



بهبود عملکرد ضربه‌پذیری لوله آلومینیومی AA7075 تحت بارگذاری ضربه‌ای با تغییر در هندسه

مسعود افروشه^۱ و جواد مرزبان‌راد^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده‌ی مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

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

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۱۱۱/۱۱/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۱۱۱/۱۱/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۱۱۱/۱۱/۱۱

چکیده

سازه‌های جدار نازک یکی از بهترین جاذب‌های انرژی در بارگذاری‌های ضربه‌ای بوده که به شکل‌های مختلف از جمله، لوله‌های استوانه و پروفیل‌های مربعی و به روش‌های مختلف مانند، بارگذاری محوری و مایل، مورد مطالعه قرار گرفته است. این سازه‌ها در صنایع مختلفی مثل، هوافضا، ریلی و حمل‌ونقل جاده‌ای استفاده می‌شود، خصوصاً در خودرو برای کاهش صدمه به سرنشین در تصادف کاربرد دارد. یکی از پارامترهای مهم در جهت بهبود عملکرد ضربه‌پذیری سازه، نیروی بیشینه عکس‌العمل در جاذب است که به بخش‌های بعدی خودرو و نهایتاً به سرنشین وارد می‌شود. در این تحقیق سعی شده است، جهت آزمون‌های تجربی از لوله‌های آلومینیومی ساخته شده از آلیاژ فوق سبک AA7075 با خاصیت جذب انرژی بالا استفاده شود. با در نظر گرفتن روابط تشکیل لولای پلاستیک در مقاطع جدار نازک، هندسه‌ای پیشنهاد شده که با ترکیب شدن بارگذاری محوری و بارگذاری مایل، بتوان نیروی بیشینه را بهتر کنترل کرد. با تغییر در هندسه سر لوله به فرم شیپوری، پس از انجام آزمون‌های تجربی و تطابق نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، تأثیر قوس ابتدای لوله مطابق روابط تحلیلی ارائه شده، سبب کاهش ۳۰٪ نیروی بیشینه اولیه شده است. همچنین اثر پارامترهای هندسی نیز مورد بررسی قرار گرفته است که در این خصوص نیز، نتایج قابل قبولی جهت کنترل نیروی بیشینه حاصل شده است. با تغییر ارتفاع قوس به دو برابر و نصف، نیروی بیشینه اولیه به ترتیب ۱۵٪ افزایش و ۲۰٪ کاهش داشته است.

کلمات کلیدی: آلومینیوم AA7075؛ بارگذاری ضربه‌ای؛ عملکرد ضربه‌پذیری؛ نیروی بیشینه؛ هندسه لوله

Improve the Crashworthiness Properties of AA7075 Tube under Axial Impact Loading by Geometrical Change

M. Afrousheh¹, J. Marzbanrad^{2,*}

¹ Ph.D. Student, School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

² Associate Professor, School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Thin-walled sections absorb impact energy very efficiently that were considered in the studies in different shapes such as square profiles and cylindrical tubes by various methods as axial collapse or oblique loading. These structures are used in a variety of industries, such as aerospace, railways and road transport, especially to reduce road accident injuries in vehicles. To improve the crashworthiness properties of the structures, the peak load of the absorbers that ultimately shocks the occupant is also of importance. In this study, the cylindrical tubes of ultra-light aluminum alloys AA7075 that have a high-energy absorbing property were used for empirical tests. By considering the relationships of plastic hinge formation in thin-walled sections, a new geometry has been proposed that combined the axial and oblique loadings, then the peak load was controlled completely. By changing the end-cap of the tubes to the nozzleed shape, after conducting empirical tests and validation of the finite element simulation results, according to analytical relation, the effect of this change was 30% reduction of initial peak load. Also, the effect of the geometry parameters has been studied. In this regard, to control the initial peak load, acceptable results are obtained. By changing the arc height by double and half, the peak load increased by 15% and decreased by 20%, respectively.

Keywords: Aluminum AA7075, Impact Loading, Crashworthiness Performance, Peak Load, Tube Geometry.

۱- مقدمه

حرکت به‌سوی خودروه‌های سبک‌تر، تبدیل به یک موضوع مهم مهندسی در صنعت خودروسازی امروز دنیا شده است. در این میان توجه به آلیاژهای آلومینیم به‌عنوان جایگزین اجزاء از جنس فولادهایی با استحکام نه‌چندان زیاد، افزایش پیدا کرده است؛ اما این جایگزینی نه باید درستی و بی‌عیبی ساختاری قطعات و نه خواص جذب انرژی خودرو هنگام تصادف را کم کرده و به خطر اندازد. سرعت‌های بالا در این عصر، سبب کاربرد گسترده جاذب‌های انرژی از شاتل‌های فضایی گرفته تا در بدنه خودرو شده است. [۱، ۲]. امروزه در طراحی و آزمایش انواع مختلف خودرو، شاخص ضربه‌پذیری^۱ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به این معنا که هر قدر صدمات وارد شده به خودرو و یا صدمات وارد شده به سرنشینان بعد از حادثه کمتر باشد، شاخص ضربه‌پذیری خودرو بزرگ‌تر است. برای بهبود شاخص ضربه‌پذیری یک خودرو، طراحی قطعات و اجزای خودرو بسیار اهمیت دارد. اختلاف جاذب‌های انرژی با ضربه‌گیرها در این است که برخلاف ضربه‌گیرها که با برگرداندن نیروی ورودی به شکل اولیه بازمی‌گردند و مکرر قابل‌استفاده‌اند، جاذب‌های انرژی به اجزای فدا شونده‌ای اطلاق می‌شود که طی تغییرشکل پلاستیک، انرژی مکانیکی جنبشی را تلف می‌کنند. از آنجایی که وزن سازه‌ها بسیار اهمیت دارد، در این بین سازه‌های جدار نازک از جمله لوله‌های استوانه‌ای از ویژگی نسبت جذب انرژی به جرم بالایی برخوردار هستند. در بحث جذب انرژی، دو فاکتور میزان انرژی جذب شده و میزان نیروی بیشینه به دلیل ضربه‌ای که به سرنشین وارد می‌شود، بسیار اهمیت دارد. بدین منظور تحقیقات فراوانی جهت افزایش انرژی جذبی و کاهش نیروی بیشینه انجام شده است [۳]. در این زمینه مطالعاتی روی شرایط بارگذاری و پارامترهای هندسه مدل مانند، ضخامت و تأثیر آن‌ها روی فاکتورهای جذب انرژی انجام شده و طرح‌های مختلفی از جمله، پروفیل‌های سوراخ‌دار جهت کاهش نیروی بیشینه اولیه پیشنهاد شده است. جرم و سرعت ضربه‌زننده نیز، روی نحوه تغییرشکل مدل، رفتار فروریزش [۴] و میزان نیروی بیشینه و انرژی جذبی تأثیرگذار است. رفتار غیرخطی و

گذرای مواد تحت بارگذاری ضربه‌ای، لزوم مطالعه این مدل‌ها را همچنان تأیید می‌کند [۵، ۶].

توانایی سازه در جذب انرژی و جلوگیری از صدمات وارده به سرنشینان وسیله نقلیه را خاصیت ضربه‌پذیری گویند. چنانچه یک سازه ایده‌آل در جذب انرژی در نظر گرفته شود، در مرحله اول می‌بایست انرژی جنبشی جذب گردیده و در مرحله بعد، اتلاف این انرژی در زمان مناسب از لحاظ اطمینان کاهش سرعت و سلامت سرنشین‌ها (مخصوصاً ضربات مغزی) صورت پذیرد. مقدار و نرخ جذب انرژی، هر دو از مشخصات خاص هر ماده بوده و برای دو ماده متفاوت در یک آزمایش مشابه، بازه طولانی‌تر جذب، نشان‌دهنده خاصیت ضربه‌پذیری بیشتر آن ماده است؛ پس اهمیت اندازه‌گیری زمان جذب انرژی مشخص می‌شود [۷، ۸].

ریس^۲ و همکاران [۹، ۱۰] در سال ۲۰۰۲، به تحلیل عددی و تجربی رفتار مچالگی اکستروژن‌های آلومینیومی AA6060 با بارگذاری شبه استاتیکی تحت سه زاویه پرداختند، که نشان دادند شکل مود تغییرشکل بستگی به هر دو زاویه بار و ضخامت ستون دارد. در این مطالعه نشان داده شد، هنگامی که بار به‌صورت مایل وارد می‌شود، فرایند جذب انرژی به‌صورت محسوسی در مقایسه با بار محوری کاهش می‌یابد. احمد^۳ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۹، به تحقیق در مورد خصوصیات جذب انرژی شیپوری‌های مخروطی شکل تحت بارگذاری مایل در برخورد پرداختند. شماتیک و مکانیزم انجام آزمایش تحت بار مایل و نحوه اعمال بار، در شکل ۱ نشان داده شده است؛ همچنین آزمون‌های تجربی بیشتری روی مقاطع مخروطی تقویت شده طی چند سال گذشته انجام شده است [۱۲، ۱۳].

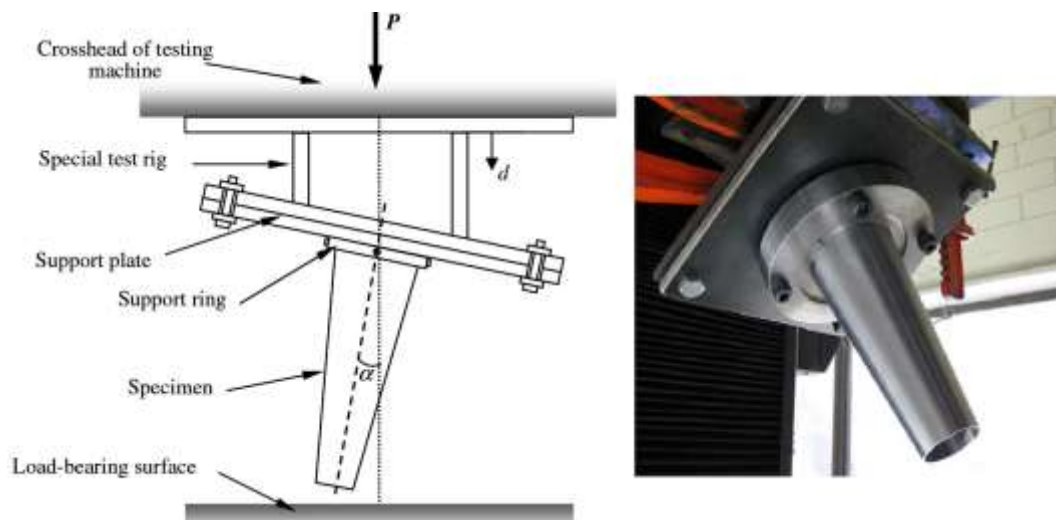
ناگل^۴ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۵، به مطالعه اثر ضخامت جداره، شیب مخروط و طول اضلاع یک پروفیل مخروطی با سطح مقطع مستطیلی روی قابلیت جذب انرژی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، استفاده از پروفیل‌های مخروطی و افزایش در زاویه مخروط، سبب کاهش نیروی بیشینه اولیه در بارگذاری شبه استاتیکی می‌شود؛ همچنین بر اساس نظریه‌های بیشینه، تنش روی جاذب‌های مختلف

² Reyes

³ Ahmad

⁴ Nagel

¹ Crashworthiness



شکل ۱- شماتیک و مکانیزم انجام آزمایش تحت بار مایل [۱۱]

نمونه‌های آلومینیومی ثابت کردند، پروفیل‌های استوانه‌ای مدور بیش‌ترین نیروی متوسط لهیدگی را در بین انواع سطح مقطع داشته و پروفیل‌های هرمی شکل و مخروطی، به دلیل منحنی نیرو-جابجایی یکنواخت و تفاوت ناچیز در نیروی بیشینه اولیه و نیروی متوسط برای بارگذاری‌های دینامیکی و ضربه مناسب‌تر هستند. در تحقیقات کاراگیوزوا [۲۱، ۲۲] تلاش شد، یک مدل تحلیلی برای مدل‌سازی کمناش این مقاطع به دست بیاید. در مقاله روسینک و همکاران [۲۳]، اثر موج الاستیک روی تاخوردگی مقاطع تحت برخورد مورد مطالعه قرار گرفت؛ اما مطالعه انجام شده تنها بر اساس روش اجزای محدود بود [۲۴، ۲۵، ۲۶].

مدل‌سازی اجزای محدود غیرخطی^۳ لوله‌ها و مقاطع مربعی جداره نازک تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی و دینامیکی با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری مانند آباکوس^۴، ال.اس.داین^۵، اوپسس^۶، دایانا.تری.دی^۷، پام کرش^۸ سالیان متممادی، مورد مطالعه قرار گرفته است. اتوبوشین^۹ [۲۷] اولین کسی بود که نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود غیرخطی خود را با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقایسه کرد.

انرژی و با هدف خودرویی تحقیقاتی انجام شده است. تغییرشکل لوله‌های جدار نازک تحت فشار محوری در چهار الگوی فروپاشی متقارن، نامتقارن، اوپلری و خمراهی صورت می‌گیرد. در این راستا اندرو^۱ و همکاران [۱۵]، اثر پارامترهای هندسی در الگوی کمناش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که برای لوله‌های با قطر یکسان، معمولاً لوله‌های جدار ضخیم به‌صورت متقارن و لوله‌های جدار نازک به صورت نامتقارن کمناش می‌نمایند. برخی از لوله‌ها نیز هنگام تغییرشکل از متقارن به نامتقارن، تغییر الگو می‌دهند. نتایج گوپتا^۲ و همکاران [۱۶، ۱۷]، در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷ نشان داد که قابلیت جذب انرژی در حالت بارگذاری دینامیکی ۱/۵۳٪ تا ۱۲/۳٪ بیش‌تر از حالت شبه استاتیکی است؛ همچنین نیروی بیشینه اولیه از ۱۴/۳۳٪ تا ۴۰/۲۵٪ افزایش یافته است.

در سال ۲۰۰۹ مرزبان و همکاران [۱۸]، روی ظرفیت جذب انرژی انواع پروفیل‌های مربعی، بیضوی و دایره‌ای با وزن یکسان پرداختند و ثابت کردند که پروفیل‌های بیضوی، بهترین جذب انرژی را دارند، همچنین در سال ۲۰۱۰ علوی‌نیا و همکاران [۱۹، ۲۰]، به بررسی ظرفیت جذب انرژی پروفیل‌های جدار نازک با انواع سطح مقطع پرداختند. با آزمایش‌های شبه استاتیکی و شبیه‌سازی عددی روی

^۳ Non-linear Finite Element Modeling

^۴ ABAQUS

^۵ LS-DYNA

^۶ OASYS

^۷ DYANA3D

^۸ PAMCRASH

^۹ Outbushin

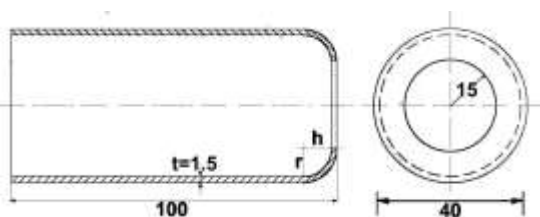
^۱ Andrews

^۲ Gupta

در ناحیه دوم است؛ بدین منظور با این رویکرد طراحی پیشنهاد شده که در بخش بعدی روی جزئیات طرح بحث می‌شود.

۲- لوله نازلی شکل

با توجه به مطالعات پیشین در خصوص جذب انرژی لوله‌های جدار نازک در برابر بارگذاری محوری، شروع جذب انرژی با یک نیروی بیشینه اولیه همراه است. میزان انرژی جذبی این مقاطع تحت بارگذاری مایل، کاهش قابل توجهی داشته، اما به دلیل بارگذاری خمشی نیروی بیشینه اولیه از بین می‌رود؛ بنابراین این ایده به ذهن می‌رسد که هندسه‌ای در نظر گرفته شود که جهت از بین بردن بیشینه نیرو شروع بارگذاری به‌صورت خمشی باشد و ادامه کار تحت بارگذاری محوری صورت گیرد تا جذب انرژی بهینه‌ای صورت پذیرد. جهت دست یافتن به این چنین هندسه‌ای، با به‌کارگیری تلفیق دو هندسه مختلف و با در نظر گرفتن مشکلات تولید و حفظ تقارن هندسی، مدلی شبیه یک لوله با ابتدای نازلی شکل در نظر گرفته شد که در شکل ۳، مشخصات هندسی مدل توضیح داده شده است. بدین گونه در بارگذاری محوری بخش ابتدای لوله تحت بارگذاری خمشی بوده و مابقی لوله تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرد. از آنجایی که آلیاژ آلومینیوم در نظر گرفته شده فقط به‌صورت شمش تولید می‌شود، نمونه‌های آزمایش مطابق شکل ۳ به روش تراشکاری آماده شده است. در ادامه تأثیر قوس ایجاد شده برحسب تئوری تشکیل لولای پلاستیک بررسی شده است.

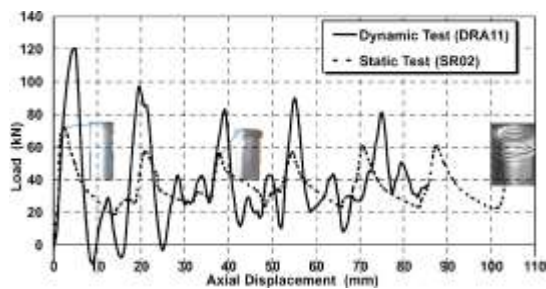


شکل ۳- نقشه فنی مدل لوله نازلی شکل جهت آماده‌سازی

مدل آزمون تجربی

در صورتی که مطابق شکل ۴-الف بارگذاری محوری مستقیماً به لوله استوانه‌ای وارد شود، در ابتدا نیاز به نیروی زیادی جهت ایجاد ممان و تشکیل لولای پلاستیک است.

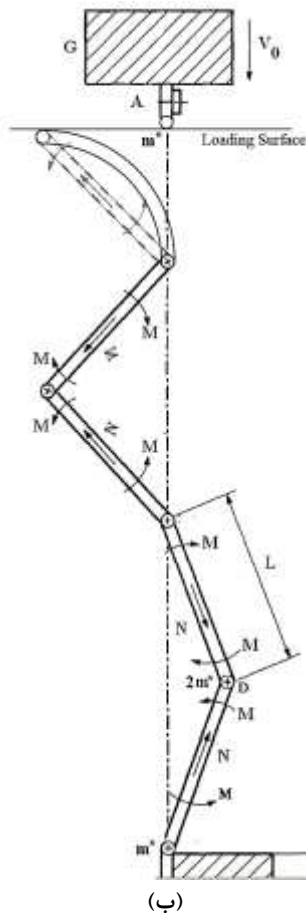
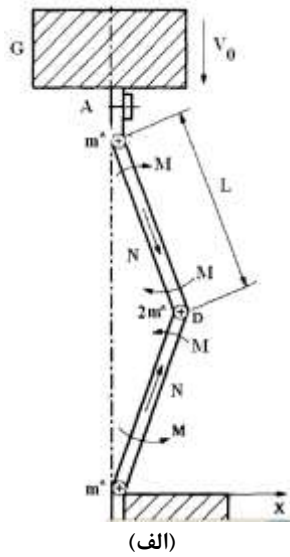
جاذب‌های انرژی جدار نازک استوانه‌ای تحت بارگذاری دینامیکی، بسته به هندسه و شرایط بارگذاری رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهند که در همه آن‌ها تغییر شکل‌های پلاستیک به فرم تاشدگی سبب استهلاک انرژی جنبشی می‌شود. تاشدگی شامل، ایجاد تغییر شکل‌های پی‌درپی و خم‌های محلی است، مانند اینکه لوله مطابق کنتورینا^۱ تاخوردگی باشد. کمانش پیش‌رونده دینامیکی و کمانش پلاستیک دینامیکی، یکی از متداول‌ترین روش‌های جذب انرژی در جاذب‌های لوله‌ای تحت اثر ضربه محوری است. از آنجایی که معمولاً چین‌خوردگی از یک انتهای لوله شروع و پیشروی می‌نماید، این پدیده، کمانش پیش‌رونده نامیده می‌شود. نمودار نیرو-جابجایی برای یک نمونه از این پدیده، روی شکل ۲ نشان داده شده است که در این منحنی سه ناحیه مهم وجود دارد، ابتدا پاسخ اولیه خطی-الاستیک که در قله قبل از افت بار پایان می‌یابد، سپس به‌صورت یک سری از نوسانات در اطراف تراز فشردگی ادامه می‌یابد؛ به‌طوری که هر نوسان بیانگر یک تاخوردگی کامل در لوله است. سرانجام زمانی که لوله به‌طور کامل فشرده شد، بار به‌سرعت افزایش می‌یابد. به این علت که تمام طول واقعی در این مود شکست به کار می‌رود، مقادیر قابل توجهی از انرژی جذب می‌شود [۲۸].



شکل ۲- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمون استاتیک و دینامیک و نمایش رفتار لهیدگی پیش‌رونده لوله جدار نازک آلومینیومی 6060 در بارگذاری محوری [۲۸]

هدف اول این تحقیق، کنترل بیشینه نیرو در ناحیه اول بوده تا از ضربه و شک شدید به سرنشین جلوگیری به عمل آید و هدف دوم، استفاده از بیشینه قابلیت جذب انرژی مواد

^۱ Concertina



شکل ۴- الف) مدل سازه جهت تحلیل لهیدگی مرحله اول
[۳۰] و ب) نمایش تشکیل لولای پلاستیک در لوله نازلی

همان گونه که در شکل ۴-ب نشان داده شده، قوس ایجاد شده را می توان با یک لولای از پیش شکل گرفته جایگزین کرد، بنابراین در نقطه B که شروع لوله تحت بارگذاری محوری است، یک گشتاور به واسطه انتقال نیرو از نقطه A به نقطه B ایجاد شده، از این رو جهت تشکیل لولای پلاستیک اول، نیاز به صرف نیروی کمتری است. برای ایجاد یک چین کامل، نیروی لهیدگی متوسط مطابق رابطه (۱) آبرامویچ و جونز [۲۹] محاسبه می شود:

$$\frac{P_m}{M_p} = 25.23 \sqrt{\frac{D}{t}} + 15.09 \quad (1)$$

t ضخامت دیواره، D قطر میانگین لوله و M_p گشتاور پلاستیک بر واحد طول است. میزان گشتاور مورد نیاز جهت تشکیل لولای پلاستیک برابر با رابطه (۲) است:

$$M_{P_0} = \frac{\sigma_0 t^2}{4} \quad (2)$$

σ_0 انرژی معادل تنش جریان، به مقدار لحظه ای تنش مورد نیاز جهت ادامه یافتن تغییر شکل پلاستیک برای حفظ جریان فلزی اطلاق می شود. مقدار این تنش، مابین تنش تسلیم و تنش شکست فلز به صورت رابطه بر مبنای کرنش نیز، قابل تعریف است. گشتاوری که بر اثر کمان ابتدایی لوله ایجاد می شود، برابر با رابطه (۳) است:

$$M_0 = \frac{h}{r} \left(\frac{m^* \times v^2}{2} \right) \quad (3)$$

M_0 گشتاور پلاستیک

h ارتفاع قوس بالای لوله مطابق شکل ۳

r شعاع قوس بالای لوله مطابق شکل ۳

m^* جرم متمرکز شده در بالای لوله

v سرعت برخورد چکش با لوله

بنابراین گشتاور M_0 به کمک گشتاور پلاستیک M_p می آید که بر اثر نیروی لهیدگی ایجاد می شود و گشتاور پلاستیک بر واحد طول M_{P_0} شکل می گیرد که برای تشکیل اولین لولای پلاستیک مطابق رابطه (۲) مورد نیاز است.

$$M_{P_0} = M_p + M_0 \quad (4)$$

در روش‌های آزمون ارزیابی، سپر خودروهای مسافری روش آزمون استاتیکی و آزمون آونگ تعریف شده است که استفاده از هر شیء دیگری به‌عنوان ضربه زننده قابل قبول است [۳۴].

اکثر تحقیقات پیشین در زمینه جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی از نمونه‌های با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و قطر حدود ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده گردیده و نتایج خوبی حاصل شده است [۳۵، ۳۶، ۳۷]. با مطالعه تحقیقات پیشین از جمله یامازاکی و هان^۱ [۳۸] که تکنیک‌های بهینه‌سازی قابلیت جذب انرژی را برای پروفیل‌های مدور در مسئله لهیدگی محوری توسعه دادند، ابعاد مدل و روش شبیه‌سازی انتخاب گردید. مدل‌ها در دو نوع لوله استوانه‌ای و لوله نازلی شکل به تعداد ۱۲ عدد جهت انجام آزمون تجربی تهیه شده است. شکل سازه چکش سقوطی^۲ آزمون دینامیکی در آزمایشگاه مکانیک ضربه دانشگاه تربیت مدرس، مطابق شکل ۵، از یک بالابرنده مغناطیسی چکش سقوطی تشکیل شده که فرایند جمع‌آوری اطلاعات خروجی توسط سنسور شتاب مستقر روی چکش متصل به دیتالاگر انجام می‌شود. این آزمون با ضربه زنی با جرم ۴۲ کیلوگرم که از ارتفاع ۳/۵ متری سقوط می‌کند انجام شده است.

گاهی آلیاژ AA7075 طی عملیات حرارتی ضمن تولید نمونه به فرم تمپر شده AA7075-T6 تبدیل می‌شود که رفتار ترد و شکننده‌ای از خود نشان می‌دهد. جهت تعریف خواص الاستیک-پلاستیک خطی فلزات در نرم‌افزار LS-DYNA، از کد موادی 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY استفاده می‌شود، اما در مورد فلزات ترد که قابلیت چکش‌خواری را ندارند، باید خواص موادی جانسون-کوک با کد 015-JOHNSON_COOK برای ماده موردنظر تعریف شود [۴۰]. ابتدا آنالیز شیمیایی (کوانتومتری) از نمونه تهیه شده، سپس برای اطمینان از تطابق خواص مکانیکی آلیاژ مورد آزمایش تست کشش انجام گردید؛ همچنین، خواص ویژه آلومینیوم از مراجع معتبر [۳۵] و [۳۹] تعریف شده است. خواص مکانیکی آلیاژی نمونه‌های AA7075 در

بنابراین نیروی لهیدگی جهت تشکیل اولین لولای پلاستیک P_{m_0} با توجه به رابطه (۲) و (۴) کاهش می‌یابد (رابطه ۵).

$$P_{m_0} = (M_{p_0} - M_0) \times \left(25.23 \sqrt{\frac{D}{t}} + 15.09 \right) \quad (5)$$

با بررسی نحوه تشکیل لولای پلاستیک در این مدل، مشخص می‌شود که کمان ابتدای لوله شبیه یک لولای از پیش ایجاد شده عمل می‌کند و به همین دلیل لولای بعدی با صرف نیروی کمتری ایجاد شده و ضمن کاهش نیروی بیشینه جهت ایجاد لولای پلاستیک، بخشی از نیروی ضربه‌ای ذخیره شده به پیشروی بیشتر تخریب لوله کمک کرده و میزان انرژی جذبی توسط لوله نیز افزایش می‌یابد. برای تحقیق تأثیر هندسه قوس روی میزان بیشینه نیرو، دو مدل با قوس‌های با ارتفاع دو برابر و نصف بررسی گردیده است. با توجه به روابط (۳) و (۵) نتیجه می‌شود که با کاهش ارتفاع قوس، نیروی بیشینه افزایش و با افزایش ارتفاع قوس، نیروی بیشینه کاهش می‌یابد.

ضمن اینکه بدون توجه به روابط تحلیلی و با مشاهده شکل ۴-ب مشاهده می‌شود که با ارتفاع قوس بیشتر، طول لولای پلاستیک بزرگ‌تر شده و بخصوص زاویه لولا به‌گونه‌ای قرار می‌گیرد که در راستای موج تشکیل لولای پلاستیک بوده، لذا در تشکیل لولای پلاستیک با صرف نیروی کمتر تأثیرگذارتر است. در این زمینه تحقیقات بیشتر با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود LS-DYNA انجام شده است.

۳- آزمون و اعتبارسنجی

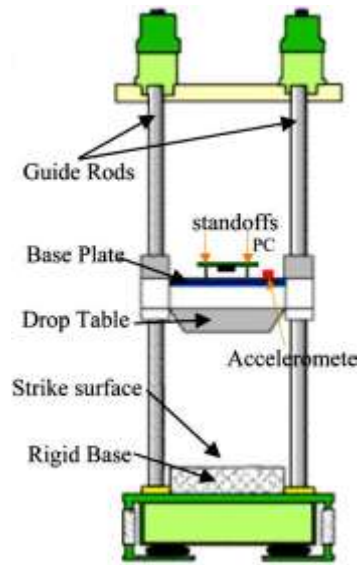
خودروها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که در تصادفات با سرعت بیشتر از 55 km/hr با جسم صلب، شتاب کاهش سرعت بیشتر از $20g$ نباشد، چراکه جراحات‌های داخلی، بخصوص ضربه‌مغزی را به دنبال دارد [۳۱]. استاندارد NCAP که در مورد ایمنی خودروها فعالیت می‌کند، معمولاً با توجه به نوع و ایمنی خودرو، تعدادی ستاره به آن تعلق می‌گیرد که بالاترین حد استاندارد، پنج ستاره بوده و در این حالت در شبیه‌سازی تصادف واقعی سرعت 56 km/hr در نظر گرفته می‌شود [۳۲، ۳۳]. بر اساس استاندارد بین‌المللی SAE J 980

¹ Yamazaki and Han

² Drop test



(ج)



(ب)



(الف)



(هـ)



(د)

شکل ۵- الف) نمای کلی چکش سقوطی، ب) شماتیک دستگاه آزمون دینامیکی، ج) محل قرارگیری حسگر شتاب سنج، د) نمایش وزنه سقوطی و هـ) دیتالاگر

جهت بررسی تأثیر قوس ابتدایی لوله، نمونه‌ها در دو فرم لوله استوانه‌ای و لوله نازلی شکل تهیه شده است. در شکل ۶، تصاویر دو مدل از نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون نمایش داده شده است. در لوله استوانه‌ای تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری همانند نظریه الکساندر-جونز [۴۱، ۴۲] چین‌خوردگی از پایین لوله شکل گرفته است. در مورد لوله نازلی شکل نیز، نظریه ارائه شده مطابق شکل ۴-ب صادق است.

جدول ۱ و پارامترهای استحکام و شکست جانسون-کوک برای شبیه‌سازی عددی در جدول ۲ آورده شده است [۳۹، ۳۵].

نسبت پارامترهای استحکام جانسون-کوک در جدول ۲ مطابق رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n) (1 + C \ln \varepsilon^*) (1 - (T^*)^m) \quad (6)$$

$\bar{\varepsilon}^*$ کرنش پلاستیک مؤثر، ε^* کرنش مؤثر نرمالیزه شده و T^* دمای همولوگ است [۳۹].



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

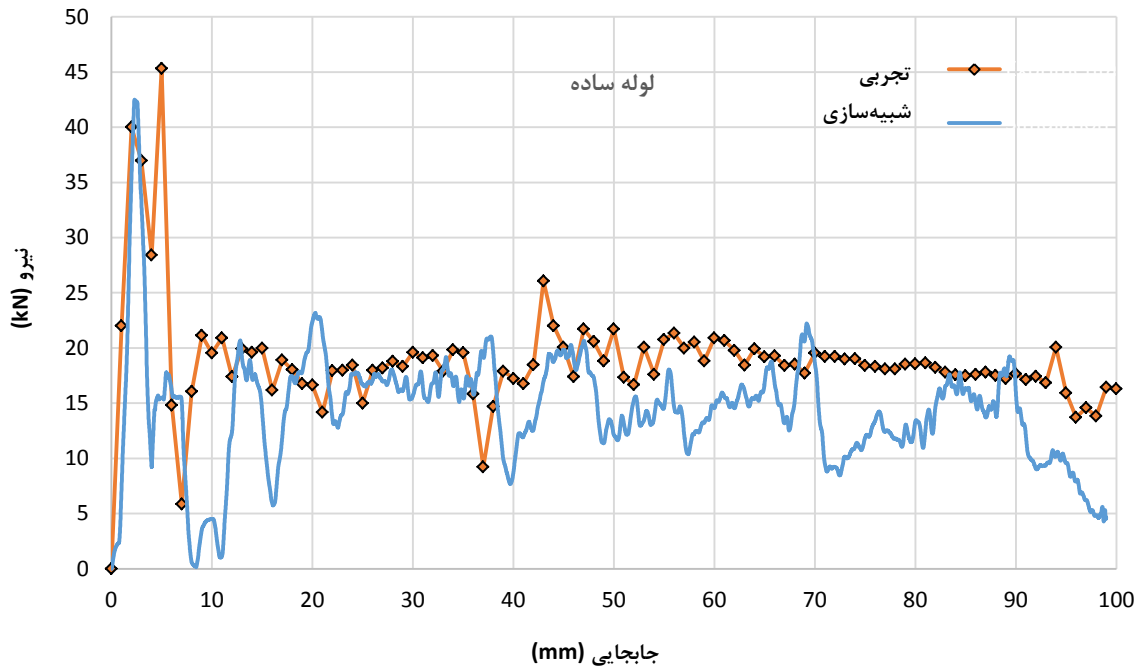
شکل ۶- تصاویر نمونه‌های آزمون تجربی الف) لوله استوانه‌ای قبل از آزمون، ب) بعد از آزمون، ج) لوله نازلی شکل قبل از آزمون و د) بعد از انجام آزمون

مطالعات بعدی طبق شرایط آزمون تجربی در نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود LS-DYNA انجام شده است و نتایج اعتبارسنجی گردیده است. شبیه‌سازی اجزای محدود در برابر آزمون تجربی، نتایج قابل قبولی داشته که نمودارهای نیرو-جابجایی آن‌ها در شکل ۷ و ۸ مقایسه شده است و از لحاظ نیروی بیشینه، نیروی متوسط لهیدگی (۸)، بازده نیروی لهیدگی (۹)، بازده ضربه (۱۰)، انرژی جذبی (۷) و انرژی جذبی ویژه^۱ (SAE) (۱۱) همخوانی خوبی دارند.

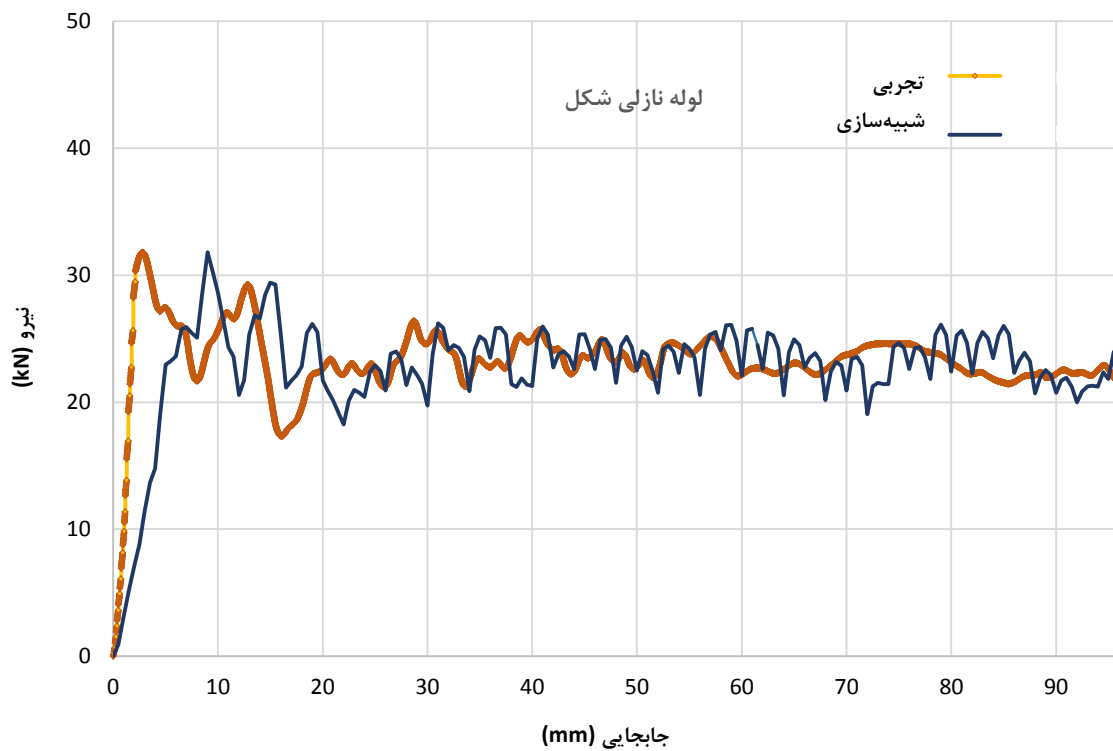
جدول ۱- خواص مکانیکی آلومینیوم نمونه AA7075 [۳۵]

خواص مکانیکی	نمونه	واحد	مقدار
چگالی	Al	kg/m ³	۲۷۸۰
مدول الاستیسیته	Al	GPa	۷۱
ضریب پواسون	Al	-	۰/۳۱
تنش تسلیم	Al	MPa	۵۰۰

^۱ Special Energy Absorbtion (SEA)



شکل ۷- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نتایج آزمون تجربی و شبیه سازی اجزای محدود برای مدل لوله ساده



شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نتایج آزمون تجربی و شبیه سازی اجزای محدود برای مدل لوله نازلی شکل

جدول ۲- پارامترهای استحکام و آسیب جانسون-کوک
نمونه AA7075-T6 [۳۹]

۲۶/۹	GPa	G	مدول برشی
۵۲۰	MPa	A	استحکام تسلیم
۴۷۷	MPa	B	کرنش سخت‌شوندگی
۰/۰۰۱		C	ثابت اصلاح‌شده حساسیت نرخ کرنش
۰/۵۲		n	پارامتر کرنش سخت‌شوندگی
۲۹۳	K	TR	دمای محیط
۸۹۳	K	TM	دمای ذوب شدن
۹۱۰	J/kg.K	CP	ظرفیت گرمایی ویژه
۱/۶۱		m	پارامتر نرم‌شوندگی گرمایی
پارامترهای آسیب جانسون-کوک $D_1=0.096, D_2=0.049, D_3=3.465, D_4=0.016, D_5=1.099$			

(۶) به مقدار ایده‌آل آن (یعنی جذب انرژی پلاستیک کامل $(F_{max}.\delta)$ است؛ همچنین نسبت نیروی لهیدگی متوسط (۸) بر حداکثر نیروی لهیدگی به‌عنوان بازده نیروی لهیدگی تعریف می‌شود:

$$A_E = \frac{E(\delta)}{F_{max}.\delta} = \frac{F_m}{F_{max}} \quad (9)$$

از این مقدار جهت برآورد یکنواختی بار لهیدگی نیز استفاده می‌شود. برای یک جذب انرژی ایده‌آل A_E برابر با یک است؛ اما هرچه این مقدار بزرگ‌تر و به یک نزدیک‌تر باشد مطلوب‌تر است. به‌طورمعمول ممکن است، یک جذب انرژی قادر به جذب انرژی موردنظر باشد؛ اما به دلیل نیروی بیشینه اولیه بالا قادر به تشکیل کمانش پیش‌رونده نگردد؛ درنتیجه برای حل این مشکل از شروع‌کننده‌های لهیدگی به‌منظور کاهش نیروی بیشینه اولیه و در نهایت افزایش بازده نیروی لهیدگی استفاده می‌کنند.

بازده ضربه مقیاسی است، برای مشخص نمودن این‌که در عمل چه مقدار از طول اصلی جذب انرژی برای تغییر شکل و جذب انرژی صرف شده است. بازده ضربه نسبت بین نقطه‌ای که در آن بازده کل، بیشترین مقدار را دارد (δ_{max}) و طول کل ستون لهیده شده تعریف می‌شود:

$$\delta_E = \frac{\delta_{max}}{L} \quad (10)$$

این پارامتر بیشترین لهیدگی مجاز در یک جذب انرژی را نشان می‌دهد و حتی در مورد جذب‌های ایده‌آل نمی‌تواند برابر یک باشد. انرژی جذبی ویژه قابلیت سازه نسبت به جذب انرژی تغییرشکل را نشان می‌دهد. انرژی مخصوص جذب شده سازه در واحد جرم برابر با جذب انرژی سازه تقسیم بر جرم آن است که طبق معادله (۱۱) بیان می‌شود:

$$SEA = \frac{E_{Absorbed}}{m} = \frac{\int_0^{\delta} F(x)dx}{m} = \frac{\int_0^{\delta} \sigma(\epsilon)d\epsilon}{\rho} \quad (11)$$

بالا بودن انرژی مخصوص جذب‌شده بالا به معنای یک جذب انرژی با بازده بالاست. به‌علاوه این نکته نیز حائز اهمیت است که کاهش وزن سازه عملکرد ایمنی و جذب انرژی آن را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد [۳۷]. درنهایت این پارامتر به‌منظور مقایسه جذب انرژی سازه‌ها با جرم‌های مختلف برای تعیین کارآمدترین آن‌ها فوق‌العاده مؤثر است.

سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی برابر با مقدار انرژی جذب شده است که این مقدار معیار مناسبی برای مقایسه ظرفیت تحمل جذب ضربه در جذب‌های انرژی است. میزان انرژی جذبی کل مطابق رابطه (۷)، با انتگرال‌گیری از منحنی نیرو-جابجایی محاسبه می‌شود.

$$E_{abs}(\delta) = \int_0^{\delta} F(x)dx \quad (7)$$

در این رابطه δ و F به ترتیب مقدار لهیدگی و نیرو هستند. با توجه به معادله بالا حداکثر بهره‌وری زمانی اتفاق می‌افتد که بیشترین لهیدگی ممکن در طول ضربه رخ دهد و بدین‌صورت حداکثر حجم از ماده به تغییرشکل پلاستیک برسد [۴۳]. نیروی لهیدگی متوسط در فاصله لهیدگی δ ، از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$F_m = \frac{E(\delta)}{\delta} \quad (8)$$

F_m نیروی متوسط لهیدگی، $E(\delta)$ مقدار انرژی جذب شده در فاصله لهیدگی و δ طول لهیدگی محوری پروفیل است [۴۴]. بازده نیروی لهیدگی برابر نسبت انرژی جذبی

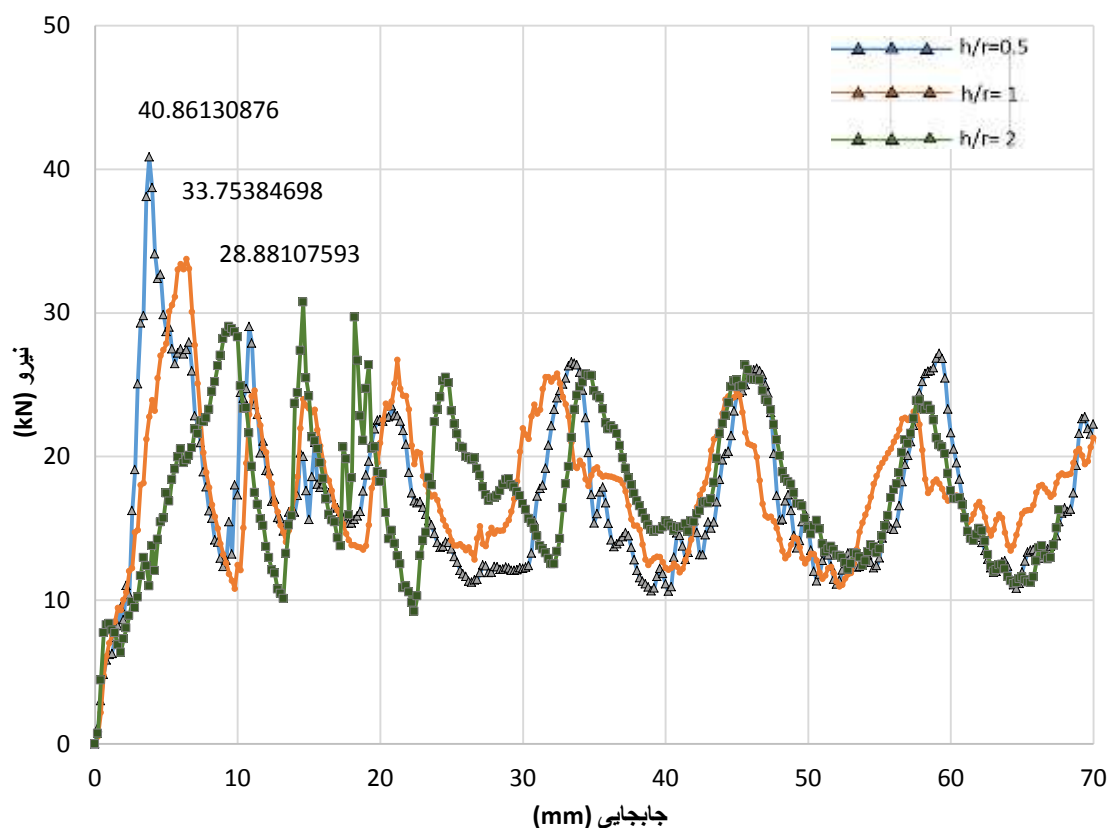
افزایش و قوس اثر خود را از دست داده و مقدار بیشینه نیرو به مقدار بیشینه نیروی لوله استوانه‌ای ساده نزدیک می‌شود.

جهت اطمینان بیشتر از این نتایج و اثبات روابط تحلیلی در مورد ارتفاع قوس، باید روند تغییرات نیروی بیشینه در مقایسه با تغییرات ارتفاع قوس ثابت بوده و دارای نوسان نباشد. بدین جهت با تغییرات جزئی نسبت h/r روند تغییرات در خواص ضربه‌پذیری مدل شامل نیروی بیشینه و انرژی جذبی بررسی شده و جهت مقایسه راحت‌تر در جدول ۳ جمع‌آوری شده است.

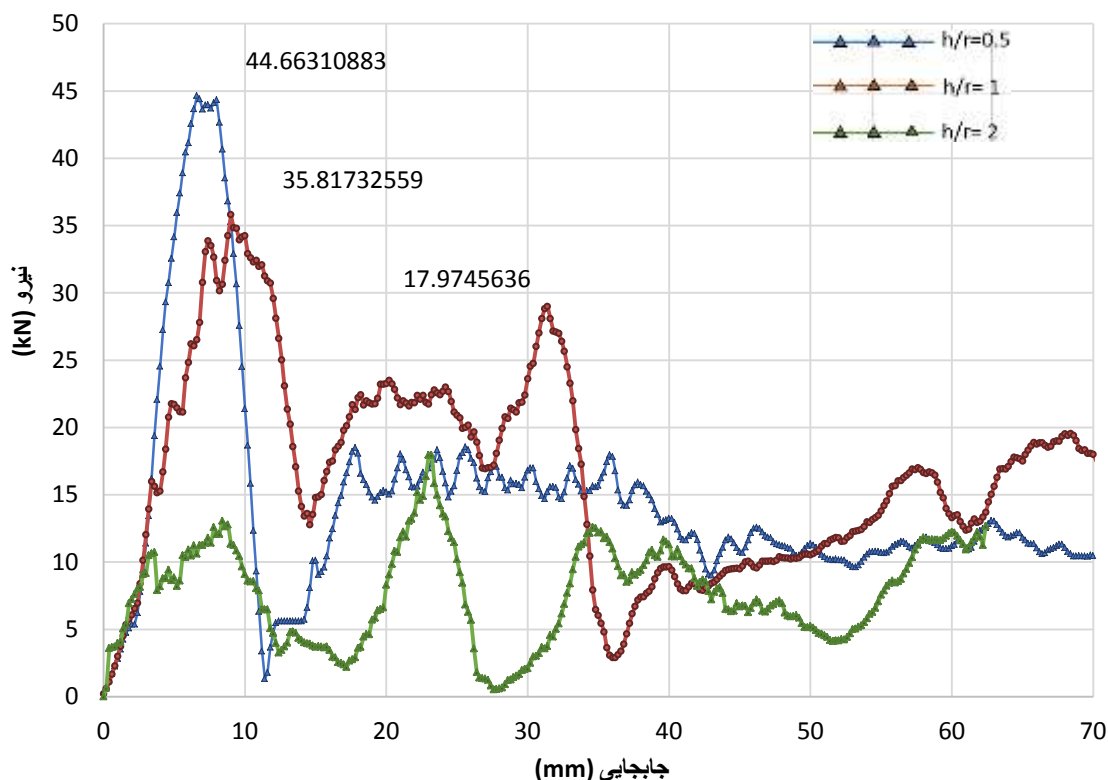
روند تغییرات یکنواخت نیروی بیشینه به نسبت تغییرات h/r در جدول ۳ کاملاً مشهود است. با تغییر ارتفاع قوس به دو برابر شعاع قوس میزان نیروی بیشینه نسبت به لوله نازلی شکل با شعاع و ارتفاع قوس یکسان،

پس از اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، مطالعات بیشتر جهت بررسی تأثیر ابعاد قوس بالای لوله انجام گرفته است. همان‌گونه که در بخش تحلیلی اثر ارتفاع قوس به شعاع قوس مورد بحث قرار گرفت، این تحقیق به صورت عددی نیز انجام گرفته است. بدین منظور جهت بررسی هندسه قوس روی رفتار هر دو نوع فلز AA7075 و AA7075-T6، شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شده است. در شکل ۹ و ۱۰ بین نمودار نیرو-جابجایی لوله‌های نازلی شکل با ارتفاع‌های متفاوت قوس و دو نوع جنس ماده مقایسه‌ای جهت بررسی نیروی بیشینه اولیه انجام شده است.

با توجه به نمودارهای شکل ۸ و ۹ با تمرکز روی نیروی بیشینه مشخص می‌شود که برای هر دو آلیاژ تأثیر ارتفاع قوس یکسان بوده و با افزایش ارتفاع قوس نیروی بیشینه کاهش یافته و با کاهش ارتفاع قوس نیروی بیشینه



شکل ۹- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی سه لوله نازلی شکل از آلیاژ AA7075 با نسبت‌های متفاوت h/r



شکل ۱۰- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی سه لوله نازلی شکل از آلیاژ AA7075-T6 با نسبت‌های متفاوت h/r

ایجاد می‌شود. هر دو نیروی بیشینه از نیروی بیشینه‌ای که در لوله مستقیم رخ می‌دهد کمتر است.

۴- جمع‌بندی

پیشرفت روزافزون علوم تأثیر عواملی که در زمینه جذب انرژی، تا به امروز به آن‌ها توجه نشده را روشن‌تر نموده و بیان می‌کند که زمینه مطالعه روی مسائلی که سال‌ها مورد تحقیق قرار گرفته، همچنان ادامه دارد. در خصوص جذب‌های انرژی نیز علاوه بر شرایط آزمون از قبیل، جرم و سرعت ضربه زننده که پیش‌تر مورد مطالعه قرار گرفته، خواص فلزی مدل مورد استفاده نیز، بر رفتار مواد تأثیر بسزایی دارد و می‌توان با تحقیقات بیشتر در این زمینه به نتایج بهتری دست یافت. یکی دیگر از عواملی که شاید مطالعه آن ساده و ارزان به نظر رسد، که در این تحقیق با هدف کنترل نیروی بیشینه هنگام برخورد جاذب انرژی طی ضربه انجام شد، هندسه مدل است. در این زمینه مشخص شد که با ایجاد یک قوس کمانی شکل در ابتدای لوله‌ای که تحت بارگذاری

کاهش یافته و با تغییر ارتفاع قوس به نصف شعاع قوس میزان نیروی بیشینه ۱۵/۶۲٪ افزایش یافته است. از آنجایی که هدف از ایجاد قوس در بالای لوله کنترل نیروی بیشینه بوده و مابقی روند نیرو جهت جذب انرژی نباید تغییر کند، از نتایج مندرج در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود که با تغییر ارتفاع قوس میزان انرژی جذبی تغییرات جزئی داشته و لوله نازلی شکل علاوه بر کنترل نیروی بیشینه، تأثیر منفی در روند جذب انرژی نداشته است.

قوس ابتدای لوله باعث می‌شود تا هم‌زمان با تشکیل لولای پلاستیک اولیه، لولای پلاستیک دیگری به سبب قوس اولیه نیز شکل بگیرد؛ بنابراین نیروی بیشینه اولیه جهت تشکیل لولای پلاستیک اولیه در لوله مستقیم به دو نیروی بیشینه کمتر تبدیل شده که نیروی بیشینه اول، جهت امتداد لولای پلاستیک در محل قوس ابتدای لوله بوده و نیروی بیشینه دوم با فاصله زمانی بسیار کم و اندکی بیشتر از نیروی بیشینه اولیه بعد از آن جهت تشکیل لولای پلاستیک کامل

۵- مراجع

- [1] Hamouda AMS, Saied RO, Shuaib, FM (2007) Energy absorption capacities of square tubular structures. *J Achiev Mater Manuf Eng* 24(1): 36-42.
- [2] Makinejad MD (2007) Development of fiber-reinforced epoxy composite energy absorber for automotive bumper system. Doctoral dissertation, Universiti Putra Malaysia.
- [۳] آذرخش س، رهی ع، قمریان ع (۱۳۹۵) بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌های برنجی. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۹۶-۱۸۱ (۲): ۶.
- [۴] پیرمحمد س، اسماعیلی مرزدشتی س (۱۳۹۶) مقایسه عملکرد جذب انرژی سازه‌های چند جداره مربعی و دایروی با استفاده از روش کپراس و بهینه‌سازی سازه دایروی با استفاده از روش سطح پاسخ. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۴۷-۱۳۳ (۳): ۷.
- [5] Ghamarian A, Zarei HR, Abadi MT (2011) Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes. *Thin Wall Struct* 49(10): 1312-1319.
- [6] Song J, Chen Y, Lu G (2013) Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing. *Int J Mech Sci* 66: 239-248.
- [7] Mahdavi S, Mahmoodi A, Pasandidehpour M, Marzbanrad J (2017) Experimental and numerical investigation on cutting deformation energy absorption in circular tubes under axial impact loading by damage criterions. *Thin Wall Struct* 120: 269-281.
- [8] Marzbanrad J, Mashadi B, Afkar A, Mahdavi S (2016) A Comparison between cutting and folding modes of an extruded aluminum alloy tube during impact using ductile failure criterion. *Mech Ind* 17(2): 208-216.
- [9] Reyes A, Langseth M, Hopperstad OS (2002) Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: Experiments and numerical analyses. *Int J Mech Sci* 44(9): 1965-1984.
- [10] Reyes A, Hopperstad OS, Langseth M (2004) Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study. *Int J Solids Struct* 41(5-6): 1645-1675.
- [11] Ahmad Z, Thambiratnam DP, Tan ACC (2010) Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading. *Int J Impact Eng* 37(5): 475-488.
- [12] Nouri MD, Hatami H (2014) Experimental and numerical study of the effect of longitudinal reinforcements on cylindrical and conical absorbers

ضربه‌ای محوری قرار دارد، می‌توان با تبدیل بخشی از بارگذاری محوری به بارگذاری مایل، ضمن کاهش نیروی بیشینه اولیه، ممان ایجاد شده به واسطه این قوس به کمک ممان لازم جهت تشکیل لولای پلاستیک آمده و لهیدگی پیشروی بیشتری دارد؛ همچنین با مدل کردن قوس بالای لوله به فرم لولای از پیش شکل گرفته، نتایج نشان می‌دهد که زاویه این لولای بر میزان نیروی بیشینه اولیه تأثیرگذار بوده، به گونه‌ای که با افزایش ارتفاع و قرار گرفتن کمان در راستای تشکیل موج پلاستیک درون لوله، نیروی بیشینه کاهش یافته و برعکس با کاهش ارتفاع قوس، اثر آن کم شده و نتایج به نتایج لوله ساده استوانه‌ای نزدیک شده است. با این‌حال، تحقیقات بیشتر در زمینه نسبت شعاع قوس به قطر لوله و ضخامت لوله می‌تواند انجام گیرد.

جدول ۳- مقادیر نیروی بیشینه و انرژی جذبی لوله نازلی
شکل با نسبت‌های متفاوت h/r

نسبت h/r	نیروی بیشینه (kN)	انرژی جذبی (kJ)
2	35.9	1.15E+01
1.8	44.4	1.18E+01
1.6	48.3	1.22E+01
1.4	49.0	1.20E+01
1.2	49.9	1.18E+01
1.0	58.9	1.15E+01
0.83	51.2	1.20E+01
0.71	50.8	1.16E+01
0.63	67.5	1.18E+01
0.55	68.4	1.20E+01
0.50	68.1	1.17E+01

- [25] Hatami HA, Nouri MD (2015) Experimental and numerical investigation of lattice-walled cylindrical shell under low axial impact velocities. *Lat Am J Solids Stru* 12(10): 1950-1971.
- [26] Jahromi AG, Hatami H (2017) Energy absorption performance on multilayer expanded metal tubes under axial impact. *Thin Wall Struct* 116: 1-11.
- [27] Otubushin A (1998) Detailed validation of a non-linear finite element code using dynamic axial crushing of a square tube. *Int J Impact Eng* 21(5): 349-368.
- [28] Al Galib D, Limam A (2004) Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes. *Thin Wall Struct* 42(8): 1103-1137.
- [29] Abramowicz W, Jones N (1986) Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *Int J Impact Eng* 4(4): 243-270.
- [30] Su XY, Yu TX, Reid SR (1995) Inertia-sensitive impact energy-absorbing structures part I: effects of inertia and elasticity. *Int J Impact Eng* 16(4): 651-672.
- [31] Jacob GC, Fellers JF, Starbuck JM, Simunovic S (2004) Crashworthiness of automotive composite material systems. *J Appl Polym Sci* 92(5): 3218-3225.
- [32] European New Car Assessment Programme (EuroNCAP) (2004) Frontal Impact Testing Protocol, Version 4.1.
- [33] European New Car Assessment Programme (EuroNCAP) (2004) Pedestrian Testing Protocol, Version 4.1.
- [34] Jarén C, Alfaro JR, Arazuri S, de León JP, Arana JI (2009) Assessing rollover safety provided by ROPS tests following SAE standard J1194 versus OECD code 4. *T ASABE* 52(5): 1453-1460.
- [35] Yamada H, Tsurudome M, Miura N, Horikawa K, Ogasawara N (2015) Ductility loss of 7075 aluminum alloys affected by interaction of hydrogen, fatigue deformation, and strain rate. *Mat Sci Eng A-Struct* 642: 194-203.
- [36] Kathiresan M, Manisekar K (2016) Axial crush behaviours and energy absorption characteristics of aluminium and E-glass/epoxy over-wrapped aluminium conical frusta under low velocity impact loading. *Compos Struct* 136: 86-100.
- [37] Reddy TY, Wall RJ (1988) Axial compression of foam-filled thin-walled circular tubes. *Int J Impact Eng* 7(2): 151-166.
- [38] Yamazaki K, Han J (2000) Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells. *Adv Eng Softw* 31(6): 425-434.
- [39] Jorgensen KC, Swan V (2014) Modeling of armour-piercing projectile perforation of thick under impact loading. *Indian J Sci Technol* 7(2): 199-210.
- [13] Nouri MD, Hatami H, Jahromi AG (2015) Experimental and numerical investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading. *Struct Eng Mech* 54(6): 1245-1266.
- [14] Nagel GM, Thambiratnam DP (2005) Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes. *Thin Wall Struct* 43(8): 1225-1242.
- [15] Andrews KRF, England GL, Ghani E (1983) Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading. *Int J Mech Sci* 25(9-10): 687-696.
- [16] Gupta NK (2004) Experimental and numerical studies of the collapse of thin tubes under axial compression. *Lat Am J Solids Stru* 1(2): 233-260.
- [17] Gupta NK (2007) Experimental and numerical studies of impact axial compression of thin-walled conical shells. *Int J Impact Eng* 34(4): 708-720.
- [18] Marzbanrad J, Mehdikhanlo M, Pour AS (2010) An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish J Eng Env Sci* 33(3): 159-166.
- [19] AlaviNia AA, Nejad KF, Badnava H, Farhoudi HR (2012) Effects of buckling initiators on mechanical behavior of thin-walled square tubes subjected to oblique loading. *Thin Wall Struct* 59: 87-96.
- [۲۰] علوی‌نیا ع، فرشاد ع (۱۳۹۳) بررسی تجربی و عددی تاثیر هندسه مقطع و فوم فلزی بر روی تغییرشکل و ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های جدارنازک. *مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۶۳-۵۱: ۴(۱).
- [21] Karagiozova D, Alves M (2004) Transition from progressive buckling to global bending of circular shells under axial impact—Part I: Experimental and numerical observations. *Int J Solids Struct* 41(5-6): 1565-1580.
- [22] Karagiozova D, Alves M (2004) Transition from progressive buckling to global bending of circular shells under axial impact—Part II: Theoretical analysis. *Int J Solids Struct* 41(5-6): 1581-1604.
- [23] Rusinek A, Zaera R, Forquin P, Klepaczko JR (2008) Effect of plastic deformation and boundary conditions combined with elastic wave propagation on the collapse site of a crash box. *Thin Wall Struct* 46(10): 1143-1163.
- [24] Hatami H, Rad MS, Jahromi AG (2017) A theoretical analysis of the energy absorption response of expanded metal tubes under impact loads. *Int J Impact Eng* 109: 224-239.

- [43] Alghamdi AAA (2001) Collapsible impact energy absorbers: An overview. *Thin Wall Struct* 39(2): 189-213.
- [44] Lu G, Yu TX (2003) Energy absorption of structures and materials. Elsevier, England: Woodhead Publishing ltd and CRC Press LLC.
- [۴۵] پیرمحمد س، اسماعیلی مرزدشتی س (۱۳۹۶) مقایسه عملکرد جذب انرژی سازه‌های چند جداره مربعی و دایروی با استفاده از روش کپراس و بهینه‌سازی سازه دایروی با استفاده از روش سطح پاسخ. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۷(۳): ۱۳۳-۱۴۷
- aluminium plates. In 13th Intern. LS-DYNA Users Conf (Vol. 8).
- [40] LS-DYNA, Keyword user's manual V971 (2014) VOLUME II Material Models, CA. Livemore software technology corporation.
- [41] Jones N (2011) Structural impact. Cambridge university press.
- [42] Alexander JM (1960) An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Q J Mech Appl Math* 13(1): 10-15.