Archive of SID.ir

نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۱۱۰، جلد ۵۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صفحه ۱۱۹-۱۲۶ – پژوهشی کامل- DOI: 10.22034/jmeut.2025.60645.3383

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

مرضیه فلاحی 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 با توجه 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 کمربند ایمنی دانست. درنهایت به دلیل تائید اعتبارسنجی می‌توان از مدل آدمک پژوهش حاضر در شبیه‌سازی‌های پیش رو استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، آدمک ترکیبی III ۵۰ درصد، مدل‌سازی کمربند 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 درحال‌توسعه است، تعداد کشته‌ها و جراحات نیز افزایش‌یافته 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 ATD 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 مورداستفاده 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: ۰۲/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۷/۳۰

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

می‌شود. درگذشته، به دلیل محدودیت منابع محاسباتی، از یک مدل آدمک صلب عمدتاً برای اندازه‌گیری ایمنی سرنشین به‌جای آدمک المان محدود (FE) در تحلیل تصادف استفاده می‌شد [۴].

بااین‌حال، برای بهبود عملکرد محاسباتی، یک مدل آدمک اجزای محدود دقیق و قوی برای داده‌ها و رفتار دقیق‌تر آسیب سرنشین موردنیاز است، زیرا یک مدل آدمک صلب نمی‌تواند رفتار بدنه را به‌خوبی در هنگام تصادف نشان دهد. ازاین‌رو مراکز تجزیه‌وتحلیل تصادف به‌صورت مداوم درحال‌توسعه‌ی مدل دقیق اجزای محدود از آدمک‌های آزمون تصادف برای دامنه عمومی است. بااین‌وجود در کشور ایران به دلیل تحریم‌ها و قیمت بسیار گران این مدل‌های آدمک تاکنون موفق به به‌کارگیری مدل آدمک اجزای محدود در مسائل مختلف صنعتی نشده‌اند، بنابراین با توجه به عدم امکان انجام آزمون برخورد در سطح خودرو و عدم به‌کارگیری گسترده از مدل آدمک اجزای محدود در کشور ضروری است خودروسازان از آدمک‌های اجزای محدود و مدل‌سازی اجزای محدود جهت بررسی خودروهای طراحی‌شده استفاده نمایند؛ بنابراین در این پژوهش نیز به معرفی مدل آدمک و سپس اعتبارسنجی و مدل‌سازی در سطح آزمون ارابه مطابق استاندارد ECER16 پرداخته‌شده است تا با اطمینان از آن، بتوان از این مدل در صنعت خودروسازی استفاده نمود.

۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- معرفی مدل اجزای محدود آدمک ترکیبیIII

مدل اجزای محدود از آدمک با استفاده از روش مهندسی معکوس توسعه داده شد. اسکن‌های سه‌بعدی برای هر یک از اجزای آدمک با استفاده از بازوی اسکن لیزری ساخته شد. یک ماشین اندازه‌گیری 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. نقشه‌های مهندسی برای بررسی متقابل هندسه دیجیتالی شده از آدمک فیزیکی مورداستفاده قرار گرفت [۵].

هنگامی‌که هندسه آدمک با جزئیات کافی ثبت شد، داده‌های IGES برای هر جزء به یک پیش پردازنده برای تولید مش وارد شد. هر یک از اجزای آدمک به‌طور صریح برای اطمینان از اینرسی و توزیع جرم دقیق مدل‌سازی شد. یک اندازه مش یکنواخت با اندازه المان کلی ۶ میلی‌متر 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 تشکیل‌شده است. هر جزء در آدمک که به نظر می‌رسید به‌عنوان یک عضو انعطاف‌پذیر عمل می‌کند، به‌عنوان یک جزء تغییر شکل‌پذیر در مدل گنجانده‌شده است. این منجر به فرضیات کمتری در مدل‌سازی آدمک فیزیکی شد. به‌عبارت‌دیگر، هر تلاشی برای تبدیل آدمک فیزیکی به‌طور 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 می‌کنند. مدل اجزای محدود کاملاً مونتاژ شده آدمک ترکیبیIII ۵۰ درصد که از ۲۵۵۰۰۰ المان تشکیل‌شده است در شکل ۱ نشان داده‌شده است [۶].



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

در مدل اجزای محدود قطعات فلزی غیرقابل تغییر شکل، عمدتاً اسکلت آدمک، به‌عنوان مواد الاستیک، نوع ۱ در نرم‌افزار LS-Dyna مدل‌سازی شده‌اند. ماده نوع ۱ در واقع یک ماده هایپوالاستیک ایزوتروپیک است که می‌توان از این مواد برای تعریف جنس المان‌های پوسته و جامد استفاده نمود. از مواد با رفتار ویسکوالاستیک نوع ۶ برای مدل‌سازی پوست پلی وینیل استفاده می‌شود 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). مقداردهی به این پارامترها با استفاده از نتایج آزمون فیزیکی انجام‌شده است. از جنس نوع ۷ (Blatz-ko_rubber) برای مدل‌سازی برخی از لاستیک‌ها استفاده می‌شود و اجزاء و مواد از نوع ۶۲ (فوم چسبناک) برای مدل‌سازی اجزای فوم استفاده می‌شود. ابزار دقیق آدمک استاندارد (شتاب سنج‌ها، لودسل‌ها، پتانسیومتر) در مدل گنجانده شد و طبق استاندارد SAE J211 تنظیم شدند. خواص جرم و اینرسی برای هر یک از مجموعه‌ها محاسبه و با داده‌های منتشرشده مقایسه شده است [۷].

مجموعه گردن از قطعه اتصال سر به گردن، چهار دیسک لاستیکی قالب‌گیری شده بین ۵ دیسک فلزی، کابل فولادی در مرکز، شبیه‌ساز پیش‌بند قفسه سینه و یک قطعه ی مرتبط با گردن بالایی برای پایه ستون فقرات تشکیل‌شده است. دیسک‌های لاستیکی دارای یک شکاف افقی با عمق جزئی در سمت قدامی هستند تا پاسخ سفتی کمتری را در کشش گردن نسبت به خمش شبیه‌سازی کنند. هرکدام از این شکاف‌ها عمق‌های متفاوتی به دلیل شبیه‌سازی 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 استفاده‌شده است.

مجموعه قفسه سینه از ژاکت سینه، مجموعه پیشانی، دنده‌ها، ترقوه‌ها و ستون فقرات قفسه سینه تشکیل‌شده است. اکثر اجزاء، در صورت امکان، به‌عنوان المان‌های جامد برای اطمینان از توزیع دقیق جرم و اینرسی مدل‌سازی می‌شوند. ژاکت سینه با یک‌لایه کاملاً یکپارچه از المان‌های جامد مدل‌سازی شده است. دنده‌های فولادی با سه لایه از المان‌های پوسته در عرض آن‌ها مدل‌سازی شدند تا رفتار خمشی واقعی را به تصویر بکشند. مواد میرایی متصل به دنده‌ها به‌عنوان المان‌های جامد مدل‌سازی می‌شوند. اجزای منفرد با استفاده از اتصالات، جوش‌های نقطه‌ای و بدنه‌های سخت گره‌ای محدود مانند آدمک فیزیکی به یکدیگر متصل شدند. شتاب سنج سه محوری مدل

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

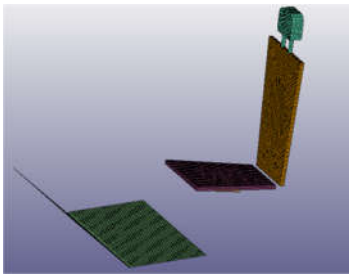
شده و در جعبه ستون فقرات قرارگرفته است. جهت تعریف ماده برای اجزای قفسه سینه نیز همانند گردن از تعریف ماده ویسکوالاستیک و الاستیک استفاده‌شده است [۸].

۲-۲- مدل‌سازی آزمون جهت اعتبارسنجی با پژوهش مائو یو [۹]

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

جهت طراحی سازه، با توجه به فضای داخلی خودرو از صندلی و کف‌پوش و بدنه‌ی جلوی پای سرنشین سازه طراحی شد. هیچ فرمان یا کیسه هوا در این مطالعه لحاظ نشده است. کنسول وسط یا درها مدل‌سازی نشده بودند زیرا این شبیه‌سازی ضربه از جلو بود و همچنین با توجه به استاندارد ECE R 16 هیچ اشاره‌ای به مدل‌سازی سایر اجزای خودرو نشده است. سازه در شکل ۲ نشان داده‌شده است [۹].

قسمت پشتی آدمک دارای مش المان ظریف‌تری بود درحالی‌که قسمت پایینی و پاهای آدمک دارای مش المان درشت‌تری بود. این تفاوت در اندازه المان می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از قفسه سینه و ستون فقرات را فراهم کند. درنتیجه، 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 می‌شود و حداقل نیروهای تماس بین سرنشین و پشتی صندلی وجود دارد. بقیه صندلی به‌صورت المان‌های بزرگ‌تر مدل‌سازی شده است؛ زیرا اطلاعات دقیق صندلی در این مطالعه موردنظر نبود. علاوه بر این، مواد سفت‌وسخت در LS-Dyna برای مدل‌سازی تمام صندلی و کف‌پوش استفاده شد. ماده صلب به‌اندازه پردازش عنصر بازتابی از ویژگی ماده نیست. این یک روش مقرون‌به‌صرفه برای مدل‌سازی ساختارهای پشتیبانی در شبیه‌سازی است که در آن اطلاعات تنش و تغییر شکل ضروری نیست ولی بااین‌وجود 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 مدل‌سازی شده‌اند. اتصال تمام قطعات به پشتی صندلی محدود شده و از طریق محدودیت‌های کلی در جای خود ثابت می‌شوند. 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 بخش‌های مختلف اندام طراحی‌شده است، به‌طوری‌که می‌توان آن را در حالت‌های مختلف با چرخش و حرکت اندام‌ها قرار داد [۹].



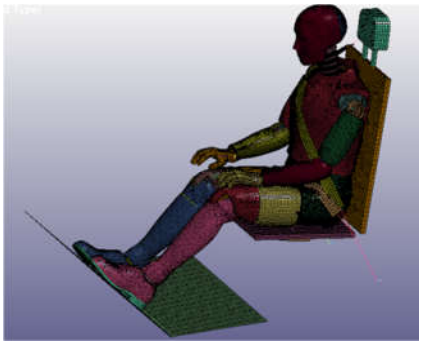
شکل ۲- مدل‌سازی سازه آزمون



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 نرم‌افزار لیورمور، لیورمور، کالیفرنیا) انجام شد. مدل کمربند ترکیبی از کمربند ایمنی ۱ بعدی و المان‌های پوسته دوبعدی باضخامت به‌جای المان‌های کمربند ایمنی ۱ بعدی استفاده شد. مطابق شکل ۳، کمربند ایمنی شامل المان‌های مثلثی است که در آن با بدن تعامل دارد و المان‌های کمربند ایمنی که در آن به جمع کننده و لنگر وارد می‌شود. فرمولاسیون المان کمربند ایمنی دوبعدی نیاز به یک گره برای تماس سطح با کمربند ایمنی یک بعدی دارد که کمتر واقع‌بینانه است. سناریوی ایده آل این است که فقط المان‌های کمربند ایمنی از نوع پوسته داشته باشیم، اما این المان در مرحله آزمایشی است و به‌اندازه کافی برای این شبیه‌سازی پایدار تلقی نمی‌شود [۱۲-۱۰].

جهت اعمال شرایط مرزی، در این آزمون مانند تمامی آزمون‌های موجود بر اساس استاندارد ECE R 16 شرایط مرزی وجود دارد که باید برای مدل اعمال شود. این‌ها را می‌توان به محدودیت‌های کلی و سینماتیک کاربردی تفکیک کرد.



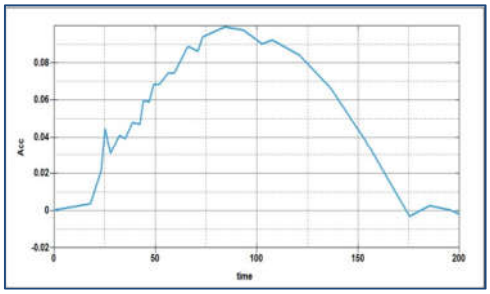
شکل ۴- مدل‌سازی کمربند ایمنی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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

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



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

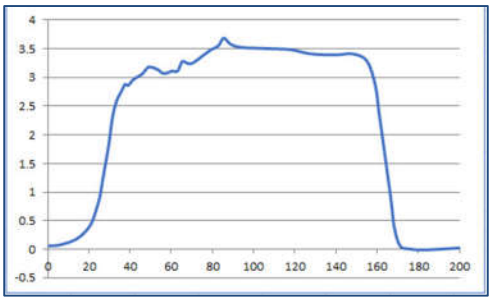
پس از ایجاد هندسه و اعمال شرایط مرزی، تعامل بین قطعات یا تعاریف تماس در شبیه‌سازی باید مشخص شود. تماس بین قطعات، مانند برخورد، لغزش و کوپلینگ، باید برای شبیه‌سازی واقع‌گرایانه تعریف شود، در غیر این صورت قطعات از طریق یکدیگر عبور می‌کنند. برای تماس‌های نوع برخورد، تماس‌های مورد استفاده، سطح به سطح هستند. 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 شکل‌گرفته 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 به‌خوبی توسط الگوریتم تماس پیش‌فرض کنترل می‌شود. با این حال، برای تماس بین دو ماده غیرمشابه مانند بافت نرم آدمک و تشتک کف، ممکن است لازم باشد اقدامات اضافی برای جلوگیری از نفوذ بیش‌ازحد به دلیل سفتی تماس بیش‌ازحد نرم انجام شود. فرمول مجازات محدودیت نرم (SOFT = 1 یا ۲) 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 به‌صورت دستی مقیاس کنید. تفاوت‌های کمی بین SOFT = 1 و SOFT = 2 از نظر فرمول‌بندی وجود دارد، اما 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 کمربند آن به‌صورت زیر انجام شده است. با توجه به اینکه کمربند ایمنی یک وسیله ایمنی مؤثر و اجباری در سیستم مهار وسایل نقلیه برای محافظت از سرنشین در هنگام تصادف است. متداول‌ترین کمربند ایمنی، سیستم مهار سه نقطه‌ای است که از یک کمربند ثابت در یک انتها، یک حلقه D و یک کشنده تشکیل‌شده است، بنابراین همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده‌شده است در این پژوهش از یک سیستم کمربند ۳ نقطه استفاده‌شده است.

مدل‌سازی کمربند ایمنی شامل مدل‌سازی پیش کشنده، جمع کننده، حلقه D و پارچه کمربند است. مدل جمع کننده در LS-DYNA مبتنی بر مفهوم ساده‌شده 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 کمربند ایمنی توسط منحنی بار بر اساس بیرون کشیدن کمربند را تعیین می‌کند. هر دو مکانیسم قفل و محدودکننده بار را می‌توان با استفاده از منحنی‌های بارگیری مربوطه شبیه‌سازی کرد. هرگونه شلی در کمربند برای حفظ کمربند 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.

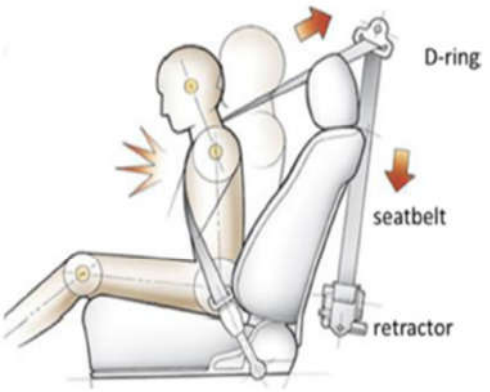


شکل ۶- نمودار نیرو بر حسب زمان در مکانیزم جمع کننده [۱۴]

مدل پارچه کمربند شامل دو نوع المان بود، المان‌های پوسته‌ای برای تماس با آدمک و المان‌های کمربند 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].

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



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

۳- نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی با پژوهش مائو یو

حرکت سینماتیک هر دو آدمک پژوهش حاضر و آدمک پژوهش مائو یو در شکل ۶ در زمان‌ها نشان داده‌شده‌اند: صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۲۵ میلی‌ثانیه و زمان پایان. حرکت آدمک پژوهش حاضر و آدمک پژوهش مائو یو هر دو دورتر از پشتی صندلی در قفسه سینه تا شکم را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که هیچ سرخوردگی از زیر کمربند رخ نداده است. در هر دو شبیه‌سازی خمیدگی گردن و ستون فقرات مشابه‌اند. آدمک شبیه‌سازی پژوهش حاضر در میزان سرخوردگی بر روی صندلی بیشتر از پژوهش مائو یو است که می‌توان به‌این‌علت توجه کرد که میزان ضریب اصطکاک و زاویه‌ی کفی صندلی در پژوهش مائو یو مشخص نشده بود. دلیل دیگر قابل‌بیان این است که در پژوهش مائو یو در جلوی پا و زانوها مانعی قرار داده‌شده 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 آدمک پژوهش حاضر با پژوهش مائو یو همخوانی دارد.

۳-۱- اعتبارسنجی دوم: مدل اجزای محدود مطابق پژوهش فانگ و همکاران

مدل آدمک با استفاده از داده‌های تجربی آزمون ارابه همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده‌شده است، اعتبارسنجی شد. D-Ring که نقش مهمی در ارتباط نیروی کمربند 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 آدمک در میزان تغییر 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 کمربند عنوان نمود؛ بنابراین طبیعی است که به دلیل عدم اطلاعات دقیق در میزان و زمان حرکت آدمک و میزان فشردگی قفسه سینه و زمان بارگذاری و بار برداری کمربند با پژوهش مدنظر تفاوت به وجود آید.

در شکل ۸ تاریخچه‌ی شتاب سر را در مدل آدمک 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 آدمک پژوهش حاضر با نتایج تجربی در یک زمان است اما مدل آدمک به‌کاررفته شبیه‌سازی فانگ و همکاران با تأخیر زمانی به بیشینه مقدار خود رسیده است؛ با این حال روند کلی نمودار میزان مطابقت قابل‌قبول مدل پژوهش حاضر با پژوهش فانگ و همکاران را نشان می‌دهد.

در شکل ۹ تاریخچه‌ی شتاب قفسه سینه را در مدل آدمک شبیه‌سازی پژوهش حاضر با پژوهش فانگ و همکاران مقایسه شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است روند کلی شتاب گیری قفسه سینه در آدمک 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 کمربند 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.

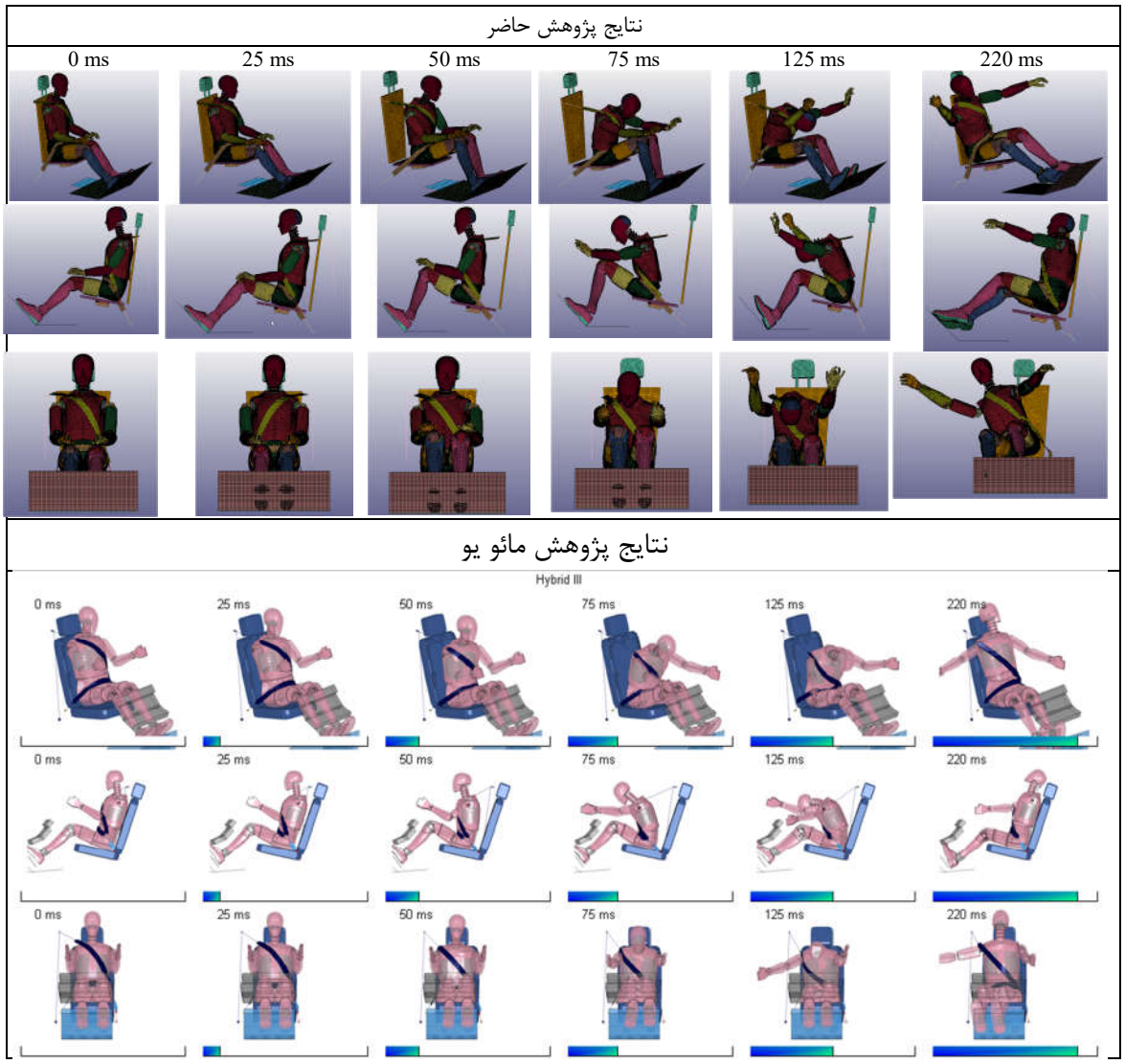
مقایسه نتایج شتاب لگن برحسب زمان در شبیه‌سازی پژوهش حاضر با پژوهش فانگ و همکاران نیز در شکل ۱۰ نشان داده‌شده است. در این نمودار نیز مشخص است که روند کلی شتاب گیری لگن و پایین‌تنه با پژوهش فانگ تطابق دارد. بااین‌وجود مدل پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش فانگ زودتر به بیشینه شتاب خود رسیده است.

می‌توان دلیل این امر را به مقداردهی میزان اصطکاک بین پایین‌تنه و صندلی عنوان نمود. همچنین میزان کشش سیستم کمربند 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 آدمک تصادف در هر دو آزمایش ارابه و شبیه‌سازی عددی پژوهش فانگ و همکاران با شبیه‌سازی پژوهش حاضر را در سه لحظه زمانی مقایسه شده است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

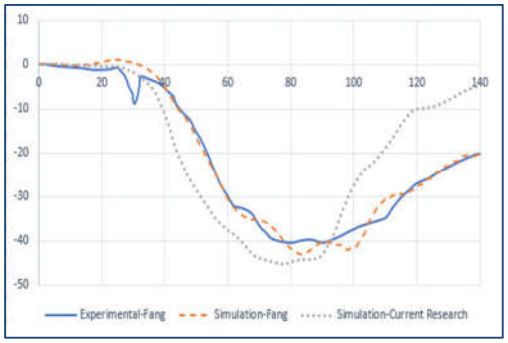


شکل ۶- اعتبارسنجی حرکت سینماتیک آدمک پژوهش حاضر با نتایج پژوهش مائو یو [۹]

نتایج حاکی از آن است که وضعیت بالاتنه بین موقعیت‌های ساعد شبیه‌سازی‌شده پژوهش فانگ و همکاران و شبیه‌سازی پژوهش حاضر در ۱۵۰ میلی‌ثانیه و داده‌های آزمون تجربی، اختلاف وجود دارد، یعنی ساعد شبیه‌سازی‌شده در مقایسه با آزمون تجربی، به‌صورت عمودی‌تر جهت‌گیری شده بود. بااین‌وجود شبیه‌سازی پژوهش حاضر از لحاظ حرکت دست نزدیک‌تر به آزمون تجربی است. قابل‌بیان است که در این مقاله به جزئیات زیادی در مورد ورودی‌های شرایط آزمون ازجمله داده‌های کمربند و شتاب وارد به ارابه 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 ارابه، مدل آدمک حاضر دقت بهبودیافته‌ای در ارائه نحوه حرکت سینماتیک دارد. بااین‌وجود، مدل آدمک هنوز در پاسخ‌های آدمک بر اساس تاریخچه‌ی زمانی تغییر شکل‌ها، شتاب‌ها و نیروی تماس به‌اندازه کافی دقیق است.

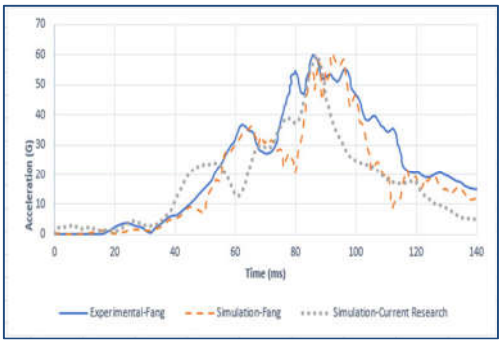
با این حال در حالت کلی با مقایسه حرکت سینماتیک آدمک پژوهش حاضر با پژوهش فانگ می‌توان تطابقت قابل قبولی را دریافت.



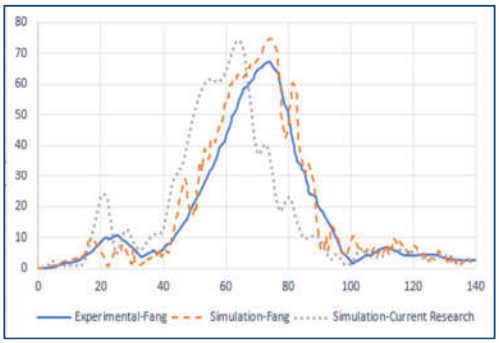
شکل ۷- نمودار تغییر شکل قفسه سینه برحسب زمان

Archive of SID.ir

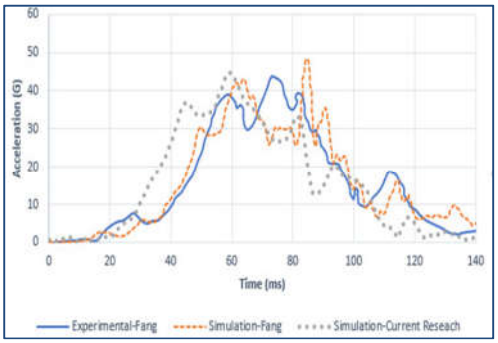
Archive of SID.ir



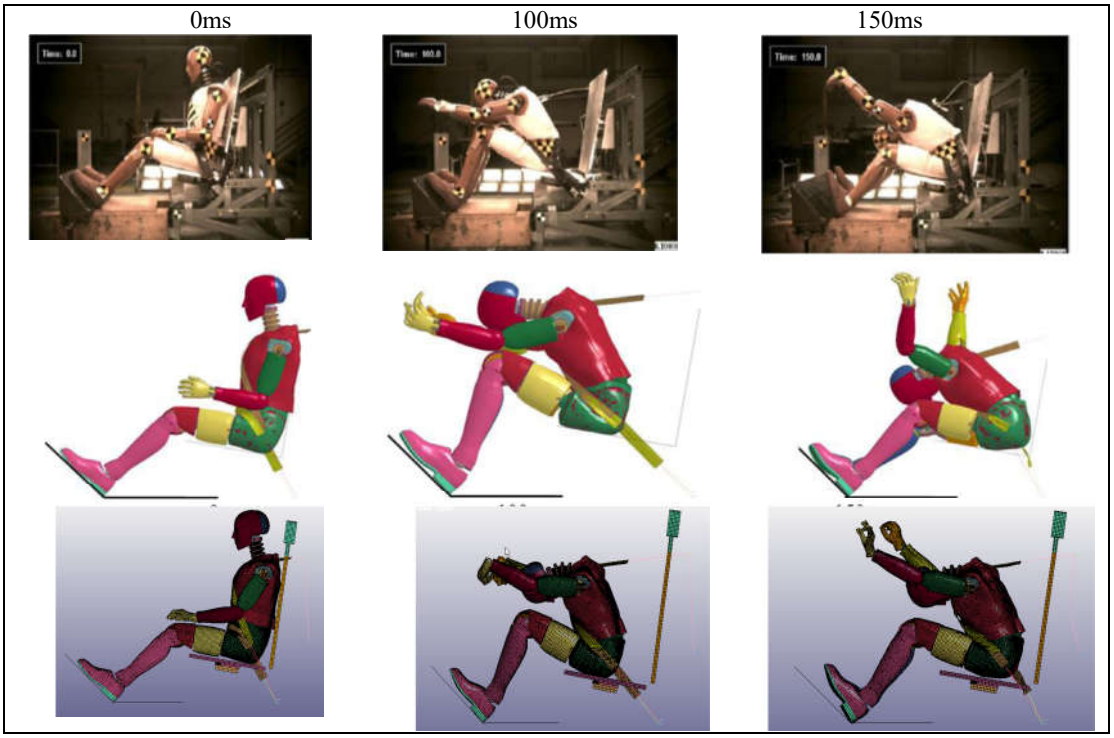
شکل ۸- نمودار شتاب سر برحسب زمان



شکل ۱۰- نمودار شتاب لگن 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].

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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 گنجانده‌شده 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 ساخته‌شده 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 عمدتاً برای اندازه گیری 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 به‌مرورزمان 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 ارابه مطابق با استاندارد ECE R16 انجام‌شده است. همچنین مدل‌سازی کمربند سه نقطه با جزئیات به‌صورت اجزای مختلف از قبیل پیش کشنده، جمع کننده، حلقه D و حسگرهای مرتبط انجام شده است. نتایج آزمون ارابه 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 سرخوردگی از زیر کمربند رخ نداده است. در هر دو شبیه‌سازی خمیدگی گردن و ستون فقرات مشابه بودند. آدمک شبیه‌سازی پژوهش حاضر در میزان سرخوردگی 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 باوجود اختلاف‌زمانی 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. InTransportation 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). InASME 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. In2017 NVDIA 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] Brumbelow ML, Baker BC, Nolan JM. Effects of seat belt load limiters on driver fatalities in frontal crashes of passenger cars. InInternational 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.

Archive of SID.ir