



طراحی پانل جانبی بدنه منفصل خودرو کلاس B و شبیه سازی اجزای محدود برخورد از جانب

دکتر محمد حسن شجاعی فرد^۱، دکتر ابوالفضل خلخالی^{۲*} و روزبه کلانتری^۳

استاد، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 استادیار، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۶/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۳۰

چکیده

تابع هدف در تصادف خودرو، مسأله تغییر شکل سازه خودرو به شکلی کاملاً منظم و کنترل شده بدون آسیب رسیدن به فضای سرنشین است. به این منظور سازه خارجی محفظه سرنشین، بایستی جهت جذب انرژی تصادف و کاهش نیروی منتقل شده به سرنشینان، دچار لهیدگی شود. در این مقاله، در فرایند طراحی ابتدا طرح بدنه منفصل خودرو در نرم افزار CATIA مدل سازی شده، سپس توسط نرم افزار پیش پردازش Hyper mesh المان بندی شده است و در نهایت در نرم افزار Pam Crash، پس از تعریف جنس های مناسب، اتصالات استاندارد تماس بین قطعات، بارگذاری به صورت سرعت اولیه برای مانع تغییر شکل پذیر برخورد کننده به پانل جانبی خودرو تعریف شده است. بدنه منفصل مورد بررسی، بر اساس پوسته خارجی محصول کلاس B پلتفرم ملی در پژوهشکده مهندسی خودرو طراحی شده است و تحلیل های این مقاله بخشی از فرایند توسعه محصول جدید در پروژه پلتفرم ملی است. خروجی های مورد نیاز از قبیل، جابجایی، سرعت، شتاب، انرژی و نیروی مقطعی از آن استخراج شده است. سپس نتایج حاصل از تحلیل ها با اهداف پیش بینی شده مقایسه شده اند. همچنین تغییر ضخامت و جنس پانل جانبی، مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر طبق داده های بدست آمده و با مقایسه این نتایج و ضخامت مناسب برای قطعه پانل جانبی استخراج شده است.

کلمات کلیدی: بدنه خودرو؛ اجزا محدود؛ جذب انرژی؛ تست تصادف

Side panel of B-Class body in white vehicle design and side crash finite element simulation

Mohammad Hassan Shojaeefard¹, Abolfazl Khalkhali^{2*} and Rouzbeh Kalantari

¹ professor, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran

^{2,3} Assistant professor, Department of Vehicle Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran

³ M.s, Department of Vehicle Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran

Abstract

Target function in vehicle crash, is about the suitable deformation of vehicle body structure in the case of do not harm occupant's space. As a consequence the vehicle body structure should be deformed to absorb the impact's energy and decrease the transmitted forces to occupants. In this paper at design process the vehicle's body in white has been simulated in CATIA software firstly, and then the element has been created by the Hyper mesh pre-processor software and finally in Pam Crash software, after introducing appropriate materials, standards joints and contacts between vehicle's parts, and then loads has been created by initial velocity for able to deform barrier toward side panel of vehicle. The vehicle body structure is designed in Vehicle Research Center, based on the style of B-class vehicle platform's product and the analysis results of this paper is part of new product development process of national platform's project. As a result, the requirements out puts such as displacement, velocity, acceleration, and energy absorption and section forces have been extracted. After all the results has been compared with the targets which are predicted. Then the suitable thickness for B-pillar illustrated based on the out puts which are extracted.

Keywords: Finite element model, vehicle structure, Crash test, Energy absorption

۱- مقدمه

بدنه خودرو عموماً برای ایمن کردن سرنشین و آرامش وی و نگه‌داشتن و مرتبط ساختن نقاط نصب سیستم فنربندی، موتور، جعبه‌دنده، سیستم انتقال قدرت، مخزن سوخت و صندلی سرنشین طراحی می‌شود. یک بدنه مناسب باید سفتی و صلبیت لازم برای هدایت مناسب‌تر خودرو توسط راننده، کم وزنی لازم برای شتاب‌گیری بهتر و کاهش لرزش ناشی از نوسانات نیروهای آئرونامیکی خودرو پیرامون محور طولی خودرو و چقرمگی لازم برای حمل بارهای نوسانی منتهی به خستگی را دارا باشد. بدنه خودرو، یک زیر ساختار مهم در خودرو است که عملکردهای زیادی را انجام می‌دهد [۱].

بدنه کامل خودرو، به دو بخش اسکلت بدنه و پوشش بیرونی تقسیم‌بندی می‌شود. منظور از پوشش بیرونی، قسمت‌های متحرک بدنه همچون، درب‌ها، کاپوت‌ها و سقف (در صورت متحرک بودن) است و منظور از اسکلت بدنه، بخش‌هایی از آن است که ثابت هستند. پوشش بیرونی تنها به جهت زیبایی خودرو و آسایش سرنشینان و ایجاد فضای مناسب داخل کابین خودرو است و نقش سازه‌ای و اسکلت بندی بدنه بر عهده اسکلت اصلی است.

بطور کلی بخش اسکلت بدنه به مجموعه‌های مختلفی تقسیم می‌شود که عبارت‌اند از:

- مجموعه کفی بدنه خودرو
- مجموعه پنل جانبی خودرو
- مجموعه سقف خودرو

هرکدام از این بخش‌ها، نقش سازه‌ای مشخصی در بدنه داشته و طراحی خاص و تحلیل مشخصی را دارند. زیر بخش‌های داخلی معمولاً به بخش‌های بیرونی از طریق جوش متصل شده و از این طریق، باعث افزایش ممان اینرسی مقطع ستون مربوطه می‌شوند. در این مقاله، به تفصیل طراحی و تقویت مجموعه پانل جانبی خودرو پرداخته شده است [۲].

مجموعه پانل جانبی، مجموعه متصل‌کننده مجموعه محفظه موتور و محفظه صندوق عقب و دربرگیرنده‌ی محفظه سرنشینان است. این بخش مهمترین مجموعه از مجموع زیر ساختارهای اسکلت بدنه خودرو هنگام برخورد از جانب خودرو است که وظیفه جذب انرژی حاصل از برخورد و تغییر

شکل و در عین حال حفاظت از سرنشینان را به عهده دارد. همچنین این مجموعه شامل، قطعات اصلی از جمله، قطعه ستون میانی و جلویی و تقویتی‌های آن، پانل یک چهارم عقب و تقویتی آن، رکاب و تقویتی آن و قطعه داخلی گلگیر جلو می‌شود. بر طبق آمار تصادف از جانب بعد از تصادف، از جلو بیشترین احتمال را دارد و از طرف دیگر هنگام برخورد تنها یک قطعه‌ی ستون میانی و تقویتی‌های آن میان مانع برخورد کننده و سرنشین است، از این رو این نوع برخورد نسبت برخوردهای از جلو و عقب، خطر بیشتری برای سرنشین‌ها می‌تواند در پی داشته باشد، به همین دلیل، گذراندن استانداردهای برخورد از جانب برای خودرو بسیار حائز اهمیت است.

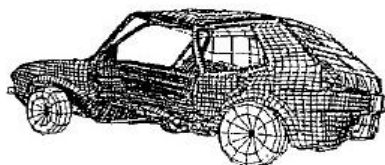
از گذشته تاکنون تحقیقات بسیاری با هدف بررسی استفاده از روش‌های غیر صریح در شبیه‌سازی برخورد صورت گرفته‌است. در سال ۱۹۸۱ توسط آقای وینتر^۱ و همکاران [۳]، تحقیقی صورت گرفت که در آن برخورد مانع با قسمت پنل جانبی بدنه منفصل صلب توسط کد غیرصریح DYCAST شبیه‌سازی شده بود. در این مدل، نیمه سمت چپ بدنه منفصل با تنها ۵۰۴ المان مختلف تعریف شده بود. بعدها در سال ۱۹۸۳ آقای هاوگ^۲ و همکاران [۴]، در مورد تکامل کد صریح - غیر صریح Pam-Crash توضیح داده بود که برای تحلیل پاسخ قطعه A-pillar و پنل یک چهارم بدنه منفصل استفاده شده بود. در سال ۱۹۸۶ آقای آرگریس^۳ و همکاران [۵]، در مورد یک کد غیر صریح برای آنالیز برخورد گزارش داده بودند. در این تحقیق از این کد غیر صریح برای شبیه‌سازی برخورد یک بدنه منفصل با یک مانع صلب با سرعت اولیه ۱۳ متر بر ثانیه استفاده شده بود. از آن زمان به بعد، استفاده از کدهای غیرصریح برای شبیه‌سازی برخورد استفاده چندانی نشده‌است.

در سال ۱۹۸۱ کمپانی فرانسوی ESI از روی کد DYNA-3D، کد تجاری PAMCARSH را بوجود آورد که در ابتدا برای صنایع هوایی استفاده می‌شد و امروزه به عنوان یکی از نرم افزارهای تحلیل تصادف خودرو در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

¹ Winter

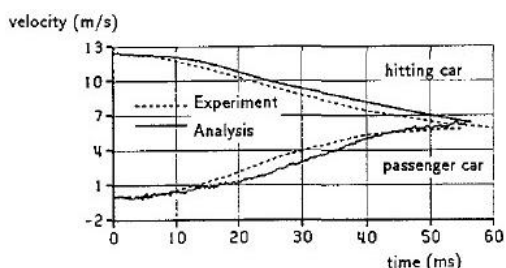
² Haug

³ Argyris



NHTSA - barrier
Time 60 ms

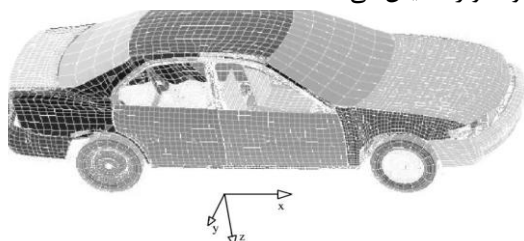
شکل ۲- برخورد از جانب در زمان ۶۰ میلی ثانیه [۷]



شکل ۳- شکل نمودار سرعت_ زمان برخورد از جانب [۷]

در سال ۲۰۰۱ چنگ^۲ و همکارانش [۸] برخورد از جلوی یک خودروی کامل در چهار شرایط مختلف (برخورد از جلوی کامل، برخورد از جلو با همپوشانی ۵۰٪، برخورد از کنار و برخورد دو خودرو) را شبیه‌سازی نموده، نتایج به دست آمده از آن را با مقادیر تجربی مقایسه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل شبیه‌سازی آن‌ها برای تحلیل‌های تصادف مشابه سایر خودروها مناسب است.

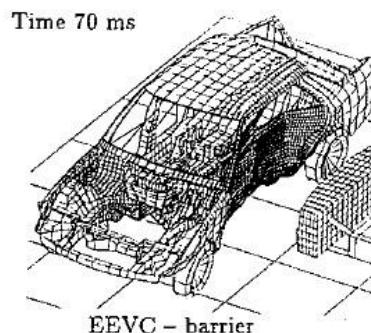
در این پژوهش، خودروی سدان، هوندا آکورد ۱۹۹۷ شکل ۴، مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها به این نکته دست یافته‌اند که تست‌های محاسباتی مدل پایدار، قابل اطمینان و تکرارپذیر هستند. شکل‌های ۵ و ۶، نماهایی از تغییر شکل خودرو در زمان ۱۰۰ میلی ثانیه در برخورد از جانب و جلو را نمایش می‌دهند.



شکل ۴- مدل المان محدود هوندا آکورد ۱۹۹۷

در سال ۱۹۹۲ شوویزروف^۱ و همکارانش [۷] در دانشگاه Karlsruhe در کشور آلمان به بررسی المان محدود برخورد خودرو از جانب پرداخته است و استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود را برای بررسی تصادف‌های خودرو پیشنهاد کرده است که می‌تواند شبیه‌سازی مناسبی از تصادف‌های واقعی خودرو در اختیار مهندسان تحلیل‌گر از مسائل علمی از جمله، جذب انرژی، تغییر شکل، تغییر سرعت، نیروهای مقطعی و... قرار دهد.

شوویزروف برای بررسی برخورد از جانب خودرو، به صورت زیرکانه‌ای و هوشمندانه‌ای از سازه‌های المان‌های ریزتری برای قطعات جانبی و سازه‌های درشت‌تری در بقیه قطعات در برخورد از جانب به منظور کاهش زمان و پیچیدگی پردازش حل مسئله استفاده کرده‌است که در شکل ۱، نتایج کار ایشان آورده شده است.



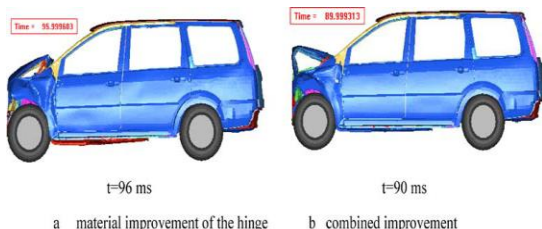
شکل ۱- شکل برخورد از جانب که توسط آقای شوویزروف و همکارانش [۷]

در این تحلیل، آقای شوویزروف از ۲۰۰۰۰ المان و المان از نوع تیر استفاده کرده است. همچنین زمان پردازش‌گیری ۶۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است که در شکل ۲، تغییر شکل خودرو در زمان ۶۰ میلی ثانیه و در شکل ۳ نیز، نمودار سرعت- زمان برای خودرو و مانع برخورد کننده آورده شده است.

² Chenga

¹ schweizerhof

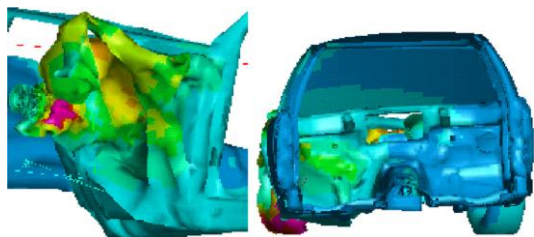
در شکل ۸-الف، اصلاح مواد تشکیل‌دهنده جلوی بدنه صورت پذیرفته است و در شکل ۸-ب، اصلاح سازه جلوی بدنه نیز به آن اضافه شده است و به صورت ترکیبی نشان داده شده است.



شکل ۸- اصلاح مواد و سازه جلوی بدنه

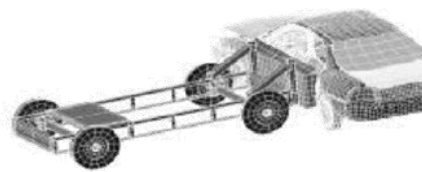
در سال ۲۰۰۸ لیکان می^۲ و همکارانش [۱۰] با ارائه کردن یک الگوریتم، پراکندگی نتایج شبیه‌سازی تست تصادف با استفاده از نرم‌افزارهای LS-DYNA و PAM-CRASH کاهش داده‌اند.

در شکل ۹، نتایج شبیه‌سازی در قسمت محفظه موتور نشان داده شده است. پراکندگی نتایج در این شکل مشخص است.



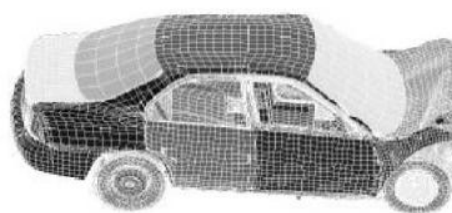
شکل ۹- پراکندگی نتایج شبیه‌سازی برای محفظه موتور

دولت‌ها برای جلوگیری از خسارت‌های ناشی از تصادف در دهه گذشته استانداردهایی در زمینه تصادف خودرو تدوین کرده‌اند که از مهمترین این استانداردها، استاندارد FMVSS^۳ آمریکا و استاندارد ECE^۴ اروپا است. بر اساس این استانداردها خودروها در تصادف باید معیارهایی را رعایت کنند و اگر خودرویی این معیارها را رعایت نکند، اجازه ساخت و فروش این خودرو در محدوده‌ای که تحت این استاندارد است توسط دولت آن منطقه داده نمی‌شود [۱۱].



t=100 ms

شکل ۵- شبیه‌سازی برخورد از جانب به وسیله MDB با سرعت ۳۸ مایل بر ساعت

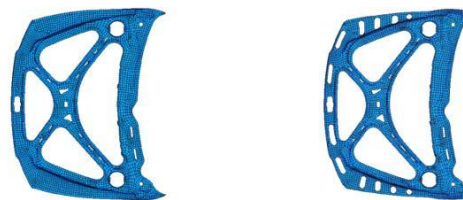


t=100 ms

شکل ۶- شبیه‌سازی برخورد از جلو به وسیله MDB با سرعت ۳۵ مایل بر ساعت

در سال ۲۰۰۶ ونگو^۱ و همکارانش [۹]، با استفاده از روش المان محدود به دنبال روشی برای افزایش جذب انرژی سازه جلوی بدنه خودرو بودند. در این پژوهش با اصلاح مواد تشکیل‌دهنده و اصلاح ساختار سازه جلوی بدنه با تحلیل تصادف از جلو با دو سرعت ۸ و ۴۸ کیلومتر بر ساعت، موفق به بهینه کردن جذب انرژی شدند.

در شکل ۷ با اصلاحی که روی سازه قسمت کاپوت صورت پذیرفته است و اعمال ریب‌هایی روی آن میزان جذب انرژی افزایش یافته است.



شکل ۷- اصلاح سازه درب کاپوت

^۲ Liquan

^۳ Federal Motor Vehicle Safety Standard

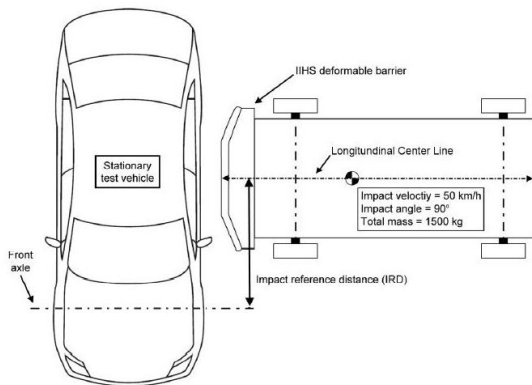
^۴ Economic Commission for Europe

^۱ Wenguo

وابسته به هندسه خودرو به جانب خودرو برخورد می‌کند که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. فاصله مرکز مانع از مرکز محور جلو را مرجع فاصله برخورد^۲ می‌نامند که طبق رابطه زیر قابل اندازه‌گیری است [۱۲].

محاسبه مرجع فاصله برخورد:

- اگر فاصله محور چرخ‌ها^۳ $> 250\text{ cm}$ ، مرجع فاصله برخورد = 144.8 cm
- اگر $250\text{ cm} \geq$ فاصله محور چرخ‌ها $\geq 290\text{ cm}$ ، مرجع فاصله برخورد = $2/$ فاصله محور چرخ‌ها + 19.8 cm
- اگر فاصله محور چرخ‌ها $\leq 290\text{ cm}$ ، مرجع فاصله برخورد = 144.8 cm



شکل ۱۰- برخورد از جانب استاندارد IIHS [۱۲]

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش در وهله اول طراحی پانل جانبی خودرو است، در ادامه به فاکتورها و یا الزامات اصلی مورد انتظار از طراحی پرداخته شده است. در طراحی بخش‌های مختلف خودرو باید الزاماتی از قبیل، سفتی، استحکام، جذب انرژی، مقاومت لازم در زمان برخورد و ... را داشته باشد که در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۱- الزام سفتی در نقاط اتصال به زیر سیستم‌ها

با توجه به عملکرد هر زیر مجموعه از قطعات متصل به بدنه، بدنه در محل اتصال آن زیر مجموعه باید الزامات مربوطه را برآورده نماید. به عنوان مثال محل اتصال سیستم تعلیق بر

در این مقاله، به تشریح و تفصیل بخش پانل جانبی و استانداردهای مربوط به تست برخورد از جانب خودرو و همچنین انجام این نوع برخورد روی یک نمونه محصول کلاس B پلتفرم ملی برطبق استانداردهای بین‌المللی، پرداخته شده است.

۲- الزامات طراحی و هدف گذاری

ورودی‌ها و خروجی‌های طراحی، از مهم‌ترین فاکتورهای طراحی هر طرح می‌باشند. در خودرو با توجه به تعدد و اندرکنش بین قطعات و تاثیرات متقابل آن‌ها روی یکدیگر، در نظر نگرفتن هر فاکتور ورودی می‌تواند منجر به عملکرد نامطلوب آن قطعه و حتی کل مجموعه و در نهایت خروجی غیرقابل پیش‌بینی شود. به عنوان مثال، در نظر نگرفتن ابعاد موتور به عنوان یک پارامتر ورودی در طراحی بدنه خودرو، منجر به خروجی غیر قابل انتظار در سرعت و یا شتابگیری مطلوب خواهد گردید. به عنوان نمونه دیگر، در نظر نگرفتن خروجی‌های طراحی سیستم تعلیق جلو و عقب به عنوان ورودی در طراحی بدنه خودرو موجب هندلینگ یا خوش فرمانی نامطلوب خواهند شد.

از مهمترین فاکتورهای ورودی در طراحی بدنه خودرو می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲].

- وزن خودرو
- فاصله بین محورها
- فاصله بین دو چرخ
- فاصله بین محور عقب و انتهای سپر خودرو
- فاصله بین محور جلو و نوک سپر خودرو
- ارتفاع مرکز ثقل خودرو

هدف از طراحی سازه بدنه خودرو حفظ شکل اولیه و تحمل بارهای گوناگون وارد بر آن است. طبق هدف گذاری انجام شده در پروژه پلتفرم ملی، طراحی بدنه باید بگونه‌ای باشد که در برخورد از جانب استاندارد IIHS^۱ را بر آورده نماید. استاندارد IIHS برای آزمایش تصادف از جانب، خودرو در محلی ثابت قرار دارد و یک مانع متحرک تغییر شکل پذیر با وزن ۱۵۰۰ کیلوگرم (هم وزن خودرو) با سرعت ثابت ۵۰ کیلومتر بر ساعت با زاویه ۹۰ درجه در مختصاتی مشخص و

^۲ Impact reference distance

^۳ wheelbase

^۱ Insurance Institute for Highway Safety

شکل سازه خودرو به شکلی کاملاً منظم و کنترل شده بدون آسیب رسیدن به فضای سرنشین است.

به این منظور سازه خارجی محفظه سرنشین، بایستی جهت جذب انرژی تصادف و کاهش نیروی منتقل شده به سرنشینان، دچار لهیدگی گردد. در ایالات متحده استانداردهای برخورد "استانداردهای ایمنی وسایل موتوری فدرال" یا به اختصار FMVSS نامیده می‌شوند. استانداردهای برخورد اتحادیه اروپا، ژاپن، کره، استرالیا نیز مشابه استانداردهای برخورد فوق‌الذکر می‌باشند.

لذا هدف طراح بدنه خودرو، طراحی سازه‌ای است که تمام الزامات فوق را برآورده نماید.

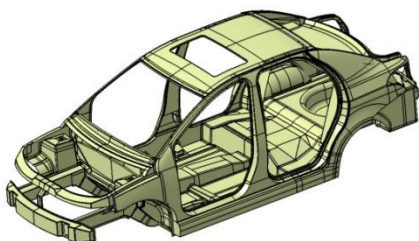
۳- اجزای پانل جانبی

بدنه منفصل محصول کلاس B، براساس پوسته خارجی در شکل ۱۱ نشان داده شده است، در پژوهشکده مهندسی خودرو طراحی شده است.



شکل ۱۱- پوسته خارجی محصول کلاس B

مدل کامل بدنه منفصل بر اساس پوسته شکل ۱۱ در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- مدل کامل بدنه منفصل خودرو کلاس B

روی بدنه می‌بایستی در بحرانی‌ترین شرایط عملکردی، سفتی و استحکام لازم را جهت تحمل بارهای وارده از سیستم تعلیق داشته باشد تا خودرو ویژگی‌های هندلینگ مطلوبی از خود نشان دهد. در بحث سفتی تغییر شکل‌ها بایستی کوچک و الاستیک باشند [۲].

۲-۲- الزام استحکام در نقاط اتصال

به زیرسیستم‌ها

مطابق این الزام، هیچ یک از قطعات و زیر مجموعه‌ها در نقاط اتصال نبایستی تحت بارهای وارده دچار مشکل عملکردی شوند. اخلاص در عملکرد ممکن است در اثر بیش بارهای لحظه‌ای یا خستگی قطعه اتفاق افتد. واماندگی‌های لحظه‌ای ممکن است در اثر بیش تنش بارگذاری شدن قطعات فراتر از حد الاستیک و یا به واسطه واماندگی در نقاط اتصال اتفاق افتد. شروع ترک خستگی به شدت بستگی به جزئیات طراحی داشته و هنگام طراحی قطعات زیر مجموعه قابل ارزیابی می‌باشند. به همین دلیل، ارزیابی استحکام خستگی معمولاً تا پس از مرحله طراحی مفهومی به تعویق می‌افتد. استحکام ممکن است بصورت حداکثر نیروی قابل تحمل توسط بدنه تعریف گردد [۲].

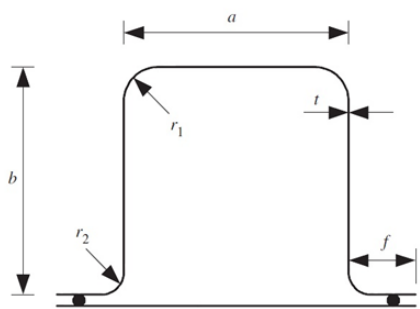
۳-۲- الزام جذب انرژی

الزام جذب انرژی با سطح زیر نمودار نیرو- تغییر شکل بیان می‌شود. در بررسی تصادفات و برخوردهای خودرو مهم‌ترین عامل در کیفیت یک طراحی، مقدار جذب انرژی کل و هر یک از قطعات است. از این رو طراحی باید به صورتی انجام شود تا در تصادفات بیشترین میزان جذب انرژی در قطعات مورد نظر شکل پذیرد. به عنوان نمونه، در برخورد از جانب، پانل جانبی باید تا حد امکان بیشترین انرژی برخورد را جذب نماید تا کمترین صدمه به اتاق و سرنشینان وارد شود [۲].

۲-۴- الزام مقاومت مطلوب در برخورد

یکی از وظایف اصلی بدنه خودرو، محافظت از سرنشینان خودرو هنگام برخورد و یا واژگونی است. با توجه به گوناگونی نوع برخورد، بسیاری از دولتمردان آزمون‌هایی برای برخورد و تعیین حداقل سطوح عملکردی مطلوب را برای خودرو ارائه نموده‌اند. تابع هدف در تصادف خودرو، مسأله تغییر

در این بخش، به چکیده از مراحل طراحی و تحلیل پرداخته شده است. مدل سازی در نرم افزار کتیا و با ابعاد مشخص که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، انجام گرفته است.



$$a = 50, b = 50, t = 1.5, f = 15, r_1 = 6, r_2 = 4$$

طول کل این تیر - 200

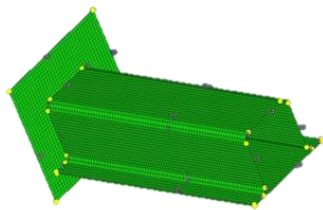
شکل ۱۴- تعریف ابعاد تیر در نرم افزار کتیا

مشخصات ماده به کار گیری شده در تست، از نوع الاستیک- پلاستیک و با مقادیر جدول زیر تعریف شده است.

جدول (۲) خواص مواد تیر

Y _s	ν	T _{Module}	E _{Module}	خاصیت
405	0.33	0.63	220	مقدار

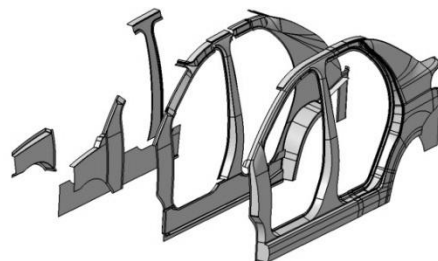
سپس تیر در نرم افزار هایپر مش، با سایز المان ۳ میلی متر مش بندی شده است که در شکل ۱۵، این مدل نمایش داده شده است.



شکل ۱۵- مدل المان بندی تیر در نرم افزار هایپر مش

در این مدل بر طبق مدل مرجع در مقاله [۱۳] از هشت نقطه جوش در طرفین تیر استفاده شده است و این نقطه جوش‌ها با دستور Plink از نرم افزار Pam Crash روی تیر اعمال شده است که در شکل ۱۶ آمده است.

شکل جدا شده پانل جانبی در شکل ۱۳ نشان داده شده است که بیان گر تمامی قطعات تشکیل دهنده پانل جانبی است و به دلیل اهمیت بالای این مجموعه در برخورد از جانب و خطرات احتمالی آسیب سرنشینان، قطعات اصلی این مجموعه از دو و یا سه لایه خارجی، تقویتی و داخلی تشکیل شده است قطعه ستون میانی، نمونه این نوع طراحی است.



شکل ۱۳- تفکیک شده پانل جانبی

پس از طراحی قطعات با داشتن برخی ورودی‌هایی از قبیل، فاصله بین دو محور چرخ‌ها، فاصله بین چرخ‌ها (در نگاه از روبرو خودرو)، وزن، موقعیت قرار گیری قطعات و جنس و تعداد آن‌ها و با امکان سنجی ساخت قطعات، به شبیه سازی برخورد از جانب بر طبق استاندارد معرفی شده پرداخته شده است. اطلاعات ضروری ورودی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ورودی‌های ضروری خودرو منفصل

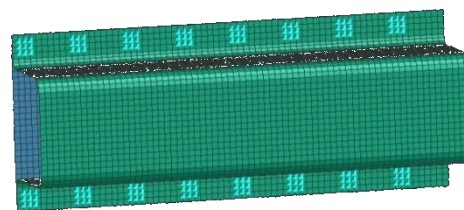
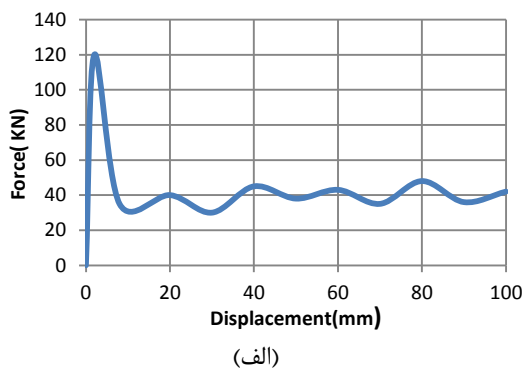
پلتفرم	الزام طراحی بدنه منفصل	پارامتر ورودی
۲۶۴۰mm	۲۴۵۰ - ۲۶۷۰mm	فاصله بین دو محور چرخ‌ها
۱۶۵۷mm	۱۶۵۰ - ۱۷۴۰mm	فاصله بین چرخ‌ها
۲۷۶Kg	۲۰۰ - ۳۰۰Kg	وزن
۷۹۹mm	۷۷۰ - ۷۹۰mm	محور چرخ جلو تا سپر جلو
۸۴۰mm	۸۰۰ - ۹۰۰mm	محور چرخ عقب تا سپر عقب

۴- شبیه سازی برخورد تیوب جاذب انرژی کلاهی شکل نقطه جوش شده

در این قسمت، به منظور اعتبارسنجی عملکرد نرم افزار Pam Crash، تحلیل اجزای محدود مچالگی جاذب انرژی کلاهی شکل نقطه جوش شده با استفاده از این نرم افزار انجام و نتایج آن با نتایج تجربی و عددی مقاله مرجع [۱۳] مقایسه می شود.

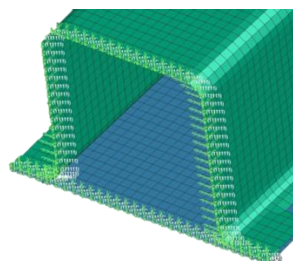
میزان جذب انرژی تیر در مقاله مرجع [۱۳] که به صورت تجربی و عددی این مسئله را مورد بررسی قرار داده است و این مقاله، به صورت نمودار نیرو-جابجایی در شکل ۱۹ آورده شده است.

با توجه به دو نمودار ارائه شده و تشابه مناسب آنها با یکدیگر، می‌توان به صحت نتایج بدست آمده استناد کرد و از طرفی به نتایج خروجی از نرم افزار Pam Crash در تحلیل مسائل المان محدود اعتماد کرد و به این ترتیب از این نرم‌افزار در تحلیل تصادف خودرو نیز مجاز به استفاده می‌باشیم. به همین ترتیب در ادامه به روند شبیه سازی مسئله برخورد از جانب خودرو پرداخته شده است.



شکل ۱۶- نمایش نقطه جوش‌ها در دو طرف تیر

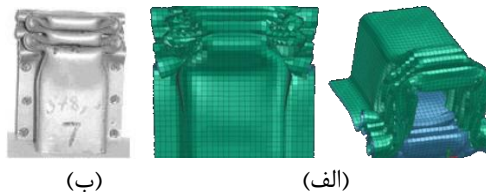
بعد از طراحی تیر و المان بندی و تعریف خواص آن و ایجاد نقطه جوش‌ها، حال باید شرایط مرزی مسئله را تعریف کنیم. در این تست برای ایجاد مچالگی از اعمال جابجایی به یک دیوار صلب استفاده می‌کنیم و برای ثابت نگه داشتن تیر انتهای آن را در تمامی جهات می‌بندیم، این شرایط در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



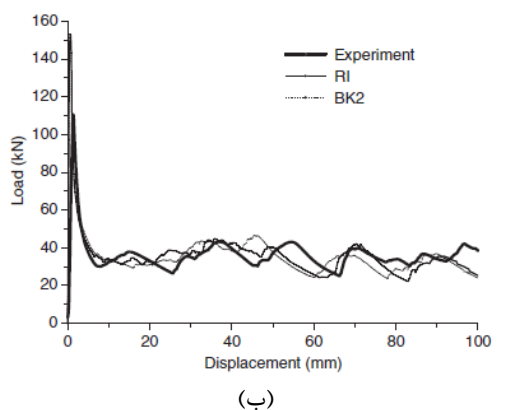
شکل ۱۷- تعریف شرایط مرزی برای حل مسئله

بعد از انجام مراحل فوق، می‌توان نتایج حاصل از کار را در محیط Pam Crash Viewer مشاهده کرد، این نکته حائز اهمیت است که در تیر شبیه سازی شده پارامتر خروجی مهم میزان جذب انرژی توسط تیر است که در ادامه این پارامتر با مقادیر عددی و تجربی حاصل از مقاله مرجع مقایسه گردیده است.

در شکل ۱۸، مقایسه تغییر شکل پس از اعمال نیرو در تست تجربی و حل عددی در نرم افزار Pam Crash آورده شده است، همان طور که مشاهده می‌شود، این دو از نظر تغییر شکل تشابه مناسبی با هم دارند.



شکل ۱۸- (الف) تیر پس از اعمال نیرو در حل عددی و (ب) تیر پس از اعمال نیرو در تست تجربی

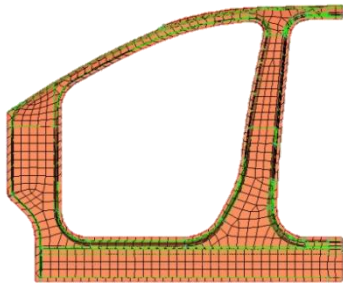


شکل ۱۹- (الف) نمودار نیرو-جابجایی تیر تست شده در این مقاله و (ب) نمودار نیرو-جابجایی تیر تست شده در مقاله مرجع [۱۳] در تست تجربی و عددی

۵- شبیه سازی برخورد از جانب

مراحل شبیه سازی را می‌توان در طی مراحل زیر خلاصه نمود:

علت تغییرات این اندازه، یافتن اندازه مناسب برای این المان‌ها بطوری که قابلیت تحلیل به کمک پردازنده‌های نه چندان پرهزینه را نیز داشته باشد و همچنین با یافتن بیشترین سایز مناسب برای المان‌ها که در مقادیر پارامترهای مورد بررسی تاثیر گذار نباشد، می‌تواند در سرعت حل مسئله توسط نرم افزار و همینطور در حجم اشغال شده توسط فایل‌های خروجی بسیار موثر باشد که خود در تحلیل مسائل بزرگ و پیچیده، موضوعی قابل توجه است. شکل ۲۰، قطعه ستون میانی را بعد از مش‌بندی در نرم‌افزار نشان می‌دهد که سایز المان ۳۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۰- قطعه ستون میانی المان بندی شده با سایز المان ۳۰ میلی‌متر

نسبت بزرگ‌ترین ضلع المان به کوچک‌ترین ضلع المان، به عنوان نسبت منظری تعریف می‌شود که یکی از مهمترین ملاک‌های المان بندی صحیح است. نسبت حدی آن ۱:۵ در نظر گرفته شده است؛ یعنی بزرگترین ضلع یک المان، نباید از کوچک‌ترین ضلع آن المان، بیشتر از ۵ برابر بزرگتر باشد. از دیگر معیارهای بررسی المان می‌توان به مواردی از جمله: ژاکوبین، تاب برداشتنگی و انحراف اشاره کرد که هر کدام معیارهای خاص خود را دارند. همگی این معیارها در نرم‌افزار وجود دارد و برای بررسی المان بندی و صحت آن از نرم‌افزار استفاده شده است [۱۴].

بعد از المان بندی کلیه قطعات و فراخوانی آن‌ها در کنار هم و ایجاد یک مجموعه پانل جانبی، تمامی قطعات وارد نرم‌افزار Pam Crash شده است و جنس‌ها و ضخامت‌های مربوط به هر قطعه مشخص شده است. سپس اتصال بین قطعات از نوع نقطه جوش بین یک نقطه از یک قطعه و یک قطعه مجاور تعریف شده است و در ادامه برای جلوگیری از تداخل قطعات با یکدیگر و با مانع مورد اصابت تماسی بین

۱- المان بندی کلیه قطعات
 ۲- تعیین اتصالات بین قطعات
 ۳- تعریف جنس و ضخامت قطعات
 ۴- تعریف تماس بین قطعات
 ۵- تعریف شرایط اولیه برای مسئله
 ۶- تعریف خروجی‌های مد نظر
 ۷- پردازش حل مسئله

در مراحل ذکر شده بالا، تنها مرحله المان‌بندی در نرم‌افزار Hyper mesh انجام شده است و بقیه مراحل در نرم‌افزار Pam Crash انجام شده است.

مدل طراحی شده برای آنکه آماده آنالیز المان محدود شود، باید المان بندی شود که در این پژوهش این فرایند در نرم‌افزار Hyper mesh صورت گرفته است، در زیر مراحل المان بندی به ترتیب آورده شده است.

- ۱- طراحی قطعات و استخراج فایل به صورت ca part
- ۲- تمیز کردن فایل برای آماده سازی المان بندی
- ۳- ایجاد المان‌ها و چک کردن کیفیت مدل از لحاظ المان بندی

اندازه ۱۰-۱۵ میلی متر برای مدل‌سازی ساختارهای اصلی

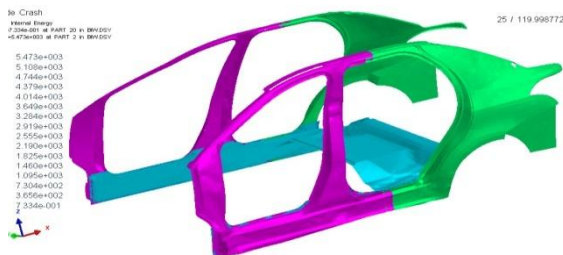
اندازه ۲۰-۲۵ میلی‌متر برای مدل‌سازی ساختارهای غیر اصلی

- ۴- سرهم بندی قطعات المان بندی شده به عنوان مدل اجزا محدود آماده تحلیل
- ۵- بررسی المان‌بندی مدل برای پی بردن به اشکالاتی مانند:

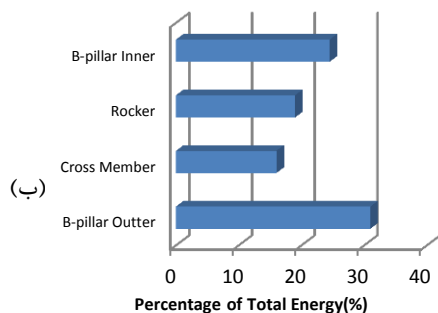
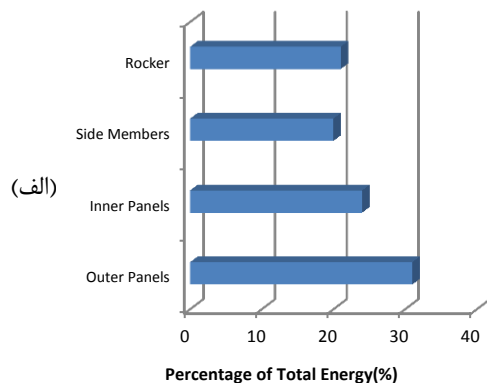
نودهای آزاد، گوشه‌های آزاد، مش‌های نامطلوب از نظر هندسه و هم پوشانی مش‌ها [۱۴].

ابتدا کلیه قطعات در نرم‌افزار CATIA با پسوند igs ذخیره شده، سپس این فایل‌ها به نرم‌افزار هایپر مش فراخوانی می‌شوند. هر کدام از قطعات به صورت جداگانه المان بندی می‌شوند. المان‌ها از نوع 2D و به صورت ترکیبی از المان‌های مربعی و مثلثی استفاده شده است. با ویرایش این المان‌ها سعی شده که المان‌های مثلثی را به حداقل برسانیم. کل قطعات به صورت یکپارچه چندین بار با اندازه‌های متفاوت از ۱۰ تا ۶۰ میلی‌متر المان بندی شده است.

در شکل ۲۲، قطعاتی نشان داده است که در برخورد از جانب، بیشترین جذب انرژی را دارا هستند. همان طور که بر طبق استانداردهای برخورد از جانب روی خودروی پورشه نشان داده شده است، قطعه ستون میانی بیشترین جذب انرژی را در میان قطعات پانل جانبی در برخورد از جانب دارد. در شکل ۲۳، اعتبار سنجی نتایج تست برخورد از جانب بین خروجی‌های پلتفرم و مدل شرکت پورشه نشان داده شده است.



شکل ۲۲- مجموعه قطعات دارای بالاترین میزان جذب انرژی در برخورد از جانب

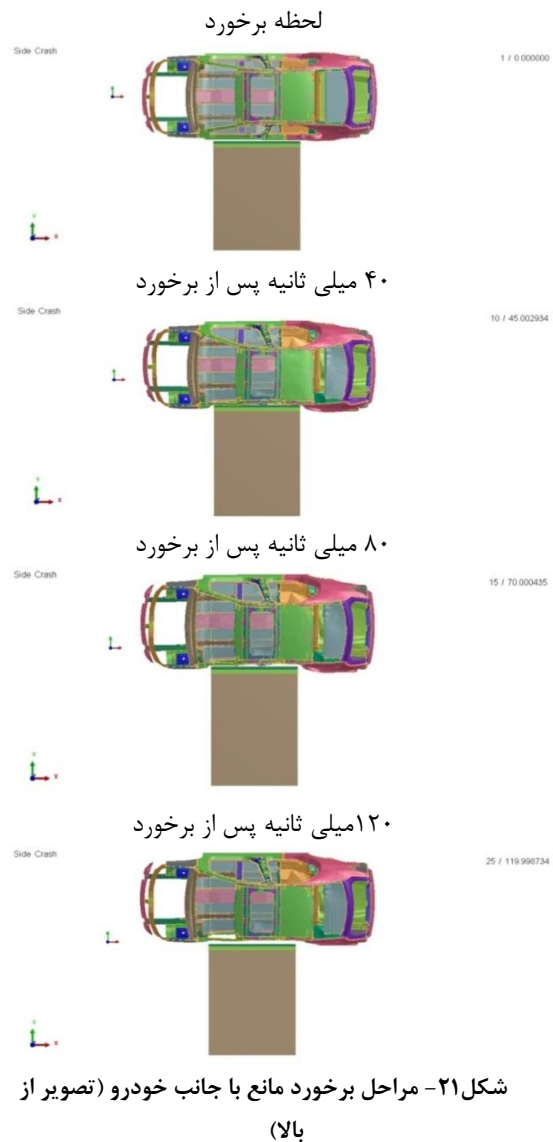


شکل ۲۳- درصد جذب انرژی قطعات بدنه منفصل خودرو در برخورد از جانب در مدل شرکت پورشه [۱۵] (الف) و پلتفرم (ب)

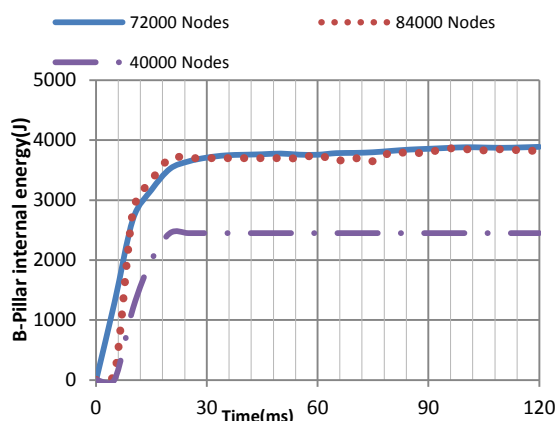
آن‌ها تعریف می‌شود. در تست برخورد از جانب، نیروی اولیه در تست برخورد مانع با خودرو به صورت سرعت اولیه به کلیه نقاط مانع داده شده‌است. بعد از مراحل تعریف مسئله خروجی‌های مورد نیاز از قبیل، جابجایی، سرعت، شتاب، انرژی و نیروی مقطعی برای نقاط و قطعات تعیین شده است.

۶- نتایج

در این مقاله، تست برخورد از جانب در حالت تست برخورد با مانع انجام شده است. در شکل ۲۱، مراحل تست برخورد از جانب در محیط نرم‌افزار visual viewer نرم Pam Crash نشان داده شده است.



است، به همین دلیل المان بندی قابل قبول نبوده است. تعداد گره ۸۴۰۰۰ در لحظه ابتدایی برخورد جذب انرژی کمی داشته و سپس با شیب تندی افزایش یافته است، ولی روند پیشرفت آن، مشابه تعداد گره ۷۲۰۰۰ است. در این مقاله به علت مناسب بودن نمودار انرژی درونی ستون میانی در تعداد گره ۷۲۰۰۰، این تعداد گره برای پارامترهای دیگر نیز، مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲۵- نمودار استقلال از تعداد المان برای قطعه ستون میانی

در ادامه به بررسی و تحلیل نمودارهای حاصل از برخورد مانع با جانب خودرو پرداخته شده است، برخورد با جانب خودرو، به گونه‌ای است که مانع برخورد کننده تنها به ستون میانی و رکاب از مجموعه قطعات پانل جانبی برخورد می‌کند، تست‌های برخورد انجام شده به ترتیب زیر است:

- برای آزمایش تاثیر سرعت بر پارامترهای مورد بررسی، مانع با سرعت‌های ۱۳/۸، ۱۵ و ۱۸ متر بر ثانیه به خودرو اصابت کرده است.
- برای آزمایش تاثیر ضخامت بر پارامترهای مورد بررسی، ضخامت‌های ۰/۶، ۱ و ۲ میلی‌متر برای مجموعه قطعات پانل جانبی تعیین شده است.
- برای آزمایش جنس قطعات بر پارامترهای مورد بررسی، دو جنس فولاد و آلومینیوم برای مجموعه پانل جانبی تعیین شده است.

۶-۱- بررسی تاثیر تغییرات سرعت

در این تست مانع با سرعت‌های ۱۳/۸، ۱۵ و ۱۸ متر بر ثانیه با خودرو برخورد می‌کند و مقادیر پارامترهای جابجایی، سرعت و شتاب روی نقطه‌ای در وسط ستون میانی و مقادیر

برای اندازه‌گیری پارامترهای خروجی نرم‌افزار همچون، جابجایی، سرعت و شتاب نقطه مرجعی روی ستون میانی در نظر گرفته شده است که در شکل ۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۲۴- نقطه مرجع بر روی ستون میانی برای اندازه‌گیری پارامترها

در حل عددی هر المان، یک نقطه‌ی محاسباتی در نظر گرفته می‌شود و معادلات حاکم بر مسئله در فضای بین دو نقطه از دو المان حل نمی‌شوند، بنابراین این امکان وجود دارد که جواب‌های به دست آمده وابسته به ابعاد المان‌ها باشند؛ بنابراین باید ابعاد المان‌های محاسباتی به اندازه‌ای باشند که:

- ۱) جواب‌های به دست آمده مستقل از ابعاد المان باشند
- ۲) تعداد المان‌های محاسباتی به صورت غیرمنطقی زیاد نباشد

درواقع برای به دست آوردن جواب‌هایی مستقل از ابعاد المان همیشه "ریز کردن تمام المان‌های موجود" یک راه حل منطقی به نظر نمی‌رسد. گاهی با این کار تعداد المان‌های موجود در دامنه محاسباتی به قدری زیاد می‌شود که زمان لازم برای رسیدن به پاسخ، با توجه به سخت افزار موجود، بسیار زیاد و در مواردی غیرممکن می‌شود؛ بنابراین باید از حداکثر فرصت برای درشت انتخاب کردن المان‌ها استفاده برد.

در این مقاله، به علت اهمیت بالای قطعه ستون میانی در جذب انرژی برخورد از جانب، به بررسی میزان انرژی درونی این قطعه در تعداد المان‌های مختلف پرداخته شده است که در شکل ۲۵ آورده شده است. در تعداد گره ۴۰۰۰۰ روند پیشرفت نمودار قابل قبول بوده است، ولی مقدار آن اختلاف زیادی با تعداد گره‌های ۷۲۰۰۰ و ۸۴۰۰۰ داشته

انرژی کل سیستم E_T برابر مجموع انرژی اولیه E_T^0 و کار خارجی W_{ext} است فرمول (۱). انرژی اولیه شامل، انرژی جنبشی اولیه E_{kin}^0 و انرژی داخلی اولیه E_{int}^0 است. انرژی ثانویه یا همان انرژی کل شامل، انرژی جنبشی، انرژی داخلی، انرژی‌هایی اتلافی با مقیاس کوچک از جمله: E_{si} انرژی‌های تماسی شامل، کار نیروی اصطکاک و E_{rw} انرژی اتلافی در اثر میرایی است. فرمول (۲). با توجه به مطالب ارائه

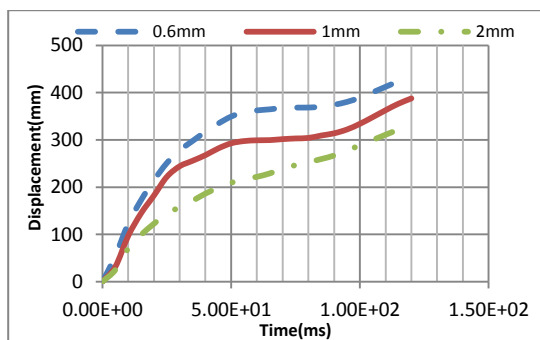
$$E_T = E_T^0 + W_{ext} \quad (1)$$

$$E_{kin} + E_{int} + E_{si} + E_{rw} + E_{damp} = E_{kin}^0 + E_{int}^0 + W_{ext} \quad (2)$$

شده انتظار می‌رود، انرژی کل سیستم با گذر زمان ثابت باشد و همچنین با کاهش انرژی جنبشی ضربه زنده که به عنوان انرژی جنبشی اولیه سیستم قلمداد می‌شود، انرژی درونی سیستم به تدریج به صورت انرژی جذب شده در قطعات افزایش یابد [۱۶].

۲-۶- بررسی تاثیر تغییرات ضخامت

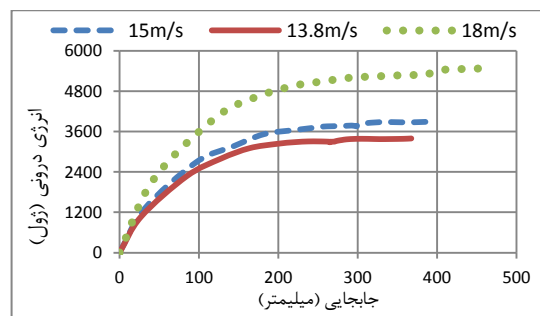
در این قسمت تاثیر تغییر ضخامت قطعه ستون میانی روی پارامترهای جابجایی، سرعت و انرژی بررسی شده است. شکل ۲۸، نمودار تغییرات جابجایی با تغییر ضخامت قطعه ستون میانی را نشان داده شده است. با افزایش ضخامت این قطعه و افزایش استحکام سازه جابجایی این قطعه در برخورد از جانب در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه کاهش پیدا کرده است.



شکل ۲۸- تغییرات جابجایی قطعه ستون میانی برای ضخامت‌های متفاوت در برخورد از جانب در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه

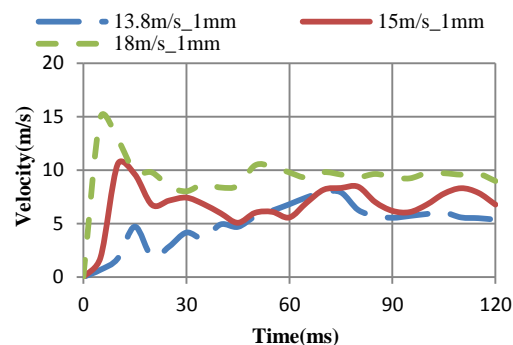
انرژی درونی، جنبشی و کل برای هر قطعه به صورت مجزا اندازه‌گیری می‌شود.

نمودار انرژی به جابجایی برای قطعه ستون میانی در شکل ۲۶ آورده شده است. بر طبق این نمودار مشخص است، با افزایش سرعت اولیه برخورد مانع با خورد، میزان جابجایی و همچنین انرژی درونی نقطه مرجع که روی ستون میانی قرار گرفته است، افزایش یافته است، این افزایش انرژی به گونه‌ای است که در زمان‌های اولیه برخورد، میزان آن با شیب زیادی افزایش می‌یابد و در ادامه برخورد به علت پرت شدن کل خودرو به عقب در اثر برخورد، جابجایی نقطه معیار رفته رفته افزایش یافته است، ولی انرژی درونی مقدار ثابتی شده است.



شکل ۲۶- نمودار انرژی درونی - جابجایی برخورد مانع با خودرو در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد

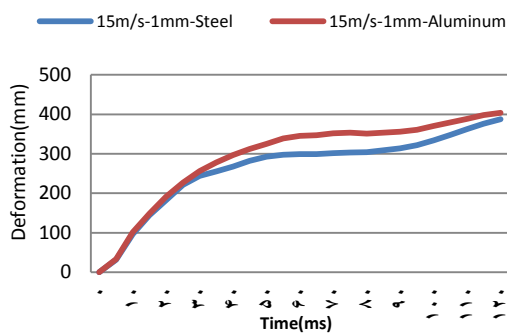
در شکل ۲۷، نمودار سرعت نقطه مرجع قرار داده شده روی ستون میانی در سرعت‌های برخورد مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به افزایش سرعت برخورد، انتظار می‌رود که سرعت نود روی ستون میانی نیز افزایش پیدا کند که در نمودار مشهود است.



شکل ۲۷- نمودار سرعت ستون میانی در سرعت‌های مختلف برخورد از جانب

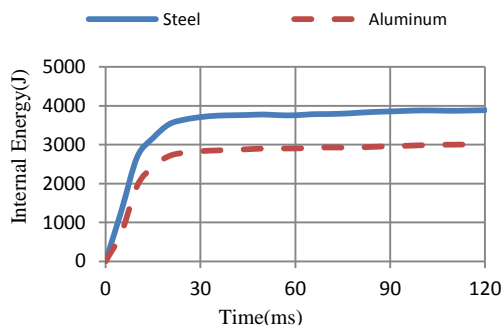
۳-۶- بررسی تأثیر تغییرات جنس

در این قسمت، قطعه ستون میانی و تقویته‌های آن در دو حالت با دو جنس فولاد و آلومینیوم در برخورد از جانب با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه مقایسه شده‌اند. شکل ۳۱، نمودار جابجایی را در دو حالت نشان می‌دهد، مطابق انتظار استفاده از آلومینیوم باعث افزایش جابجایی شده است.



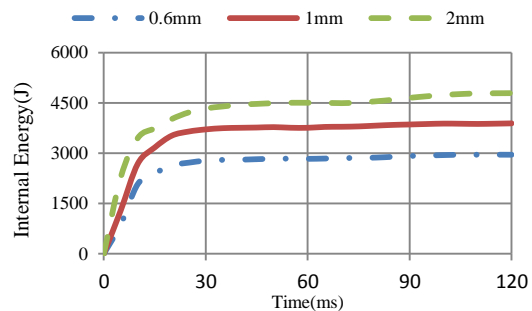
شکل ۳۱- نمودار جابجایی ستون میانی در برخورد از جانب با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه با تغییر جنس

شکل ۳۲، نمودار جذب انرژی ستون میانی را برای شرایط یاد شده نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص شده است، در شرایط برابر ستون میانی با جنس فولاد انرژی بیشتری دریافت کرده، جذب انرژی بیشتری داشته است، این مطلب به این معنا است که در قطعه ستونی میانی به دلیل اینکه بیشترین جذب انرژی را در بین مجموعه قطعات پانل جانبی هنگام برخورد مانع با جانب خودرو را دارا است، استفاده از آلومینیوم مفید نخواهد بود و پیشنهاد مناسبی برای این قطعه نمی‌باشد.



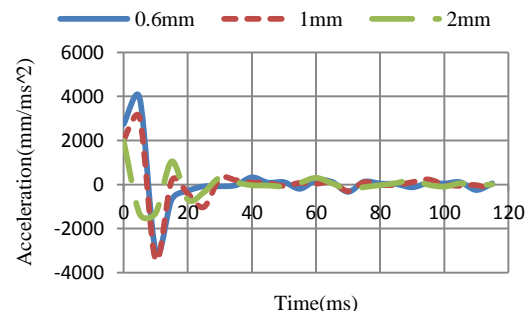
شکل ۳۲- نمودار جذب انرژی ستون میانی در برخورد از جانب با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه با تغییر جنس

شکل ۲۹، نمودار تغییرات انرژی درونی را تحت تأثیر تغییرات ضخامت قطعه ستون میانی در برخورد از جانب با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه نشان داده است. با افزایش ضخامت این قطعه در واقع مقدار جذب انرژی این قطعه افزایش پیدا کرده است و این موضوع، بیان‌گر این مطلب است که افزایش ضخامت قطعه ستون میانی، تأثیر مثبتی بر جذب انرژی برخورد داشته است.



شکل ۲۹- نمودار تغییرات انرژی درونی قطعه ستون میانی در ضخامت‌های مختلف این قطعه در برخورد از جانب با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه

نیروی وارد بر سرنشین، عامل اصلی صدمه به سرنشین هنگام تصادف است. این نیرو با شتاب وارد بر سرنشین در تصادف رابطه مستقیم دارد. سنسورهای کیسه هوا، سنسورهایی حساس به شتاب هستند و در مقدار شتاب‌های تعریف شده عمل می‌کنند پس شتاب به عنوان متغیر بسیار مهمی در تصادف قابل بررسی است. شکل ۳۰، نمودار شتاب ستون میانی را برای سه حالت بیان شده ارائه می‌دهد. انتظار می‌رود با کاهش ضخامت قطعات اصلی و افزایش سرعت در نقاط روی ستون میانی شتاب نیز افزایش پیدا کند.



شکل ۳۰- نمودار شتاب قطعه ستون میانی در ضخامت‌های مختلف این قطعه در برخورد از جانب با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه

International journal for numerical methods in engineering 22(3), pp. 497-519, 1986

[6] Finite Element Analytical Techniques and Applications to Structural Design

[7] K.schweizerhof, L.Nilsonn and J.O.Hellquist, \crashworthiness analysis in the automotive industry

[8] Z.Q. Chenga, J.G. Thackera, W.D. Pilkeya; *, W.T. Hollowellb, S.W. Reagana, E.M. Sievekaa” Experiences in reverse-engineering of a Finite element automobile crash model” Finite Elements in Analysis and Design 37 (2001) 843–860

[9] Wenguo Qi . X. L. Jin . X. Y. Zhang” Improvement of energy-absorbing structures of a commercial vehicle for crashworthiness using finite element method” Int J Adv Manuf Technol (2006) 30: 1001–1009

[10] Liqun Mei a,*, C.A. Thole b” Data analysis for parallel car-crash simulation results and model optimization” Simulation Modelling Practice and Theory 16 (2008) 329–337

[11] Popular Science - annual auto issue - russian technical skills-1958 - Jan.

[12] http://en.wikipedia.org/wiki/Insurance_Institute_for_Highway_Safety

[13] Yujiang Xianga, QianWanga, Zijie Fanb, Hongbing Fangc” Optimal crashworthiness design of a spot-welded thin-walled hat section” Finite Elements in Analysis and Design 42 (2006) 846 – 855

[14] Finite element modeling and mesh quality checks lecture 2 CE 264 Non linear finite element modeling and simulation- NCAC

[15] CAE analysis result, Porsche engineering services, October 2010.

[16] Evaluating the Structure and Crashworthiness of a 2020 Model-Year, Mass-Reduced Crossover Vehicle Using FEA Modeling produced by lotus engineerin

۷- نتیجه‌گیری

با بررسی نمودارهای خروجی نرم‌افزار، مشاهده شد که پانل جانبی، بیشترین تاثیر در برخورد از جانب را دارا است. به همین دلیل تغییرات روی این قطعه، مورد بررسی قرار گرفته است. بدیهی است که با افزایش سرعت مانع، مقدار انرژی جنبشی اولیه بوجود آمده در کل سیستم افزایش یافته است و در نتیجه مقدار جذب انرژی در ستون میانی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد با افزایش ضخامت قطعه پانل جانبی به منظور تقویت آن و همچنین بررسی تاثیر تغییرات ضخامت، میزان جذب انرژی آن افزایش یافته است. افزایش ضخامت قطعات، افزایش وزن قطعات را به طور محسوس در پی دارد، به همین دلیل افزایش ضخامت باید با بررسی افزایش وزن بدنه خودرو و در نظر داشتن محدودیت وزن سازه‌ای بدنه منفصل انجام گیرد که در این مقاله، به این موضوع توجه شده است.

با بررسی تغییر جنس فولاد به آلومینیوم در قطعه ستون میانی، نتیجه‌گیری می‌شود که قطعه ستونی میانی به دلیل اینکه مهمترین قطعه هنگام برخورد مانع با جانب خودرو است، استفاده از آلومینیوم مفید نخواهد بود. معمولاً جنس آلومینیوم به منظور سبک کردن قطعات خودرو به کار می‌رود و به دلیل مقاومت کمتر آن نسبت به فولاد و جذب انرژی کمتر آن، بهتر است این ماده برای قطعاتی استفاده شود که کمتر مورد برخورد و بار قرار می‌گیرند.

۸- مراجع

[۱] دکتر محمد شرعیات، اصول طراحی و تحلیل سازه و بدنه خودرو، ۱۳۸۸

[2] Donald E.Mallen, Fundamentals of Automobile Body Structure Design. 2011

[3] R. Winter, M. Mantus, and P. A.B., \Finite element crash analysis of a rear engine automobile," in 4th International Conference on Vehicle Structural Mechanics, pp. 55-61, 1981.

[4] E. Haug, F. Arnaudea, J. Du Bois, and A. Rouvay, \Static and dynamic finite element analysis of structural crashworthiness in automotive and aerospace industries," Structural Crashworthiness , pp. 175-217, 1983.

[5] J. Argyris, H. Balmer, J. St. Doltsinis, and A. Kurz, \Computer simulation of crash phenomena,"