

## بررسی تاثیر نحوه آرایش چرخ های وسایل نقلیه سنگین در پدیده شیار شدگی با استفاده از

### شبیه سازی در نرم افزار آباکوس

حمیدرضا احمدآبادی<sup>۱</sup>، دکتر ابراهیم صفا<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

۲- استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

#### چکیده

خرابی یک فاکتور مهم در طراحی روسازی می باشد که عدم شناخت کافی از عوامل ایجاد آن می تواند به گسترش خرابی ها، شکست و حتی اضمحلال کامل روسازی منجر شود. وسایل نقلیه مختلف، سطوح خرابی متفاوتی را روی روسازی ایجاد می کنند که البته این خرابی ها بسته به تعداد و شکل محورهای بارگذاری، نوع سیستم تعلیق، نوع لاستیک و میزان فشار باد داخل لاستیک ها، متفاوت اند. در این مقاله قصد بر آن است تا میزان آسیب وارده به لایه های روسازی آسفالت که در اثر عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین ایجاد می شود را مورد مطالعه و بررسی قرار دهیم. پس از شناسایی مخرب ترین وسایل نقلیه با استفاده از فرآیند شبیه سازی با استفاده از روش المان محدود بهره گرفته شده است. ابتدا با شبیه سازی فرآیند آسیب برای یک نمونه با مدل سه بعدی مشخص با هدف کاهش میزان خرابی به کمترین مقدار ممکن، نسبت به اصلاح موقعیت و آرایش محورها در کامیون های چهار محوره ۱۲ چرخ، پنج محوره ۱۴ چرخ و پنج محوره ۱۸ چرخ پرداخته شده است. نتایج شبیه سازی حاکی از آن بوده است که مقدار ماکزیم کرنش کششی در لایه آسفالت در سیکل های بارگذاری در طرح های اصلاح شده از کامیون های چهار و پنج محوره به طور محسوسی در مقایسه با طرح اولیه کاهش داشته است. به طوری که در طرح های اصلاح شده، نرخ رشد کرنش کششی در لایه آسفالت نسبت به طرح اولیه، در کامیون چهار محوره به میزان ۶/۷۳ درصد، در کامیون پنج محوره چهارده چرخ به میزان ۹/۲۶ درصد و در کامیون پنج محوره هجده چرخ به میزان ۱۱/۲۲ درصد کاهش داشته است.

**واژگان کلیدی:** شبیه سازی المان محدود، روسازی آسفالت، رفتار ویسکوالاستیک، محور کامیون، عمر خستگی و

شیار شدگی

## مقدمه

حمل و نقل جاده ای بار در تمام دنیا وجود دارد و در حال تبدیل شدن به شیوه غالب ، حتی در مسافت های طولانی تر می باشد. در ایران نیز به دلیل نبود زیرساخت های دیگر حمل و نقلی بیش از ۸۰ درصد حمل و نقل ها با خودرو و از طریق جاده انجام می شود، که در این رابطه باید نسبت به شناخت بهتر نحوه حمل بار اقداماتی صورت گیرد. در مورد وزن و ابعاد وسیله نقلیه ای که در حمل بار در جاده استفاده می شوند، دو مساله مهم وجود دارد؛ مساله اول بارگیری به میزان بیش از حد مجاز و مساله دوم در مورد استانداردسازی و بهینه کردن بار مجاز و محورها می باشد.

البته قاره ها و کشورهای مختلف، قوانین متفاوتی در مورد ابعاد و وزن مجاز وسایل نقلیه جاده ای دارند و هماهنگی این قوانین بین کشورها تا حدی مهم است که وسایل نقلیه بتوانند بدون نقض محدودیت های قانونی از کشورهای مختلف عبور نمایند. (Vehicle size and weight limits experiences and trends, 2004)

## روش تحقیق

روش کار در این پژوهش شامل سه گام اصلی بوده است. در گام نخست قصد بر آن بوده تا با استفاده از تحلیل المان محدود، فرآیند آسیب (خرابی) بر روی روسازی لایه های آسفالت شبیه سازی گردد. جهت انجام این کار ابتدا ساختار روسازی موردنظر، با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس<sup>۱</sup> مدل و عکس العمل سازه لایه های روسازی (تنش و کرنش ماندگار حاصل از بارگذاری) تخمین زده شده است. در ادامه با استفاده از عکس العمل های محاسبه شده و مدل های خرابی، تعداد تکرار بارگذاری که منجر به خرابی های مختلف می شود تعیین می گردد. در این مدل سازی رفتار مکانیکی مصالح آسفالت به صورت ویسکوالاستیک و رفتار دیگر لایه ها به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. سپس نتایج شبیه سازی برای یک نمونه آسفالت با بارگذاری سیکلیک مشخص به دست آمده و با نتایج بدست آمده از پژوهش های پیشین مقایسه شده است.

در گام دوم، پس از صحت سنجی نتایج شبیه سازی با نتایج به دست آمده در تحقیقات قبلی، تاثیر پنج نمونه از وسایل نقلیه سنگین بر میزان خرابی که تحت بارگذاری تناوبی در لایه های آسفالت ایجاد می شود، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام این کار از فرآیند شبیه سازی با استفاده از تحلیل المان محدود که در گام نخست اعتبارسنجی شده، بهره گرفته شده است. در این مقایسه تعداد محورهای هر یک از وسایل نقلیه مورد مطالعه و میزان باری که توسط هر محور بر سطح آسفالت وارد می شود، در شبیه سازی لحاظ شده است. همچنین با استناد به گزارش اصلاحیه مقررات حمل و نقل بار در راهها، شبیه سازی های صورت گرفته برای حالتی که بارگیری وسیله نقلیه با ماکزیمم وزن مجاز روی محورها (بحرانی ترین حالت بارگیری برای هر وسیله نقلیه سنگین مورد مطالعه) انجام شده باشد، در نظر گرفته شده است.

<sup>۱</sup>-ABAQUS

در گام سوم پس از انجام فرآیند شبیه‌سازی و تخمین میزان آسیب وارده به سطح آسفالت تحت بار سیکلیک توسط هر پنج وسیله نقلیه مورد مطالعه، وسیله‌ای که بیشترین میزان آسیب را به سطح لایه آسفالت وارد کرده است، انتخاب شده و جهت اصلاح و بازطراحی آرایش و موقعیت محورها مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی از این بازطراحی کاهش میزان آسیبی می‌باشد که توسط مخرب‌ترین وسیله نقلیه سنگین به سطح آسفالت جاده وارد می‌شود. پر واضح است که محقق شدن این هدف می‌تواند تاثیر بسزایی بر کاهش میزان هزینه‌های حمل و نقل جاده‌ای داشته باشد.

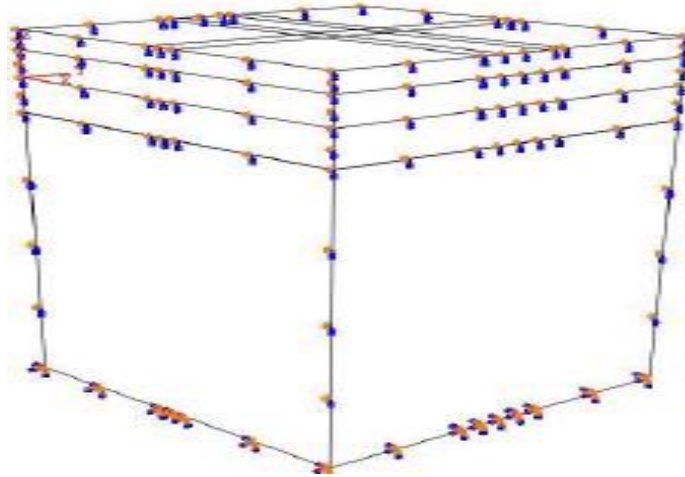
با توجه به اینکه روسازی های آسفالتی رایج در ایران از چهار لایه شامل رویه آسفالتی، لایه های اساس، زیراساس سنگدانه ای و بستر، که از خاک طبیعی متراکم است تشکیل شده و مصالح مورد استفاده در هر کدام از این لایه ها خصوصیات رفتاری مخصوص به خود را دارند. در دماهای پایین و بارگذاری سریع، فرض رفتار الاستیک خطی مخلوط های آسفالتی، فرضی منطقی بوده و به صورت عمومی پذیرفته شده است. اما، نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده آن است که فرض رفتار ویسکوالاستیک مخلوط های آسفالتی، نزدیکی بیشتری با واقعیت داشته و آسفالت در بیشتر شرایط دمایی و بارگذاری که در معرض آن قرار می گیرد، رفتاری ویسکوالاستیک از خود نشان می دهد [۱]. همچنین، از آنجایی که تحت بارهای عبوری از روی سطح روسازی، در لایه های اساس، زیراساس و بستر، تغییر شکل های بزرگ (در محدوده پلاستیک) رخ نمی دهد، فرض رفتار الاستیک خطی برای این لایه ها واقع بینانه به نظر میرسد [۲].

جهت انجام فرآیند شبیه‌سازی، از یک مدل سه بعدی به طول و عرض ۱۰۰ سانتیمتر استفاده شده است. در نظر گرفتن این ابعاد در شبیه‌سازی سبب خواهد شد تا آثار لبه‌ای در نتایج شبیه‌سازی به حداقل برسد. در این شبیه‌سازی‌ها به علت وجود شرایط تقارن کفایت تا شبیه‌سازی تنها برای نصف محور کامیون صورت گیرد.

جدول (۱) ضخامت لایه آسفالت و لایه‌های زیرین [۳]






بستر	زیراساس	اساس	آسفالت	لایه
۲۰۰	۲۵	۲۰	۱۴	ضخامت [cm]

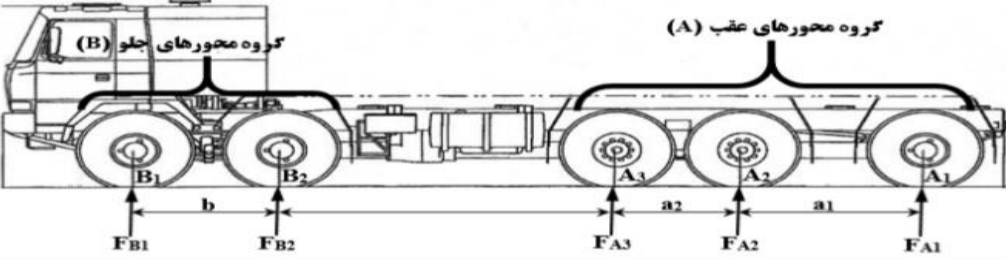
شکل (۱) هندسه مدل در نظر گرفته شده برای لایه‌های روسازی آسفالت [۳]



همانطور که پیشتر به آن اشاره شد، گام دوم تحقیق در این پژوهش، اندازه‌گیری و تخمین میزان آسیب حاصل از عبور و مرور پنج وسیله نقلیه سنگین و مقایسه نتایج می‌باشد. در جدول (۲) وسایل نقلیه‌ای که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته شده‌اند، به همراه مشخصات مدنظر شامل میزان وزن مجاز روی محورها و فاصله بین آن‌ها نشان داده شده است. [۴]

جدول (۲) مشخصات موقعیت و ماکزیمم وزن مجاز روی محورها برای پنج وسیله نقلیه مورد مطالعه

میزان وزن مجاز در گروه‌های محوری			وزن وسیله بدون بار [Ton]	فاصله محور انتهایی تا محور راهنما [m] (L)	فاصله بین محورها [m]			تعداد چرخ در هر گروه					تعداد کل محورها	تقسیم‌بندی گروه‌های محوری
A	B	A+B			a1	a2	B	A1	A2	A3	B1	B2		
۱۳	۸	۱۹	۹	۳/۷	-	-	-	۴	-	-	۲	-	۲	 کد وسیله: 5206
۲۰	۸	۲۶	۱۲	۵/۱۴	۱/۳۴	-	-	۴	۴	-	۲	-	۳	 کد وسیله: 5310
۲۰	۱۴	۳۲	۱۴	۷/۴۶	۱/۴۵	-	۱/۶۵	۴	۴	-	۲	۲	۴	 کد وسیله: 5412
۲۶	۱۴	۳۸	۱۷	۹/۰۳	۲/۱	-	۱/۴۵	۲	۴	۴	۲	۲	۵	 کد وسیله: 5412S
۲۶	۲۰	۴۴	۲۰	۱۰	۱/۴۵	۱/۴۵	۳	۴	۴	۴	۴	۲	۵	 کد وسیله: 5518



گروه محوره‌های عقب (A)

گروه محوره‌های جلو (B)

برای انجام این مقایسه معیاری جهت سنجش نتایج ارائه شده است. بر اساس این معیار فرض شده است که مجموعه باری به وزن معین  $W_{total}$ ، تنها توسط کامیون‌هایی با کد  $X$  که دارای  $n$  محور هستند، جابجا گردد. اگر وزن کامیون بدون بار  $W'$  و ماکزیمم وزن مجاز روی مجموع محورها  $W$  باشد، آن‌گاه بیشترین باری که توسط این نوع کامیون قابل بارگیری می‌باشد،  $W - W'$  می‌باشد. بنابراین برای جابجایی تمامی بار توسط کامیون با کد  $X$ ، به تعداد  $N$  کامیون نیاز است که می‌توان این مقدار را از رابطه (۱) محاسبه کرد [۵]:

$$N = \left\lceil \frac{W_{total}}{W - W'} \right\rceil + 1 \quad \text{رابطه (۱)}$$

در پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینه خرابی حاصل از عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین انجام شده است، حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی به عنوان معیاری برای سنجش عمر خستگی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر به عنوان معیاری برای سنجش عمر شیارشدگی روسازی آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش نتایج بدست آمده مربوط به روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران (با مشخصات و ضخامت‌های ارائه شده) است که در دمای مرجع ۲۱/۱ درجه سانتیگراد محاسبه شده‌اند. بدیهی است که برای روسازی‌ها در مناطق دیگر، نیاز است تا تحلیل‌ها در شرایط مشابه دمایی و با مشخصات (رفتار مکانیکی) روسازی آسفالت مطابق با آن مناطق صورت گیرد.



در این تحقیق فرض شده است که کامیون‌ها دارای سرعت ثابت ۷۲ کیلومتر بر ساعت بوده و به فاصله ۱۰ متر پشت سر هم از موقعیت از پیش تعیین شده ای عبور کنند. بنابراین با محاسبه میزان بار وارده توسط هر چرخ در هر یک از محورها می‌توان منحنی سیکل بارگذاری بر حسب زمان را برای هر گروه از کامیون‌ها جهت انجام فرآیند شبیه‌سازی بدست آورد، ابعاد، جنس و فشار داخلی لاستیک‌های مورد استفاده برای هر پنج نوع کامیون مورد بررسی یکسان بوده و در این شبیه‌سازی‌ها پهنای لاستیک حدود ۳۵cm در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده که بار وارد توسط هر چرخ به صورت یکنواخت و در مساحت مستطیلی (A) به طول ۳۵cm (متناظر با پهنای لاستیک) و عرض ۱۵cm (متناظر با فشار داخلی لاستیک) به سطح آسفالت وارد شود.

در تحلیل‌های صورت گرفته ابعاد مش‌ها طوری انتخاب شده است که در نواحی نزدیک به بارگذاری المان‌ها ریزتر بوده و با دور شدن از این ناحیه، ابعاد مش‌ها بزرگتر شود. المان‌های بکار رفته در این تحلیل نیز از نوع C3D8R بوده که یک المان ۸ گره‌ای سه بعدی با قابلیت حل به صورت انتگرال کاهش ۲ یافته می‌باشد. برای لایه‌های آسفالت، اساس، زیر اساس و بستر در راستای ضخامت به ترتیب تعداد ۷، ۵، ۹ و ۹ المان در نظر گرفته شده است. برای کل مدل مدنظر در مجموع تعداد ۲۱۶۳۲ المان به کار رفته است.

در تمامی حالات در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی فرض شده است که عملیات حمل و نقل توسط هر کامیون با ماکزیمم وزن بارگیری مجاز صورت گیرد. همچنین در این مطالعه به جهت تسریع در زمان تجزیه و تحلیل نرم افزار و ارائه نتایج با کمترین خطا، فرض شده است که می‌خواهیم مجموع باری به جرم ۵۰۰Ton را با استفاده از هر گروه از کامیون‌های مدنظر جابجا کنیم. در جدول (۳) تعداد بارگیری مورد نیاز برای حمل و نقل ۵۰۰Ton بار توسط هر گروه کامیون نشان داده شده است.

جدول (۳) تعداد بارگیری مورد نیاز برای حمل و نقل ۵۰۰Ton بار توسط هر گروه کامیون

تعداد کامیون مورد نیاز برای جابجایی بار Ton ۵۰۰	ماکزیمم جرم مجاز وسیله پس از بارگیری	جرم کامیون بدون بار (Ton)	کد وسیله
۵۰	۱۹	۹	۵۲۰۶ (دو محوره)
۳۶	۲۶	۱۲	۵۳۱۰ (سه محوره)
۲۸	۳۲	۱۴	۵۴۱۲ (چهار محوره)
۲۴	۳۸	۱۷	۵۵۱۴ (۵ محوره)
۲۱	۴۴	۲۰	۵۵۱۸ (۵ محوره)

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، جهت حمل و نقل باری به جرم کل ۵۰۰ تن، به تعداد ۵۰ کامیون دو محوره، ۳۶ کامیون سه محوره، ۲۸ کامیون چهار محوره، ۲۴ کامیون پنج محوره با تعداد ۱۴ چرخ و ۲۱ کامیون پنج محوره با تعداد ۱۸ چرخ نیاز است. با توجه به تعداد محورها در هر نوع کامیون، می‌توان تعداد سیکل بارگذاری را در یک موقعیت مشخص از سطح آسفالت (با این فرض که تمامی کامیون‌ها پشت سر هم از آن موقعیت عبور کنند) از رابطه (۲) بدست آورد:

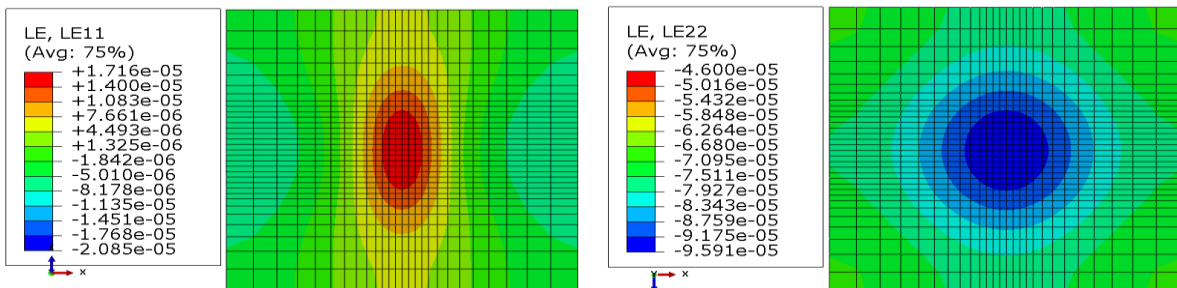
$$\text{تعداد کامیون} = \text{تعداد سیکل بارگذاری} \times \text{تعداد محور}$$

رابطه (۲):

بنابراین می‌توان گفت که تعداد سیکل بارگذاری در کامیون‌های دو محوره، سه محوره، چهار محوره، پنج محوره چهارده-چرخ و پنج محوره هجده چرخ براساس رابطه (۲) به ترتیب برابر ۱۰۰، ۱۰۸، ۱۱۲، ۱۲۰ و ۱۰۵ می‌باشد. نکته‌ای که باید به آن دقت شود این است که تعداد سیکل بیشتر بارگذاری نمی‌تواند به تنهایی گواه بر وقوع خرابی بیشتر در سطح آسفالت باشد. در واقع مقدار بیک فشاری که در هر سیکل به سطح آسفالت وارد می‌شود نیز عامل مهمی در میزان تخریب خواهد بود. با وجود اینکه در کامیون‌های با تعداد محوره‌های بیشتر تعداد سیکل بارگذاری بیشتر می‌باشد، اما از طرفی دیگر در این کامیون‌ها به واسطه وجود تعداد چرخ‌های بیشتر، نیروی وزن بین چرخ‌ها توزیع شده و ماکزیمم فشاری که توسط لاستیک به سطح آسفالت وارده می‌شود کاهش می‌یابد.

منحنی فشار وارده توسط هر چرخ به سطح آسفالت در اثر عبور هر پنج نوع کامیون مدنظر با هدف جابجایی مجموع باری به وزن ۵۰۰ Ton، بر حسب زمان برای ۵ سیکل بطوریکه کامیون‌ها پشت سر هم و به فاصله ۱۰m و با سرعت ثابت ۷۲km/h در حرکت باشند مفروض گردیده.

جهت انجام فرآیند شبیه‌سازی از تحلیل نوع **Dynamic, Implicit** استفاده شده است. همچنین مقدار گام زمانی ۳ در این شبیه‌سازی‌ها برابر ۰/۰۲۵s در نظر گرفته شده است. در پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینه خرابی حاصل از عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین انجام شده است، حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی به عنوان معیاری برای سنجش عمر خستگی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر به عنوان معیاری برای سنجش عمر شیارشدگی روسازی آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۲) کانتورهای توزیع کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل سمت چپ) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل سمت راست)، طی فرآیند بارگذاری کامیون پنج محوره در سیکل اول نشان داده شده است [۶].



3 - Time increment

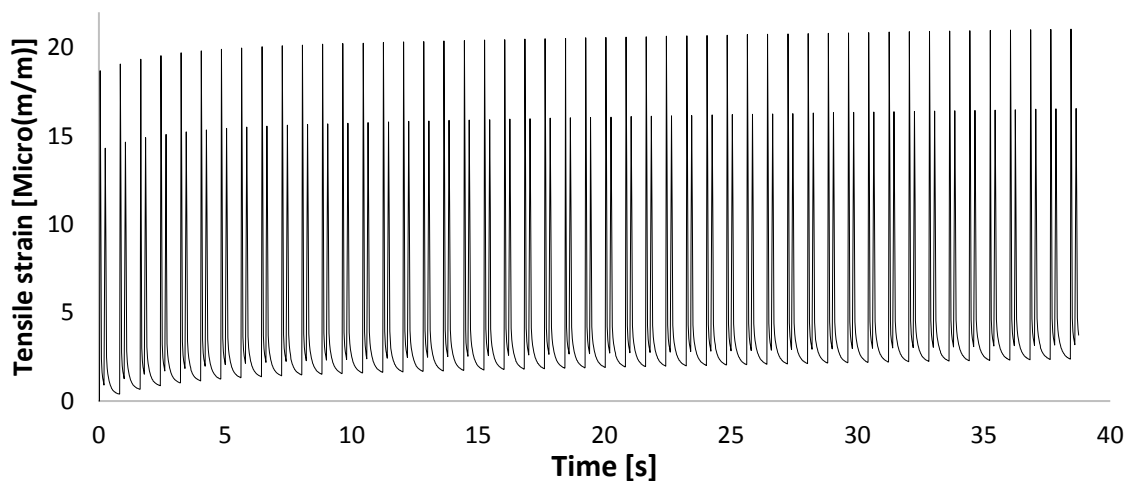
شکل (۲) کانتورهای توزیع کرنش کششی زیر لایه آسفالت (شکل سمت چپ) و کرنش فشاری روی لایه بستر (شکل سمت راست)، طی فرآیند بارگذاری کامیون پنج محوره در سیکل اول [۶]

همان گونه که در شکل بالا مشاهده می شود، مقدار ماکزیمم کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت برای حالت بارگذاری با پنج محور، در فرآیند شبیه سازی در حدود  $17 \mu\frac{m}{m}$  تخمین زده شده است. همچنین مقدار کرنش فشاری ماکزیمم روی لایه بستر نیز حدود  $96 \mu\frac{m}{m}$  اندازه گیری شده است. در این پروژه از اختلاف بیشینه مقدار کرنش ایجاد شده در اولین و آخرین سیکل بارگذاری به عنوان معیار آسیب استفاده شده است، به طوری که هر چه مقدار این اختلاف بیشتر باشد، میزان آسیب وارده به سطح آسفالت نیز بیشتر خواهد بود.

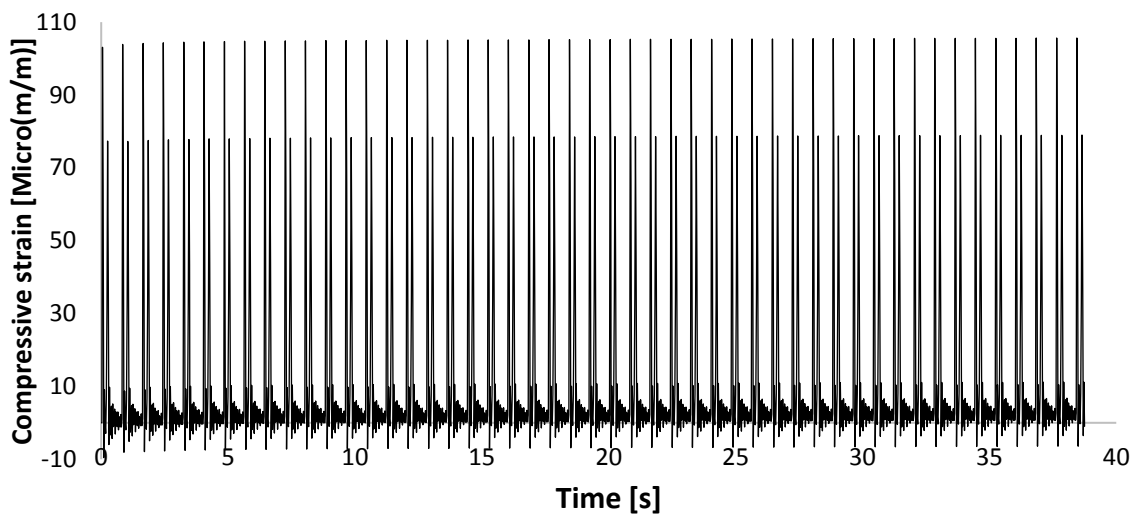
### یافته ها

در این بخش برای هر نوع کامیون مورد بررسی در این تحقیق، به طور مجزا، به ارائه و تفسیر نتایج پرداخته شده است. الف) کامیون دو محوره:

در شکل (۳) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون دو محوره نشان داده شده است [۶].





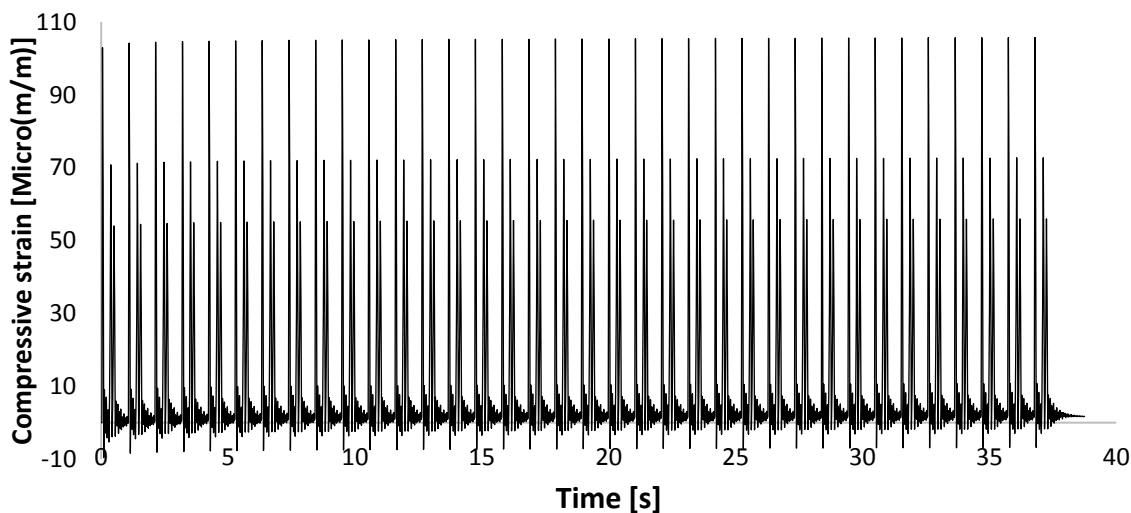
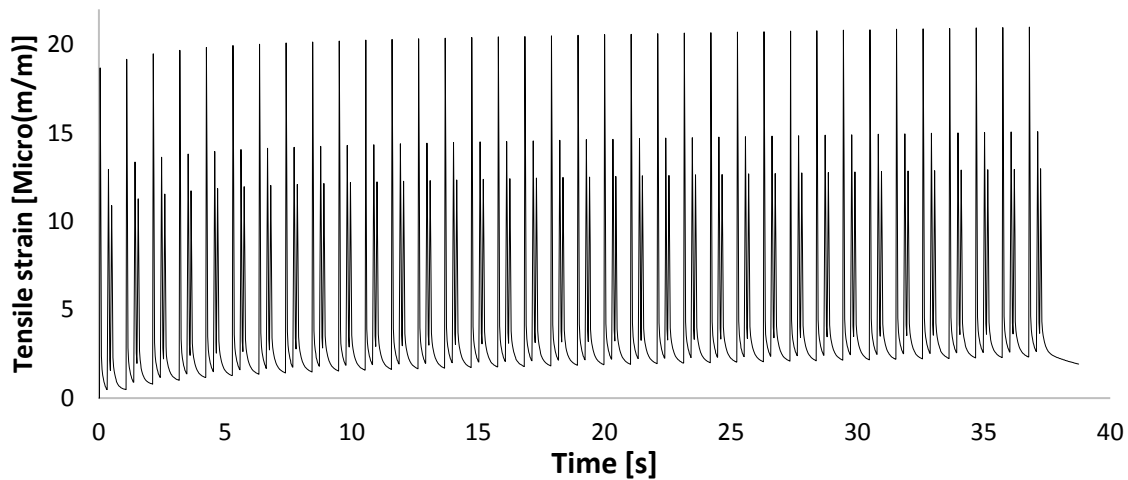


شکل (۳) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون دو محوره [۶]

نتایج بدست آمده از فرآیند شبیه‌سازی در شکل (۳) حاکی از آن بوده که مقدار ماکزیمم کرنش کششی ایجاد شده در زیر لایه آسفالت در سیکل اول  $18/7 \mu \frac{m}{m}$  اندازه‌گیری شده است. این مقدار در حین بارگذاری طی سیکل‌های بعدی به طور محسوسی روندی افزایشی داشته، به طوری که پس از اعمال آخرین سیکل بارگذاری (سیکل ۵۰ام) مقدار کرنش کششی به  $21/04 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت که به علت رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالت، مقدار کرنش کششی در آسفالت در انتهای بارگذاری به اندازه  $2/34 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۱۲/۵۱ درصد) رشد داشته است. همچنین از بررسی نمودار کرنش فشاری بر حسب زمان (نمودار پایین) می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر کرنش فشاری روی لایه بستر با افزایش تعداد تکرار بار افزایش می‌یابد، به طوری که این کرنش در طی سیکل اول تا سیکل آخر بارگذاری، از مقدار  $103 \mu \frac{m}{m}$  به مقدار  $106 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است که رشدی در حدود  $3 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۲/۹ درصد) داشته است. همان‌طور که مشخص است، حداکثر کرنش فشاری روی بستر، نسبت به حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی، حساسیت کمتری به تعداد تکرار بار دارد. علت این موضوع آن است که رفتار لایه‌های اساس، زیراساس و بستر به صورت الاستیک خطی فرض شده که مستقل از زمان است.

ب) کامیون سه محوره:

در شکل (۴) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون دو محوره نشان داده شده است [۶].



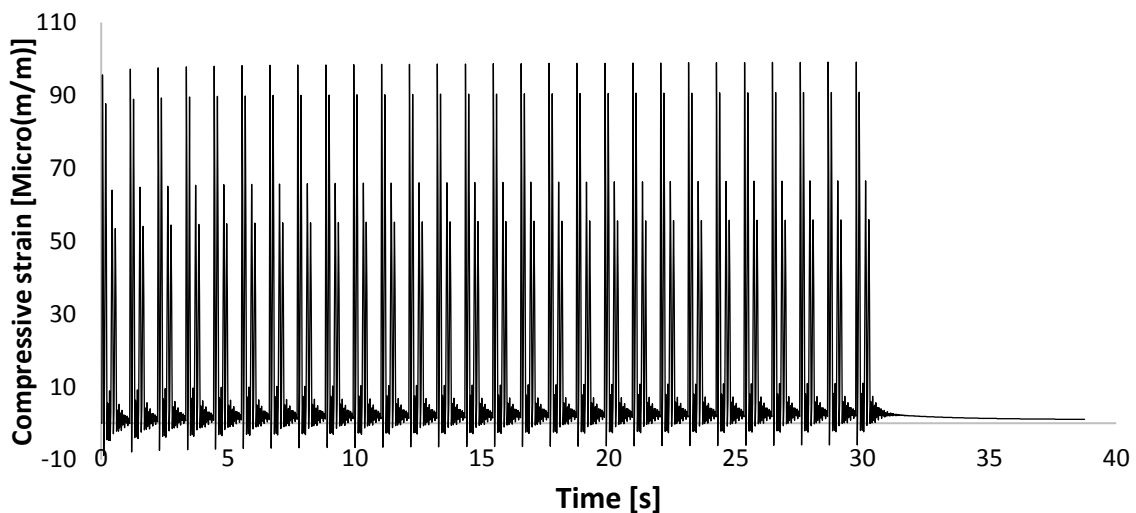
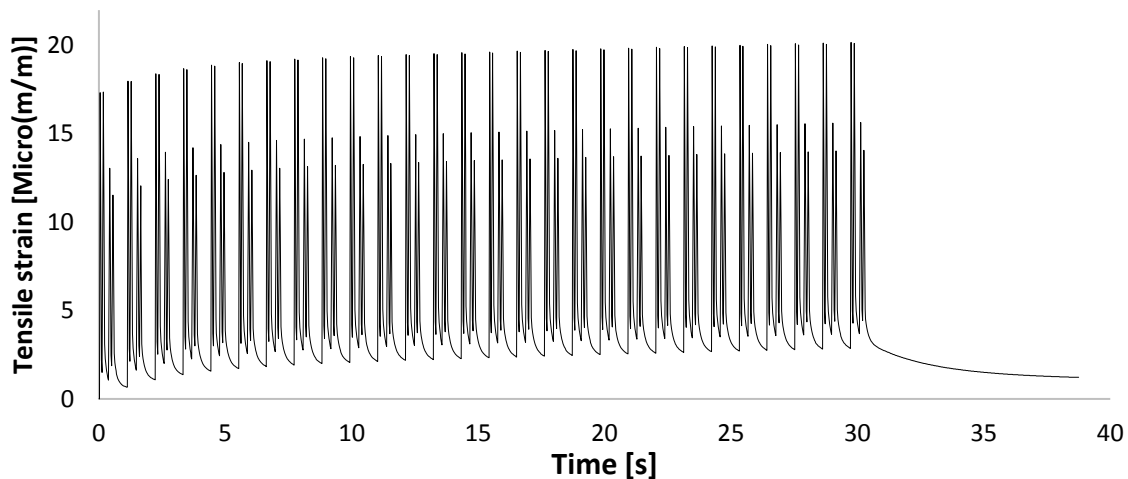
شکل (۴) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون سه محوره [۶]

نتایج بدست آمده از فرآیند شبیه‌سازی در شکل (۴) حاکی از آن بوده که مقدار ماکزیمم کرنش کششی ایجاد شده در زیر لایه آسفالت در سیکل اول  $18/7 \mu \frac{m}{m}$  اندازه‌گیری شده است. این مقدار در حین بارگذاری طی سیکل‌های بعدی به طور محسوسی روندی افزایشی داشته، به طوری که پس از اعمال آخرین سیکل بارگذاری (سیکل ۳۶ ام) مقدار کرنش کششی به  $20/82 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت که به علت رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالت، مقدار کرنش کششی در آسفالت در انتهای بارگذاری به اندازه  $2/12 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۱۱/۳۴ درصد) رشد داشته است. همچنین از بررسی نمودار کرنش فشاری بر حسب زمان (نمودار پایین) می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر کرنش فشاری روی لایه بستر با افزایش تعداد تکرار بار افزایش می‌یابد، به طوری که این کرنش در طی سیکل اول تا سیکل آخر بارگذاری، از مقدار  $103 \mu \frac{m}{m}$  به مقدار  $105/6 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است که رشدی در حدود  $2/6 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۲/۵ درصد)

داشته است. همان‌طور که مشخص است، در این حالت نیز حداکثر کرنش فشاری روی بستر، نسبت به حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی، حساسیت کمتری به تعداد تکرار بار دارد.

(پ) کامیون چهار محوره محوره:

در شکل (۵) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون دو محوره نشان داده شده است [۶].



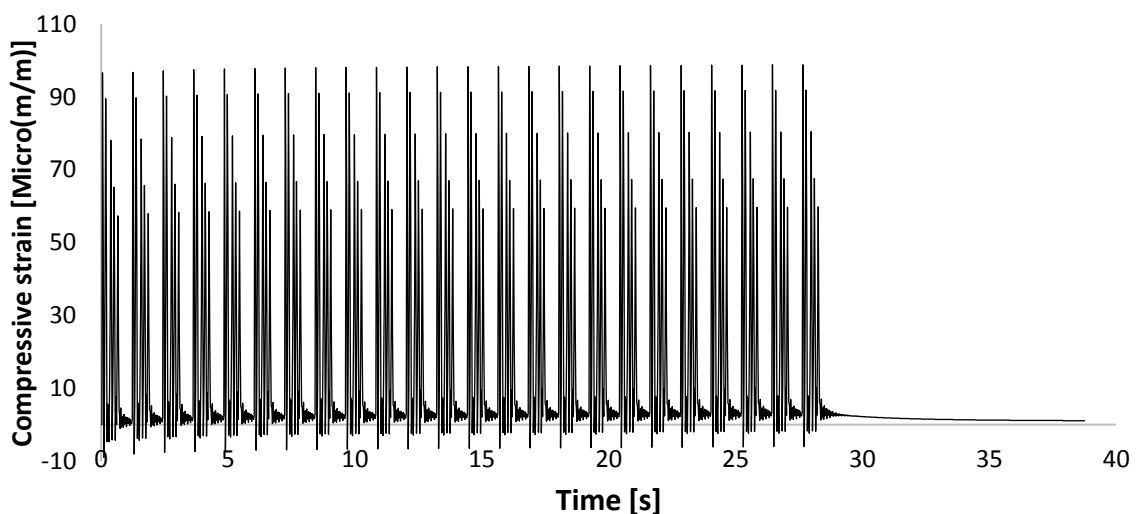
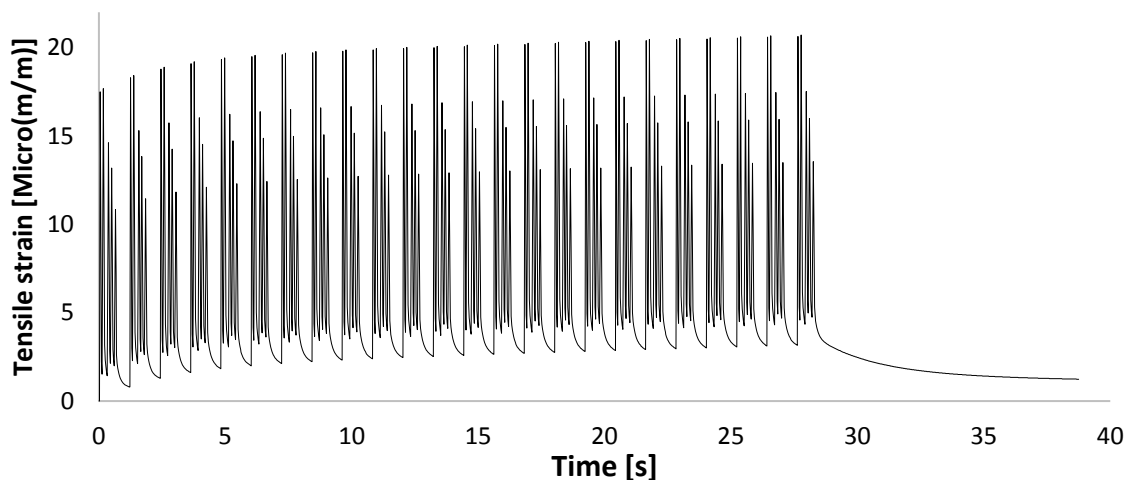
شکل (۵) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون چهار محوره [۶]

نتایج بدست آمده از فرآیند شبیه‌سازی در شکل (۴-۱۳) حاکی از آن بوده که مقدار ماکزیمم کرنش کششی ایجاد شده در زیر لایه آسفالت در سیکل اول  $17/33 \mu \frac{m}{m}$  اندازه‌گیری شده است. این مقدار در حین بارگذاری طی سیکل‌های بعدی

به طور محسوسی روندی افزایشی داشته، به طوری که پس از اعمال آخرین سیکل بارگذاری (سیکل ۲۸ ام) مقدار کرنش کششی به  $20/17 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است. به عبارتی دیگر می توان گفت که به علت رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالت، مقدار کرنش کششی در آسفالت در انتهای بارگذاری به اندازه  $2/84 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۱۶/۳۸ درصد) رشد داشته است. همچنین از بررسی نمودار کرنش فشاری بر حسب زمان (نمودار پایین) می توان نتیجه گرفت که حداکثر کرنش فشاری روی لایه بستر با افزایش تعداد تکرار بار افزایش می یابد، به طوری که این کرنش در طی سیکل اول تا سیکل آخر بارگذاری، از مقدار  $96/05 \mu \frac{m}{m}$  به مقدار  $99/15 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است که رشدی در حدود  $3/1 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۳/۲۳ درصد) داشته است.

ت) کامیون پنج محوره با تعداد ۱۴ چرخ:

در شکل (۶) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون دو محوره نشان داده شده است [۶].



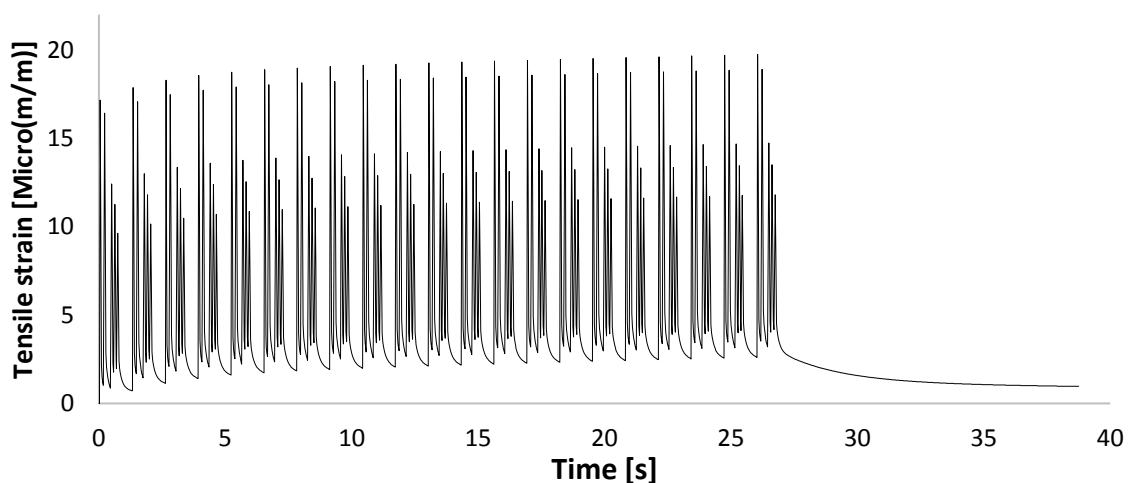
شکل (۶) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر

(شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون پنج محوره با چهارده چرخ [۶]

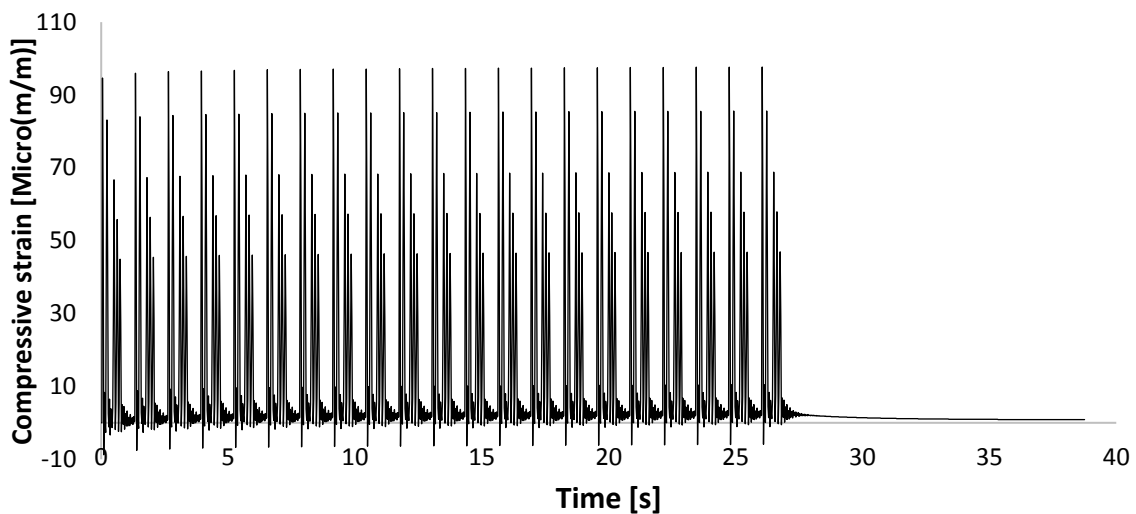
نتایج بدست آمده از فرآیند شبیه سازی در شکل (۴-۱۴) حاکی از آن بوده که مقدار ماکزیمم کرنش کششی ایجاد شده در زیر لایه آسفالت در سیکل اول  $17/5 \mu \frac{m}{m}$  اندازه گیری شده است. این مقدار در حین بارگذاری طی سیکل های بعدی به طور محسوسی روندی افزایشی داشته، به طوری که پس از اعمال آخرین سیکل بارگذاری (سیکل ۲۴ ام) مقدار کرنش کششی به  $20/65 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است. به عبارتی دیگر می توان گفت که به علت رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالت، مقدار کرنش کششی در آسفالت در انتهای بارگذاری به اندازه  $3/15 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۱۸ درصد) رشد داشته است. همچنین از بررسی نمودار کرنش فشاری بر حسب زمان (نمودار پایین) می توان نتیجه گرفت که حداکثر کرنش فشاری روی لایه بستر با افزایش تعداد تکرار بار افزایش می یابد، به طوری که این کرنش در طی سیکل اول تا سیکل آخر بارگذاری، از مقدار  $96/6 \mu \frac{m}{m}$  به مقدار  $99/9 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است که رشدی در حد  $3/3 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۳/۵ درصد) داشته است.

**ث) کامیون پنج محوره با تعداد ۱۸ چرخ:**

در شکل (۷) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون دو محوره نشان داده شده است [۶].







شکل (۷) نمودارهای کرنش کششی ایجاد شده زیر لایه آسفالت (شکل بالا) و کرنش فشاری ایجاد شده روی لایه بستر (شکل پایین)، طی فرآیند بارگذاری کامیون پنج محوره با هجده چرخ [۶]

نتایج بدست آمده از فرآیند شبیه سازی در شکل (۴-۱۵) حاکی از آن بوده که مقدار ماکزیمم کرنش کششی ایجاد شده در زیر لایه آسفالت در سیکل اول  $17/16 \mu \frac{m}{m}$  اندازه گیری شده است. این مقدار در حین بارگذاری طی سیکل های بعدی به طور محسوسی روندی افزایشی داشته، به طوری که پس از اعمال آخرین سیکل بارگذاری (سیکل ۲۱ ام) مقدار کرنش کششی به  $19/75 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است. به عبارتی دیگر می توان گفت که به علت رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالت، مقدار کرنش کششی در آسفالت در انتهای بارگذاری به اندازه  $2/59 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۱۵/۱ درصد) رشد داشته است. همچنین از بررسی نمودار کرنش فشاری بر حسب زمان (نمودار پایین) می توان نتیجه گرفت که حداکثر کرنش فشاری روی لایه بستر با افزایش تعداد تکرار بار افزایش می یابد، به طوری که این کرنش در طی سیکل اول تا سیکل آخر بارگذاری، از مقدار  $94/7 \mu \frac{m}{m}$  به مقدار  $97/68 \mu \frac{m}{m}$  رسیده است که رشدی در حدود  $2/98 \mu \frac{m}{m}$  (معادل با ۳/۱۵ درصد) داشته است.

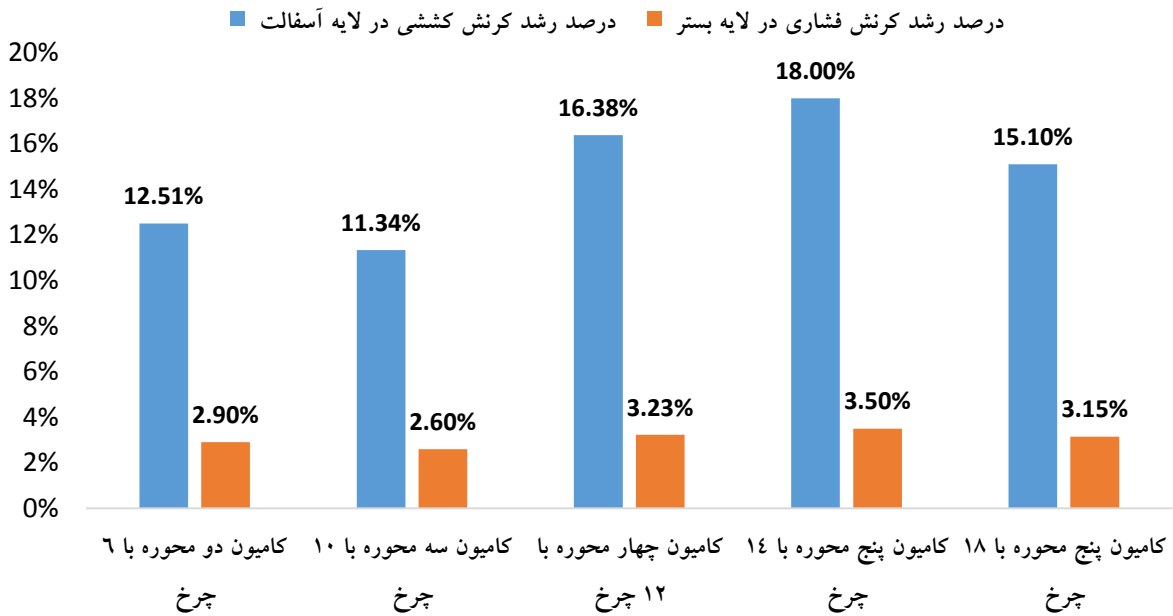
هدف از این بخش مقایسه نتایج بدست آمده برای هر پنج کامیون مدنظر جهت شناسایی وسیله نقلیه ای می باشد که بیشترین میزان خرابی را در لایه های آسفالت ایجاد می کند. در جدول (۴) نتایج شبیه سازی برای تمامی حالت های مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول (۴) نتایج شبیه‌سازی برای تمامی حالت‌های مورد مطالعه [۶]

نوع وسیله نقلیه	دو محوره ۶ چرخ	سه محوره ۱۰ چرخ	چهار محوره ۱۲ چرخ	پنج محوره ۱۴ چرخ	پنج محوره ۱۸ چرخ
ماکزیمم کرنش کششی در لایه آسفالت در اولین تکرار ( $\mu \frac{m}{m}$ )	۱۸/۷	۱۸/۷	۱۷/۳۳	۱۷/۵	۱۷/۱۶
ماکزیمم کرنش کششی در لایه آسفالت در آخرین تکرار ( $\mu \frac{m}{m}$ )	۲۱/۰۴	۲۰/۸۲	۲۰/۱۷	۲۰/۶۵	۱۹/۷۵
درصد رشد کرنش کششی در لایه آسفالت در انتهای بارگذاری (معیار خستگی) (%)	۱۲/۵۱	۱۱/۳۴	۱۶/۳۸	۱۸	۱۵/۱
ماکزیمم کرنش فشاری در لایه بستر در اولین تکرار ( $\mu \frac{m}{m}$ )	۱۰۳	۱۰۳	۹۶/۰۵	۹۶/۶	۹۴/۷
ماکزیمم کرنش فشاری در لایه بستر در آخرین تکرار ( $\mu \frac{m}{m}$ )	۱۰۶	۱۰۵/۶	۹۹/۱۵	۹۹/۹	۹۷/۶۸
درصد رشد کرنش فشاری در لایه آسفالت در انتهای بارگذاری (معیار شیارشدگی) (%)	۲/۹	۲/۶	۳/۲۳	۳/۵	۳/۱۵
کرنش کششی پسماند در لایه آسفالت در زمان ۱۰۵ پس از بارگذاری ( $\mu \frac{m}{m}$ )	۱/۵۶	۱/۵۱	۱/۸۳	۱/۹۹	۱/۷۱

نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که کامیون پنج محوره با ۱۴ چرخ با داشتن بیشترین رشد کرنش کششی در لایه آسفالت در آخرین تکرار (۱۸٪) و کامیون سه محوره با ۱۰ چرخ با داشتن کمترین رشد کرنش کششی در آخرین سیکل بارگذاری، به ترتیب بیشترین و کمترین خرابی با معیار خستگی را در لایه‌های روسازی آسفالت ایجاد می‌کنند. تریلی پنج محوره ۱۸ چرخ که در ایران موجود است، نیز با دارا بودن ۱۵/۱٪ رشد کرنش کششی در لایه آسفالت در انتهای بارگذاری، سومین وسیله مخرب از میان وسایل نقلیه مورد بررسی در این تحقیق بوده است. همچنین بررسی مقدار کرنش‌های فشاری ایجاد شده در لایه بستر نیز نشان داده است که تریلی‌های پنج و چهار محوره ۱۴ و ۱۲ چرخ، با دارا بودن بالاترین درصد رشد

کرنش، بیشترین آسیب حاصل از پدیده شیارشدهگی را در لایه آسفالت ایجاد می کنند. در نمودار (۱) میزان خرابی حاصل از عبور هر پنج کامیون در سطح آسفالت نشان داده شده است [۶].



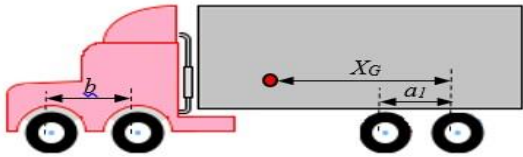
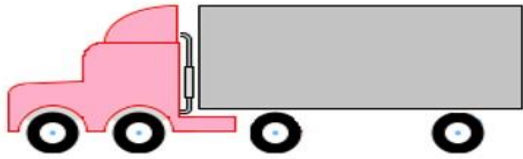
نمودار (۱) میزان خرابی حاصل از عبور هر پنج کامیون در سطح آسفالت [۶]

در شبیه سازی های صورت گرفته در این بخش، قصد بر آن است تا با تغییر در آرایش محورهای کامیون های چهار و پنج محوره، طرحی ارائه گردد که در مقایسه با طراحی اولیه خرابی کمتری را در لایه های روسازی ایجاد کند. برای انجام این بررسی فرض شده است که موقعیت محور انتهایی و محور راهنمادر طرح اولیه و طرح اصلاح شده یکسان باشد. همچنین مرکز جرم کامیون به همراه بار نیز در هر دو طرح در موقعیتی یکسان در نظر گرفته شده است. در این پروژه اصلاح موقعیت محورها طوری صورت گرفته است که میزان توزیع بار در همه محورها تقریباً یکسان گردد. شایان ذکر است که در فرآیند شبیه سازی برای تمامی حالت های مورد بررسی در این بخش فرض شده است که بارگذاری به تعداد ۳۰ سیکل انجام پذیرد. در ادامه به طور جداگانه به مقایسه نتایج طرح اصلاح شده با طرح اولیه برای هر نوع کامیون پرداخته شده است.

(۱) کامیون چهار محوره

در جدول (۵) موقعیت محورها برای طرح اولیه و طرح اصلاح شده و نیز موقعیت مرکز جرم در کامیون چهار محوره نشان داده شده است [۶].

جدول (۵) موقعیت محورها برای طرح اولیه و طرح اصلاح شده در کامیون چهار محوره [۶]

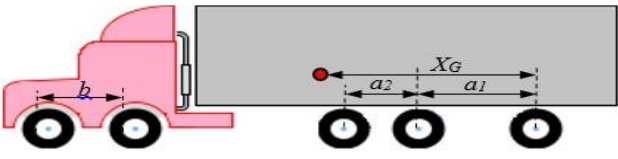
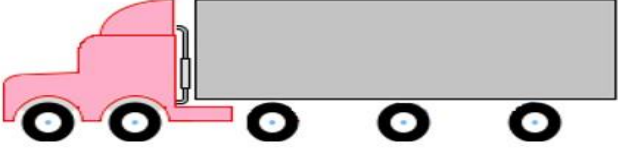
موقعیت محورها و مرکز جرم		طرح	شماتیک کامیون
$a_1$ [m]	۱,۴۵	اولیه	
$a_2$ [m]	-		
$b$ [m]	۱,۶۵		
$X_G$ [m]	۳,۴		
$L$ [m]	۷,۴۶		
$a_1$ [m]	۳,۵	اصلاح شده	
$a_2$ [m]	-		
$b$ [m]	۱,۶۵		
$X_G$ [m]	۳,۴		
$L$ [m]	۷,۶۴		

نتایج بدست آمده در شبیه سازی های صورت گرفته حاکی از آن بوده که میزان رشد کرنش کششی در لایه آسفالت در طرح اصلاح شده در مقایسه با طرح اولیه کاهش یافته است، به طوری که در طرح اولیه مقدار ماکزیمم کرنش در سیکل های اول و آخر به ترتیب  $17/55 \mu \frac{m}{m}$  و  $20/52 \mu \frac{m}{m}$  تخمین زده شده است که نشان می دهد پس از اعمال ۳۰ تکرار بار، کرنش کششی به مقدار  $2/97 \mu \frac{m}{m}$  رشد داشته است. در حالی که در طرح اصلاح شده مقدار کرنش در سیکل های اول و آخر،  $14/51 \mu \frac{m}{m}$  و  $17/28 \mu \frac{m}{m}$  بوده که به مقدار  $2/77 \mu \frac{m}{m}$  رشد داشته است. مقایسه نتایج نشان می دهد که در طرح اصلاح شده، نرخ رشد کرنش کششی در لایه آسفالت نسبت به طرح اولیه به میزان  $6/73$  درصد کاهش داشته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که طرح اصلاح شده در مقایسه با طرح اولیه، میزان خرابی کمتری را در روسازی لایه های آسفالت در پی خواهد داشت.

(۲) کامیون پنج محوره چهارده چرخ

در جدول (۶) موقعیت محورها برای طرح اولیه و طرح اصلاح شده و نیز موقعیت مرکز جرم در کامیون پنج محوره چهارده چرخ نشان داده شده است. [۶]

جدول (۶) موقعیت محورها برای طرح اولیه و طرح اصلاح شده در کامیون پنج محوره چهارده چرخ [۶]

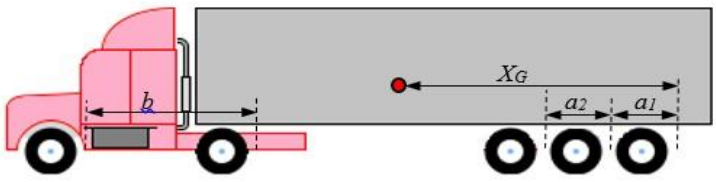
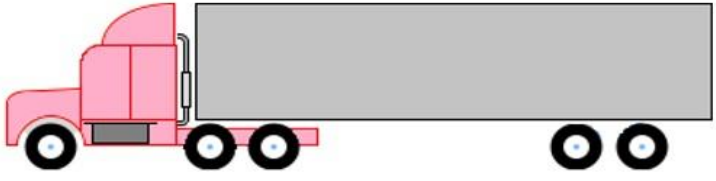
موقعیت محورها و مرکز جرم		طرح	شماتیک کامیون
$a_1$ [m]	۲,۱	اولیه	
$a_2$ [m]	۱,۴۵		
$b$ [m]	۱,۶۵		
$X_G$ [m]	۴,۵		
$L$ [m]	۹,۰۳		
$a_1$ [m]	۲,۵	اصلاح شده	
$a_2$ [m]	۲,۵		
$b$ [m]	۱,۶۵		
$X_G$ [m]	۴,۵		
$L$ [m]	۹,۰۳		

نتایج بدست آمده در این خصوص نیز باتوجه به شبیه سازی های انجام شده نشان از آن دارد که میزان رشد کرنش کششی در لایه آسفالت در طرح اصلاح شده در مقایسه با طرح اولیه کاهش یافته است، به طوری که در طرح اولیه مقدار ماکزیمم کرنش در سیکل های اول و آخر به ترتیب  $18/01 \mu \frac{m}{m}$  و  $21/68 \mu \frac{m}{m}$  تخمین زده شده است که نشان می دهد پس از اعمال ۳۰ تکرار بار، کرنش کششی به مقدار  $3/67 \mu \frac{m}{m}$  رشد داشته است. در حالی که در طرح اصلاح شده مقدار کرنش در سیکل های اول و آخر،  $14/86 \mu \frac{m}{m}$  و  $18/19 \mu \frac{m}{m}$  بوده که به مقدار  $3/33 \mu \frac{m}{m}$  رشد داشته است. مقایسه نتایج نشان می دهد که در طرح اصلاح شده، نرخ رشد کرنش کششی در لایه آسفالت نسبت به طرح اولیه به میزان ۹/۲۶ درصد کاهش داشته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که طرح اصلاح شده در مقایسه با طرح اولیه، میزان خرابی کمتری را در روسازی لایه های آسفالت در پی خواهد داشت.

(۳) کامیون پنج محوره هجده چرخ

در جدول (۷) موقعیت محورها برای طرح اولیه و طرح اصلاح شده و نیز موقعیت مرکز جرم در کامیون پنج محوره هجده چرخ نشان داده شده است [۶].

جدول (۷) موقعیت محورها برای طرح اولیه و طرح اصلاح شده در کامیون پنج محوره هجده چرخ [۶]

موقعیت محورها و مرکز جرم		طرح	شماتیک کامیون
$a_1$ [m]	۱,۴۵	اولیه	
$a_2$ [m]	۱,۴۵		
$b$ [m]	۲,۶۸		
$X_G$ [m]	۴,۶۵		
$L$ [m]	۱۰		
$a_1$ [m]	۱,۴۵	اصلاح شده	
$a_2$ [m]	۴,۵		
$b$ [m]	۲,۵		
$X_G$ [m]	۴,۶۵		
$L$ [m]	۱۰		

نتایج بدست آمده در تحلیل های نرم افزاری حاکی از آن بوده که میزان رشد کرنش کششی در لایه آسفالت در طرح اصلاح شده در مقایسه با طرح اولیه کاهش یافته است، به طوری که در طرح اولیه مقدار ماکزیمم کرنش در سیکل های اول و آخر به ترتیب  $17/35 \mu \frac{m}{m}$  و  $20/47 \mu \frac{m}{m}$  تخمین زده شده است که نشان می دهد پس از اعمال ۳۰ تکرار بار، کرنش کششی به مقدار  $3/12 \mu \frac{m}{m}$  رشد داشته است. در حالی که در طرح اصلاح شده مقدار کرنش در سیکل های اول و آخر،  $13/45 \mu \frac{m}{m}$  و  $16/22 \mu \frac{m}{m}$  بوده که به مقدار  $2/77 \mu \frac{m}{m}$  رشد داشته است. مقایسه نتایج نشان می دهد که در طرح اصلاح شده، نرخ رشد کرنش کششی در لایه آسفالت نسبت به طرح اولیه به میزان ۱۱/۲۲ درصد کاهش داشته است. بنابراین



می توان نتیجه گرفت که طرح اصلاح شده در مقایسه با طرح اولیه، میزان خرابی کمتری را در روسازی لایه های آسفالت در پی خواهد داشت.

### بحث و نتیجه گیری

پس از انجام فرآیند شبیه سازی و تخمین میزان آسیب وارده به سطح آسفالت تحت بار سیکلیک توسط هر پنج وسیله نقلیه مورد مطالعه، وسایل نقلیه ای که بیشترین میزان آسیب را به سطح لایه آسفالت وارد کرده است (کامیون های چهار و پنج محوره)، انتخاب شده و جهت اصلاح و بازطراحی آرایش و موقعیت محورها مورد بررسی قرار گرفته اند. هدف اصلی از این بازطراحی کاهش میزان آسیبی می باشد که توسط وسیله نقلیه به سطح آسفالت جاده وارد می شود. نتایج شبیه سازی حاکی از آن بوده است که مقدار ماکزیمم کرنش کششی در لایه آسفالت در سیکل های بارگذاری در طرح های اصلاح شده از کامیون های چهار و پنج محوره به طور محسوسی در مقایسه با طرح اولیه کاهش داشته است. به طوری که در طرح های اصلاح شده، نرخ رشد کرنش کششی در لایه آسفالت نسبت به طرح اولیه، در کامیون چهار محوره به میزان  $6/73\%$  درصد، در کامیون پنج محوره چهارده چرخ به میزان  $9/26\%$  درصد و در کامیون پنج محوره هجده چرخ به میزان  $11/22\%$  درصد کاهش داشته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که طرح های اصلاح شده در مقایسه با طرح های اولیه، میزان خرابی کمتری را در روسازی لایه های آسفالت در پی خواهند داشت.

این تحقیق عمدتاً بر مدار محورهای وسایل نقلیه متمرکز بوده و مدل توسعه یافته تر برای بررسی پدیده شیارشدگی می تواند پهنا و تعداد تایرهای هر محور باشد و مدلسازی بر روی سطوح واقعی آسفالت مورد تحقیق قرار گیرد. همچنین سازمان ایمنی بزرگراه ها برای ارزیابی مقاومت در برابر پدیده شیارشدگی در ارتباط با روسازی های مختلف آسفالتی تحت شرایط مختلف عملیات وسایل نقلیه می تواند به مدلسازی و آنالیز پدیده فوق بپردازد.

### منابع

- [۱] کاووسی، امیر و بابازاده، علی، "بررسی روشهای تجربی تعیین مدول دینامیکی مخلوطهای آسفالتی در روسازی-های کشور جهت طراحی روسازی در سطوح مختلف"، مجموعه مقالات چهارمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، آبان ۲۱-۲۲، ص ۱۱۱-۱۲۷، ۱۳۸۷.
- [۲] کی منش، محمودرضا، میرشکاریان، مهرداد و شفیع پور مرجی، ابوذر، "ارزیابی تحلیلی اثر اضافه بار بر خرابی های روسازی آسفالتی با استفاده از روش اجزا محدود"، مجموعه مقالات هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، اردیبهشت ۱۷-۱۸، ۱۳۹۳.
- [۳] طاهرخانی، حسن، مرادلو، امیرجواد، "بررسی اثر فشار باد چرخ بر پاسخ های روسازیهای مسلح شده با ژئوسنتتیک با تحلیل ویسکوالاستیک به روش المانهای محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS"، مهندسی حمل و نقل، ۱۳۹۵.
- [۴] مقررات ابعاد و اوزان مجاز تردد وسایل نقلیه در راه های کشور، سازمان راهداری و حمل و نقل جاده ای، ۱۳۹۷.۹
- [۵] Dr. Nor Azuana Ramli "Statistical Tables & Mathematics Formula" For Bachelor (Hons) Engineering Students, TUNKU AZIZAH KNOWLEDGE CENTRE, KUALA LUMPUR
- [۶] ABAQUS.(141).Version 9241 User's Manual, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.