



## شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سازه کابین کامیون در معرض انفجار

علی یوسفی<sup>۱</sup>، فرهاد کیا<sup>۲</sup>، سیدعسکری مهدوی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گرایش سازه بدنه خودرو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد تهران جنوب، تهران، ایران

<sup>۳\*</sup> دانشجوی دکتری، مربی، گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی مهندسی دانشگاه افسری امام علی (ع)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

### چکیده

یکی از علل تلفات در مناطق جنگی، تلفات ناشی از انفجار مواد منفجره در نزدیکی وسایل نقلیه است. موضوع مهم در این وسایل، عدم آسیب شدید به سرنشین هنگام انفجار است. یکی دیگر از مشکلات خودروهای سنگین عدم چابکی لازم است. به منظور افزایش چابکی خودروها کاهش وزن کابین خودرو الزامی است. در این مقاله، مدل سه‌بعدی کابین کامیون با هدف بررسی اثر انفجار در نزدیکی و زیر این کامیون و بهینه‌سازی کابین آن ایجاد می‌شود. سپس مدل شبیه‌سازی شده با المان‌های مربعی ۱۰ میلی‌متری المان‌بندی می‌شود. سپس آزمون انفجار به دو صورت انفجار در زیر و جانب خودرو مطابق با استاندارد AEP-55 شبیه‌سازی می‌شود. در آزمون انفجار در زیر خودرو از ۴ کیلوگرم معادل TNT در سطح زمین و در آزمون انفجار در اطراف خودرو نیز از ۸ کیلوگرم معادل TNT در فاصله ۳ متری هم سطح کف کابین استفاده می‌شود و میزان آسیب به سرنشین مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور برآوردن الزامات انفجار و با توجه اینکه این خودرو پایه یک خودرو تجاری طراحی شده است، جنس و ضخامت کفی خودرو اصلاح می‌شود. سپس ضخامت قطعات با بیشترین تأثیر در این آزمون که عبارت‌اند از: ۱- کفی جانبی ۲- کفی میانی ۳- دیواره جانبی ۴- دیواره جلویی ۵- درب خودرو در ۱۶ حالت بهینه‌سازی می‌شود. از این بین ۷ حالت الزامات آزمون انفجار در زیر خودرو را برآورده می‌سازند. حالت بهینه خودرو دارای وزن ۵۷۱/۳۹ کیلوگرم است که نسبت به حالت اولیه ۳/۳۱ کیلوگرم سبک‌تر و نسبت به اولین حالتی که الزامات استاندارد AEP-55 را برآورده می‌سازد، ۷۹/۷۲ کیلوگرم سبک‌تر است.

**کلمات کلیدی:** انفجار؛ آزمون ناتو؛ بهینه‌سازی؛ شبیه‌سازی؛ کامیون.

## Simulation and Optimizations of Truck's Cabin Structure Exposed to Explosion

Ali Yousefi<sup>1</sup>, Farhad Kia<sup>2</sup>, Seyyed Askari Mahdavi<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> MSc, Faculty of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. candidate, Mechanical Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran

<sup>3\*</sup> Ph.D. candidate, Instructor, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Imam Ali Officer University, Tehran, Iran

### Abstract

One of the casualties in war zones is casualties due to the explosion of explosives near vehicles. The important issue in these vehicles isn't to seriously injure the occupant during the explosion. It is necessary to optimize of the cabin structure of heavy vehicles to achieve high-performance vehicles. In this article, the 3-d model of the truck is created to study the effect of exploding near and under a truck and to optimize the truck cabin. The model is meshed by square and 10 mm<sup>2</sup> elements. Then, explosion tests are simulated in two situation: explosion under the vehicle and explosion near the truck according to AEP-55. In the explosion test under the car, using 4 kg TNT equivalent on the ground surface and In the test near the truck, using 8 kg TNT equivalent at the distance of 3 meter at the same level by under cabin surface and the amount of occupant injuries are checked. For meeting the requirements of the explosion and because this truck platform is a commercial vehicle, vehicle floor panels' material and thickness are modified. The thickness of important parts include 1. Side floor panel 2. Middle floor panel 3. Front side panel 4. Front Panel 5 Door Panel are optimized in 16 modes and Only 7 modes meet the requirements of the explosion test under the vehicle. The optimal mode is 571.39 kg which has decreased 79.72 kg compared to the first mode meet AEP-55 requirements and has decreased 3.31kg compared to the initial mode.

**Keywords:** explosion; NATO test; Optimization; Simulation; Truck.

## ۱- مقدمه

یکی از علل تلفات در مناطق جنگی یا پس از جنگ، تلفات ناشی از انفجار مواد منفجره مانند خمپاره، نارنجک و مین است. حفظ جان سرنشین در وسایل نقلیه در معرض انفجار بسیار حائز اهمیت است. از اینرو سازمان‌های مختلف اقدام به تدوین استانداردهایی در این راستا نموده است. یکی دیگر از مشکلات خودروهای سنگین عدم چابکی است. برای دستیابی به 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.» به همین دلیل بهینه‌سازی وزن سازه کابین کامیون از اهمیت ویژه برخوردار است. علاوه بر این کاهش وزن باعث کاهش مواد مورد استفاده برای ساخت سازه‌ی کامیون می‌شود که این موضوع باعث کاهش هزینه‌ها است. [۱] به منظور کاهش وزن کابین یک کامیون ابتدا کابین کامیون به اجزای مختلف تقسیم می‌شود که در ادامه معرفی می‌شوند.

## ۱-۱- 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<sup>۱</sup>: شامل ورق سقف و تقویتی‌های طولی و عرضی جهت استحکام آن است.  
پنل کفی<sup>۲</sup>: 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<sup>۳</sup>: شامل صفحه کناری چپ و راست به همراه تقویتی‌های طولی و عرضی و همچنین فریم دور درب‌های جانبی است.

دیواره جلویی<sup>۴</sup>: شامل صفحه نگه‌دارنده داشبورد و فضای رادیاتور و متعلقات و اتصالات فرمان و پدال‌های گاز و ترمز و کلاچ است.  
دیواره پشتی<sup>۵</sup>: شامل صفحه اتاقک خواب و تقویتی‌های آن است. [۱]

## ۱-۲- مروری بر مطالعات پیشین

امروزه یکی از خطرناک‌ترین تجهیزات، وسایل انفجاری بهبودیافته است که بر ضد وسایل نقلیه استفاده می‌شود. این تجهیزات در انواع مختلف از جمله انواع مخفی و دفن شده در زیر خاک تا تجهیزات انفجاری پرتابی وجود دارند. این تجهیزات بیشتر تأثیر انفجاری نقطه‌ای دارند مانند مین‌های ضد نفر اما نمی‌توان از تأثیر کلی انفجار آن‌ها چشم‌پوشی کرد که موجب وارد شدن گشتاور بالا به خودرو و سرنشین است. مطابق با آمار، ۶۰ درصد تلفات انسانی در عراق در اثر انفجار مواد منفجره اتفاق افتاده است. [۲] به منظور بررسی و بهبود اثرات انفجار سه روش توسط محققان مورد استفاده است. تعدادی از محققان مانند ولاهوپولوس و همکاران و دوج و همکاران به انجام آزمون واقعی انفجار و بررسی تأثیر آن می‌پردازند. [۳] و [۴] گروهی دیگر از محققان مانند آرپالی و همکاران [۵]، بیر و همکاران [۶]، بیلی و همکاران [۷] با استفاده از ارایه به شبیه‌سازی تأثیر موج انفجار بر روی آدمک می‌پردازند. یکی دیگر از متداول‌ترین روش‌های بررسی انفجار، شبیه‌سازی با استفاده از روش‌های عددی است که در ادامه به بررسی برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

در صنعت خودرو هنگامی که صحبت از ایمنی است، بیشتر به بررسی عملکرد خودرو در هنگام تصادفات پرداخته می‌شود. در صورتی که خطرات بیشتری از جمله انفجار مین‌ها و مواد منفجره پرتابی وجود دارد که تحقیقات کمتری در این حوزه انجام شده است. تفاوت اصلی بین انفجار و تصادف در این موضوع است که در هنگام انفجار نیرو تا بیش از ۱۰ برابر بیشتر از تصادف است و زمان اعمال نیرو نیز کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه است، در صورتی که در تصادف این زمان بیش از ۱۰۰ میلی‌ثانیه است. [۶] به همین منظور طراحی و بررسی وسایل

<sup>4</sup> Front Panel

<sup>5</sup> Back Panel

<sup>1</sup> Roof Panel

<sup>2</sup> Underbody Panel

<sup>3</sup> Side Panel

استفاده از جاذب ضربه دینامیکی است. استفاده از جاذب دینامیکی ضربه باعث جذب انرژی پرتابی شده و خودرو در اثر انفجار واژگون نمی‌شود؛ همچنین این روش باعث شتاب وارد به سر از ۴۵g به ۹g شده است.

بیر و همکاران [۶] در مقاله‌ای تحت عنوان اعتبارسنجی مدل اندام تحتانی به‌عنوان ابزارهای ارزیابی آسیب در اثرات ناشی از مین‌های زمینی ضد وسایل نقلیه به بررسی امکان استفاده از آدمک به‌جای انسان در خودروها در شرایط انفجار مین ضد خودرو پرداخته‌اند. این آزمون در دو شرایط بارگذاری شبیه‌سازی شده است. در شرایط سطح پایین، ضربه زننده با وزن ۲۴ کیلوگرم با سرعت ۴/۷ متر بر ثانیه برخورد می‌کند و در شرایط بارگذاری بالا ضربه زننده با وزن ۳۷ کیلوگرم با سرعت ۸/۳ متر بر ثانیه استفاده شده است. دو مدل بیومکانیکی آدمک ۵۰ درصد هیبرید III و مدل سرنشین انسانی THOR-Lx مورد آزمون قرار گرفتند. مقایسه نتایج نشان داد که مدل THOR-Lx در آینده مدل مناسب‌تری برای این آزمون خواهد بود.

ونگ و همکاران [۱۰] در مقاله‌ای به بررسی میزان آسیب به سرنشین در چهار خودرو متفاوت پرداخته است. او دریافت که آسیب اساسی به‌پای سرنشین در اثر نفوذ کفی خودرو به فضای سرنشین در طول انفجار است. در نهایت او پیشنهاد استفاده از محافظ‌های انفجاری بر روی خودروهای مورد استفاده در مناطق مین‌گذاری شده را داده است. آن‌ها دریافتند که شتاب وارده به کف یک خودرو متوسط حدود ۱۰۰g است و سرعت آن در هنگام انفجار مین ضد خودرو بیش از ۱۲ متر بر ثانیه است. آن‌ها با اضافه نمودن کفی کاذب که از دو ماده جذب‌کننده انرژی ساخته شده است، سعی در کاهش انرژی وارد به سرنشین نموده‌اند.

زاهدی نیا و همکاران [۱۱] در مقاله‌ای تحت عنوان مطالعه تجربی و عددی تغییر شکل صفحات چندلایه کامپوزیت-فلز (FML) با ضخامت‌های یکسان تحت بارگذاری انفجاری به بررسی تأثیر انفجار بر روی سازه‌های هیبریدی پرداخته‌اند.

پدنلی و همکاران [۱۲] در مقاله‌ای تحت عنوان پاسخ اندام تحتانی نظامی و پای هیبرید III با استفاده از هیبرید III و EuroSID-2 ATD در برخورد بارگذاری عمودی به بررسی تأثیر مدل پای انتخاب شده بر نتایج تحلیل‌ها پرداخته است و

نقلیه در معرض انفجار با طراحی و بررسی وسایل تحت تصادف بسیار متفاوت است.

اردیک [۸] در مقاله‌ای تحت عنوان پاسخ دینامیکی مدل آدم در خودرو در زمین مین‌گذاری شده به شبیه‌سازی یک نفربر نظامی تحت انفجار با استفاده از روش اجزای محدود مطابق با استاندارد AEP-55 ناتو در نرم‌افزار LS-DYNA پرداخته است. در این شبیه‌سازی آسیب وارد به سرنشین مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی از ۳۳۳۹۶۳۸ المان پوسته، ۶۲۱۷۸ المان جامد و ۱۳۴۰ المان تیر استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از مدل آدمک هایبرید III 50 درصد و ۶ کیلوگرم مواد منفجره استوانه‌ای استفاده شده است. مطابق با نتایج این مقاله ۰/۳۴۳ درصد از ۲۶/۷ کیلوژول انرژی تولید شده توسط ۶ کیلوگرم مواد منفجره به آدمک منتقل می‌شود.

سهیمی و همکاران [۲] در مقاله‌ای تحت عنوان شبیه‌سازی اثر موج انفجار بر سرنشینان وسایل نقلیه در اثر بارگذاری انفجاری در زیر خودرو به بررسی تأثیر سه متغیر ارتفاع صندلی سرنشینان، محل قرارگیری مواد منفجره و ضریب وزنی انفجار هایپکینز-کرنز بر میزان آسیب وارد به سرنشینان وسایل نقلیه پرداخته است. در پایان این نتیجه حاصل شده است که محل صندلی سرنشینان بیشترین تأثیر را در بین متغیرها بر اثر موج انفجار بر روی سرنشینان دارد. دینفلد و همکاران [۹] در مقاله‌ای تحت عنوان کاهش اثرات کلی وارد به خودرو در اثر انفجار به بررسی راهکارهایی برای کاهش تأثیر انفجار بر روی یک خودرو نظامی پرداخته‌اند. در این مقاله خودرو با کفی صاف و خودروها با کفی مخروطی دارای ارتفاع از زمین متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور بررسی اثرات انفجار، نمونه کوچک‌شده این خودروها با وزن ۱۵۰ کیلوگرم، طول ۸۰ سانتی‌متری و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری ساخته شده است. دینفلد علاوه بر ساخت نمونه کوچک‌شده به شبیه‌سازی با اندازه واقعی با استفاده از مدل آدمک پرداخته است. نرم‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی انفجار در این مقاله LS-DYNA است. در این شبیه‌سازی سه حالت مختلف ارتفاع از زمین برای مخروط اضافه‌شده در زیر خودرو با حالت صاف کف خودرو مقایسه شده است. پس از بررسی حالات مختلف این نتیجه حاصل شده است که در خودرو با کفی مخروطی و ارتفاع از زمین بیشتر، آسیب کمتری به سرنشینان وارد شده است. راهکار دیگر دینفلد و همکاران

استانداردهایی تحت عنوان Stanag نمونه است. یکی از این استانداردها تحت عنوان آزمون محافظت از خودرو در برابر انفجار تحت شماره NATO AEP-55 STANAG 4569 [۱۶] است. که شامل دو بخش محرمانه و غیر محرمانه است. این غیر محرمانه این سند با شماره جلد ۳ شناخته می‌شود. این استاندارد به دو بخش انفجار در زیر خودرو و در نزدیکی خودرو تقسیم می‌شود که در هر دو حالت به بررسی میزان آسیب وارد شده به خودرو و میزان آسیب وارد شده به سرنشین می‌پردازد. مطابق با استاندارد میزان آسیب مجاز وارد به سرنشین در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- معیارهای مورد پذیرش آسیب به سرنشین

عضو بدن	معیار سنجش	حد مجاز
سر	معیار آسیب به سر <sup>۱</sup>	۲۵۰
گردن	نیروی فشاری محوری <sup>۲</sup>	۴ کیلو نیوتن در ۰ میلی ثانیه و ۱/۱ کیلو نیوتن بیش از ۳۰ میلی‌ثانیه
	نیروی کششی محوری <sup>۳</sup>	۳/۳ کیلو نیوتن در ۰ میلی ثانیه و ۲/۸ کیلو نیوتن در ۳۵ میلی‌ثانیه و ۱/۱ کیلو نیوتن در بیش از ۶۰ میلی‌ثانیه
	نیروی برشی <sup>۴</sup>	۳/۱ کیلو نیوتن در ۰ میلی ثانیه و ۱/۵ کیلو نیوتن در ۳۵-۲۵ میلی‌ثانیه و ۱/۱ کیلو نیوتن در بیش از ۴۵ میلی‌ثانیه
	گشتاور خمشی (خمشی) <sup>۵</sup>	۱۹۰ نیوتن متر
	گشتاور خمشی (انبساط) <sup>۶</sup>	۹۶ نیوتن متر
	قفسه سینه	معیار فشاری قفسه سینه <sup>۷</sup>
معیار ویسکوزیته <sup>۸</sup>		۰/۷ متر بر ثانیه
ستون فقرات	معیار پاسخ دینامیکی <sup>۹</sup>	۱۷/۷

به این نتیجه رسیده که در صورت انتخاب آدامک نامناسب نتایج فاقد اعتبار است.

مبارک و همکاران [۱۳] در مقاله‌ای تحت عنوان اثر هندسه‌های مختلف بر روی عملکرد صفحه کفی سازه تحت بار انفجاری به بررسی هندسه‌های مختلف به عنوان کفی خودرو برای جذب انرژی انفجاری پرداخته است و در نهایت دریافته که جذب انرژی توسط ساختار لانه‌زنبوری از سایر حالات بیشتر بوده است.

سیبیلوسکی و همکاران [۱۴] در مقاله‌ای تحت عنوان مطالعات تجربی بر روی پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه ساندویچ لانه زنبوری آلومینیوم به بررسی میزان جذب انرژی این پنل‌ها در هنگام انفجار در نزدیکی خودروها پرداخته است. لیم و همکاران [۱۵] در مقاله‌ای تحت عنوان نقش تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی چند پاسخه در قابلیت اطمینان بهینه‌سازی طراحی قوی: کاربردی برای طراحی خودرو تجاری از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی سیستم تعلیق اتاق یک کامیون استفاده کرده است. در این مقاله از روش تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) به منظور تحلیل چند متغیره استفاده کرده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده تحقیقات متنوعی بر روی خودروهای تحت انفجار انجام شده است اما در ایران در این حوزه مقاله‌ای یافت نشده است. از طرفی در هیچ یک از مقالات مورد بررسی تحلیل انفجار و بهینه‌سازی در یک مقاله دیده نشده است. از اینرو در این مقاله به شبیه‌سازی انفجار و بهینه‌سازی پرداخته شده است. در این مقاله ابتدا کابین یک کامیون براساس نمونه واقعی شبیه‌سازی می‌شود. سپس مدل شبیه‌سازی شده المان‌بندی می‌شود. در گام بعد، آزمون انفجار در زیر خودرو و انفجار در جانب خودرو شبیه‌سازی می‌شود. سپس با استفاده از روش تاگوچی وزن سازه با توجه به الزامات انفجار در زیر و نزدیکی خودرو بهینه‌سازی می‌شود.

### ۱-۳- آزمون محافظت از خودرو در برابر انفجار

سازمان با هدف یکپارچه‌سازی و افزایش کیفیت ارتش‌های کشورهای عضو اقدام به تدوین رویه‌ها، دستورالعمل‌ها و

<sup>6</sup>Bending moment (extension)

<sup>7</sup>Thoracic Compression Criterion

<sup>8</sup>Viscous Criterion

<sup>9</sup>Dynamic Response Index

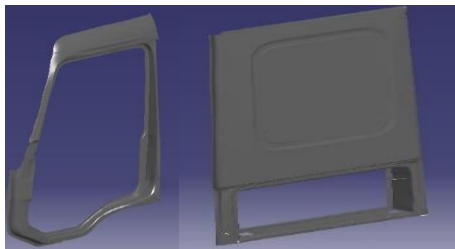
<sup>1</sup>Head Injury Criterion

<sup>2</sup>Axial compression force

<sup>3</sup>Axial tension force

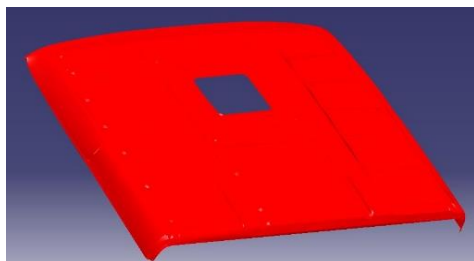
<sup>4</sup>Shear force

<sup>5</sup>Bending moment (flexion)



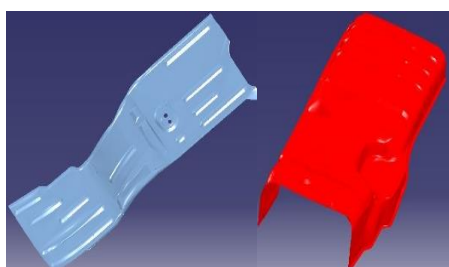
شکل ۲- صفحات جانبی خودرو

سقف بالای خودرو نیز از یک صفحه یک‌تکه تشکیل شده است که تا لبه‌ی دیوارهای جانبی و عقبی ادامه دارد و در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳- سقف خودرو

در قسمت جلو نیز این صفحه تا پشت تقویتی بالای شیشه ادامه پیدا می‌کند. صفحه پشتی خودرو به‌صورت یکپارچه طراحی شده است. کفی خودرو نیز از سه قسمت تشکیل شده است که شامل صفحات جانبی کفی و صفحه میانی است که در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴- کف خودرو

صفحه جلویی این خودرو نیز به‌صورت یکپارچه است و ستون A نیز به‌عنوان آخرین قطعه خارجی خودرو است.

۶/۹ کیلو نیوتن	نیروی فشاری محوری	استخوان ران
۶/۲ کیلو نیوتن برای قسمت بالایی	نیروی فشاری محوری	ساق پا
۵/۴ کیلو نیوتن برای قسمت پایینی		

لازم به ذکر است که این آزمون‌ها هم بر روی خودرو و هم بر روی صفحات بدنه تعریف شده است. میزان آسیب به سازه خودرو در این استاندارد مطابق با اهداف مهندسی تعیین شده در اسناد طراحی در نظر گرفته شده است.

## ۲- روش حل

با توجه به فایل ابر نقاط خودرو و مشاهده نمونه‌های واقعی آن، ابتدا مدل‌سازی سه‌بعدی سازه بدنه کابین خودرو انجام شد. بدین منظور ابتدا ابرنقاط سازه کابین کامل خودرو تهیه شد. سپس مرز قطعات از مدل ابر نقاط شناسایی شد. پس از آن، طراحی هر قطعه به‌صورت جداگانه انجام شد. ابر نقاط سازه این خودرو مطابق با شکل ۱ است:



شکل ۱- ابرنقاط سازه کابین خودرو

## ۲-۱- صفحه‌های خارجی خودرو

صفحه‌های خارجی خودرو شامل صفحه‌های جانبی، صفحه سقف، صفحه عقب خودرو، صفحه‌های کف خودرو و صفحه جلوی خودرو است که در ادامه این صفحه‌ها قابل مشاهده است. صفحات جانبی این خودرو شامل دو بخش قاب دور در و قسمت خواب کابین که در شکل ۲ دیده می‌شود.

## ۲-۲- ریل‌ها و تقویتی‌ها

در یک خودرو علاوه بر صفحات خارجی، ریل‌ها و تقویتی‌های متعددی مورد استفاده است که این تقویتی‌ها به صورت جداگانه در زیر نشان داده شده است. در جانب خودرو دو تقویتی عمودی و یک تقویتی طولی از ابتدا تا انتهای جانب خودرو قرار دارد. در قسمت عقب خودرو سه ریل عرضی قرار دارد که یک ریل در بالا بین صفحه سقف و صفحه عقب خودرو قرار می‌گیرد. یک ریل عرضی از ابتدا تا انتهای عرض خودرو امتداد دارد. دو تقویتی عمودی نیز در طول ارتفاع صفحه عقب قرار دارد. در سقف خودرو با توجه به این نکته که این خودرو ارتفاع زیادی نسبت به سایر خودروها ندارد، از دو ریل طولی استفاده شده است که بین این دو ریل یک تقویتی عرضی و سازه سانروف قرار دارد. سازه سانروف یک قاب کامل است. مهم‌ترین ریل در هنگام تصادف و یا برخورد از روبرو خودرو تحت عنوان S-Rail شناخته می‌شود که از ابتدای خودرو تا انتها ادامه دارد. شبیه‌سازی کامل بدنه خودرو شامل حدود ۶۰ قطعه انجام شده است که مدل بدنه خام خودرو در شکل ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که درب‌های جانبی خودرو نیز به صورت جداگانه به صورت سه‌بعدی ایجاد شدند.



شکل ۵- شبیه‌سازی سه‌بعدی کامل بدنه خودرو

## ۲-۳- 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 مجموعه‌ی 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.

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. [۱۷]
۲. لبه‌ها: لبه‌هایی با شعاع کوچک‌تر از ۸ میلی‌متر نادیده گرفته می‌شوند و به صورت یک المان مربعی مدل می‌شود. لبه‌هایی با شعاع بزرگ‌تر از ۸ میلی‌متر حداقل با دو المان و یک نود باید مدل شوند.
۳. انتقال در مش: از المان مثلثی برای انتقال در مش از تعداد المان بیشتر به تعداد المان کمتر می‌توان استفاده کرد. [۱۷]

## ۲-۳-۱- ایجاد المان‌ها

پس از آماده‌سازی سطوح قطعات، با استفاده از دستور المان‌بندی خودکار از قسمت دو بعدی سطوح المان‌بندی می‌شوند. در این مقاله قطعات مختلف با توجه به اهمیت و پیچیدگی‌های آن‌ها با ابعاد ۱۰ میلی‌متر مربع المان‌بندی شده‌اند.

## ۲-۳-۲- بررسی کیفیت المان

به منظور 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. هرچه قدر 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 بزرگ‌تر باشد و هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، المان مذکور دارای کیفیت بهتری است. [۱۸]
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. [۱۸]

جدول ۳- ویژگی مواد DP590

RO (Mass Density)	7850e-6 kg/mm <sup>3</sup>
E (Young's modulus)	206 kN/mm <sup>2</sup>
PR (Poisson's ratio)	0/3
SIGY (Yield stress)	0/4 Gpa
Fail (Failure flag)	0/4
C (Strain rate parameter)	8 ms <sup>-1</sup>
P (Strain rate parameter)	8 ms <sup>-1</sup>

پس از تعیین خواص مواد قطعات، ضخامت هر کدام از قطعات تعیین می‌شود. به منظور تعیین ضخامت قطعات مختلف، اندازه ضخامت‌ها از روی نمونه اصلی وسیله نقلیه اندازه‌گیری شده است. ضخامت قطعات از ۱ میلی‌متر تا ۴/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

با توجه به استاندارد AEP55، انفجار در دو فاز متفاوت انجام خواهد شد. انفجار در زیر خودرو و انفجار در نزدیکی خودرو. به منظور شبیه‌سازی هر دو انفجار از قسمت Load در نرم‌افزار LS-DYNA، روش Blast\_Enhanced استفاده می‌شود که در حجم معادل دینامیت برای ماده منفجره مشخص شده و سپس مرکز انفجار تعیین می‌شود. روش مورد استفاده در این قسمت از نوع محاسبه تجربی بار فشاری است که از نتایج داده‌های تجربی به دست آمده است که شبیه روش کانوپ است. [۱۹] در این روش انفجار با انبساط جرم ماده منفجره با نرخ سرعت انفجار چاپمن-ژوگت<sup>۱</sup> به صورت موج در فضا گسترده شده و بر روی تمام قطعاتی که تحت تأثیر انفجار تعیین شده هستند، تأثیر می‌گذارد. در انفجار در زیر خودرو، حجم معادل دینامیت برای انفجار در سند محرمانه تعیین شده است که در دسترس عموم نیست. با توجه به اینکه مین‌های ضدتانک معادل ۴، ۶ و ۸ کیلو دینامیت هستند، در این پروژه نیز از معادل ۴ کیلو دینامیت استفاده شده است. با توجه به این نکته که در استاندارد ذکر شده که مواد منفجره در بدترین وضعیت باید قرار بگیرد. مرکز مواد منفجره در نزدیکی صندلی راننده در نظر گرفته شده است و با کف کابین حدود ۱۱۵۰ میلی‌متر فاصله دارد.

در حالت انفجار در جانب و نزدیکی خودرو، مطابق با استاندارد ۸ کیلو دینامیت مورد استفاده قرار می‌گیرد که باید در بدترین وضعیت در نزدیکی خودرو قرار گیرد و کل جانب

۳. تاب برداشتنگی: تاب برداشتنگی 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 برداشتنگی 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.

#### ۲-۴- شبیه‌سازی آزمون انفجار

اولین گام برای تحلیل با استفاده از نرم‌افزار ال اس داین، وارد نمودن فایل المان‌بندی شده است. تمام قطعات را می‌توان به صورت یک فایل از هاپیرمش به داخل ال اس داین وارد نمود و یا قطعات را به صورت جداگانه وارد این نرم‌افزار کرد. پس از وارد نمودن تمام قطعات، اتصال بین قطعات در این نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود. مطابق با اکثر خودروهای هم‌کلاس در این خودرو نیز فاصله بین نقاط جوش به صورت متوسط ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی نقاط جوش از دستور Spotweld استفاده شده است. در گام بعدی اقدام به تعریف مواد برای قطعات مختلف می‌شود. در این پروژه 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 قطعات کفی اتاق از ماده DP590 استفاده شده است. ویژگی‌های مواد تعریف شده برای DC04 مطابق جدول ۲ است و برای DP590 مطابق جدول ۳ است.

جدول ۲- ویژگی مواد DC04

RO (Mass Density)	7860e-6 kg/mm <sup>3</sup>
E (Young's modulus)	210 kN/mm <sup>2</sup>
PR (Poisson's ratio)	0/3
SIGY (Yield stress)	0/283 Gpa
Fail (Failure flag)	0/4
C (Strain rate parameter)	390 ms <sup>-1</sup>
P (Strain rate parameter)	4/19 ms <sup>-1</sup>

<sup>۱</sup> Chapman-Jouguet

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. روش تاگوچی برای بهینه‌سازی‌های تک متغیره و دومتغیره قابل استفاده است. روش تاگوچی در ابتدا برای بهینه‌سازی در تحقیقات تجربی به کار گرفته شد، اما پس از آن در بسیاری از مسائل مهندسی از این روش استفاده شد. این روش از آرایه‌های استاندارد متعامد برای تنظیم ماتریس تعداد آزمایش‌ها بر اساس تعداد متغیرها و سطح تغییر آن‌ها استفاده می‌شود. در این روش با انجام حداقل آزمایش بیشترین اطلاعات به دست خواهد آمد. برای بررسی داده‌ها در این روش، از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. در این روش، سه حال امکان دارد که عبارتند از:

۱- مقدار کمتر بهتر است. (LB)

۲- مقدار بیشتر بهتر است (HB)

۳- مقادیر نامی بهتر است. (NB) [۲۱]

در این مقاله با توجه به اینکه هدف بهینه‌سازی، وزن خودرو است، مقدار کمتر بهتر است. قید بهینه‌سازی نیز حفظ جان سرنشین مطابق با معیارهای ارائه شده در استاندارد AEP-55 است. متغیر بهینه‌سازی نیز در این مسئله ضخامت قطعات با بیشترین تأثیر در انفجار در زیر و جانب کامیون هستند. به همین دلیل ابتدا ۵ قطعه با بیشترین تأثیر در آزمون‌های انفجار در نزدیکی خودرو مشخص می‌شوند که عبارت‌اند از:

۱- کفی جانبی

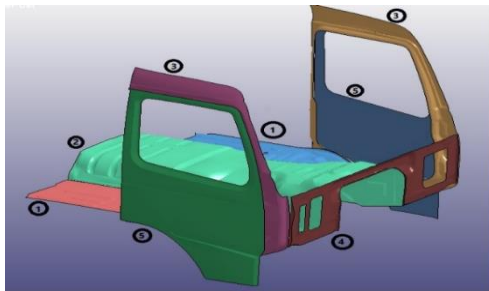
۲- کفی میانی

۳- دیواره جانبی (قاب اطراف در)

۴- دیواره جلویی

۵- درب خودرو

این قطعات در شکل ۷ قابل مشاهده است:



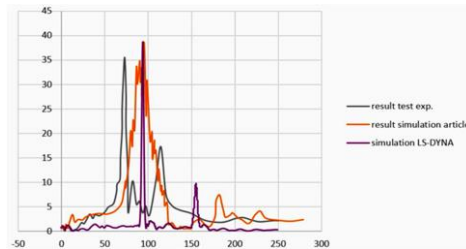
شکل ۷- قطعات منتخب برای بهینه‌سازی

خودرو تحت تأثیر موج انفجار باشد. از این‌رو مواد منفجره به موازات به H-Point آدمک در فاصله حدودی ۳ متری نسبت به جانب خودرو و تقریباً هم‌سطح با کف کابین خودرو قرار دارد. لازم به ذکر است به منظور بررسی حساسیت المان‌ها شبیه‌سازی آزمون انفجار در زیر خودرو با المان‌های با اندازه ۵، و ۱۲ انجام شد که میزان اختلاف نتایج در این حالات نسبت به حالت اولیه کمتر از ۴ درصد بوده است.

### ۲-۴-۱- مدل شبیه‌سازی شده آدمک مصنوعی Hybrid

#### III

در این مقاله از آدمک مدل Hybrid III نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی آدمک، مطابق با مدل آدمک مقاله طبیعی و همکاران [۲۰] شبیه‌سازی انجام شده است. برای این کار ابتدا آدمک روی صندلی مطابق با مقاله قرار گرفته است. پس از یکسان نمودن شرایط آدمک با نمونه‌ی موجود در مقاله به تعریف شتاب گفته شده در این پژوهش برای آدمک مصنوعی پرداخته شده است. نتایج مقایسه آدمک مصنوعی با مدل موجود در مقاله انجام شده است که در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۶- مقایسه نمودارهای مدل آدمک مصنوعی با مقاله و نمونه آزمایشی (شتاب (g)/ زمان (ms))

با توجه به نتایج نشان داده شده در بالا، این آدمک با مدل مقاله طبیعی و همکاران [۲۰] مطابقت دارد. از این‌رو این آدمک قابلیت استفاده در این پژوهش را دارد.

### ۲-۵- بهینه‌سازی

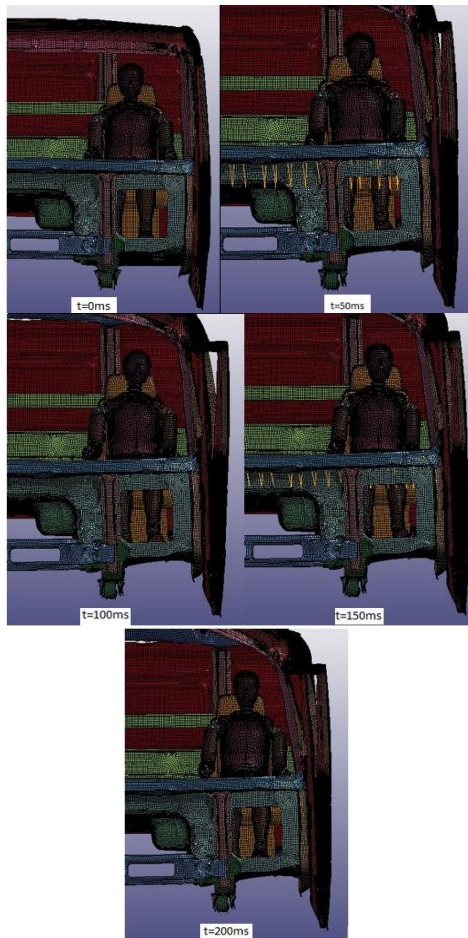
در این مقاله برای بهینه‌سازی از روش تاگوچی استفاده می‌شود. الگوریتم تاگوچی بهینه‌سازی به روش گسسته است که بر مبنای طراحی کیفیت محصول است. این روش با استفاده از آرایه‌های متعامد تعداد آزمایش‌ها را بسیار کاهش داده است. زمانی که ژاپن پس از جنگ جهانی دوم کار بازسازی خود را



بهینه‌سازی ارائه می‌شود و در پایان بهینه‌ترین حالت تعیین می‌شود.

### ۳-۱- آزمون انفجار در زیر خودرو

این آزمون با هدف بررسی مقاومت وسیله نقلیه در برابر مین‌ها و یا مواد منفجره پنهان‌شده در زمین است. با توجه به این نکته که استفاده از مین‌های ضدتانک در مناطق جنگی بسیار متداول است، حفظ جان سرنشینان وسایل نقلیه در هنگام انفجار این مواد منفجره بسیار حائز اهمیت است. در بررسی‌های انفجار معیارها با استاندارد مقایسه می‌شود و در ادامه به بررسی این مقادیر پرداخته خواهد شد. آزمون انفجار در زیر خودرو در زمان‌های مختلف در شکل ۸ ارائه شده است و نیروی وارد به ساق پای آدمک در شکل ۹ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که سازه اتاق خودرو اولیه ۵۷۴/۷۰ کیلوگرم است.



شکل ۸- انفجار در زیر خودرو

با استفاده از روابط تاگوچی و با ۴ سطح مختلف ضخامت قطعات، ۱۶ حالت مختلف مطابق جدول ۴ بررسی می‌شود:

جدول ۴- حالت‌های مختلف بهینه‌سازی (تمامی اعداد بر حسب میلی‌متر است).

ردیف	کفی جانبی	کفی میانی	دیواره جانبی	دیواره جلویی	درب خودرو
۱	۴/۵	۴/۵	۱/۵	۲/۵	۲/۵
۲	۴/۵	۳	۱	۲	۲
۳	۴/۵	۲/۵	۰/۷	۱/۵	۱/۵
۴	۴/۵	۲	۲	۳	۳
۵	۳	۴/۵	۱	۱/۵	۳
۶	۳	۳	۱/۵	۳	۱/۵
۷	۳	۲/۵	۲	۲/۵	۲
۸	۳	۲	۰/۷	۲	۲/۵
۹	۲/۵	۴/۵	۰/۷	۳	۲
۱۰	۲/۵	۲/۵	۲	۱/۵	۲/۵
۱۱	۲/۵	۲/۵	۱/۵	۲	۳
۱۲	۲/۵	۲	۱	۲/۵	۱/۵
۱۳	۲	۴/۵	۲	۲	۱/۵
۱۴	۲	۳	۰/۷	۲/۵	۳
۱۵	۲	۲/۵	۱	۳	۲/۵
۱۶	۲	۲	۱/۵	۱/۵	۲

هریک از حالت‌های جدول ۴ مجدداً شبیه‌سازی می‌شود و بهینه‌ترین حالت استخراج می‌شود.

### ۳- نتایج

در این بخش ابتدا نتایج شبیه‌سازی انفجار در زیر خودرو و تغییرات لازم برای برآورده شدن الزامات آزمون انفجار در زیر خودرو، سپس نتایج انفجار در جانب خودرو ارائه می‌شود. پس از اطمینان از برآورده شدن الزامات استاندارد AEP-55، نتایج



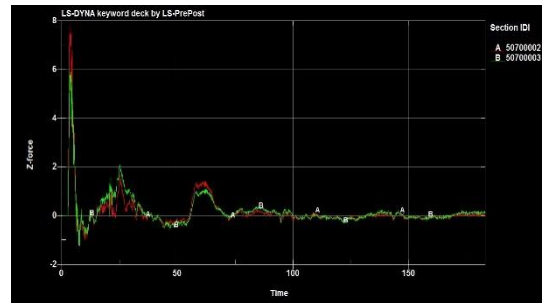
شکل ۱۰- انفجار در زیر کامیون بهبود یافته

با تغییرات اعمال شده در کفی خودرو، انتقال نیرو از کفی خودرو به پای سرنشین بسیار کاهش یافته است و در محدوده مجاز استاندارد AEP-55 قرار گرفته است؛ در نتیجه تمام معیارهای استاندارد AEP-55 برای خودرو ارتقا یافته برآورده شده است.

لازم به ذکر است که در تمام مراحل این مقاله نویسندگان آمادگی لازم برای انجام تست‌های تجربی را داشتند که با توجه به هزینه بالای انجام این آزمون‌ها از این موضوع صرف‌نظر شده است. از اینرو با مقایسه نتایج حاصل از انفجار این کامیون از جمله میزان نیروی وارد به کفی خودرو، شیوه حرکت کفی به داخل اتاق و آسیب وارد به پای سرنشین با نتایج ذکر شده در مقالات ارائه شده در مطالعات پیشین از جمله مقاله ونگ و همکاران [۱۰] در هر دو مقاله مشابه بوده است.

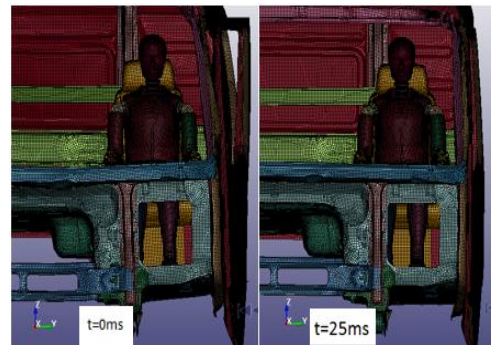
### ۳-۲- آزمون انفجار در جانب خودرو

آزمون انفجار در جانب خودرو با هدف بررسی میزان آسیب وارد به سرنشین در هنگام انفجار مواد منفجره و خمپاره‌ها در نزدیکی خودرو طراحی شده است. لازم به ذکر است که در این انفجار، از شبیه‌سازی شیشه و موج انتقالی توسط آن، صرف‌نظر شده است. در شکل ۱۱ شبیه‌سازی انفجار در جانب خودرو و در شکل ۱۲ آسیب به سر سرنشین نشان داده شده است.



شکل ۹- نیروی وارد به ساق پا (کیلو نیوتن- میلی ثانیه)

میزان نیروی مجاز برای ساق پا ۵/۴ کیلو نیوتن است در صورتی که در این آزمون این میزان به نزدیک ۸ کیلو نیوتن می‌رسد. از این‌رو در انفجار در زیر این خودرو، ساق پای سرنشین آسیب جدی می‌بیند و خودرو این استاندارد را برآورده نساخته است. به همین دلیل در گام بعدی اقدام به بهبود خودرو مطابق با استاندارد AEP-55 شده است. با بررسی‌های انجام‌شده، کفی خودرو بیشترین تأثیر را در آسیب وارد به سرنشین در انفجار در زیر خودرو دارد. به همین دلیل و به منظور بهبود این کامیون، جنس کفی خودرو از DC04 به DP590 تغییر یافته که به مراتب از استحکام بالاتری برخوردار است؛ همچنین ضخامت این صفحات به بالاترین ضخامت بکار رفته در این خودرو یعنی ۴/۵ میلی‌متر تغییر یافته است. در ادامه نتایج آزمون خودرو بهبود یافته در شکل ۱۰ ارائه شده است.

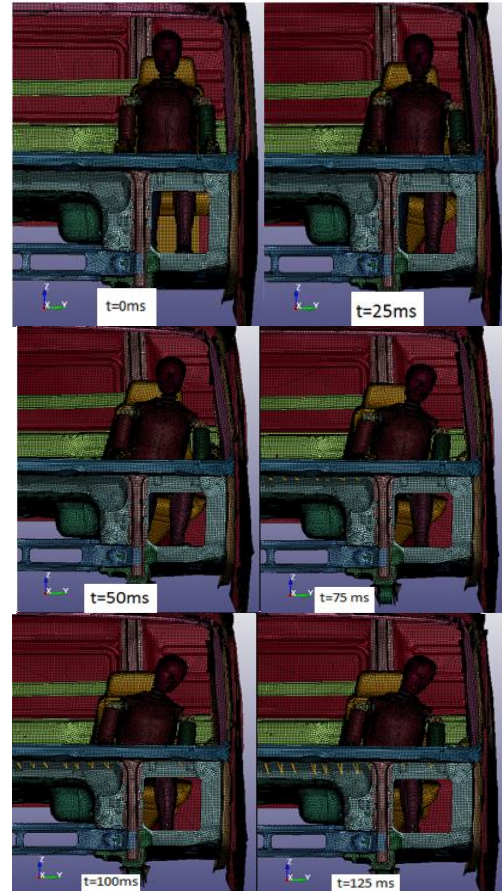


### ۳-۳- نتایج بهینه‌سازی

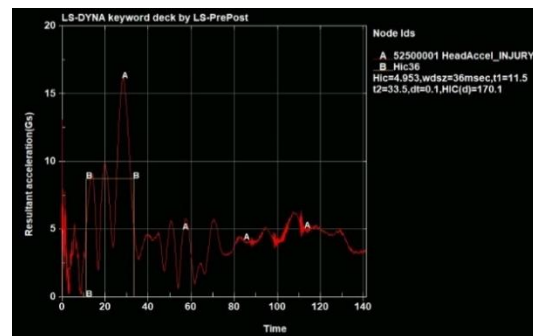
به منظور دستیابی به بهینه‌ترین ضخامت قطعات با بیشترین تأثیر در آزمون انفجار زیر و جانب خودرو، مطابق با جدول ۲ آزمون‌های انفجار شبیه‌سازی می‌شود. این خودرو در برابر انفجار در زیر خودرو نسبت به انفجار در جانب خودرو آسیب‌پذیرتر است. از این رو در گام نخست اقدام به بررسی نتایج هریک از حالت‌های بهینه‌سازی با شرایط انفجار در زیر خودرو می‌شود و بهینه‌ترین حالت مطابق با این آزمون انتخاب شده و سپس تحت شرایط آزمون انفجار در جانب خودرو قرار می‌گیرد. در صورتی که بتواند الزامات انفجار در جانب خودرو را نیز برآورده سازد به‌عنوان حالت بهینه خودرو تحت تأثیر انفجار شناخته می‌شود. نتایج حالات مختلف بهینه‌سازی تحت تأثیر انفجار در زیر خودرو در جدول ۵ ارائه شده است.

### جدول ۵- نتایج حالات مختلف بهینه‌سازی به روش تاگوچی

حالت	وزن سازه + صندلی‌ها+ درها (کیلوگرم)	معیار آسیب به سر سرنشین	نیروی وارد به ساق پا سرنشین (کیلو نیوتن)	آزمون انفجار در زیر خودرو
۱	۶۵۱/۱۱	۱۶۹/۷	۰/۸۵	مورد پذیرش
۲	۵۸۹/۵۸	۱۷۵/۳	۱/۴۸	مورد پذیرش
۳	۵۷۲/۲۹	۱۸۲/۹	۱/۲۲	مورد پذیرش
۴	۶۰۸/۹۷	۱۷۵	۱/۰۳	مورد پذیرش
۵	۶۱۶/۹۴	۱۷۲/۶	۲/۵۸	مورد پذیرش
۶	۵۷۱/۳۹	۱۷۴/۴	۱/۳۶	مورد پذیرش
۷	۵۷۱/۴۸	۱۷۳/۱	۱/۴۲	مورد پذیرش
۸	۵۴۸/۲۷	-	-	به دلیل آسیب شدید به ساق پا مورد پذیرش نیست.
۹	۵۹۴/۲۶	۱۸۲/۴	۶/۶۱	نیروی وارد به ساق پای سرنشین بیش از حد مجاز است.



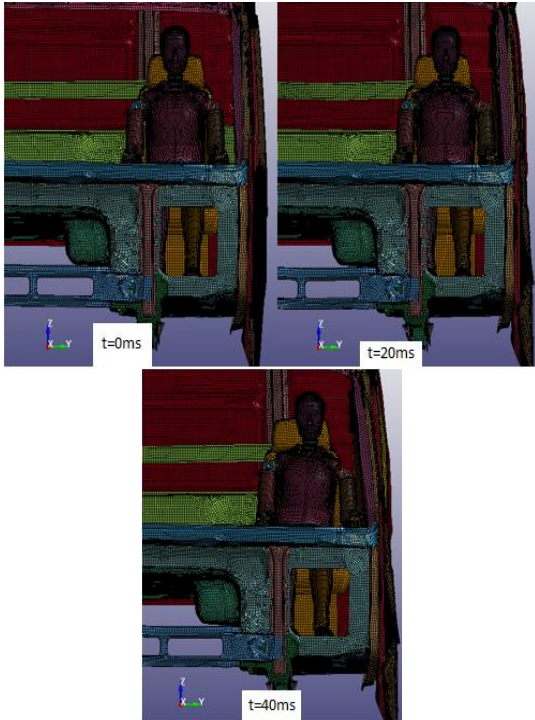
شکل ۱۱- آزمون انفجار در جانب خودرو



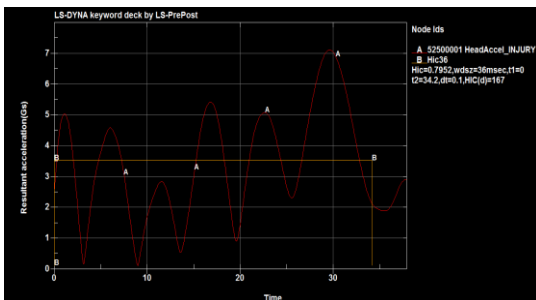
شکل ۱۲- آسیب به سر در اثر انفجار در جانب خودرو

این خودرو الزامات انفجار در جانب خودرو را برآورده می‌سازد. از این رو خودرو بهبود یافته تمام الزامات استاندارد AEP-55 را برآورده ساخته است، اما در بهینه‌ترین حالت نیست.

بر اساس نتایج جدول ۳ تنها ۷ حالت از حالات فوق الزامات آزمون انفجار در زیر خودرو را برآورده ساختند و از این میان، آزمون حالت ۶، بهینه‌ترین حالت است. آزمون انفجار در جانب خودرو این حالت انجام شده است که تصاویر آن مطابق شکل ۱۳ و نمودار معیار آسیب به سر سرنشین در این حالت در شکل ۱۴ آورده شده است.



شکل ۱۳- آزمون انفجار جانب خودرو حالت ۶



شکل ۱۴- نمودار آسیب به سر سرنشین در انفجار جانب خودرو حالت ۶

مطابق با نمودارهای بالا، حالت ۶ الزامات انفجار در جانب و نزدیکی خودرو را برآورده می‌کند و هیچ‌یک از معیارهای

حالت	وزن سازه + صندلی‌ها+ درها (کیلوگرم)	معیار آسیب به سر سرنشین	نیروی وارد به ساق پا سرنشین (کیلو نیوتن)	توضیحات
۱۰	۵۷۶/۰۳	۱۸۲/۶	۷/۱۰	نیروی وارد به ساق پای سرنشین بیش از حد مجاز است.
۱۱	۵۶۸/۳۶	۱۸۴/۶	۶/۶۶	نیروی وارد به ساق پای سرنشین بیش از حد مجاز است.
۱۲	۵۲۸/۵۱	-	۶/۷۸	شتاب وارد به ساق دست آدمک بسیار بالا است و همچنین نیروی وارد به ساق پای سرنشین بیش از حد مجاز است.
۱۳	۵۸۷/۷۷	۱۸۹/۵	۱۳/۸۴	نیروی وارد به ساق پای سرنشین بیش از حد مجاز است.
۱۴	۵۶۲/۲۳	-	۱۶/۰۰	آسیب وارد به ساق پا و نیروی وارد به ساق پای سرنشین بیش از حد مجاز است.
۱۵	۵۴۸/۷۶	۱۹۳/۹	۱۵/۴۳	نیروی وارد به ساق پای سرنشین بیش از حد مجاز است.
۱۶	۵۲۷/۶۵	۱۹۸/۲	۱۴/۳۷	نیروی وارد به ساق پای سرنشین بیش از حد مجاز است.

## مراجع

- [۱] یوسفی ع، خلخالی ا، مهدوی ع (۱۴۰۰). شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی استحکام اتاق کامیون. سازه‌ها و شماره‌ها. ۱۱(۴): ۳۱-۱۵
- [2] Suhaimi K, Risby MS, Tan KS, Knight VF. (2016) Simulation on the shock response of vehicle occupant subjected to underbelly blast loading. *Procedia - Procedia Comput Sci.*;80:1223-31.
- [3] Vlahopoulos N, Zhang G. (2010) Validation of a Simulation Process for Assessing the Response of a Vehicle and Its Occupants To an Explosive Threat. *27th Army Sci Conf.*;8.
- [4] Dooge D, Dwarampudi R, Schaffner G, Miller A. (2011) Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium a ugust 9-11 D Earborn , M Ichigan Evolution of Occupant Survivability Simulation Framework Using Fem-Sph Coupling Evolution of Occupant Survivability Simulation;
- [5] Arepally S, Gorsich D, Hope K, Gentner S, Drotleff K. (2008) Application of Mathematical Modeling in Potentially Survivable Blast Threats in Military Vehicles. *Proc 26th Army Sci Conf.*;1-8.
- [6] Bir C, Barbir A, Dosquet F, Wilhelm M. (2008) Validation of Lower Limb Surrogates as Injury Assessment Tools in Floor Impacts due to Anti-Vehicular Land Mines.;173:1180-4.
- [7] Bailey AM, Christopher JJ, Henderson K, Brozowski F, Salzar RS.(2013) Comparison of Hybrid-III and PMHS Response to Simulated Underbody Blast Loading Conditions.;7288:158-70.
- [8] Erdik A. (2019) Investigation of dynamic response of a mannequin in a vehicle exposed to land mine blast. *Sak Univ J Sci.*;23:1-10.
- [9] Denefeld V, Heider N, Holzwarth A, Sättler A, Salk M. (2014) Reduction of global effects on vehicles after IED detonations. *Def Technol.*;10(2):219-25.
- [10] Xiang Y, Wang Q, Fan Z, Fang H. (2006) Optimal crashworthiness design of a spot-welded thin-walled hat section. *Finite Elem Anal Des.* 1;42(10):846-55.
- [۱۱] زاهدی‌نیا م، حسینی ر، خداحمی ح. (۱۳۹۷) مطالعه تجربی و عددی تغییر شکل صفحات چندلایه کامپوزیت-فلز (FML) با ضخامت‌های یکسان تحت بارگذاری انفجاری. مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها. ۸(۴):۱۲۹-۴۲ .
- [12] Pandelani T, Modungwa D. (2022) The response of Military Lower Extremity and Hybrid III leg using the Hybrid III and EuroSID-2 ATD in vertical loading impacts. *Traffic Inj Prev.*10;
- [13] Husni Mubarak MA, Muttaqie T, Prabowo AR, Sohn JM, Surojo E, Imaduddin F. (2022) Effects of Geometrical Variations on the Performance of Hull Plate Structures under Blast Load: A Study using Nonlinear FEA. *Procedia Struct Integr.*;41:282-9.
- سنجش آسیب به سرنشین در طول این آزمون بالاتر از حد مجاز نیست. به عبارت دیگر سرنشین در دو آزمون انفجار در زیر و جانب خودرو دچار آسیب شدید نشده و می‌تواند به زندگی خود ادامه دهد. در این آزمون معیار آسیب به سر سرنشین ۱۶۷ است. لازم به ذکر است که وزن خودرو در این حالت نسبت به حالت بهبودیافته خودرو (حالت اول قابل قبول استاندارد AEP-55)، ۷۹/۷۲ کیلوگرم سبک‌تر شده و وزن نمونه بهینه‌شده ۵۷۱/۳۹ است که نسبت به خودرو اولیه (بدون توجه به استاندارد AEP-55) ۳/۳۱ کیلوگرم سبک‌تر است.
- #### ۴- نتیجه‌گیری
- در گام اول این مقاله یک کامیون بر اساس نمونه واقعی و با استفاده از اسکن سه‌بعدی، در نرم‌افزار کتیا شبیه‌سازی شد. سپس خودروی مدنظر در نرم‌افزار Hyper-mesh، المان‌بندی شد. در گام بعدی، شبیه‌سازی آزمون‌های انفجار در زیر و جانب این کامیون انجام شد. برای این آزمون مطابق با نمونه واقعی خودرو از فولاد DC04 استفاده شد و قطعات دارای ضخامت ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۴/۵ میلی‌متر هستند. این خودرو در حالت اولیه قادر به برآورده ساختن الزامات انفجار در زیر و جانب خودرو نیست. لذا اقدام به بهبود خودرو با تغییر مواد و ضخامت کفی خودرو شد. در خودرو بهبودیافته جنس کفی به DP590 با ضخامت ۴/۵ میلی‌متر تغییر یافت. خودرو بهبود یافته تمام الزامات انفجار در زیر و جانب خودرو را برآورده ساخته است. سپس قطعات با بیشترین تأثیر در این شبیه‌سازی‌ها شناسایی شدند. این قطعات عبارت‌اند از: ۱- کفی جانبی ۲- کفی میانی ۳- دیواره جانبی (قاب اطراف در) ۴- دیواره جلویی ۵- درب خودرو. ضخامت این قطعات به‌عنوان متغیر بهینه‌سازی انتخاب شد و برای هرکدام چهار حالت در نظر گرفته شد و با استفاده از روش تاگوچی بر روی آن‌ها بهینه‌سازی انجام شد. از بین ۱۶ حالت بهینه‌سازی تنها ۷ حالت شرایط استاندارد انفجار AEP-55 را برآورده می‌ساختند که از این بین بهینه‌ترین حالت، حالت ۶ بود که وزن آن ۵۷۱/۳۹ کیلوگرم است. وزن این حالت نسبت به حالت اولیه ۳/۳۱ کیلوگرم بیشتر است و نسبت به اولین حالتی که الزامات استاندارد AEP-55 را برآورده سازد ۷۹/۷۲ کاهش یافته است.



- [۱۸] موسی‌زاده ا. (۱۳۹۹) بهینه‌سازی سفتی فریم موتورسیکلت برقی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت.
- [19] Tabiei a, Lawrence C, Fasanella EL. (2009) Validation of Finite Element Crash Test Dummy Models of the Prediction of Orion Crew Member Injuries during a Simulated Vehicle Landing. 10th LS-DYNA users Conf.;(5):1-28.
- [۲۰] خاکي جامعی م (۲۰۱۷). بررسی عددی تأثیر نانوسیال بر راندمان چاه حرارتی میکرو کانالی با استفاده از روش تاگوچی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها; (۱)۷:۲۷۵-۸۷.
- [14] Ciepiewski R, Gieleta R, Miedzinska D (2022). Experimental Study on Static and Dynamic Response of Aluminum Honeycomb Sandwich Structures;
- [15] Lim J, Jang YS, Chang HS, Park JC, Lee J. (2018) Role of multi-response principal component analysis in reliability-based robust design optimization: an application to commercial vehicle design. Struct Multidiscip Optim; 58(2):785-96.
- [16] (NSA) NSA. PROCEDURES FOR EVALUATING THE PROTECTION LEVEL OF ARMoured VEHICLES - IED THREAT.
- [۱۷] افشار م (۱۳۹۹). شبیه‌سازی و بهینه‌سازی لوله‌های برخورد جانبی کامپوزیتی در خودرو. پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی خودرو گرایش سازه و بدنه خودرو.