

معرفی مدل اجزای محدود آدمک ترکیبی III ۵۰ درصد و اعتبارسنجی عددی و تجربی مطابق با استاندارد ECER16

مرضیه فلاحي

دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
fallahi.mechanic@gmail.com

ابوالفضل خلخالی*

دانشیار، گروه مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، ab_khalkhali@iust.ac.ir

چکیده

امروزه در شبیه‌سازی کامپیوتری، به‌عنوان یک ابزار استاندارد در جهت ارتقای ایمنی خودرو، در جهت پیش‌بینی پاسخ بدن و میزان آسیب به اجزای مختلف باید از مدل‌های آدمک اجزای محدود استفاده نمود. از سوی دیگر با توجه به گران‌قیمت بودن تجهیزات و آدمک‌های آزمون، اهمیت شبیه‌سازی بیشتر نمود پیدا می‌کند؛ بنابراین در این مقاله به اهمیت موضوع، ابتدا به معرفی مدل آدمک ترکیبی III ۵۰ درصد به‌عنوان یکی از پرکاربردترین آدمک تصادف پرداخته‌شده و پس از بررسی اجزای بدن آدمک از منظر اتصالات، جنس و ... به تکمیل مدل پرداخته‌شده است. سپس به اعتبارسنجی عددی و تجربی مدل با پژوهش‌های مختلف پرداخته‌شده است. نتایج اعتبارسنجی‌ها تطابقت قابل قبولی را در حرکت سینماتیک کل بدن، شتاب سر، قفسه سینه و لگن و تغییر شکل قفسه سینه نشان می‌دهد. همچنین تفاوت‌های جزئی از لحاظ زمان رسیدن به شتاب بیشینه در لگن و قفسه سینه مشاهده شد که یکی از دلایل این تأخیر زمانی را می‌توان فقدان اطلاعات کافی در مدل کمر بند ایمنی دانست. درنهایت به دلیل تأیید اعتبارسنجی می‌توان از مدل آدمک پژوهش حاضر در شبیه‌سازی‌های پیش رو استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، آدمک ترکیبی III ۵۰ درصد، مدل‌سازی کمر بند ایمنی، آزمون تصادف، تغییر شکل قفسه سینه، اعتبارسنجی.

Introducing the 50% hybrid dummy FE model and numerical and experimental validation according to the ECER16 standard

M. Fallahi School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

A. Khalkhali School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

In today's computer simulations, the use of Finite Element (FE) models of crash test dummies has become a standard tool for enhancing vehicle safety by predicting the body's response and the extent of injury to various components. Given the high cost of testing equipment and dummies, the importance of simulation is further emphasized. This article introduces the Hybrid III 50th percentile dummy, one of the most widely used crash test dummies, and examines its body components in terms of connections, materials, and more to enhance the model. It also discusses the numerical and experimental validation of the model through various studies. The validation results show a satisfactory correlation in the overall kinematic motion of the body, head acceleration, chest and pelvis acceleration, and chest deformation. Minor differences were observed in the time to reach maximum acceleration in the pelvis and chest, which may be attributed to insufficient information in the seatbelt model. Ultimately, due to the validation confirmation, the dummy model from this research can be utilized in future simulations.

Keywords: Simulation, Hybrid III 50% dummy, Seat belt modeling, Crash test, Chest deformation, Validation.

۱- مقدمه

همان‌طور که صنعت خودرو در حال توسعه است، تعداد کشته‌ها و جراحات نیز افزایش یافته است. برای کاهش خسارات ناشی از تصادفات اتومبیل، اداره ملی ایمنی ترافیک بزرگراه (NHTSA) یک شرایط آزمایشی را برای بازتولید یک تصادف پیشنهاد کرد و مقررات ایمنی خودرو مانند استانداردهای ایمنی خودروی فدرال (FMVSS) را وضع کرد. به‌منظور انجام این آزمون‌ها، دستگاه‌های آزمون شبه انسان (ATD) برای پیش‌بینی خطرات آسیب یک انسان در آزمایش تصادف استفاده می‌شوند [۱]. سازندگان خودرو می‌توانند با رعایت مقررات ایمنی خودرو، خودرو ایمن‌تری برای کاهش صدمات ناشی از تصادف بسازند. آدمک آزمون تصادف ترکیبی III یک استاندارد است که برای اندازه‌گیری ایمنی سرنشینان در آزمون برخورد از جلو استفاده

می‌شود. در سال ۱۹۸۵، NHTSA آدمک تصادف ترکیبی III را به‌عنوان یک آدمک آزمایشی استاندارد برای آزمون انطباق FMVSS 208 گنجانید. آدمک مرد ۵۰ درصد ترکیبی III برای آزمون ضربه از جلو استفاده می‌شود و نشان‌دهنده میانگین مرد بالغ است و پرکاربردترین آدمک است [۲]. از آن زمان، آدمک‌هایی در اندازه‌های مختلف ساخته‌شده و برای اندازه‌گیری صدمات ناشی از تصادفات بر اساس جنسیت و سن استفاده می‌شود [۳].

از سوی دیگر انجام آزمون تصادف واقعی با استفاده از خودرو بسیار گران است و تکرار آزمون بسیار دشوار است؛ بنابراین، شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور خاص، FEM برای طراحی یک خودرو برای بهبود ایمنی خودرو و کاهش هزینه آزمون خودرو استفاده

* نویسندگان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ab_khalkhali@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰



شکل ۱- مدل کامل اجزای محدود آدامک ترکیبی III ۵۰ درصد [۶]

در مدل اجزای محدود قطعات فلزی غیرقابل تغییر شکل، عمدتاً اسکلت آدامک، به عنوان مواد الاستیک، نوع ۱ در نرم افزار LS-Dyna مدل سازی شده اند. ماده نوع ۱ در واقع یک ماده هایپوالاستیک ایزوتروپیک است که می توان از این مواد برای تعریف جنس المان های پوسته و جامد استفاده نمود. از مواد با رفتار ویسکوالاستیک نوع ۶ برای مدل سازی پوست پلی وینیل استفاده می شود که چهار پارامتر برای نوع مواد ویسکوالاستیک وجود دارد: مدول حجیم الاستیک (K)، مدول برش اولیه (G0)، مدول برش نامحدود (G0) و ثابت فروپاشی (B). مقادیری به این پارامترها با استفاده از نتایج آزمون فیزیکی انجام شده است. از جنس نوع ۷ (Blatz-ko_rubber) برای مدل سازی برخی از لاستیک ها استفاده می شود و اجزاء و مواد از نوع ۶۲ (فوم چسبناک) برای مدل سازی اجزای فوم استفاده می شود. ابزار دقیق آدامک استاندارد (شتاب سنج ها، لودسل ها، پتانسیومتر) در مدل گنجانده شد و طبق استاندارد SAE J211 تنظیم شدند. خواص جرم و اینرسی برای هر یک از مجموعه ها محاسبه و با داده های منتشر شده مقایسه شده است [۷].

مجموعه گردن از قطعه اتصال سر به گردن، چهار دیسک لاستیکی قالب گیری شده بین ۵ دیسک فلزی، کابل فولادی در مرکز، شبیه ساز پیش بند قفسه سینه و یک قطعه ی مرتبط با گردن بالایی برای پایه ستون فقرات تشکیل شده است. دیسک های لاستیکی دارای یک شکاف افقی با عمق جزئی در سمت قدامی هستند تا پاسخ سفتی کمتری را در کشش گردن نسبت به خمش شبیه سازی کنند. هر کدام از این شکاف ها عمق های متفاوتی به دلیل شبیه سازی پاسخ گردن انسان را دارا هستند. جهت تعریف ماده در قسمت عضلات گردن از ماده ویسکوالاستیک و در قسمت دیسک گردن از تعریف مواد الاستیک استفاده شده است.

مجموعه قفسه سینه از ژاکت سینه، مجموعه پیشانی، دنده ها، ترقوه ها و ستون فقرات قفسه سینه تشکیل شده است. اکثر اجزاء در صورت امکان، به عنوان المان های جامد برای اطمینان از توزیع دقیق جرم و اینرسی مدل سازی می شوند. ژاکت سینه با یک لایه کاملاً یکپارچه از المان های جامد مدل سازی شده است. دنده های فولادی با سه لایه از المان های پوسته در عرض آن ها مدل سازی شدند تا رفتار خمشی واقعی را به تصویر بکشند. مواد میرایی متصل به دنده ها به عنوان المان های جامد مدل سازی می شوند. اجزای منفرد با استفاده از اتصالات، جوش های نقطه ای و بدنه های سخت گرمای محدود مانند آدامک فیزیکی به یکدیگر متصل شدند. شتاب سنج سه محوری مدل

می شود. در گذشته، به دلیل محدودیت منابع محاسباتی، از یک مدل آدامک صلب عمدتاً برای اندازه گیری ایمنی سرنشین به جای آدامک المان محدود (FE) در تحلیل تصادف استفاده می شد [۴].

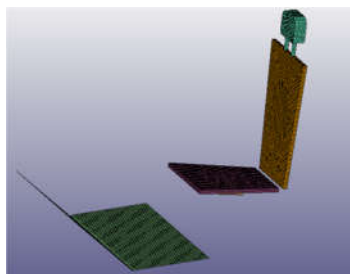
با این حال، برای بهبود عملکرد محاسباتی، یک مدل آدامک اجزای محدود دقیق و قوی برای داده ها و رفتار دقیق تر آسیب سرنشین مورد نیاز است، زیرا یک مدل آدامک صلب نمی تواند رفتار بدنه را به خوبی در هنگام تصادف نشان دهد. از این رو مراکز تجزیه و تحلیل تصادف به صورت مداوم در حال توسعه ی مدل دقیق اجزای محدود از آدامک های آزمون تصادف برای دامنه عمومی است. با این وجود در کشور ایران به دلیل تحریم ها و قیمت بسیار گران این مدل های آدامک تاکنون موفق به به کارگیری مدل آدامک اجزای محدود در مسائل مختلف صنعتی نشده اند، بنابراین با توجه به عدم امکان انجام آزمون برخورد در سطح خودرو و عدم به کارگیری گسترده از مدل آدامک اجزای محدود در کشور ضروری است خودروسازان از آدامک های اجزای محدود و مدل سازی اجزای محدود جهت بررسی خودروهای طراحی شده استفاده نمایند؛ بنابراین در این پژوهش نیز به معرفی مدل آدامک و سپس اعتبارسنجی و مدل سازی در سطح آزمون ارا به مطابق استاندارد ECER16 پرداخته شده است تا با اطمینان از آن، بتوان از این مدل در صنعت خودروسازی استفاده نمود.

۲- مبانی و روش ها

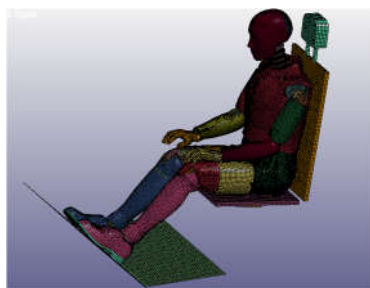
۲-۱- معرفی مدل اجزای محدود آدامک ترکیبی III

مدل اجزای محدود از آدامک با استفاده از روش مهندسی معکوس توسعه داده شد. اسکن های سه بعدی برای هر یک از اجزای آدامک با استفاده از بازوی اسکن لیزری ساخته شد. یک ماشین اندازه گیری مختصات (CMM) در صورت نیاز برای به دست آوردن هندسه دقیق برای قطعاتی که با استفاده از بازوی اسکن لیزری قابل اسکن نیستند، استفاده شد. نقشه های مهندسی برای بررسی متقابل هندسه دیجیتالی شده از آدامک فیزیکی مورد استفاده قرار گرفت [۵].

هنگامی که هندسه آدامک با جزئیات کافی ثبت شد، داده های IGES برای هر جزء به یک پیش پردازنده برای تولید مش وارد شد. هر یک از اجزای آدامک به طور صریح برای اطمینان از اینرسی و توزیع جرم دقیق مدل سازی شد. یک اندازه مش یکنواخت با اندازه المان کلی ۶ میلی متر در مدل به دو دلیل اصلی استفاده شد؛ یکی، برای اطمینان از یک گام زمانی حداقل ۱ میکروثانیه و دو، برای داشتن تعامل تماس خوب با فضای داخلی خودرو که معمولاً نیز وجود دارد. این مدل از شش مجموعه اصلی، سر، گردن، بالاتنه، لگن، بازوها و پاها تشکیل شده است. هر جزء در آدامک که به نظر می رسد به عنوان یک عضو انعطاف پذیر عمل می کند، به عنوان یک جزء تغییر شکل پذیر در مدل گنجانده شده است. این منجر به فرضیات کمتری در مدل سازی آدامک فیزیکی شد. به عبارت دیگر، هر تلاشی برای تبدیل آدامک فیزیکی به طور مستقیم به یک مدل اجزای محدود با حداقل فرضیات انجام شد. این اجزای محدود که هندسه و خواص مواد دقیقی دارند، رفتار همتایان فیزیکی خود را از نزدیک تکرار می کنند. مدل اجزای محدود کاملاً مونتاژ شده آدامک ترکیبی III ۵۰ درصد که از ۲۵۵۰۰ المان تشکیل شده است در شکل ۱ نشان داده شده است [۶].



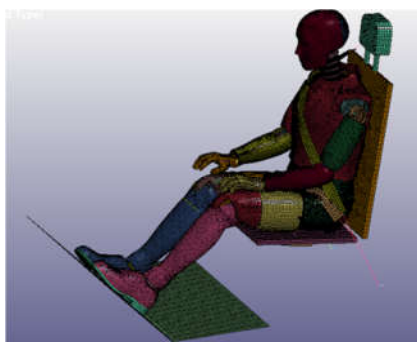
شکل ۲- مدل سازی سازه آزمون



شکل ۳- جانمایی آدمک بر روی صندلی

یک سیستم مهار استاندارد سه نقطه با جمع کننده شانه و پیش کشنده مدل شد. بستن کمربند با LS-PREPOST (شرکت فناوری نرم افزار لیورمور، لیورمور، کالیفرنیا) انجام شد. مدل کمربند ترکیبی از کمربند ایمنی ۱ بعدی و المان های پوسته دوبعدی با ضخامت به جای المان های کمربند ایمنی ۱ بعدی استفاده شد. مطابق شکل ۳، کمربند ایمنی شامل المان های مثلثی است که در آن با بدن تعامل دارد و المان های کمربند ایمنی که در آن به جمع کننده و لنگر وارد می شود. فرمولاسیون المان کمربند ایمنی دوبعدی نیاز به یک گره برای تماس سطح با کمربند ایمنی یک بعدی دارد که کمتر واقع بینانه است. سناریوی ایده آل این است که فقط المان های کمربند ایمنی از نوع پوسته داشته باشیم، اما این المان در مرحله آزمایشی است و به اندازه کافی برای این شبیه سازی پایدار تلقی نمی شود [۱۰-۱۲].

جهت اعمال شرایط مرزی، در این آزمون مانند تمامی آزمون های موجود بر اساس استاندارد ECE R 16 شرایط مرزی وجود دارد که باید برای مدل اعمال شود. این ها را می توان به محدودیت های کلی و سینماتیک کاربردی تفکیک کرد.



شکل ۴- مدل سازی کمربند ایمنی

شده و در جعبه ستون فقرات قرار گرفته است. جهت تعریف ماده برای اجزای قفسه سینه نیز همانند گردن از تعریف ماده ویسکوالاستیک و الاستیک استفاده شده است [۸].

۲-۲- مدل سازی آزمون جهت اعتبارسنجی با پژوهش

مائو یو [۹]

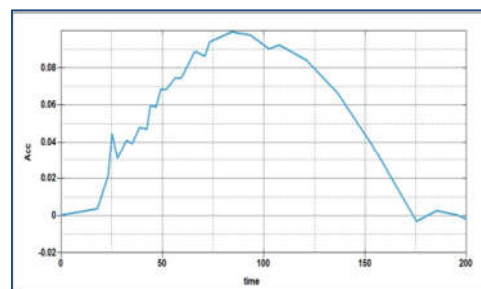
مدل سازی آزمون در جهت انجام اعتبارسنجی به پنج مرحله تقسیم شد. ابتدا یک سازه با توجه به فضای داخلی خودرو مدل سازی شد. دوم، مدل آدمک ترکیبی III بر روی صندلی rigid قرار گرفت. سوم، محدودیت ها بر روی آدمک قرار گرفتند. چهارم، شرایط مرزی و پالس تصادف اعمال شد. در نهایت، تماس بین آدمک و داخل خودرو تعیین شد.

جهت طراحی سازه، با توجه به فضای داخلی خودرو از صندلی و کف پوش و بدنه ی جلوی پای سرنشین سازه طراحی شد. هیچ فرمان یا کیسه هوا در این مطالعه لحاظ نشده است. کنسول وسط یا درها مدل سازی نشده بودند زیرا این شبیه سازی ضربه از جلو بود و همچنین با توجه به استاندارد ECE R 16 هیچ اشاره ای به مدل سازی سایر اجزای خودرو نشده است. سازه در شکل ۲ نشان داده شده است [۹].

قسمت پشتی آدمک دارای مش المان ظریف تری بود در حالی که قسمت پایینی و پاهای آدمک دارای مش المان درشت تری بود. این تفاوت در اندازه المان می تواند اطلاعات دقیق تری از قفسه سینه و ستون فقرات را فراهم کند. در نتیجه، پشتی صندلی با المان کمتری نسبت به قسمت پایینی صندلی ایجاد شد تا تعامل بهتری با آدمک ایجاد کند. در هنگام برخورد از جلو، سرنشین به دلیل پالس به جلو به سمت جلو پرتاب می شود و حداقل نیروهای تماس بین سرنشین و پشتی صندلی وجود دارد. بقیه صندلی به صورت المان های بزرگ تر مدل سازی شده است؛ زیرا اطلاعات دقیق صندلی در این مطالعه مورد نظر نبود. علاوه بر این، مواد سفت و سخت در LS-Dyna برای مدل سازی تمام صندلی و کف پوش استفاده شد. ماده صلب به اندازه پردازش عنصر بازتابی از ویژگی ماده نیست. این یک روش مقرون به صرفه برای مدل سازی ساختارهای پشتیبانی در شبیه سازی است که در آن اطلاعات تنش و تغییر شکل ضروری نیست ولی با این وجود مواد سفت و سخت هنوز دارای خواص لازم برای ایجاد تماس است. صندلی در این مطالعه دارای مدول یانگ ۵۲/۵ کیلو پاسکال و نسبت پواسون ۰/۳۳ (تقریباً خواص مواد برای فوم) است. دلیل به کار رفتن این خواص این است که صندلی برای تماس با آدمک خیلی سخت نیست. کفی و جلوی پا با مواد الاستیک با مدول یانگ ۱۰ مگا پاسکال مدل سازی شده اند. اتصال تمام قطعات به پشتی صندلی محدود شده و از طریق محدودیت های کلی در جای خود ثابت می شوند. در مرحله دوم، مدل آدمک مطابق شکل ۳ در صندلی قرار گرفت و حرکت کرد تا زمانی که هیچ نفوذ اولیه بین آدمک و صندلی وجود نداشت. خود آدمک با نفوذ اولیه بین بخش های مختلف اندام طراحی شده است، به طوری که می توان آن را در حالت های مختلف با چرخش و حرکت اندام ها قرار داد [۹].

محدودیت‌های اعمال شده شامل مقید نمودن ساختار سازه به گونه‌ای است که نسبت به یکدیگر حرکت نکنند. این کار با مقید نمودن هر قسمت از سازه (صندلی، کفپوش، کشنده، سگک، لنگر کمر بند) به پشتی صندلی از طریق ساختارهای بدنه سفت یا محدودیت‌های گرهی (بدنه‌های سفت محدود و مجموعه گره‌های اضافی محدود شده) انجام می‌شود.

سینماتیک اعمال شده شامل پالس سقوط و گرانش است. پالس تصادف اعمال شده یک پالس دلتا-وی (DV) با سرعت ۴۰ مایل در ساعت است که از یک تصادف شدید ناشی می‌شود. پالس مطابق استاندارد ECE R16 اعمال شده است. مطابق شکل ۵ پالس اعمال شده به طور چشمگیری پس از ۲۰۰ میلی ثانیه کاهش می‌یابد، به این معنی که شبیه‌سازی نیازی به اجرا بیش از ۲۰۰ میلی ثانیه ندارد [۹].



شکل ۵- نمودار شتاب بر حسب زمان در استاندارد ECE R16

پس از ایجاد هندسه و اعمال شرایط مرزی، تعامل بین قطعات یا تعاریف تماس در شبیه‌سازی باید مشخص شود. تماس بین قطعات، مانند برخورد، لغزش و کوپلینگ، باید برای شبیه‌سازی واقع‌گرایانه تعریف شود، در غیر این صورت قطعات از طریق یکدیگر عبور می‌کنند. برای تماس‌های نوع برخورد، تماس‌های مورد استفاده، سطح به سطح هستند. همچنین گزینه‌ای برای استفاده از گره‌ها برای سطح یا تماس بخشی به قسمت وجود دارد. تماس‌های خودکار سطح به سطح، تماس‌های پایداری هستند که بردارهای عادی صحیح را تضمین می‌کنند. علاوه بر این، تعاریف تماس سطح به سطح دقیق‌تر از تعاریف تماس گره به سطح است. برای تماس پیش‌فرض بین گره‌ها و سطح، یک سطح اصلی و گره‌های مرتبط به آن وجود دارد. گره مرتبط برای نفوذ به سطح اصلی در هر نقطه زمانی بررسی می‌شود.

مش‌های غیرمشابه یا بد شکل گرفته می‌توانند در تماس‌های سطح به سطح مشکلاتی ایجاد کنند، زیرا تشخیص اینکه کدام گره به کدام گره اصلی تعلق دارد ممکن است دشوار باشد و این ممکن است در تعیین نفوذ اولیه بین سطوح در تماس با مشکل مواجه شود. تماس بین سطوح با سختی‌های مشابه به خوبی توسط الگوریتم تماس پیش‌فرض کنترل می‌شود. با این حال، برای تماس بین دو ماده غیرمشابه مانند بافت نرم آدامک و تشنک کف، ممکن است لازم باشد اقدامات اضافی برای جلوگیری از نفوذ بیش‌ازحد به دلیل سفتی تماس بیش‌ازحد نرم انجام شود. فرمول مجازات محدودیت نرم ($\text{SOFT} = 1$ یا 2) می‌تواند برای رسیدگی به این نوع موقعیت‌های تماس استفاده شود. این فرمول سفتی تماس را طوری تغییر می‌دهد که تابعی از گام زمانی و ضریب مقیاس باشد. گزینه دیگر این است که سفتی تماس پیش‌فرض را

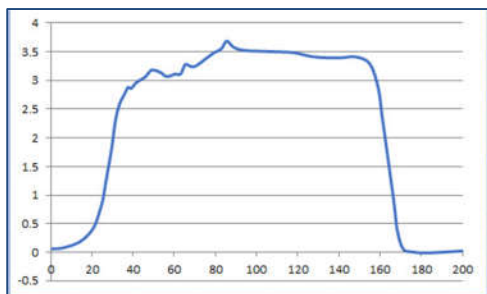
به صورت دستی مقیاس کنید. تفاوت‌های کمی بین $\text{SOFT} = 1$ و $\text{SOFT} = 2$ از نظر فرمول‌بندی وجود دارد، اما $\text{SOFT} = 2$ شبیه‌سازی‌هایی را تولید کرد که احتمال ناپایداری برای این مطالعه کمتر بود.

۲-۳- مدل‌سازی آزمون جهت اعتبارسنجی با پژوهش

فانگ و همکاران [۱۳]

مدل‌سازی آزمون در این پژوهش مشابه پژوهش مائو یو است؛ با این تفاوت که مدل‌سازی کمر بند آن به صورت زیر انجام شده است. با توجه به اینکه کمر بند ایمنی یک وسیله ایمنی مؤثر و اجباری در سیستم مهار وسایل نقلیه برای محافظت از سرنشین در هنگام تصادف است. متداول‌ترین کمر بند ایمنی، سیستم مهار سه نقطه‌ای است که از یک کمر بند ثابت در یک انتها، یک حلقه D و یک کشنده تشکیل شده است، بنابراین همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است در این پژوهش از یک سیستم کمر بند ۳ نقطه استفاده شده است.

مدل‌سازی کمر بند ایمنی شامل مدل‌سازی پیش کشنده، جمع کننده، حلقه D و پارچه کمر بند است. مدل جمع کننده در LS-DYNA مبتنی بر مفهوم ساده شده یک جمع کننده فیزیکی است و کاربر را ملزم می‌کند که یک منحنی بارگذاری (بار در مقابل کشش) و یک منحنی باربرداری ارائه دهد (شکل ۶) [۱۴]. طول تسمه بیرون آمده و برگردانده شده به داخل کشنده، به ترتیب، نیروی کمر بند ایمنی توسط منحنی بار بر اساس بیرون کشیدن کمر بند را تعیین می‌کند. هر دو مکانیسم قفل و محدودکننده بار را می‌توان با استفاده از منحنی‌های بارگیری مربوطه شبیه‌سازی کرد. هرگونه شلی در کمر بند برای حفظ کمر بند سفت خورده می‌شود. حلقه D توسط یک المان لغزنده در LS-DYNA بدون نمایش هندسی از حلقه فیزیکی مدل‌سازی می‌شود. عنصر حلقه لغزش در اصل یک نقطه گره است که به قاب خودرو متصل یا ثابت شده است.



شکل ۶- نمودار نیرو بر حسب زمان در مکانیزم جمع کننده [۱۴]

مدل پارچه کمر بند شامل دو نوع المان بود، المان‌های پوسته‌ای برای تماس با آدامک و المان‌های کمر بند ایمنی برای تحمل بار (معادل عناصر تک بعدی اما با قابلیت عبور از عنصر حلقه D). جنس تسمه معمولاً از پنبه و نایلون بافته شده است و می‌توان آن را توسط MAT_FABRIC در LS-DYNA مدل‌سازی کرد [۱۵].

شکل قفسه‌ی سینه در روند کلی و مقدار بیشینه با نتایج شبیه‌سازی و تجربی مطابقت دارد.

البته لازم به بیان است که میزان بیشینه تغییر شکل در شبیه‌سازی پژوهش حاضر از لحاظ زمانی زودتر اتفاق افتاده است که می‌توان دلیل آن را فقدان اطلاعات کافی در مورد نمودارهای بارگذاری و باربرداری کمر بند عنوان نمود؛ بنابراین طبیعی است که به دلیل عدم اطلاعات دقیق در میزان و زمان حرکت آدامک و میزان فشردگی قفسه سینه و زمان بارگذاری و بار برداری کمر بند با پژوهش مدنظر تفاوت به وجود آید.

در شکل ۸ تاریخچه‌ی شتاب سر را در مدل آدامک شبیه‌سازی پژوهش حاضر با پژوهش فانگ و همکاران مقایسه شده است. همان‌طور که از نمودار شتاب سر مشخص است، میزان بیشینه شتاب سر در شبیه‌سازی پژوهش حاضر با نتایج پژوهش فانگ و همکاران تقریباً مطابقت دارد.

همچنین از نمودار می‌توان نتیجه گرفت که زمان رسیدن به بیشینه شتاب در مدل آدامک پژوهش حاضر با نتایج تجربی در یک زمان است اما مدل آدامک به‌کاررفته شبیه‌سازی فانگ و همکاران با تأخیر زمانی به بیشینه مقدار خود رسیده است؛ با این حال روند کلی نمودار میزان مطابقت قابل قبول مدل پژوهش حاضر با پژوهش فانگ و همکاران را نشان می‌دهد.

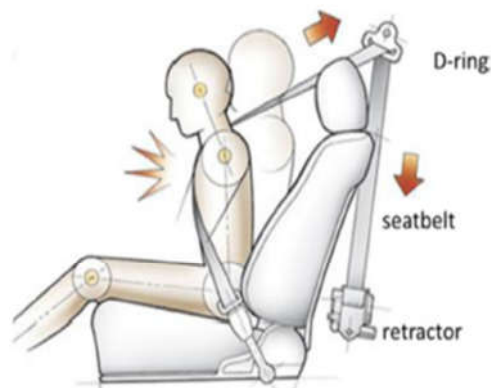
در شکل ۹ تاریخچه‌ی شتاب قفسه سینه را در مدل آدامک شبیه‌سازی پژوهش حاضر با پژوهش فانگ و همکاران مقایسه شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است روند کلی شتاب گیری قفسه سینه در مدل آدامک پژوهش حاضر با نتایج فانگ و همکاران مطابقت دارد اما در زمان رسیدن به بیشینه شتاب متفاوت‌اند.

همان‌طور که در نتایج تغییر شکل قفسه سینه نیز بیان شد، دلیل این تفاوت زمانی را می‌توان در ناکافی بودن اطلاعات مدل کمر بند ایمنی دانست. لازم به بیان است که شبیه‌سازی پژوهش حاضر در روند کلی از لحاظ مطابقت با نتایج آزمون تجربی نسبت به شبیه‌سازی فانگ و همکاران بیشتر تطابق دارد.

مقایسه نتایج شتاب لگن برحسب زمان در شبیه‌سازی پژوهش حاضر با پژوهش فانگ و همکاران نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این نمودار نیز مشخص است که روند کلی شتاب گیری لگن و پایین‌تنه با پژوهش فانگ تطابق دارد. با این وجود مدل پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش فانگ زودتر به بیشینه شتاب خود رسیده است.

می‌توان دلیل این امر را به مقداردهی میزان اصطکاک بین پایین‌تنه و صندلی عنوان نمود. همچنین میزان کشش سیستم کمر بند ایمنی و زمان فعال‌سازی پیش کشنده و جمع کننده، نقش بسزایی در حرکت و شتاب گیری بدن و پایین‌تنه دارد.

در شکل ۱۱، تصاویر سینماتیک آدامک تصادف در هر دو آزمایش ارباب و شبیه‌سازی عددی پژوهش فانگ و همکاران با شبیه‌سازی پژوهش حاضر را در سه لحظه زمانی مقایسه شده است.



شکل ۶- مدل‌سازی کمر بند ایمنی با جزئیات پیش کشنده، جمع کننده و حلقه D [۱۳]

۳- نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی با پژوهش مائو یو

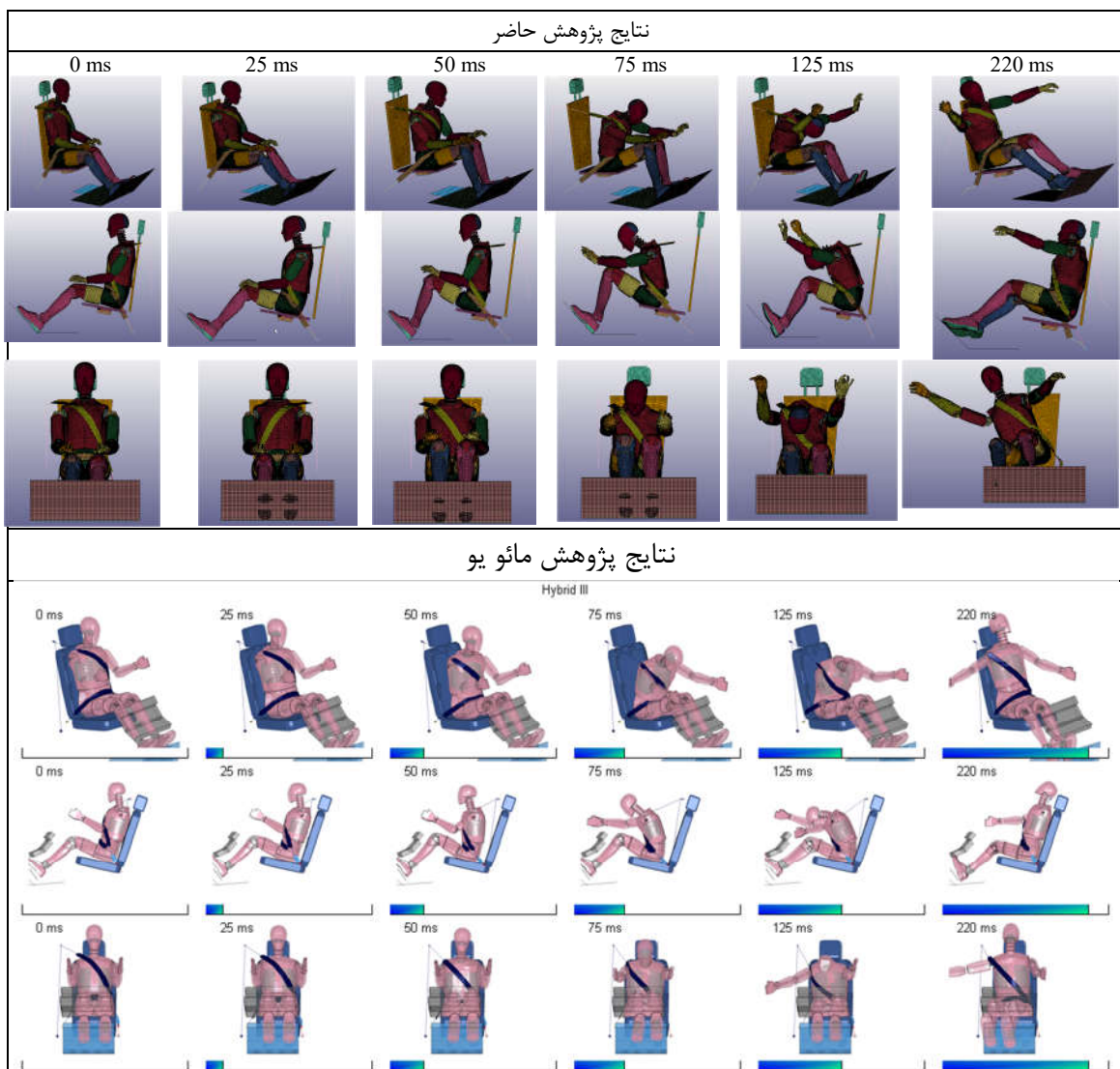
حرکت سینماتیک هر دو آدامک پژوهش حاضر و آدامک پژوهش مائو یو در شکل ۶ در زمان‌ها نشان داده شده‌اند: صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۲۵ میلی‌ثانیه و زمان پایان. حرکت آدامک پژوهش حاضر و آدامک پژوهش مائو یو هر دو دورتر از پشتی صندلی در قفسه سینه تا شکم را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که هیچ سرخوردگی از زیر کمر بند رخ نداده است. در هر دو شبیه‌سازی خمیدگی گردن و ستون فقرات مشابه‌اند. آدامک شبیه‌سازی پژوهش حاضر در میزان سرخوردگی بر روی صندلی بیشتر از پژوهش مائو یو است که می‌توان به این علت توجه کرد که میزان ضریب اصطکاک و زاویه‌ی کفی صندلی در پژوهش مائو یو مشخص نشده بود. دلیل دیگر قابل بیان این است که در پژوهش مائو یو در جلوی پا و زانو مانع قرار داده شده است که در پژوهش حاضر چنین صفحه‌ای مدل‌سازی نشده است. همچنین حرکت دست‌ها نیز متفاوت بودند چرا که در شرایط اولیه‌ی آزمون شرایط و زوایای قرارگیری دست نسبت به بدن تعیین نشده بود هرچند این مورد زیاد حائز اهمیت نیست چرا که در شرایط تصادف واقعی نحوه‌ی قرارگیری دست بر روی فرمان خودرو مشخص است؛ بنابراین در حالت کلی رفتار اجزای مختلف بدن آدامک پژوهش حاضر با پژوهش مائو یو همخوانی دارد.

۳-۱- اعتبارسنجی دوم: مدل اجزای محدود مطابق

پژوهش فانگ و همکاران

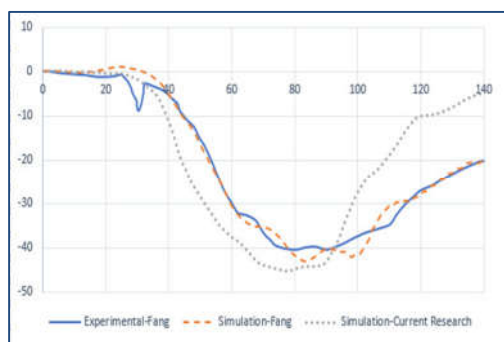
مدل آدامک با استفاده از داده‌های تجربی آزمون ارباب همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، اعتبارسنجی شد. D-Ring که نقش مهمی در ارتباط نیروی کمر بند شانه‌ای به نیروی جمع کننده داشت، با استفاده از یک عنصر حلقه لغزشی در LS-DYNA مدل‌سازی شد. با تنظیم ضریب اصطکاک μ بین تسمه و حلقه D، همبستگی بهتری با داده‌های آزمون می‌توان به دست آورد.

شکل ۷ میزان تغییر شکل قفسه سینه پژوهش حاضر را با شبیه‌سازی و آزمون تجربی مقاله‌ی فانگ و همکاران را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشاهده می‌شود، مدل آدامک در میزان تغییر



شکل ۶- اعتبارسنجی حرکت سینماتیک آدمک پژوهش حاضر با نتایج پژوهش مائو یو [۹]

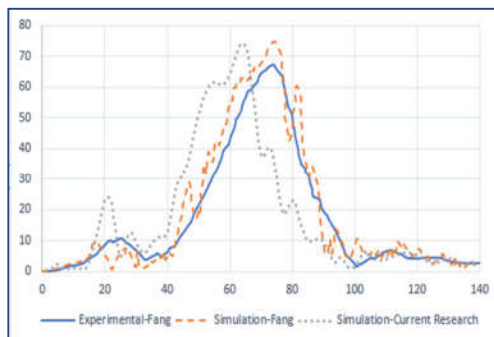
پژوهش حاضر با پژوهش فانگ می‌توان تطابقت قابل قبولی را دریافت.



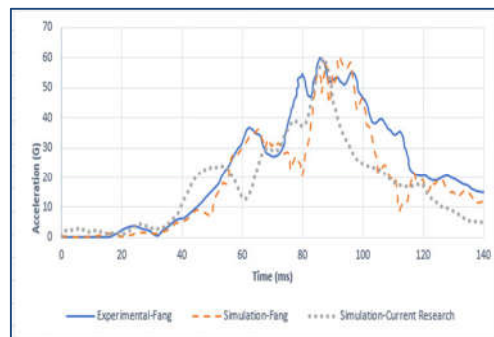
شکل ۷- نمودار تغییر شکل قفسه سینه برحسب زمان

نتایج حاکی از آن است که وضعیت بالاتنه بین موقعیت‌های ساعد شبیه‌سازی شده پژوهش فانگ و همکاران و شبیه‌سازی پژوهش حاضر در ۱۵۰ میلی‌ثانیه و داده‌های آزمون تجربی، اختلاف وجود دارد، یعنی ساعد شبیه‌سازی شده در مقایسه با آزمون تجربی، به‌صورت عمودی‌تر جهت‌گیری شده بود. با این وجود شبیه‌سازی پژوهش حاضر از لحاظ حرکت دست نزدیک‌تر به آزمون تجربی است. قابل بیان است که در این مقاله به جزئیات زیادی در مورد ورودی‌های شرایط آزمون از جمله داده‌های کمر بند و شتاب وارد به ارایه پرداخته نشده است. بنابراین در حالت کلی نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر به‌طور مطلوب با داده‌های آزمون مقایسه و مشاهده شد که در مقایسه با مدل اصلی NCAC در آزمایش ارایه، مدل آدمک حاضر دقت بهبود یافته‌ای در ارائه نحوه حرکت سینماتیک دارد. با این وجود، مدل آدمک هنوز در پاسخ‌های آدمک بر اساس تاریخچه‌ی زمانی تغییر شکل‌ها، شتاب‌ها و نیروی تماس به‌اندازه کافی دقیق است.

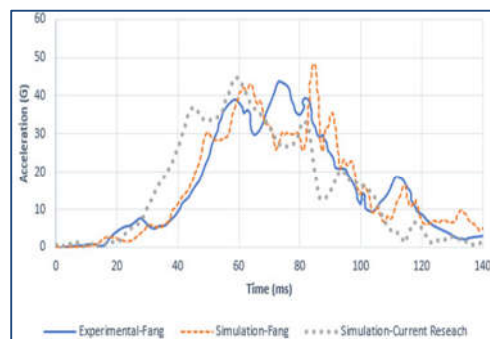
با این حال در حالت کلی با مقایسه حرکت سینماتیک آدمک



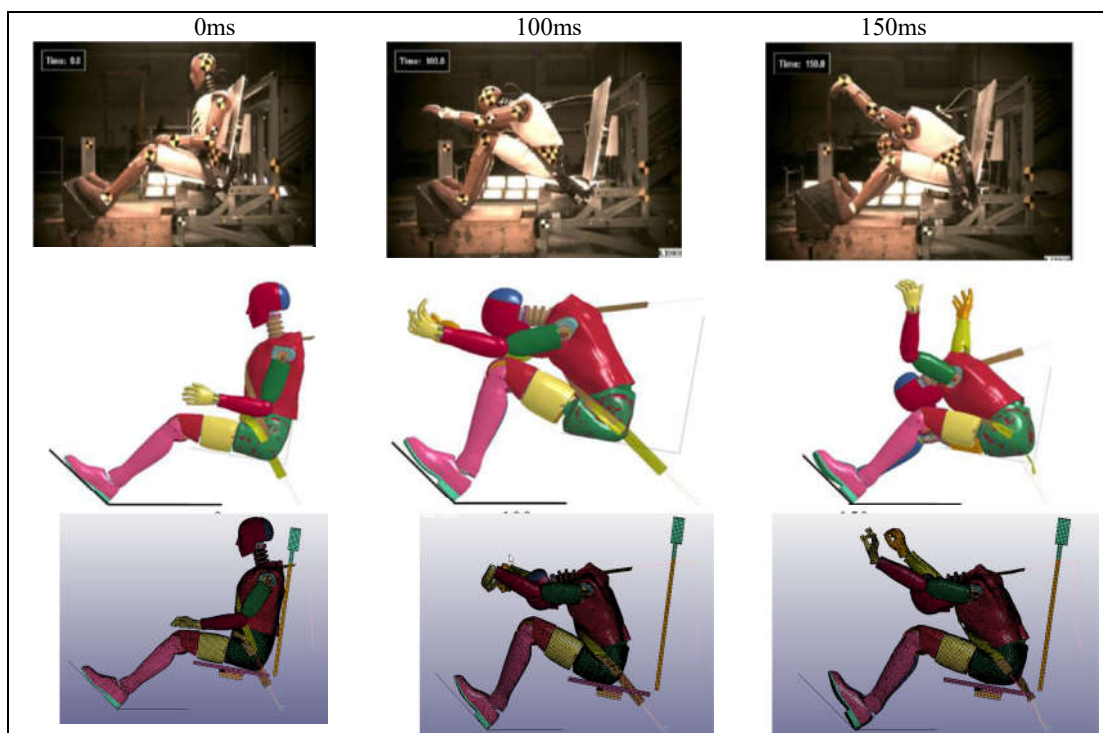
شکل ۱۰- نمودار شتاب لگن برحسب زمان



شکل ۸- نمودار شتاب سر برحسب زمان



شکل ۹- نمودار شتاب قفسه سینه برحسب زمان



شکل ۱۱- اعتبارسنجی حرکت سینماتیک آدمک پژوهش حاضر با نتایج پژوهش فانگ و همکاران [۱۳].

۴- نتیجه‌گیری

جهت بررسی و پیش‌بینی میزان آسیب به سرنشین در تصادفات، آدمک تصادف ترکیبی III را به‌عنوان یک آدمک آزمایشی استاندارد برای آزمون انطباق FMVSS 208 گنجانده شده است. آدمک مرد ۵۰ درصد ترکیبی III برای آزمون ضربه از جلو استفاده می‌شود و نشان‌دهنده میانگین مرد بالغ است و پرکاربردترین آدمک است. از آن زمان، آدمک‌هایی در اندازه‌های مختلف ساخته شده و برای اندازه‌گیری صدمات ناشی از تصادفات بر اساس جنسیت و سن استفاده می‌شود. شبیه‌سازی برای طراحی یک خودرو برای بهبود ایمنی خودرو و کاهش هزینه آزمون خودرو استفاده می‌شود. در گذشته، به دلیل محدودیت منابع محاسباتی، از یک مدل آدمک صلب عمده‌تاً برای اندازه‌گیری ایمنی سرنشین به‌جای آدمک المان محدود (FE) در تحلیل تصادف استفاده می‌شد.

با این حال، برای بهبود عملکرد محاسباتی، یک مدل آدمک اجزای محدود دقیق و قوی برای داده‌ها و رفتار دقیق‌تر آسیب سرنشین مورد نیاز است، زیرا یک مدل آدمک صلب نمی‌تواند رفتار بدنه را به‌خوبی در هنگام تصادف نشان دهد. با توجه به اهمیت مدل‌های آدمک آزمون‌های تصادف، در این پژوهش به بررسی مدل آدمک ترکیبی III ۵۰ درصد پرداخته شد. این آدمک در مدل‌سازی‌های اولیه‌ی خود به‌صورت صلب بوده و به‌مرور زمان توسط محققین مختلف مدل بهبودیافته است تا پاسخ دقیق‌تری از حرکت و میزان آسیب سرنشین خودرو را پیش‌بینی نماید.

در این پژوهش پس از معرفی مدل، مدل‌سازی آزمون اربه مطابق با استاندارد ECE R16 انجام شده است. همچنین مدل‌سازی کمر بند سه نقطه با جزئیات به‌صورت اجزای مختلف از قبیل پیش کشنده، جمع کننده، حلقه D و حسگرهای مرتبط انجام شده است. نتایج آزمون اربه با پژوهش فانگ و همکاران و مائو یو مقایسه و اعتبارسنجی شد.

نتایج اعتبارسنجی با پژوهش مائو یو نشان داد که حرکت آدمک پژوهش حاضر و آدمک پژوهش مائو یو هر دو دورتر از پشتی صندلی در قفسه سینه تا شکم را نشان داد، به‌طوری‌که هیچ برخوردگی از زیر کمر بند رخ نداده است. در هر دو شبیه‌سازی خمیدگی گردن و ستون فقرات مشابه بودند. آدمک شبیه‌سازی پژوهش حاضر در میزان برخوردگی بر روی صندلی بیشتر از پژوهش مائو یو بود که یکی از علل آن مشخص نبودن میزان ضریب اصطکاک و زاویه‌ی کفی صندلی در پژوهش مائو یو بود؛ اما در حالت کلی رفتار اجزای مختلف بدن آدمک پژوهش حاضر با پژوهش مائو یو همخوانی دارد.

اعتبارسنجی دوم با پژوهش فانگ و همکاران صورت گرفت. در این پژوهش علاوه بر حرکت سینماتیک اجزای بدن نمودار شتاب سر، قفسه سینه و لگن و همچنین میزان تغییر شکل قفسه سینه مقایسه و میزان بیشینه و روند کلی نمودارها بررسی شد. نتایج این اعتبارسنجی نیز با وجود اختلاف زمانی در بیشینه شتاب قفسه سینه و لگن در حالت کلی انطباق قابل قبولی داشت.

بنابراین با توجه به اعتبارسنجی‌های انجام شده و حصول اطمینان، می‌توان از مدل آدمک پژوهش حاضر در مراکز تحقیقاتی کشور استفاده نمود.

۵- مراجع

- [1] Albert DL, Beeman SM, Kemper AR. Occupant kinematics of the Hybrid III, THOR-M, and postmortem human surrogates under various restraint conditions in full-scale frontal sled tests. *Traffic injury prevention*. 2018 Feb 28;19(sup1):S50-8.
- [2] Jones DA, Gaewsky JP, Saffarzadeh M, Putnam JB, Weaver AA, Somers JT, Stitzel JD. Multidirection validation of a finite element 50th percentile male hybrid III anthropomorphic test device for spaceflight applications. *Journal of biomechanical engineering*. 2019 Mar 1;141(3):031004.
- [3] Xu T, Sheng X, Zhang T, Liu H, Liang X, Ding A. Development and validation of dummies and human models used in crash test. *Applied bionics and biomechanics*. 2018;2018(1):3832850.
- [4] Kirkpatrick SW, MacNeill R, Bocchieri RT. Development of an LS-DYNA occupant model for use in crash analyses of roadside safety features. In *Transportation Research Board 82nd Annual Meeting*, Washington, DC, Jan 2003 Jan 12 (pp. 12-16).
- [5] Eshraghi S, Severson K, Hynd D, Perlman AB. Finite Element Model Validation of the Hybrid-III Rail Safety (H3-RS) Anthropomorphic Test Device (ATD). In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2018 Nov 9*. 52187, V013T05A011). American Society of Mechanical Engineers.
- [6] Mohan P, Marzougui D, Kan CD. Development and validation of hybrid III crash test dummy. *SAE Technical Paper*; 2009 Apr 20.
- [7] Jensen MR, Honaker M, Boglaev A. CALIBRATION AND VERIFICATION OF DETAILED HYBRID III 50 TH PERCENTILE MALE ANTHROPOMORPHIC TEST DEVICE (ATD) BASED ON EXTENSIVE MINE BLAST TESTS. In *2017 NVDA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium, Modeling and Simulation, Testing and Validation (MSTV) Technical Session 2017 Aug 8*.
- [8] Ambrosio J, Carvalho M, Milho J, Escalante S, Martin R. A validated railway vehicle interior layout with multibody dummies and finite element seats models for crash analysis. *Multibody System Dynamics*. 2022 Feb;54(2):179-212.
- [9] Yu M. Finite element analysis of passenger multiple belt restraint configurations (Master's thesis, Wake Forest University).
- [10] Valdano M, Jiménez-Octavio JR, López-Valdés FJ. The Effect of Seatbelt Pretensioners and Load Limiters in the Reduction of Mais2+ and Mais 3+ Injuries in Real-World Frontal Crashes. Available at SSRN 4398931.
- [11] Brumblow ML, Baker BC, Nolan JM. Effects of seat belt load limiters on driver fatalities in frontal crashes of passenger cars. In *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Paper 2007 Jun 18 (No. 07-0067).
- [12] Hellenbrand C, Brown JF, Goodworth A. The Impact of Seat Belt Pretensioner Deployment on Forward-Leaning Occupants. *SAE International Journal of Transportation Safety*. 2023 Sep 20;11(09-11-02-0019):197-203.
- [13] Li N, Fang H, Zhang C, Gutowski M, Palta E, Wang Q. A numerical study of occupant responses and injuries in vehicular crashes into roadside barriers based on finite element simulations. *Advances in Engineering Software*. 2015 Dec 1;90:22-40.
- [14] Van Arsdell WW, Weber P, Stankewich C, Larson B, Hoover R, Watson R. Load-Limiters Effect on Occupant Restraint System Performance. *SAE Technical Paper*; 2016 Apr 5.
- [15] Pan L, Ramavath S, Jung SH, Hernandez L, Frank R, Truong H, Song Y. Efficiency Improvement of Seat Belt Pull CAE Analysis by Technology and Process Changes. 2018.