



شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی استحکام اتاق کامیون

علی یوسفی^۱، ابوالفضل خلخالی^۲ و سیدعسکری مهدوی^{۳*}

^۱ کارشناس ارشد، گرایش سازه بدنه خودرو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکتری، گروه آموزشی حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱

چکیده

به منظور کاهش تلفات انسانی، استانداردهای مختلفی برای خودروها از جمله استاندارد سفتی کابین تهیه شده است. خودروسازان به دنبال افزایش نسبت توان به وزن خودروها برای افزایش سرعت و چابکی بیشتر وسایل نقلیه هستند. به همین دلیل بهینه‌سازی سازه اتاق کامیون‌ها با توجه به استانداردهای ایمنی تأثیر زیادی بر عملکرد آن‌ها می‌گذارد. در این مقاله، اقدام به شبیه‌سازی کامیون بنز اکتروس در نرم‌افزار CATIA می‌شود. سپس مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Hyper-mesh المان‌بندی می‌شود. المان‌ها به صورت مربعی و مثلثی و دارای ابعاد ۱۰، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر مربع هستند. پس از اطمینان از صحت المان‌بندی، مدل المان‌بندی شده وارد نرم‌افزار LS-DYNA می‌شود. در این نرم‌افزار آزمون ECE-R29 شبیه‌سازی شده است. این آزمون در سه بخش روی خودرو انجام می‌شود که عبارتند از آزمون B و آزمون C. آزمون C خود شامل دو بخش برخورد عمودی و برخورد با زاویه ۲۰ درجه نسبت به افق است. پس از آنکه خودرو مورد نظر این آزمون‌ها را با موفقیت به اتمام رساند، قطعات با بیشترین تأثیر در این آزمون‌ها که عبارتند از: ۱. دیواره جانبی ۲. پنل سقف ۳. قسمت خارجی ستون A ۴. قسمت داخلی ستون A ۵. تقویتی بالای شیشه انتخاب می‌شوند. سپس اقدام به بهینه‌سازی ضخامت این قطعات می‌شود. از میان ۱۶ حالت (ارائه شده توسط روش تاگوچی)، تنها پنج حالت قادر به برآورده کردن شرایط آزمون B سفتی کابین بودند که حالت بهینه دارای وزن ۸۹۰/۸۳ کیلوگرم است که نسبت به حالت اولیه ۶۰/۶۹ کیلوگرم کاهش وزن داشته است.

کلمات کلیدی: آزمون ECE-R29؛ آزمون سفتی کابین؛ بهینه‌سازی؛ شبیه‌سازی؛ کابین کامیون.

Numerical Simulation and Optimization of Truck's Cabin Strength

A. Yousefi¹, A. Khalkhali², S. A. Mahdavi^{3,*}

¹ MSc, Faculty of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology.

² Assoc. Prof., Automotive. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

³ Ph.D. Candidate, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Abstract

Different vehicle standards are used for decreasing of casualties for example the Protection of occupants of the CAB of a commercial vehicle. Vehicle manufacturer increase the power to weight ratio to achieve high speed vehicles. The optimization of the heavy vehicle's cabin structure according to safety standards are important to achieve best function. In this article, the Mercedes Benz Actors is simulated in CATIA software. The model is meshed in Hyper-mesh software. The meshes are square and triangular and they are 10, 15 and 25 mm². After checking truck's meshes, the model Import to LS-DYNA software. ECE-R29 test is performed in three parts include test B and test C. Test C includes two parts: 1-vertical collision and 2-collision with an angle of 20 degrees to the horizon. After the vehicle has successfully completed these tests, the most important parts in tests are identified. These parts are: 1. Side panel 2. Roof panel 3. A-pillar exterior 4. A-Pillar interior 5. Windshield upper panel. Then the thickness of parts are optimized. Only five modes of 16 modes (are submitted by the Taguchi method) are able to meet the requirements of the ECE-R29 B test. The optimal mode has a weight of 890.83 kg which has decreased 60.63kg compared to the initial mode.

Keywords: ECE-R29, Cabin Structure; Optimization; Simulation; Truck Cabin.

۱- مقدمه

یکی از علل تلفات انسانی، تصادف خودروها با موانع و واژگونی است. یکی از راهکارهای جلوگیری از این تلفات، استفاده از خودروهای ایمن است. به‌منظور افزایش ایمنی وسایل نقلیه، استانداردهای مختلفی تدوین شده است. یکی از این استانداردها، آزمون سفتی کابین است. یکی دیگر از مشکلات خودروهای سنگین عدم چابکی آنها است. برای دستیابی چابکی و سرعت عمل بیشتر وسایل نقلیه، افزایش نسبت توان به وزن الزامی است. وینکلن مدیرعامل بوگاتی در مصاحبه با وبسایت Caradvice در سال ۲۰۱۹ گفت: «زمانی که در شرکت لامبورگینی بودم، حرف همیشگی من اهمیت نسبت قدرت به وزن بود؛ همیشه معتقد بودیم که یک کیلوگرم وزن کمتر، مهم‌تر از یک اسب بخار قدرت بیشتر است.» از این رو یکی از مهم‌ترین روش‌های افزایش چابکی خودروها، کاهش وزن آنها است. در این راستا، کاهش وزن بدنه با در نظر گرفتن استانداردهای ایمنی، بسیار مهم است. بخش عمده وزن خودرو شامل وزن سازه و بدنه است. سازه بدنه نیز به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌شود که یکی از مهم‌ترین این بخش‌ها، سازه‌ی اتاق است. به همین دلیل بهینه بودن سازه‌ی اتاق بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر این کاهش وزن باعث کاهش مواد مورد استفاده برای ساخت سازه کامیون می‌شود که این موضوع باعث کاهش هزینه‌ها است. در خودروهای جدید با توجه به افزایش قابل توجه امکانات و تجهیزات رفاهی در آنها، انتظار می‌رود میانگین وزن خودرو افزایش یابد که از این رو بهینه شدن سازه اتاق این خودروها با توجه به استانداردهای ایمنی تأثیر مستقیم و غیرمستقیم زیادی بر عملکرد آنها می‌گذارد.

۱-۲- اجزای کابین کامیون

کابین یک کامیون از اجزای مختلفی تشکیل شده است. این اجزا در چند دسته بندی اصلی تقسیم می‌شود که خود شامل قطعات کوچکتری هستند. تقسیم‌بندی کلی کابین به شرح زیر است:

پنل سقف^۱: شامل ورق سقف و تقویتی‌های طولی و عرضی جهت استحکام آن است.
پنل کفی^۲: شامل صفحه نشیمنگاه صندلی چپ و راست و تونل مرکزی محفظه موتور است. تقویتی‌های S شکل در زیر پنل کفی جهت استحکام طولی قرار دارد.
پنل جانبی^۳: شامل صفحه کناری چپ و راست به همراه تقویتی‌های طولی و عرضی و همچنین فریم دور درب‌های جانبی است.
دیواره جلویی^۴: شامل صفحه نگه‌دارنده داشبورد و فضای رادیاتور و متعلقات و اتصالات فرمان و پدال‌های گاز و ترمز و کلاچ است.
دیواره پشتی^۵: شامل صفحه اتاقک خواب و تقویتی‌های آن است.

۱-۳- کلیاتی پیرامون سازه خودرو

یک بدنه‌ی خودرو متشکل از سازه خودرو و بازشوها است. بخش عمده نیروها هنگام ضربه‌ها توسط سازه خودرو جذب می‌شود. به همین دلیل خودروسازان به دنبال دستیابی به جذب نیرو حداکثری توسط سازه بدنه خودرو هستند. بررسی ضربه وارد شده از مانع به خودرو یک فرآیند بسیار پیچیده‌ای است؛ زیرا در مدت‌زمان بسیار کم اتفاق افتاده (۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌ثانیه) و سازه با تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک همراه است. در این برخوردها تعیین خصوصیات تغییر شکل مناسب، از مهم‌ترین موضوعاتی است که خودروسازان با آن مواجه هستند.

۱-۳-۱- نواحی مچاله شونده

با وجود تمام امکانات ایمنی فعال و غیرفعال بازهم مهم‌ترین نقش را در تصادفات، سازه بدنه خودرو ایفا می‌کند. در تصادفات خودروها از دو بخش اصلی تشکیل می‌شود. ۱- کابین یا منطقه امن که سرنشین در آن قرار دارد و نباید دچار تغییر شکل شود و یا تغییر شکل آن بسیار جزئی است.

¹ Roof Panel

² Underbody Panel

³ Side Panel

⁴ Front Panel

⁵ Back Panel

میرزا امیری و همکاران [۵]، در مقاله‌ای تحت عنوان شبیه‌سازی آزمون تصادف و بهبود ساختار کامیون IKCO 2624 مطابق آیین‌نامه ECE-R29 به بررسی رفتار کامیون ایران‌خودرو مطابق استاندارد ECE-R29 در یک آزمون تصادف پیچیده پرداخته است.

پاتیدار و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۵ مشکلات موجود در آزمون ECE R-29 در هندوستان و راهکارهای حل آن‌ها را ارائه می‌کند. لی و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۵ روش‌های آزمون و نیازمندی‌های خودروهای تجاری سنگین را مطابق با استاندارد ECE R-29 ارائه کرد و امکان آزمون برای تصادف از روبروی خودروهای تجاری سنگین را افزایش داده است.

شجاعی‌فر و همکاران [۸]، به بررسی و تحلیل جذب ضربه در تصادف از جانب خودرو در سرعت‌های مختلف پرداختند. در این مقاله میزان جذب ضربه در سه سرعت مورد بررسی قرار گرفته است.

ایزانلو و همکاران [۹] به تحلیل سفتی پیچشی و خمشی خودرو با استفاده از شبیه‌سازی ساده سازی شده پرداخته و میزان خطای این نوع شبیه‌سازی را مشخص کردند.

علی عبدالمنافی و حسین رحمانی [۱۰]، به تحلیل جذب انرژی در ضربه‌گیرهای استوانه‌ای پرداخته‌اند. در این مقاله ساختار جذب انرژی در ضربه‌گیرها نشان داده شده است.

خلخالی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ به بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت ایمنی سرنشین در برخورد از روبرو خودرو پرداختند. در این مقاله از روش‌های تاگوچی و ANOVA استفاده شده است.

ژو و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۱۲]، با کاربرد روشی محافظه‌کارانه در بهینه‌سازی حاشیه امنی تعریف کردند که طراحی انجام گرفته بر پایه آن نهایتاً منجر به طراحی سازه‌ای سبک اما مقاوم در برابر ضربه می‌گردد.

در این مقاله، ابتدا مدل بنز اکتروس به صورت سه‌بعدی ایجاد می‌شود. سپس مدل ایجاد شده المان‌بندی می‌شود. آزمون سفتی کابین روی مدل المان‌بندی شده شبیه‌سازی می‌شود. سپس با استفاده از روش تاگوچی بهینه‌سازی وزن مدل با توجه به آزمون سفتی کابین انجام می‌شود.

۲- نواحی جاذب ضربه که وظیفه جذب انرژی وارده به خودرو را بر عهده دارد. در تصادفات با ایجاد مچالگی و ازهم‌گسیختگی در این نواحی انرژی وارده به خودرو جذب می‌شود. انرژی‌های وارده به خودرو در نواحی جاذب ضربه توسط اجزای سازه‌ی خودرو جذب می‌شود و یا از کابین سرنشینان دور می‌شود و به نواحی دیگر از جمله سمت سقف، کف، درب موتور و جداره داخلی هدایت می‌شود.

۱-۴- مروری بر مطالعات پیشین

به رخداد حادثه برای خودرو جاده‌ای، هنگامی که با خودرو دیگر یا استفاده‌کنندگان از جاده (عابر پیاده، دوچرخه‌سوار و ...) یا یک مانع برخورد می‌کند و به خسارت و یا جراحت منجر می‌شود تصادف می‌گویند [۱]. انرژی وارد به خودرو در تصادفات توسط سازه بدنه آن جذب می‌شود. این جذب انرژی با تغییر شکل اجزای سازه‌ی خودرو اتفاق می‌افتد. اگر انرژی وارده از میزان انرژی جذب‌شده توسط سازه خودرو بیشتر باشد، سرنشینان وسیله نقلیه آسیب می‌بینند. تحلیل سازه خودرو به دلیل پیچیدگی‌های موجود معمولاً از نوع غیرخطی است. از این‌رو نیاز به استفاده از روش‌های عددی از جمله المان محدود است. به دلیل اهمیت حفظ جان سرنشینان در خودروها و اهمیت سازه بدنه خودرو در تصادفات، تحقیقات فراوانی در این حوزه در جهان انجام شده است. برخی از این تحقیقات عبارت‌اند از:

چو و همکاران [۲] راهکاری برای به حداکثر رساندن جذب انرژی ضربه توسط جاذب ضربه در تصادف از روبرو ارائه کرده است.

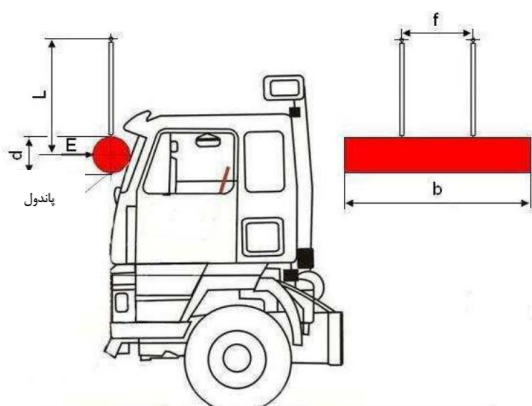
چن و همکاران [۳] در مقاله‌ای به شبیه‌سازی آزمون‌های استاندارد ECE-R29 برای یک کشنده سبک پرداخته‌اند. در این مقاله ابتدا نمونه شبیه‌سازی شده را با نمونه واقعی در برخورد از روبرو مقایسه کرده‌اند. سپس نمونه اعتبارسنجی شده را با معیارهای استاندارد ECE-R29 مورد بررسی قرار می‌دهند. پس از آن، با تقویت قسمت‌های مختلف سازه به بهبود این خودرو طبق استاندارد موردنظر پرداخته‌اند.

دکاسترو و همکاران [۴] در مقاله‌ای با شبیه‌سازی برخورد از روبرو، ارزیابی ساختاری اتاق یک کامیون سنگین با توجه به پاسخ سرنشینان موردبررسی قرار داده است.

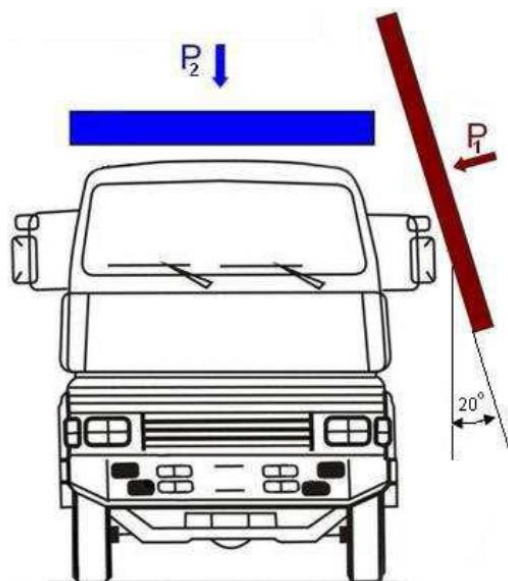
این بار نباید از ۱۰ تن تجاوز کند و باید به‌طور یکنواخت در تمام اعضای یاتاقان سازه سقف اتاق یا محفظه راننده توزیع شود [۱۳ و ۱۴]. این آزمون با هدف سنجش مقاومت سقف خودرو و دیواره جانبی در واژگونی ۱۸۰ درجه انجام می‌شود. در شکل ۲ این آزمون دیده می‌شود.

۳- روش حل

با توجه به اطلاعات استخراج شده و مشاهده نمونه‌های واقعی ابتدا مدل سه‌بعدی پوسته کامیون بنز اکتروس با استفاده از نقشه دوبعدی شبیه‌سازی شده است. در شکل ۳ پوسته بنز اکتروس شبیه‌سازی شده قابل مشاهده است.



شکل ۱- آزمون برخورد ستون جلویی



شکل ۲- آزمون دوام دیواره عقب کابین

۲- متون علمی مقاله

از آنجا که بخش عمده وسایل نقلیه جاده‌ای در دسته‌بندی N (خودروهای سنگین) قرار می‌گیرند، سازمان‌های بین‌المللی به تعریف استانداردهای ایمنی مخصوص این گروه از خودروها پرداخته‌اند. یکی از این استانداردها، استاندارد سفتی اتاق است که در اروپا با شماره استاندارد ECE-R29 وجود دارد و در هند این استاندارد با شماره AIS-029 شناخته می‌شود. در استاندارد ایران نیز با شماره استاندارد ۷۰۳۴ تحت عنوان تأیید در ارتباط با حفاظت از سرنشینان اتاق خودروهای تجاری در سال ۱۳۸۲ تصویب شد و در سال ۱۳۹۷ مورد تجدیدنظر قرار گرفت که مشابه استاندارد اروپا است [۱۳ و ۱۴].

۲-۱- آزمون سفتی کابین

آزمون سفتی اتاق از سه آزمون مختلف تشکیل شده است. برای آزمون A موتور یا یک معادل آن در جرم و ابعاد مشابه باید در وسیله نقلیه قرار گیرد و اتاق باید روی وسیله نقلیه سوار شود. برای آزمون‌های B و C اتاق به‌دلخواه تولیدکننده باید روی یک قاب نصب شود. پس از انجام هر یک از آزمون‌های توصیف‌شده، اتاق وسیله نقلیه باید فضای نجات را در اختیار شما قرار دهد که امکان قرارگیری آدمک در صندلی را فراهم می‌کند. در حین آزمایش نباید درب باز شود و پس از آزمون نیز الزامی برای باز شدن درب وجود ندارد [۱۳ و ۱۴].

۲-۱-۱- آزمون برخورد ستون جلویی (B)

در این آزمون که برای وسایل نقلیه تجاری با بار مجاز بیش از ۷/۵ تن است یک ضربه زننده به‌صورت افقی به قسمت بالایی خودرو برخورد می‌کند. در این آزمون انرژی ضربه زننده ۲۹/۴ کیلوژول است. ضربه زننده از طریق نگه‌دارنده‌هایی معلق است [۱ و ۲]. در این آزمون مقاومت ستون A خودرو برای واژگونی ۹۰ درجه و یا برخورد با درخت یا ستون‌ها سنجیده می‌شود. در شکل ۱ این آزمون دیده می‌شود.

۲-۱-۲- آزمون استحکام سقف (C)

سقف اتاق باید در برابر بار استاتیک متناسب با حداکثر بار مجاز برای محور جلو یا محورهای وسیله نقلیه مقاومت کند.

محافظت می‌نماید. اجزای تشکیل‌دهنده آن شامل سینی کفی چپ و راست و تونل مرکزی است که با تقویتی‌هایی به‌صورت یکپارچه به پنل جانبی چپ و راست و پنل پشتی و جلویی متصل می‌شود. این کفی دارای دو ریل S شکل است که به‌صورت طولی قرار دارند و جهت لولا نمودن کابین به شاسی از آن‌ها استفاده می‌شود.

۳-۱-۳- مجموعه پنل پشتی

مجموعه پنل پشتی در کابین‌ها علاوه بر اینکه نقش دیواره اتصال مابین بدنه جانبی چپ و راست را دارد، فضای خواب و قرارگیری تجهیزات پشت سرنشینان را نیز فراهم می‌سازد. این مجموعه از یک پوسته خارجی و تقویتی‌ها تشکیل شده است.

۳-۱-۴- مجموعه سقف

با توجه به انتخاب سقف بلند برای این نوع کابین، مجموعه سقف فضای کافی برای قرارگیری تجهیزات در قسمت عقب کابین و یا قرارگیری دو تخت در کامیون‌های تجاری را فراهم می‌کند؛ همچنین در این خودرو یک دریچه در سقف برای دسترسی به خارج خودرو در نظر گرفته شده است.

۳-۱-۵- پنل جلویی

پنل جلویی کابین در حقیقت فضای نگهداری و دسترسی به رادیاتور و همچنین فضای داشبورد و اتصالات میل فرمان است که شامل قطعات و تقویت‌های درونی است که به‌وسیله درب جلو پوشانده می‌شود.

پس از اتمام طراحی هر یک از مجموعه‌ها، این قطعات در کنار یکدیگر در محیط مونتاژ کتیا قرار می‌گیرند.

۳-۲- المان‌بندی و بررسی کیفیت المان‌ها

تمام نرم‌افزارهای المان محدود قابلیت المان‌بندی برای قطعات ساده را دارا هستند؛ اما در طراحی‌های پیچیده مانند طراحی کابین یک خودرو، استفاده از نرم‌افزار Hyper-mesh به‌عنوان یکی از نرم‌افزارهای مجموعه Hyper-work فرآیند المان‌بندی را ساده‌تر می‌کند. این نرم‌افزار قابلیت ساده‌سازی سطوح مختلف پیش از المان‌بندی، ایجاد المان با سایزها و اشکال مختلف، اصلاح المان‌ها پس از المان‌بندی را دارد.



شکل ۳- طراحی پوسته بنز اکتروس نظامی در نرم‌افزار کتیا

۳-۱-۱- طراحی سازه کابین

پس از طراحی سه‌بعدی پوسته خودرو، طراحی سازه بدنه کابین خودرو انجام می‌پذیرد. برای طراحی کابین کامیون به قسمت‌های مختلف تقسیم شده است. هر یک از این قسمت‌ها یک زیرسیستم از ماژول سازه بدنه است و طراحی هر قسمت بر اساس محل اتصال آن به سایر قسمت‌ها انجام داده می‌شود. این تقسیم‌بندی مطابق زیر است:

۳-۱-۱-۱- قطعات پنل جانبی

پنل جانبی شامل دو قسمت دهانه درب و دیواره اتاق خواب است که شامل رویه بیرونی و تقویت‌های درونی بوده که به‌وسیله نقطه جوش به‌صورت یکپارچه در آمده است و برای قسمت چپ و راست کابین به‌صورت متقارن طراحی می‌شود.

۳-۱-۲- مجموعه کفی

مجموعه کفی در کابین‌های بدون دماغ علاوه بر اینکه نقش نشیمنگاه صندلی و فضای خواب پشت راننده را تأمین می‌کند، مجموعه موتور و متعلقات آن نظیر رادیاتور را نیز

در المان محدود برای ساده‌سازی فرآیند المان‌بندی فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱. سوراخ‌ها: سوراخ‌ها با قطر کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر نادیده فرض می‌شوند و مدل نمی‌گردند [۱۵].
۲. لبه‌ها: لبه‌هایی با شعاع کوچک‌تر از ۸ میلی‌متر نادیده گرفته می‌شوند و به‌صورت یک المان مربعی مدل می‌شود. لبه‌هایی با شعاع بزرگ‌تر از ۸ میلی‌متر حداقل با دو المان و یک نود باید مدل شوند [۱۵].
۳. انتقال در مش: از المان مثلثی برای انتقال در مش از تعداد المان بیشتر به تعداد المان کمتر می‌توان استفاده کرد [۱۵].

۳-۲-۱- ایجاد المان‌ها

پس از آماده‌سازی سطوح قطعات، با استفاده از دستور المان‌بندی خودکار^۱ از قسمت دو بعدی سطوح المان‌بندی می‌شوند. در این مقاله قطعات مختلف با توجه به اهمیت و پیچیدگی‌های آن‌ها با ابعاد ۱۰، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر مربع المان‌بندی شده‌اند. در شکل ۴ نمونه‌ای از المان‌بندی سطوح دیده می‌شود.

۳-۲-۲- بررسی کیفیت المان

به‌منظور بررسی کیفیت المان‌بندی از ابزار qualityindex استفاده می‌شود. در این ابزار ایرادات مختلف المان‌بندی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از جمله این ایرادات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱. نسبت منظری: نسبت بزرگ‌ترین ضلع المان به کوچک‌ترین ضلع المان به‌عنوان نسبت منظری تعریف می‌شود. یک مربع دارای نسبت منظری ۱ است، زیرا طول اضلاع آن یکسان است. هرچقدر از شکل مربع دور شویم، نسبت ابعاد کوچک‌تر از ۱ می‌شود. نسبت ابعاد یکی از مهم‌ترین ملاک‌های المان‌بندی صحیح است. نسبت حدی آن ۵:۱ است؛ یعنی بزرگ‌ترین ضلع یک المان نباید از کوچک‌ترین ضلع آن المان بیشتر از ۵ برابر

^۱ Automesh

بزرگ‌تر باشد و هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، المان مذکور دارای کیفیت بهتری است [۱۶].

۲. ژاکوبین: محاسبات ژاکوبین در نقاط تلاقی المان صورت می‌گیرد. در هر نقطه تلاقی، دترمینان ژاکوبین محاسبه می‌شود و نسبت ژاکوبین با نسبت حداکثر و حداقل مقدار تعیین‌کننده پیدا می‌شود [۱۶].

۳. تاب برداشتن: تاب برداشتن المان مربعی به‌عنوان انحراف از صفحه‌های تعریف می‌شود که المان در آن قرار دارد. این‌گونه نیست که همواره هر چهار گره در یک صفحه تعریف شوند و یک گره از المان مربعی ممکن است در خارج از صفحه تشکیل شود. تاب برداشتن بیان می‌کند که این گره چقدر انحراف پیدا کرده و این معیار هرچقدر به صفر نزدیک‌تر شود، المان مسطح‌تر است.

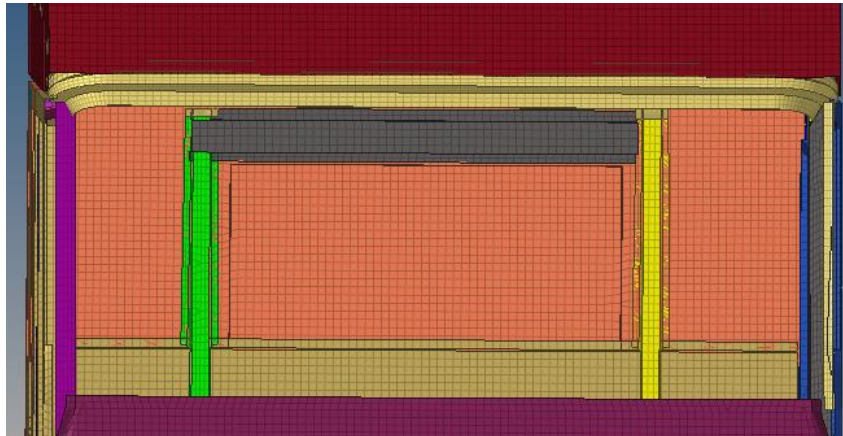
۴. انحراف: این زاویه میان دو خط تشکیل می‌شود که از میان اضلاع المان عبور می‌کنند. زاویه انحراف نشان‌دهنده تفاوت بین زاویه و ۹۰ درجه است. یک مستطیل دارای زاویه انحراف صفر است؛ زیرا زاویه شکل گرفته بین خطوط ۹۰ درجه است.

۳-۲-۳- شبیه‌سازی آنالیز مودال

به‌منظور بررسی اتصال قطعات و نقاط جوش، ابتدا در نرم‌افزار هایپرمش بین قطعات نقاط جوش ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از آنالیز مودال، مشکلات اتصالات، نیاز به اضافه کردن تقویتی‌ها مشخص می‌شود. روش حل در این تحلیل، روش مرسوم و شناخته شده Lanczos است. جهت استفاده از این روش می‌بایست هنگام تعریف Load step در نرم‌افزار روش normal mode انتخاب گردد.

۳-۳- شبیه‌سازی آزمون سفتی کابین

اولین گام برای تحلیل با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA، وارد نمودن فایل المان‌بندی شده است. تمام قطعات را می‌توان به‌صورت یک فایل از هایپرمش به داخل ال اس داینا وارد کرد. پس از وارد نمودن تمام قطعات، ابتدا اتصال بین قطعات در این نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود. در گام بعدی اقدام به



شکل ۴- المان‌بندی بدنه

پس از تعیین خواص مواد قطعات، ضخامت هرکدام از قطعات تعیین می‌شود. ضخامت قطعات به صورت پیش فرض برای تمام آن‌ها یک میلی‌متر در نظر گرفته شد. پس از انجام آزمون‌های اولیه برخی از قطعات نیاز به تقویت داشتند. به همین منظور ضخامت آن‌ها به ۲ میلی‌متر افزایش پیدا کرد. در گام بعدی مواد و ضخامت‌های تعریف شده به قطعات اختصاص داده می‌شود.

در این شبیه‌سازی علاوه بر کابین، درب‌ها، داشبورد، فرمان و صندلی‌ها نیز در مدل وارد شده‌اند؛ همچنین آدامک استاندارد تصادف ECE-R29 نیز در تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. برای دو آزمون B و C استاندارد تنها نیاز به شبیه‌سازی کابین کامیون است. در گام بعدی این شبیه‌سازی نیاز به طراحی ضربه زنده‌ها است. دو ضربه زنده آزمون B و C سفتی کابین به صورت صلب مطابق با استاندارد شبیه‌سازی شده‌اند.

در شبیه‌سازی برخورد، برای جلوگیری از فرورفتن و رد شدن قطعات خودرو از یکدیگر و همچنین برای جلوگیری از رد شدن مانع از خودرو، باید تماس بین قطعات خودرو و مانع تعریف شود. بنابراین برای تعریف تماس در نرم‌افزار ال اس داینا از دو نوع تماس استفاده شده است. تماس نوع Automatic_Surface_to_Surface برای تعریف تماس بین قطعات خودرو با یکدیگر و تماس نوع Tie_Surface_To_Surface برای تعریف تماس بین قطعات خودرو و جوش‌ها استفاده شده است. در نهایت مطابق با

تعریف مواد برای قطعات مختلف می‌شود. در این مقاله در فاز اول تمام جنس بدنه از نوع DC04 در نظر گرفته شده است؛ اما پس از انجام آزمون‌های اولیه به منظور تقویت بدنه خودرو برای برخی از قطعات از ماده DP590 استفاده شده است. در تعریف این مواد از روش Linear Plasticity استفاده شده است که برای DC04 مطابق جدول ۱ و برای DP590 مطابق جدول ۲ است.

جدول ۱- ویژگی مواد DC04

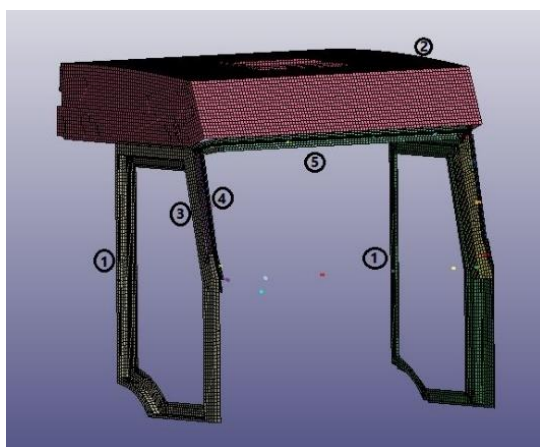
RO (Mass Density)	7860e-6
E (Young's modulus)	210
PR (Poisson's ratio)	0/3
SIGY (Yield stress)	0/283
Fail (Failure flag)	0/4
C (Strain rate parameter)	390
P (Strain rate parameter)	4/19

جدول ۲- ویژگی مواد DP590

RO (Mass Density)	7850e-6
E (Young's modulus)	206
PR (Poisson's ratio)	0/3
SIGY (Yield stress)	0/4
Fail (Failure flag)	0/4
C (Strain rate parameter)	8
P (Strain rate parameter)	8

طراحی، فضای سرنشین مطابق با استاندارد سفتی کابین است. متغیر بهینه‌سازی ضخامت قطعات با بیشترین تأثیر در سفتی کابین هستند. بدین منظور ابتدا ۵ قطعه با بیشترین تأثیر در آزمون‌های سفتی کابین مشخص می‌شوند که عبارت‌اند از: ۱- دیواره جانبی، ۲- پنل سقف، ۳- قسمت خارجی ستون A، ۴- قسمت داخلی ستون A، ۵- تقویتی بالای شیشه. این قطعات در شکل ۵ قابل مشاهده است. برای هر یک از قطعات چهار ضخامت مختلف در نظر گرفته شده است که مطابق جدول ۳ است.

با استفاده از روابط تاگوچی و با استفاده از نرم‌افزار Minitab، به ۱۶ حالت مختلف برای ضخامت‌های قطعات دست یافته می‌شود که مطابق جدول ۳ است. هر یک از حالت‌های جدول ۱ مجدداً شبیه‌سازی می‌شود و بهترین حالت استخراج می‌شود.



شکل ۵- قطعات برگزیده برای بهینه‌سازی

جدول ۳- ضخامت‌های مختلف برای قطعات انتخاب شده

ردیف	دیواره جانبی	پنل سقف	قسمت خارجی ستون A	قسمت داخلی ستون A	تقویتی بالای شیشه
۱	۲	۱	۲	۲	۲
۲	۱/۵	۰/۸	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۳	۱	۱/۵	۱	۱	۱
۴	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵

استاندارد سفتی کابین، ضربه زنده‌ها با کابین برخورد می‌کند.

لازم به ذکر است که برای اطمینان از مدل شبیه‌سازی شده برای تعریف مواد، نقطه جوش‌ها و دستورات تعریف شده در نرم‌افزار ال اس داینما مطابق با مدل تویوتا یاریس تهیه شده توسط مرکز تحلیل و ایمنی تصادف آمریکا تحت نظارت مرکز ایمنی بزرگراه‌های آمریکا (NHTSA) است. از اینرو این مدل قابلیت اطمینان دارد.

۳-۴- بهینه‌سازی

در این مقاله برای بهینه‌سازی از روش تاگوچی استفاده می‌شود. الگوریتم تاگوچی بهینه‌سازی به روش گسسته است که بر مبنای طراحی کیفیت محصول است. این روش با استفاده از آرایه‌های متعامد تعداد آزمایش‌ها را بسیار کاهش داده است. زمانی که ژاپن پس از جنگ جهانی دوم کار بازسازی خود را آغاز کرد، با مشکلاتی نظیر کمبود مواد خام، تجهیزات با کیفیت و مهندسين ماهر روبرو شد. در چنین شرایطی رقابت برای تولید محصول‌های با کیفیت بالا و تداوم بهبود کیفیت را آغاز کرد. در این زمان گینچی تاگوچی روشی را ارائه کرد که به مهندس ژاپنی کمک کرد. این روش بیشتر متمرکز بر حذف عواملی است که کیفیت محصول را پایین می‌آورد. روش تاگوچی برای بهینه‌سازی‌های تک متغیره و دو متغیره قابل استفاده است. این روش در ابتدا برای بهینه‌سازی در تحقیقات تجربی به کار گرفته شد؛ اما سپس در بسیاری از مسائل مهندسی از آن استفاده گردید. در این روش از آرایه‌های استاندارد متعامد برای تنظیم ماتریس تعداد آزمایش‌ها بر اساس تعداد متغیرها و سطح تغییر آن‌ها استفاده می‌شود و با انجام حداقل آزمایش بیشترین اطلاعات به دست خواهد آمد. برای بررسی داده‌ها در روش تاگوچی، از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. ضمناً در این روش، سه حالت امکان‌پذیر است که عبارتند از:

۱. مقدار کمتر بهتر است. (LB)

۲. مقدار بیشتر بهتر است. (HB)

۳. مقادیر نامی بهتر است. (NB) [۱۷]

در این مقاله با توجه به اینکه متغیر بهینه‌سازی، وزن خودرو است، «مقدار کمتر بهتر است» انتخاب شده است. قید

۴- نتایج

نتایج این مقاله در چندین بخش تقسیم می‌شود. ابتدا به بررسی نتایج آزمون‌های سفتی کابین پرداخته می‌شود. سپس نتایج آزمون‌های بهینه‌سازی بررسی می‌شود و در نهایت بهینه‌ترین حالت مطابق با استاندارد سفتی کابین انتخاب می‌شود.

۴-۱- نتایج آزمون استاندارد سفتی کابین

در این آزمون تغییر شکل بدنه خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که در هیچ‌کدام از آن‌ها نباید کابین فضای سرنشین را کاهش دهد. از این‌رو برای بررسی از فضای آدامک استاندارد استفاده می‌شود. نتایج آزمون‌ها به ترتیب عبارت‌اند از:

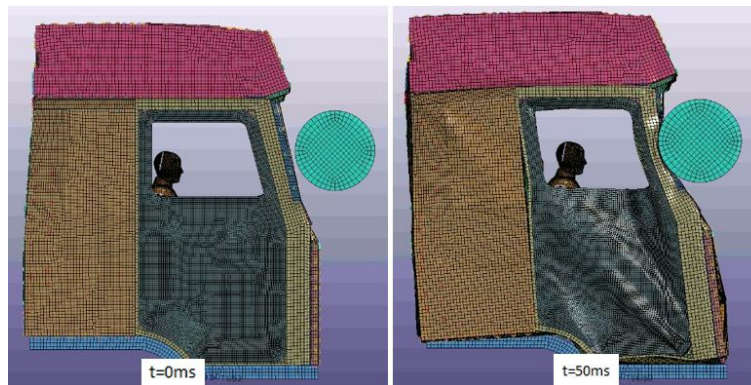
۴-۱-۱- آزمون برخورد ستون جلویی (B)

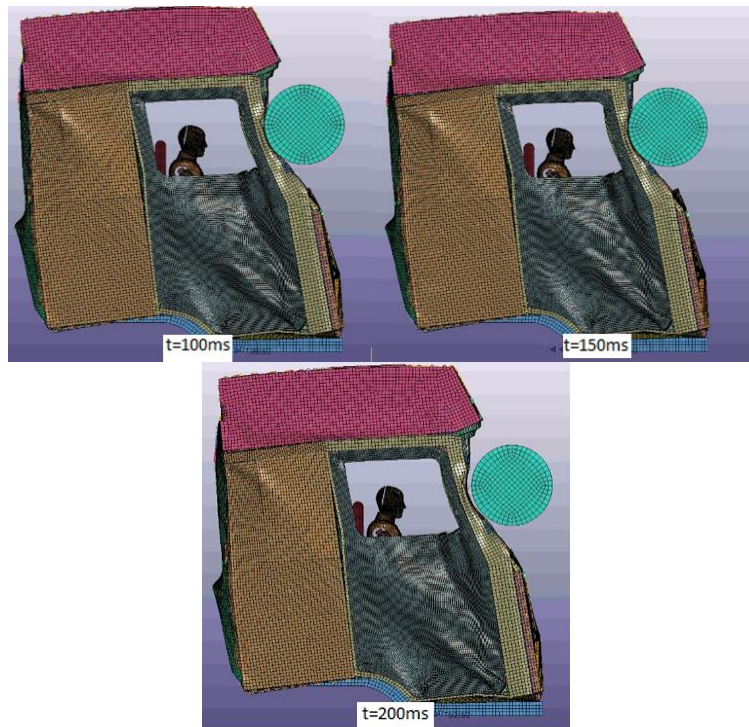
این آزمون شبیه‌سازی واژگونی ۹۰ درجه خودرو و یا برخورد خودرو با درخت و یا تیر است. در این آزمون میزان جابه‌جایی ستون A خودرو بیشترین اهمیت را دارد. این ستون نباید وارد فضای امن سرنشین شود. میزان جابه‌جایی این نقطه در شبیه‌سازی آزمون برابر ۲۷ سانتی‌متر است. نتایج شبیه‌سازی این برخورد در شکل ۶ و شکل ۷ و شکل ۸ قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است، به منظور بررسی حساسیت المان‌ها شبیه‌سازی آزمون B با المان‌های با اندازه ۱۰، ۱۴ و ۲۳ انجام شد که میزان اختلاف نتایج در دو حالت مختلف کمتر از ۳ درصد بوده است.

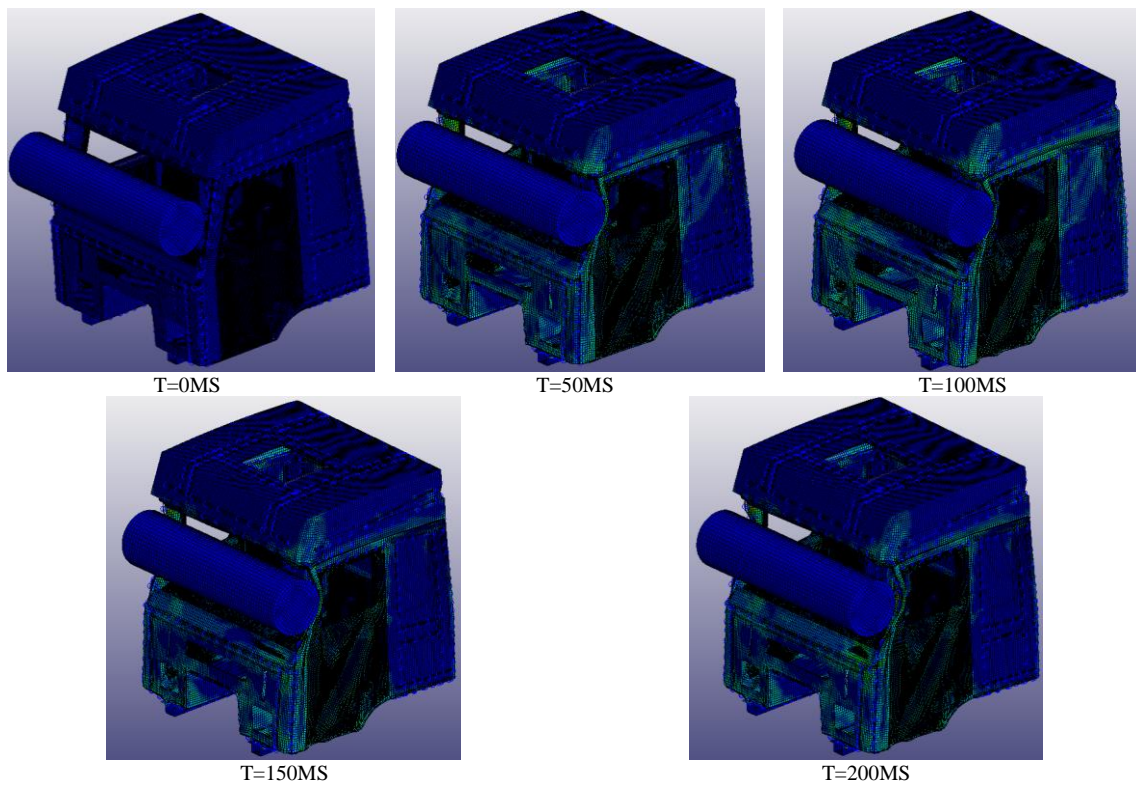
جدول ۴- ضخامت انتخاب شده قطعات به روش تاگوچی

ردیف	دیواره جانبی	پنل سقف	قسمت خارجی ستون A	قسمت داخلی ستون A	تقویتی بالای شیشه
۱	۲	۱	۲	۲	۲
۲	۲	۰/۸	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۳	۲	۱/۵	۱	۱	۱
۴	۲	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
۵	۱/۵	۱	۱/۵	۱	۰/۵
۶	۱/۵	۰/۸	۲	۰/۵	۱
۷	۱/۵	۱/۵	۰/۵	۲	۱/۵
۸	۱/۵	۰/۵	۱	۱/۵	۲
۹	۱	۱	۱	۰/۵	۱/۵
۱۰	۱	۰/۸	۰/۵	۱	۲
۱۱	۱	۱/۵	۲	۱/۵	۰/۵
۱۲	۱	۰/۵	۱	۲	۱
۱۳	۰/۵	۱	۰/۵	۱/۵	۱
۱۴	۰/۰۵	۰/۸	۱	۲	۰/۵
۱۵	۰/۰۵	۱/۵	۱/۵	۰/۵	۲
۱۶	۰/۵	۰/۵	۲	۱	۱/۵

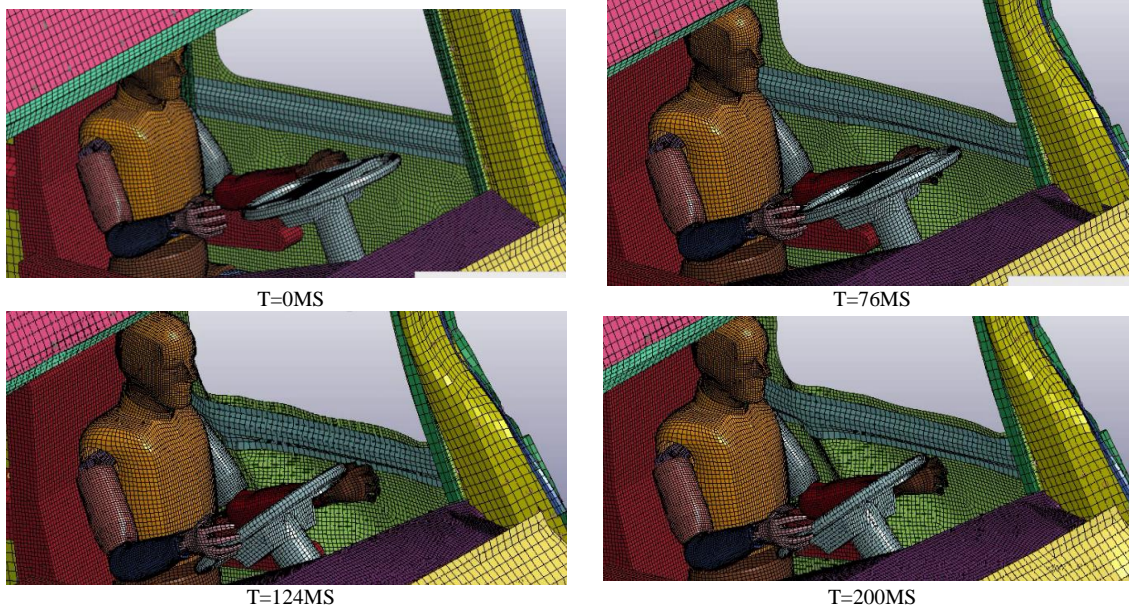




شکل ۶- آزمون برخورد ستون جلویی



شکل ۷- بررسی گسترش تنش در آزمون B



شکل ۸- بررسی حفظ فضای سرنشین در آزمون B

اینرو این خودرو آزمون سفتی کابین را با موفقیت پشت سر گذاشته است؛ اما در بهینه‌ترین حالت خود از نظر وزن و ضخامت قطعات نیست. در این راستا نتایج بهینه‌سازی این خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور راستی آزمایی پروژه، نتایج با نتایج مقاله چن و همکاران [۳] مقایسه می‌شود. با مقایسه این شبیه‌سازی‌ها این نتیجه حاصل می‌شود که شبیه‌سازی بنز اکتروس به درستی انجام شده است. مقایسه نمودار انرژی جنبشی آزمون B استاندارد مطابق شکل ۱۱ است و مقایسه تشابه آزمون C استاندارد سفتی کابین در شکل ۱۲ دیده می‌شود.

۲-۴- نتایج بهینه‌سازی

به منظور دستیابی به بهینه‌ترین ضخامت قطعات تأثیرگذار در آزمون سفتی کابین، مطابق با جدول ۱ آزمون‌های سفتی کابین انجام می‌شود. در گام اول نتایج هر یک از این حالت برای آزمون B سنجیده می‌شود. سپس بهینه‌ترین حالت مطابق با این آزمون انتخاب شده و طبق آزمون C استاندارد سفتی کابین مورد بررسی قرار می‌گیرد. وزن، نتایج آزمون B استاندارد سفتی کابین و میزان جابه‌جایی ستون A در طول این آزمون در جدول ۲ آورده شده است.

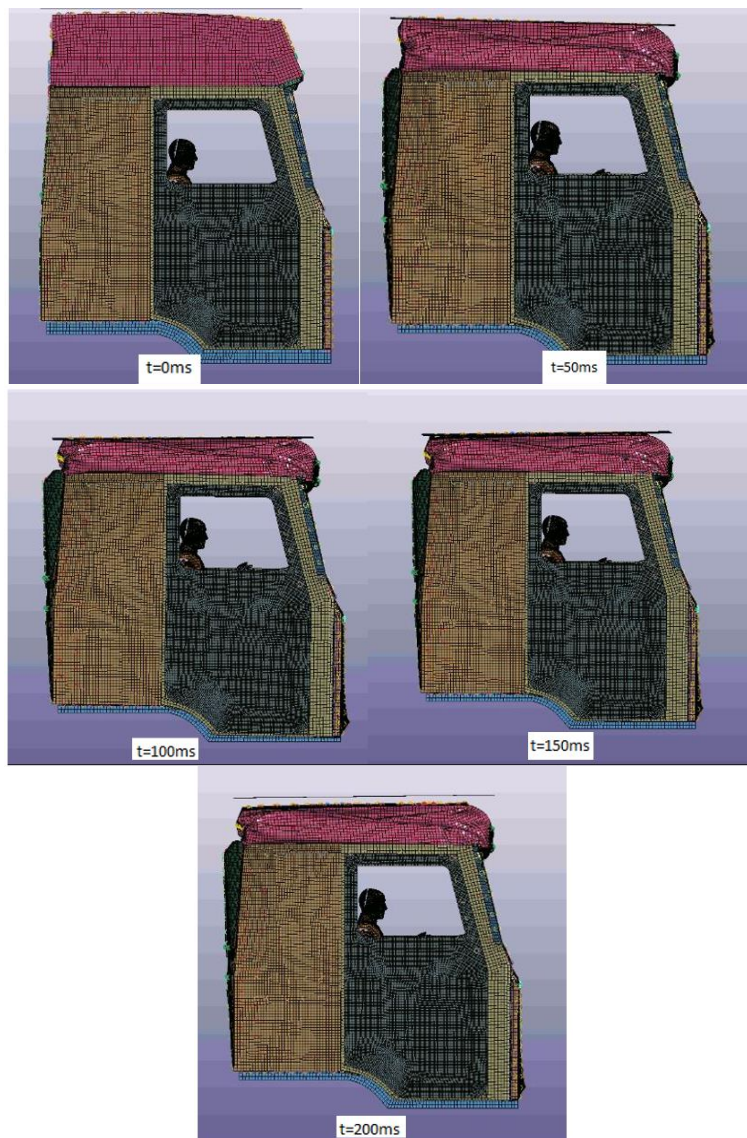
۴-۱-۲- آزمون استحکام سقف (C)

این آزمون به منظور بررسی تغییر شکل سقف خودرو و حفظ جان سرنشین در واژگونی ۱۸۰ درجه است. میزان جابه‌جایی قطعات سقف باید به گونه‌ای باشد که فضای امن راننده حفظ شود. این آزمون خود به دو قسمت تقسیم می‌شود:

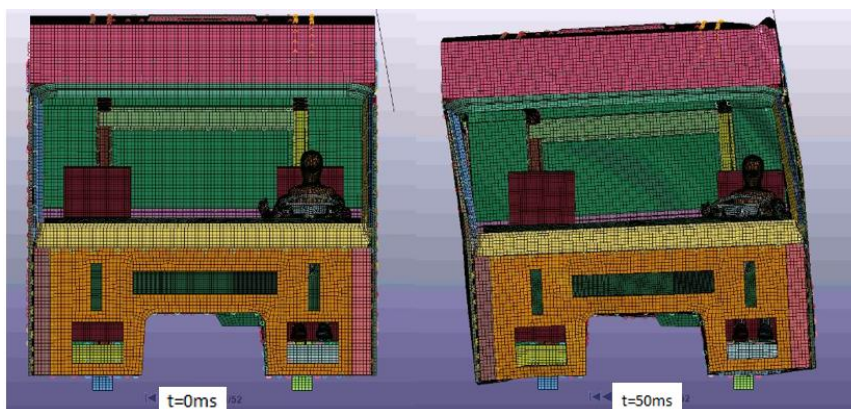
۱- ضربه‌زننده به صورت عمودی روی سقف نیرو وارد کند. در شبیه‌سازی این برخورد بیشترین جابه‌جایی کمتر از ۲۸ سانتی‌متر بوده است که با فضای امن راننده فاصله زیادی دارد. این فاصله در شکل ۹ دیده می‌شود.

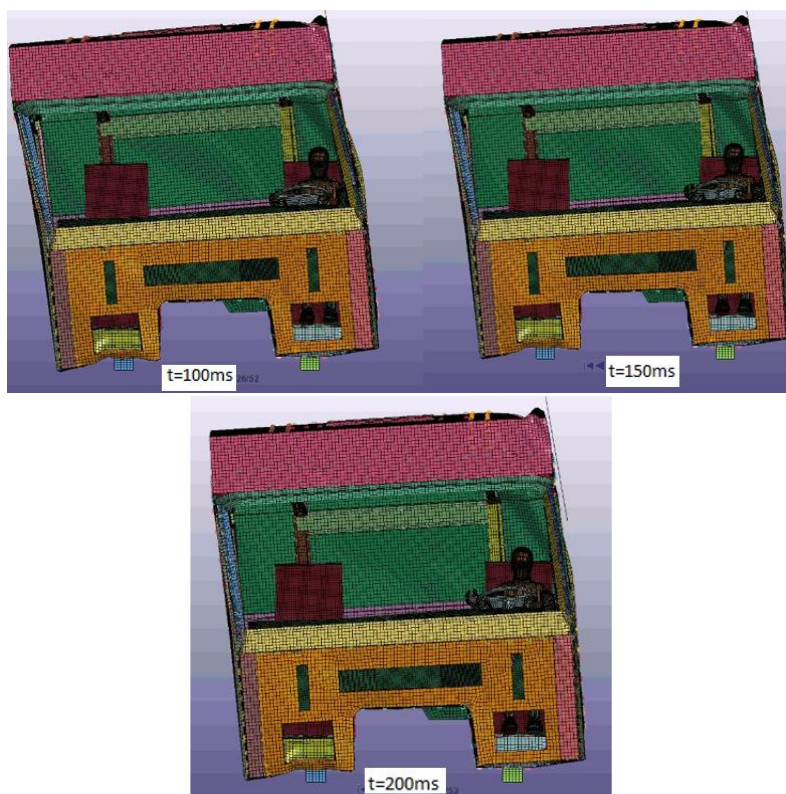
۲- ضربه‌زننده با زاویه ۲۰ درجه نسبت به صفحه عمودی با سقف خودرو برخورد می‌کند. در شبیه‌سازی این برخورد بیشترین جابه‌جایی کمتر از ۳۵ سانتی‌متر است که در دو جهت عمودی و عرضی خودرو تقسیم می‌شود. با توجه به اینکه این کامیون دارای سقف بلندی است، فضای گرفته شده در اثر برخورد ضربه‌زننده با فضای امن راننده فاصله زیادی دارد. این برخورد در شکل ۱۰ دیده می‌شود.

با توجه به نتایج ارائه شده در بالا، در هیچ یک از آزمون‌های استاندارد، فضای سرنشین از بین نرفته است. از

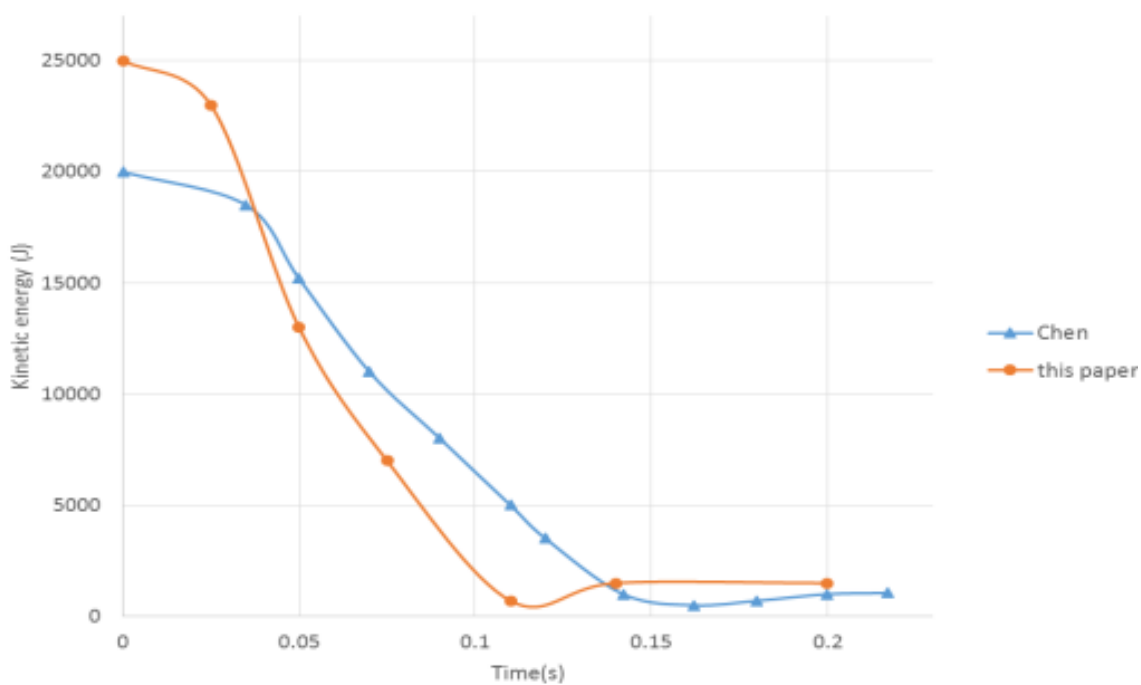


شکل ۹- آزمون اول استحکام سقف کابین

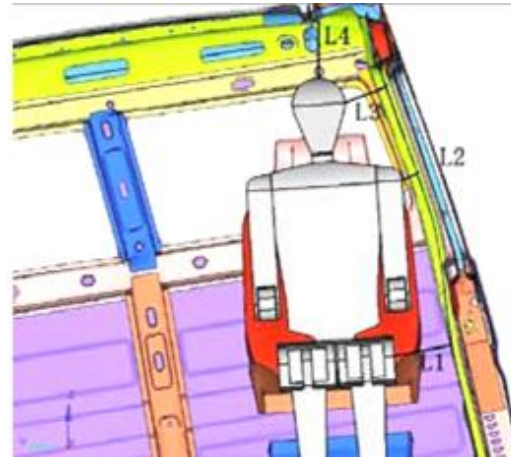




شکل ۱۰- آزمون دوم استحکام سقف کابین



شکل ۱۱- مقایسه انرژی جنبشی آزمون استحکام ستون A خودرو با مقاله چن و همکاران



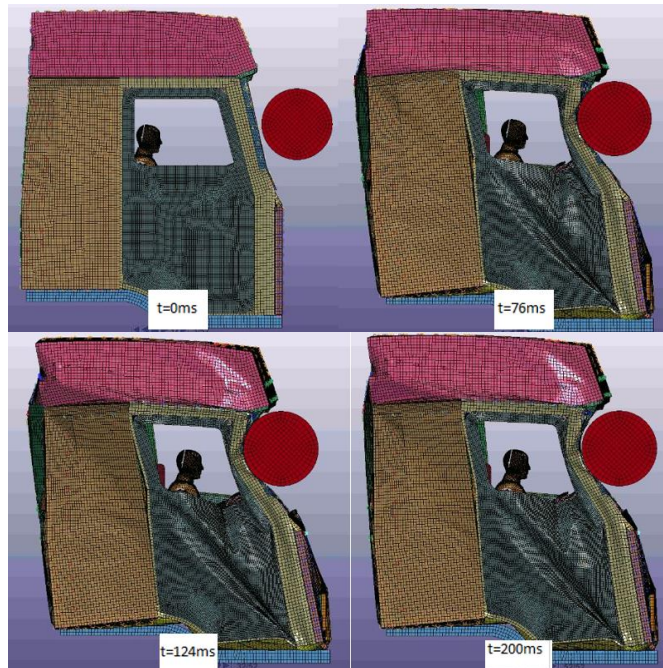
شکل ۱۲- مقایسه آزمون استحکام سقف کابین خودرو با مقاله چن و همکاران

جدول ۵- بیشترین میزان جابه‌جایی در آزمون B برای هر یک از حالت‌ها و وزن کابین خودرو در هر حالت

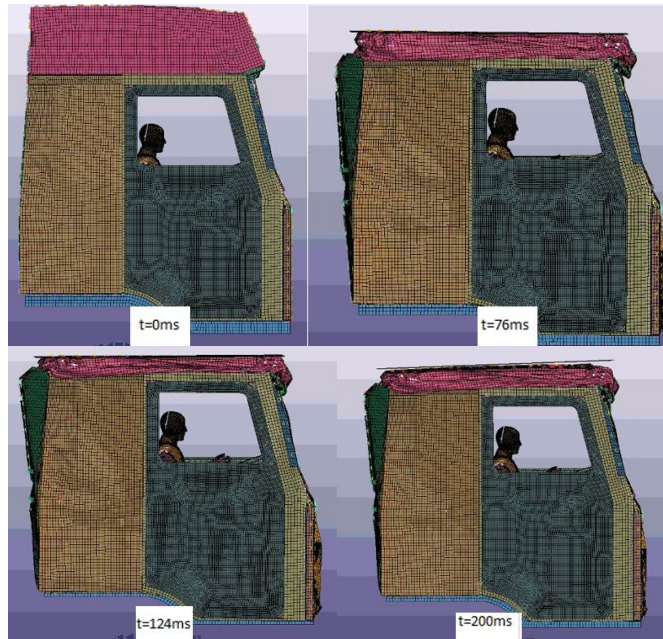
حالت	وزن سازه+ داشبورد+ صندلی‌ها+ درها (کیلوگرم)	جابه‌جایی ستون A (سانتی‌متر)	آزمون B
۱	۹۵۱/۵۲	۲۷	مورد پذیرش
۲	۹۳۴/۴۶	۳۰	مورد پذیرش
۳	۹۷۷/۹۳	۳۱	فضای دست سرنشین از بین رفت
۴	۹۰۷/۰۲	۳۴	فضای دست سرنشین از بین رفت
۵	۹۳۱/۳	۳۵	فضای دست سرنشین از بین رفت
۶	۹۱۷/۲۳	۳۷	فرمان با بدن آدمک برخورد داشت و فضای دست سرنشین از بین رفت.
۷	۹۷۱/۲۳	۲۹	مورد پذیرش
۸	۹۰۳/۲۱	۳۱	فضای دست سرنشین از بین رفت
۹	۹۱۹/۳۴	۴۰	فضای آدمک از بین رفت.
۱۰	۹۰۸/۹۷	۳۹	فرمان با بدن آدمک برخورد داشت و فضای دست سرنشین از بین رفت.
۱۱	۹۵۵/۲۳	۳۴	مورد پذیرش
۱۲	۸۹۰/۸۳	۳۲	مورد پذیرش
۱۳	۹۰۹/۹۷	۴۰	فضای آدمک از بین رفت.
۱۴	۸۹۷/۷۵	۳۸	فضای آدمک از بین رفت.
۱۵	۹۴۲/۴۳	۴۱	فضای آدمک از بین رفت.
۱۶	۸۷۶/۱۸	۴۵	فضای آدمک از بین رفت.

آزمون C استاندارد سفتی کابین برای این حالت تکرار شد که تصاویر آزمون اول C استاندارد سفتی کابین مطابق شکل ۱۴ و آزمون دوم C مطابق شکل ۱۵ است.

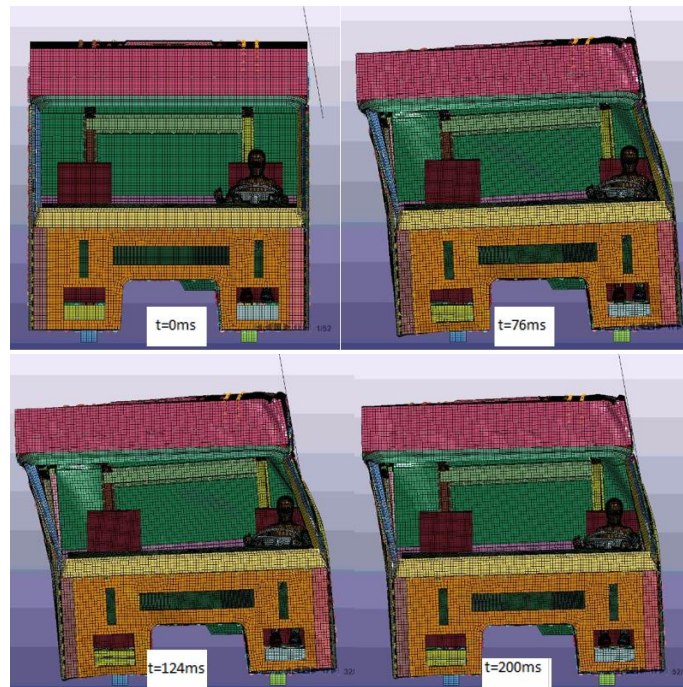
بر اساس نتایج جدول ۲ تنها پنج حالت از آزمون‌ها قادر به برآورده کردن شرایط آزمون B استاندارد سفتی کابین هستند و از این میان، آزمون حالت ۱۲، بهینه‌ترین حالت است. این آزمون در شکل ۱۳ دیده می‌شود.



شکل ۱۳- آزمون B سفتی کابین حالت بهینه



شکل ۱۴- آزمون اول استحکام سقف کابین حالت بهینه



شکل ۱۵- آزمون دوم استحکام سقف کابین حالت بهینه

میلی متر هستند. سپس قطعات با بیشترین تأثیر شناسایی شدند. این قطعات عبارتند از: ۱. دیواره جانبی ۲. پنل سقف ۳. قسمت خارجی ستون ۴ A، قسمت داخلی ستون ۵ A. تقویتی بالای شیشه. ضخامت این قطعات به عنوان متغیر بهینه‌سازی انتخاب شد و برای هر کدام چهار حالت در نظر گرفته شد و با استفاده از روش تاگوچی بر روی آن‌ها بهینه‌سازی انجام شد. از بین ۱۶ حالت بهینه‌سازی تنها پنج حالت شرایط استاندارد سفتی کابین را برآورده می‌سازند که از این بین بهترین حالت، حالت ۱۲ بود که وزن آن ۸۹۰/۸۳ کیلوگرم است. وزن این حالت نسبت به حالت اولیه ۶۰/۶۹ کیلوگرم کاهش داشته است. این کاهش وزن باعث افزایش نسبت قدرت به وزن خودرو است که به شدت بر چابکی آن تأثیرگذار است.

۶- مراجع

- [۱] سازمان استاندارد ج.ا.ا (۲۰۱۸) خودروهای جاده‌ای- طبقه‌بندی تصادف- واژه‌نامه.
- [2] Cho YB, Bae CH, Suh MW, Sin HC (2008) Maximisation of crash energy absorption by crash trigger for vehicle front frame using the

همانطور که در تصاویر بالا قابل مشاهده است، حالت ۱۲ شرایط آزمون‌های C استاندارد ECE-R29 را نیز فراهم نموده است و فضای سرنشین در طول آزمون حفظ شده است. میزان جابه‌جایی پنل سقف در آزمون اول C این حالت ۴۱ سانتی‌متر است که با توجه به سقف بلند کابین این خودرو، با فضای سرنشین فاصله کافی را دارد و میزان جابه‌جایی پنل سقف برای آزمون دوم C برابر با ۴۰ سانتی‌متر است که در آن پنل جانبی بسیار به فضای سرنشین نزدیک می‌شود، اما وارد این فضا نمی‌شود و پس از بازگشت بدنه به خاطر حالت الاستیک قطعات، این فاصله بیشتر می‌شود. در این حالت وزن خودرو نسبت به حالت اولیه ۶۰/۶۹ کیلوگرم سبک‌تر شده است که به چابکی آن کمک شایانی می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله کامیون بنز اکتروس در نرم‌افزار کتیا شبیه‌سازی شد. سپس خودروی مدنظر در نرم‌افزار هایپر مش، المان‌بندی شد. شبیه‌سازی آزمون‌های سفتی کابین برای این خودرو انجام شد. برای این آزمون از دو جنس DC04 و DP590 استفاده شد. در این آزمون‌ها قطعات دارای ضخامت ۱ و ۲

جذب انرژی در ضربه‌گیرهای استوانه‌ای با ضخامت دیواره متغیر. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۱۰۲-۹۱ (۳): ۱۰۳.

[11] Asadinaa N, Khalkhalia A, Saranjam MJ (2018) Sensitivity analysis and optimization for occupant safety in automotive frontal crash test. *Lat Am J Solids Struct* 15(7).

[12] Zhu P, Pan F, Chen W, FACV (2013) Lightweight design of vehicle parameters under crashworthiness using conservative surrogates. *Comput Ind* 4: 280-289.

[۱۳] سازمان استاندارد ج.ا.ا (۲۰۱۹) خودرو-تایید در رابطه با حفاظت از سرنشینان کابین خودروی تجاری.

[14] Nation U (1999) Vehicle witg regard to the protection of the occupants of the CAB of a commercial vehicle.

[۱۵] افشار م (۱۳۹۹) شبیه‌سازی و بهینه‌سازی لوله‌های برخورد جانبی کامپوزیتی در خودرو. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی خودرو گرایش سازه و بدنه خودرو.

[۱۶] موسی‌زاده ا (۱۳۹۹) بهینه‌سازی سفتی فریم موتورسیکلت برقی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت.

[۱۷] خاکی جامعی م (۱۳۹۶) بررسی عددی تأثیر نانوسیال بر راندمان چاه حرارتی میکرو کانالی با استفاده از روش تاگوچی. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۲۸۷-۲۷۵ (۲): ۷.

homogenisation method. *Int J Veh Des* 46(1): 23-50.

[3] Chen DY, Wang LM, Wang CZ, Yuan LK, Zhang TY, Zhang Z (2015) Finite element based improvement of a light truck design to optimize crashworthiness. *Int J Automot Technol* 16(1): 39-49.

[4] De Castro I, Jokuszies M, Altamore P, Lee W (2001) Simulation of occupant response in the ECE R29 safety test. *SAE Tech Pap*.

[5] Mirzaamiri R, Esfahanian M, Ziaei-Rad S. Crash (2012) Test simulation and structure improvement of IKCO 2624 truck according to ECE-R29 regulation. *Int J Automot Eng* 2(3): 180-192.

[6] Atidar SK, Tandon V, Mahajan RS, Raju S (2005) Practical problems in implementing commercial vehicle cab occupant protection standard ECE R-29. In: *SAE Technical Papers*.

[7] Li S, Guo K, Zhao Y, Guo Y (2005) Frontal pendulum impact test and computer simulation of commercial vehicles. In: *China Mechanical Engineering*.

[۸] شجاعی‌فر م (۱۳۹۴) طراحی پانل جانبی بدنه منفصل خودرو کلاس B و شبیه‌سازی اجزای محدود برخورد از جانب. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۶۴-۵۱ (۳): ۵۳.

[۹] ایزانلو م (۲۰۱۷) تحلیل سفتی پیچشی و خمشی بدنه خودروی سواری با استفاده از مدل اجزای محدود ساده سازی شده. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۲۶-۱۷ (۲): ۷.

[۱۰] عبدالمنافی ع (۱۳۹۹) مطالعه تحلیلی و عددی