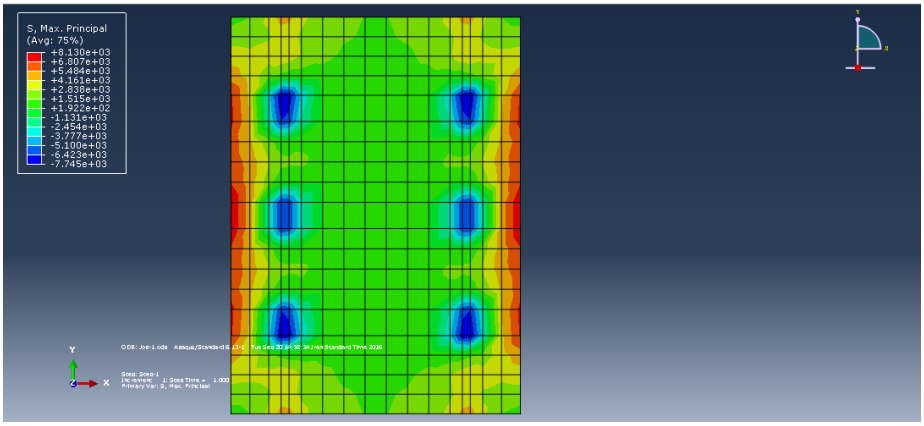


شکل ۲۴. کرنش وارده زیر بار چرخ مینی بوس

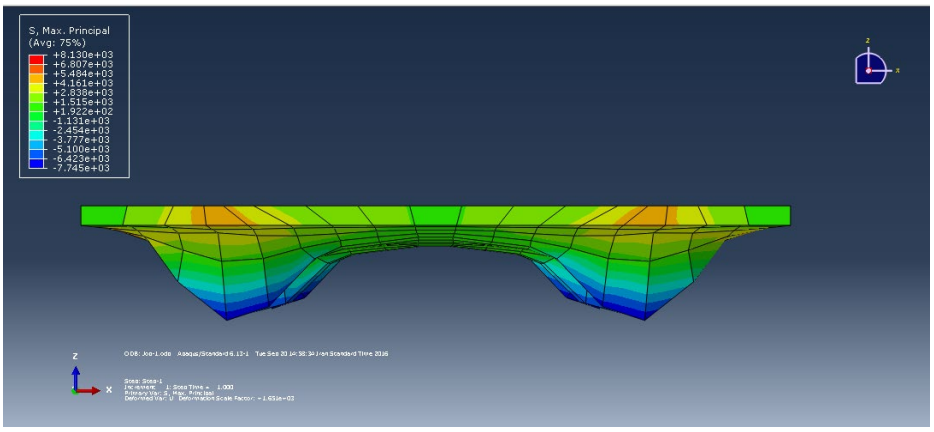
مدل شبیه‌سازی شده تریلی و کامیون ۲محور را در شکل‌های ۲۵ الی ۳۰ مشاهده می‌شود، که بیشترین تنش کششی را در خودروهای چند محور بر سطح لایه آسفالتی را تریلی وارد می‌کند.



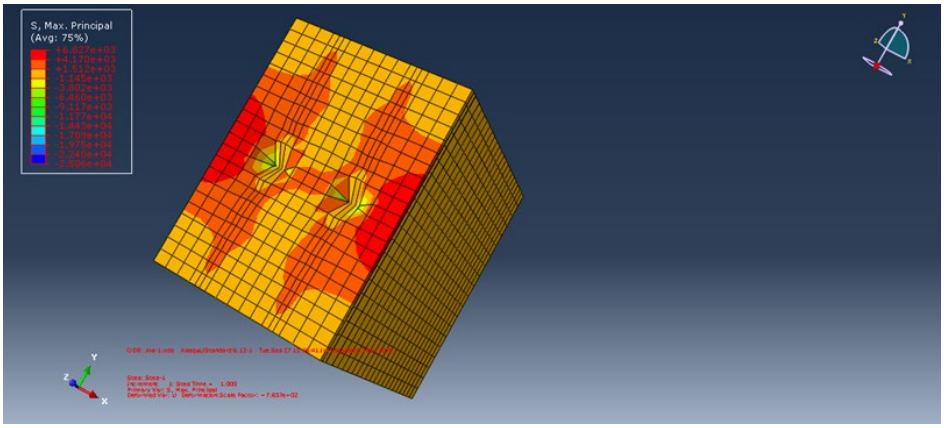
شکل ۲۵. مدل شبیه‌سازی تحت بارگذاری تریلی



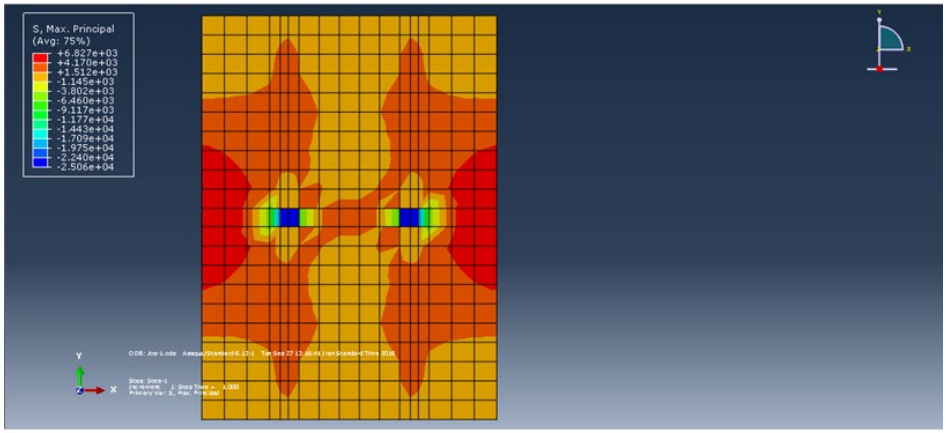
شکل ۲۶. تنش ماکزیمم روی لایه آسفالتی تریلی



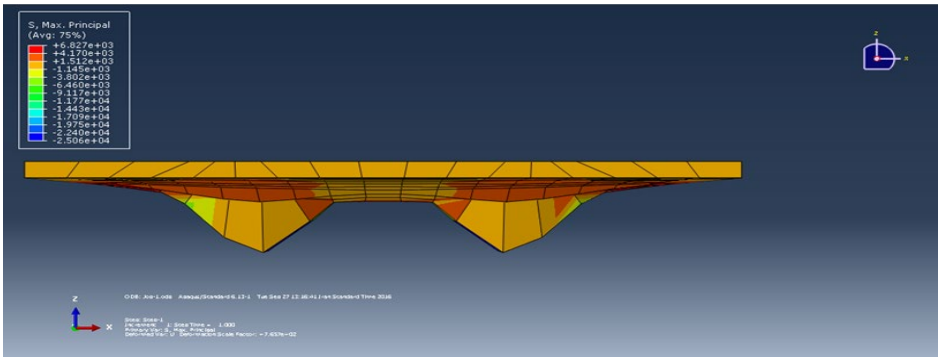
شکل ۲۷. تنش ماکزیمم زیر لایه آسفالتی تریلی



شکل ۲۸. مدل شبیه سازی تحت بارگذاری کامیون ۲ محور

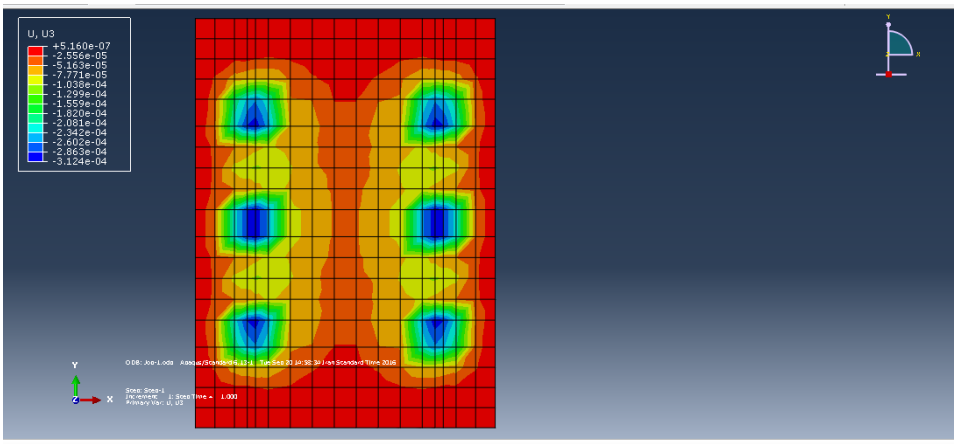


شکل ۲۹. تنش ماکزیمم روی لایه آسفالتی کامیون ۲ محور

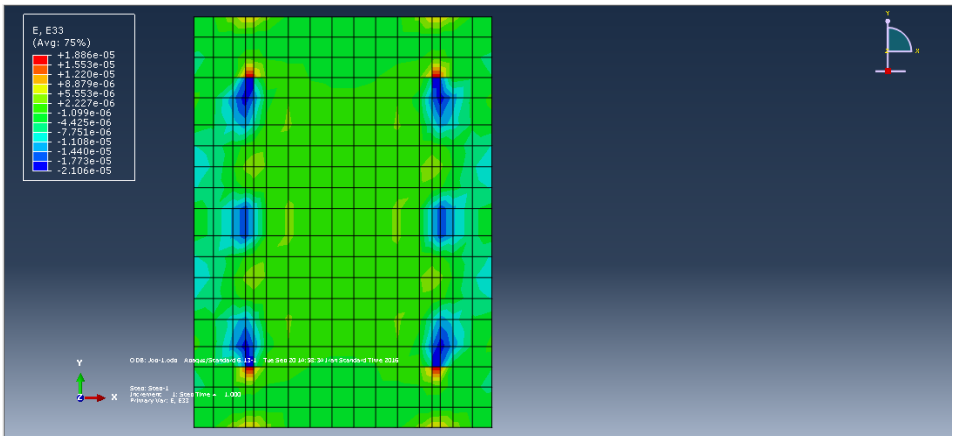


شکل ۳۰. تنش ماکزیمم زیر لایه آسفالتی کامیون ۲ محور

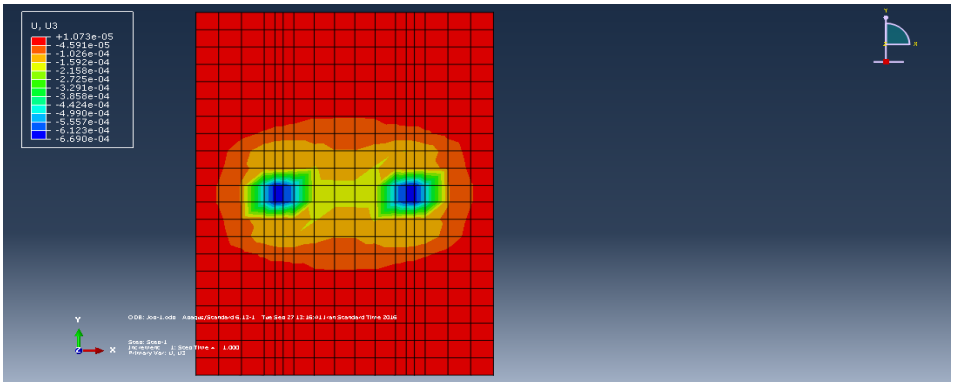
و اما بیشترین کرنش و جابجایی (تغییر مکان عمودی) از میان خودروهای چند محور مربوط به کامیون ۲ محور می‌باشد، که در شکل‌های ۳۱ الی ۳۴ مشاهده می‌شود.



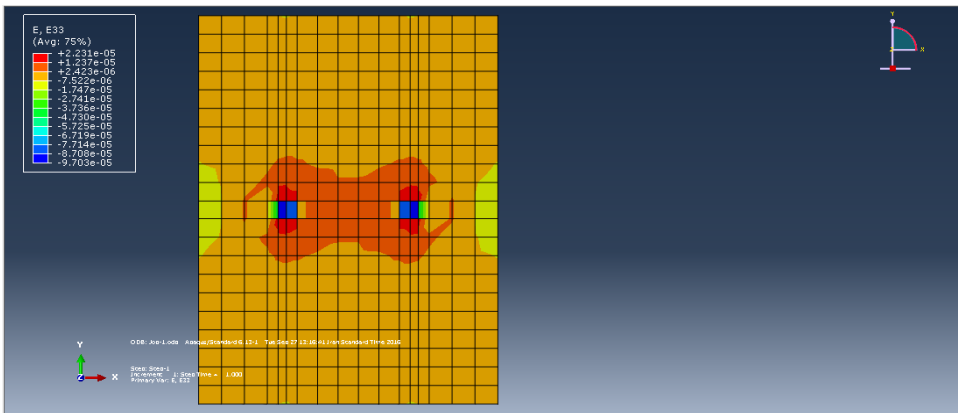
شکل ۳۱. تغییر مکان عمودی تریلی



شکل ۳۲. کرنش وارده زیر بار چرخ تریلی



شکل ۳۳. تغییر مکان عمودی کامیون ۲ محور



شکل ۳٤. کرنش وارده زیر بار چرخ کامیون ۲ محور

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی رفتار روسازی آسفالتی محور بابل-شیرگاه به منظور تعیین تنش، کرنش و جابجایی وارده بر رو سازی، تحت ترافیک حاصل از آرایش چرخ های مختلف انواع خودرو های عبوری از این محور با استفاده مدل سازی در نرم افزار ABAQUS برای ۲ دوره طرح مورد مطالعه می‌پردازد. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد.

-بیشترین تنشی که به روسازی وارد می‌شود مربوط به ماشین‌های سنگین چند محور با چرخ دوبل (تریلی) است.

-بیشترین کرنش و جابجایی مربوط به ماشین‌های سنگین تک محور با چرخ دوبل (کامیون ۲ محور) می‌باشد.

-تعداد محورها و چرخ‌ها تاثیر قابل توجهی بر کرنش وارده و همچنین جابجایی زیر بار چرخ دارد.

-فاصله بین چرخ‌ها در خودروهای سنگین بر میزان کرنش و جابجایی وارده تاثیر گذار است.

- ضخامت لایه آسفالتی در میزان نیروی وارد شده بر روسازی تاثیر بسزایی دارد.

٦-مراجع

-عالی، علی (۱۳۹۱). بررسی اثر تایر بر تنش لایه‌های روسازی با آنالیز المان محدود، *دومین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه‌های عمرانی*، تهران، اسفند.

-فخری، منصور، غنی‌زاده، علی رضا (۱۳۹۱). توسعه برنامه‌ای برای تحلیل غیرخطی روسازی‌های انعطاف پذیر، *مهندسی حمل و نقل*، سال سوم، شماره سوم، بهار.

-فصیحی، فاضل (۱۳۹۰). مطالعه عددی تحلیل و طراحی روسازی انعطاف‌پذیر راه‌ها، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، پایان‌نامه ارشد، دانشگاه سمنان، مهر.

-کی منش، محمودرضا، شفیع پور، ابوذر، میر شکاریان بابکی، مهرداد (۱۳۹٤). ارزیابی تحلیل اثر وزن محورهای وسایل نقلیه مختلف بر خرابی‌های روسازی آسفالتی با استفاده از روش المان محدود، *دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران*، تبریز، اردیبهشت.

-گزارش مطالعاتی شرکت مشاور عمران دشت فراساز، (۱۳۹٤). فصل پنجم، ترافیک، فصل ششم، *روسازی*.

-نخعی، مصطفی، دولت پور، امین (۱۳۹۳). آنالیز طراحی روسازی (ویرایش دوم).

-Amoozadeh, O. M., & Babagoli, R. (2023). Evaluation of the effect of nano-calcium carbonate mechanical performance of asphalt binder and mixture. *Journal of Transportation Research*, *20*(3), 467-488.

-Burmister, D. M., (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems, *Journal of Applied Physics.* Vol. 16, 89-94, 126-127, 296-302, 1945.

-Chun, Sanghyun, Kukjoo Kim, James Greene, and Bouzid Choubane (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.

-muhammad N.S. Hadi, B.C.Bodhinayake, (2003). Non-linear finite element analysis of flexible pavements, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Wollongong, *NSW 2522,* Australia

-Shi, Shuang, Jusheng Tong, Feng Chen, Jianying Hu, and Tao Ma (2023). Towards an improved prediction of asphalt pavement rutting through thermal-mechanical coupled constitutive modelling. *International Journal of Pavement Engineering* 24, No. 1: 2192495.

-Tahmouresi, G., Amouzadeh Omrani, M., Divandari, H., & Seyedkazemi, A. (2025). Experimental investigation of the mechanical properties of asphalt mixtures containing lightweight expanded clay aggregate replacing coarse aggregates and modified with nano-AL2O3. *International Journal of Pavement Engineering*, *26*(1), 2532690.

-Yao, Kang, Qiao Dong, Xueqin Chen, Xiang Wang, Shengjia Xie, and Zhiqiang Cheng. (2024). Influence of bonding condition of different interfaces on the mechanical responses and failure mode of asphalt pavement. *Canadian Journal of Civil Engineering* 51, No. 6 (2024): 640-653.

Numerical Analysis of Asphalt Pavements under Various Traffic Loads Using the Finite Element Method (Case Study: Babol-Shirgah Route)

Mohsen Amouzadeh Omrani, *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.*
Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Mazandaran, Iran.
Soodabeh Mehri, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.
Hamideh Zolfaghary, Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran.

E-mail: Mo.Omrani@iau.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT
Asphalt pavement is the most common type of pavements. More roads in the country are flexible pavements and different tensions are applied due to movement of vehicles on the road. This difference in stress along with a variety of traffic passing through the axles causes damage to the pavement. This case study has been conducted to examine the arrangement of different wheels in type of vehicles passing through Babol-Shirgah axis. For this purpose, the response of flexible pavement that are affected by wheel load has been analyzed with ABAQUS finite element software. Materials should be elastic. The stresses, strains and displacements under loads by vehicles passing the road have been calculated. Results showed that the highest and lowest tensile stress in single-shaft vehicles with single wheels is related to minibus and cars, respectively, and in multi-axis vehicles with double wheels is related to 5-axis trucks and buses, respectively. In review, the highest strain and replacement in single-shaft vehicles is related to minibus and in multi-axis vehicles is related to two-axis truck. The lowest strain and replacement in single-shaft is related to car and in multi-axis vehicles is related to bus.

Keywords: Flexible Pavement, Finite Element Method, Numerical Analysis, ABAQUS