



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



Research Article

Crashworthiness investigation of multi-component conical absorber with spherical cap under free inversion process: experimental study and numerical simulation

Sajad Azarakhsh¹, Mohammad Javad Rezvani^{2*}, Adel Maghsoudpour¹

1. Department of mechanical engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

*Corresponding Author: m.rezvani@semnaniau.ac.ir

PAPER INFO

Paper history:

Received: 12 October 2022

Revised: 18 February 2023

Accepted: 25 February 2023

Keywords:

Multi-component,
Conical,
Spherical cap,
Free inversion,
Initial peak load,

ABSTRACT

In this article, in order to provide energy absorption in thin-walled conical tubes under the inversion process, a new model of a multi-component conical absorber with a spherical cap is presented. For this purpose, by creating edges, a conical tube with a long length is divided into smaller components with different lengths and diameters. When the tube is subjected to axial loading, the process of deformation and dissipate of energy in this energy absorber is divided into two stages. The first stage is deformation of the spherical cap and the second stage is free inversion of each part of the conical inside next part. In other words, free inversion is formed by curling the edge of the components and then moving the tube wall downward. Therefore, the loss of energy absorption occurs with the bending of the spherical cap, the curling of the components edge and the circumferential contraction in the tube wall of each component. In this study, by using numerical simulation ABAQUS software, the effect of geometrical parameters, including cap type, number of conical components and semi-apical angle, on crashworthiness characteristics of the multi-component conical tubes are investigated. Also, in order to investigate the accuracy of the numerical simulation, some experimental tests were performed, which have obtained acceptable results. The results show that the proposed absorber model can be a suitable alternative for energy absorbers under the progressive buckling process.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.28676.2347>

How to cite this article:

Azarakhsh, S., Rezvani, M. J., & Maghsoudpour, A. (2023). Crashworthiness investigation of multi-component conical absorber with spherical cap under free inversion process: experimental study and numerical simulation. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(73),241-253. doi: 10.22075/jme.2023.28676.2347

بررسی ضربه پذیری جاذب مخروط چند جزئی با درپوش کروی تحت فرآیند وارونگی آزاد: مطالعه تجربی و شبیه سازی عددی

سجاد آذرخش^۱، محمدجواد رضوانی^{۲*}، عادل مقصودپور^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰</p> <p>بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹</p> <p>پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶</p> <p>واژگان کلیدی:</p> <p>چند جزء، مخروط، درپوش کروی، وارونگی آزاد، بیشینه نیروی اولیه.</p>	<p>در این مقاله، به منظور فراهم نمودن جذب انرژی در لوله های مخروط جدار نازک تحت فرآیند وارونگی، مدل جدیدی از جاذب مخروط چند جزئی با درپوش کروی ارائه شده است. برای این منظور، با ایجاد پله هایی در طول لوله، یک مخروط با طول زیاد به جزء های کوچکتر با طول ها و قطر های مختلف تقسیم می شود. هنگامی که لوله تحت بارگذاری محوری قرار می گیرد، فرآیند تغییر شکل و اتلاف انرژی در این جاذب انرژی به دو مرحله تقسیم می شود. مرحله اول تغییر شکل درپوش کروی و مرحله دوم وارونگی آزاد هر جزء مخروط در داخل جزء بعدی می باشد. به عبارتی با پیچ خوردن لبه جزء ها و سپس کشیده شدن دیواره لوله به سمت داخل، وارونگی آزاد شکل می گیرد. بنابراین اتلاف انرژی با خمیدگی درپوش کروی، پیچ خوردن لبه جزء ها و انقباض محیطی در دیواره لوله هر جزء بوجود می آید. در این مطالعه، با استفاده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس، اثر پارامترهای هندسی شامل نوع درپوش، تعداد جزء های مخروط و زاویه نیم رأس بر روی مشخصات ضربه پذیری لوله های مخروط چند جزئی بررسی می شود. همچنین، به منظور بررسی صحت شبیه سازی عددی، تعدادی تست تجربی انجام گردید که نتایج قابل قبولی حاصل شده است. نتایج نشان می دهد، که مدل جاذب پیشنهادی می تواند جایگزین مناسبی برای جاذب های انرژی تحت فرآیند کمانش پیش رونده باشد.</p>

۱- مقدمه

تغییر شکل پلاستیکی که از خود نشان می دهند سبب اتلاف انرژی حاصل از برخورد می شوند [۱].
درباره جاذب های انرژی شاخص های مهمی وجود دارد که با استفاده از آن ها می توان عملکرد جاذب ها را ارزیابی نمود. مهم ترین این شاخص ها شامل انرژی جذب شده (EA)، جذب انرژی ویژه یا انرژی جذب شده در واحد جرم جاذب (SEA)، بیشینه نیروی فروریزش (P_{max}) و متوسط نیروی فروریزش (P_m) می باشد [۲] با توجه به چگونگی طراحی جاذب ها و با اعمال نیروی محوری، دو مدل مکانیزم جذب

امروزه تلاش های زیادی در خصوص بهبود ایمنی جاده ها و کاهش آمار تصادفات جاده ای شده است، اما با این وجود همچنان تصادفات عامل مرگ و میر بسیار زیادی هستند. از این رو، محققان همواره بر بالا بردن سطوح ایمنی خودرو در تصادفات تاکید داشته اند. یکی از راه های کاهش خسارات ناشی از تصادفات رانندگی، استفاده از جاذب های انرژی جدار نازک در اجزای خودرو (از جمله سپر) می باشد. این جاذب ها زمانیکه تحت بار محوری قرار می گیرند با

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.rezvani@semnaniau.ac.ir

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. دانشیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

انرژی وجود دارد:

مکانیزم اول، ایجاد چین خوردگی یا کمانش پیش رونده در طول کل لوله می‌باشد. در این حالت، وقتی لوله به واسطه چین خوردگی انرژی را جذب می‌کند دارای نیروی بیشینه لهیدگی بالایی بوده و نوسانات نیرو در طول لوله زیاد می‌باشد که این می‌تواند باعث آسیب به سازه اصلی و سرنشینان شود [۳، ۴]. مکانیزم دوم، وارونگی لوله می‌باشد. وارونگی، حالتی از تغییر شکل لوله می‌باشد، که به صورت آزاد یا با استفاده از قالب انجام می‌شود. در وارونگی لوله بر روی قالب، لوله تحت نیروی محوری به صورت داخلی یا خارجی وارونه شده و منجر به جذب انرژی می‌شود. در این مکانیزم، نیروی بیشینه اولیه پایین بوده و تغییرات نیرو نیز در طول لوله یکنواخت و ملایم می‌باشد [۵].

جعفریان و رضوانی رفتار فروریزش لوله‌های چندبخشی مخروط درپوش دار و بدون درپوش تحت بارگذاری محوری را بررسی کردند. نتایج نشان داد که نیروی بیشینه اولیه در لوله‌های مخروط ساده بیشتر از لوله مخروط چند بخش‌ها است. همچنین مشخص گردید که با افزایش تعداد بخش‌ها در طول لوله مخروط، نیروی بیشینه اولیه کاهش و انرژی ویژه جذب شده افزایش می‌یابد [۶].

در زمینه وارونگی لوله‌های جدارنازک کارهای زیادی به صورت تحلیلی، شبیه سازی عددی و تجربی انجام شده است. سخون و همکاران به بررسی تجربی و عددی وارونگی خارجی لوله استوانه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که نحوه وارونگی خارجی لوله بر روی یک قالب در حالت تجربی و عددی تطابق خوبی دارند [۷].

نیک نژاد و معینی فرد فرآیند وارونگی خارجی لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای را به صورت تجربی و تئوری مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، یک مدل تئوری جدید برای پیش‌بینی نمودار نیرو-جابجایی ارائه گردید. مقایسه پیش‌بینی‌های تئوری و نتایج تجربی مطابقت خوبی را نشان داد. همچنین، تجزیه و تحلیل تئوری نشان داد که انرژی جذب شده و بار محوری در طول فرآیند وارونگی به ضخامت، قطر دیواره لوله، نوع مواد لوله و شعاع قالب بستگی دارد [۸].

کیو و همکاران یک مدل تئوری بهبود یافته از لوله استوانه‌ای آلومینیومی تحت فرآیند وارونگی خارجی را معرفی نمودند. نتایج نشان داد که در مقایسه با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود، مدل آن‌ها

پیش‌بینی‌های دقیق‌تری را در مورد نیروی وارونگی ارائه می‌دهد [۹].

لیو و همکاران به بررسی وارونگی لوله جدارنازک بر روی یک قالب مخروط پرداختند. در این تحقیق، از شبیه‌سازی اجزاء محدود برای اعتبارسنجی مدل تئوری استفاده گردید. نتایج نشان داد که نیروی فشاری پیش‌بینی شده توسط مدل تئوری با نتایج عددی مطابقت خوبی دارد [۱۰].

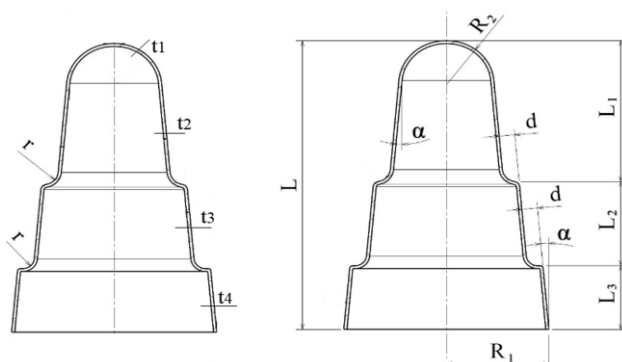
رجبیه فرد و همکاران فرآیند وارونگی داخلی لوله‌های فولادی تحت بار محوری را به صورت تحلیلی، عددی و تجربی با استفاده از یک قالب بررسی نمودند. مدل تحلیلی آنها براساس روش انرژی قادر به پیش‌بینی نیروی مورد نیاز برای وارونگی لوله با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت لوله است [۱۱].

لی و یو وارونگی خارجی لوله‌های موجدار (راه راه) جدارنازک را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که لوله‌های موجدار جدارنازک می‌توانند وارونگی بسیار پایدارتری در مقایسه با لوله‌های استوانه‌ای (بدون موج) داشته باشند [۱۲].

چهاردولی و همکاران به روش تجربی و عددی نحوه تغییر شکل جاذب انرژی ترکیبی تحت بارگذاری محوری را بررسی کردند. در جاذب ترکیبی (مخروط-استوانه) تحت بار محوری، ابتدا مخروط توسط استوانه وارونه می‌شود. هنگامی که نصف مخروط وارونه می‌شود، مخروط و استوانه‌ای به طور همزمان، انرژی را از طریق فرآیند کمانش پیش رونده جذب می‌کنند. در این تحقیق، بخش استوانه به عنوان یک سنبه عمل می‌کند که با وارونه کردن مخروط انرژی را جذب می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که جاذب ترکیبی می‌تواند انرژی ویژه را تا ۲۶ درصد در مقایسه با جاذب‌های متعارف افزایش دهد [۱۳].

تحقیقات نشان می‌دهد که تاکنون بر روی یک جاذب مخروط چند جزئی با درپوش کرومی که براساس فرآیند وارونگی آزاد و بدون استفاده از قالب یا سنبه انرژی را جذب نماید، کاری انجام نشده است. کلیه تحقیقات انجام شده در زمینه وارونگی توسط محققین، متمرکز بر روی لوله‌های استوانه بوده و در زمینه وارونگی آزاد لوله‌های مخروط تحقیقی انجام نشده است. بر این اساس، مقاله حاضر نوع جدیدی از جاذب مخروط را معرفی می‌کند که کارایی بالایی در جهت کاهش هزینه‌های تولید، کاهش وزن و افزایش طول وارونگی دارد. لذا، با تغییرات انجام شده در

وارونگی، از فیکسچری برای محدود کردن قطر بزرگ استفاده شده است. شکل (۲) جزئیات نمونه مخروط چند جزئی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، ضربه‌گیر دارای شعاع بزرگ R_1 ، شعاع درپوش کروی R_2 ، شعاع لبه r ، طول لبه بالایی d_u ، طول لبه پایین d_b و زاویه مخروط α است. علاوه بر این، ضخامت درپوش کروی t_1 ، ضخامت هر جزء t_2 ، t_3 و t_4 ، طول کل لوله L و طول هر یک از اجزا L_1 ، L_2 و L_3 در نظر گرفته شده است. ابعاد نمونه آزمایش تجربی در جدول ۱ آمده است. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم بر اساس استاندارد ASTM E8M-04، دو نمونه دمبلی شکل از ورق آلومینیوم برش داده شد و برای استخراج منحنی‌های تنش-کرنش، تحت آزمایش کشش شبه‌استاتیک قرار گرفت. منحنی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین خواص مکانیکی استخراج شده از شکل (۳) در جدول (۲) آورده شده است.

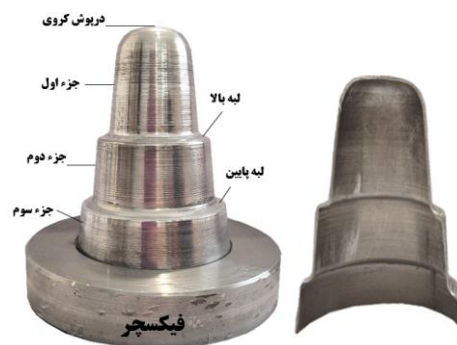


شکل ۲- جزئیات هندسی لوله مخروط چند جزئی

طول لوله مخروط درپوش کروی، امکان وارونگی آزاد ایجاد شده است. در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی عددی با نرم افزار آباکوس اثر پارامترهای هندسی شامل نوع درپوش، تعداد جزءهای مختلف مخروط و زاویه نیم راس مخروط بر روی مشخصات ضربه‌پذیری بررسی شده است. به منظور صحت شبیه‌سازی عددی تعدادی تست تجربی انجام شده که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. این نوع جاذب انرژی می‌تواند به عنوان یک سیستم کارآمد در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی، صنایع هوافضا و آسانسورها مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و طراحی

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، لوله مخروط چند جزئی با درپوش کروی از آلیاژ آلومینیوم سری ۱۰۵۰ با شکل‌دهی چرخشی فلزی ساخته شده است. برای جلوگیری از حرکت افقی و عمودی لوله در طی فرآیند



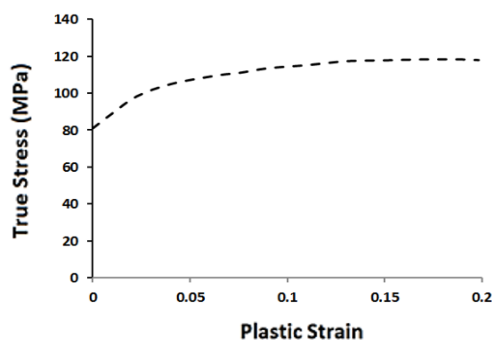
شکل ۱- لوله مخروط چند جزئی با درپوش کروی به همراه فیکسچر

جدول ۱- ابعاد نمونه تجربی

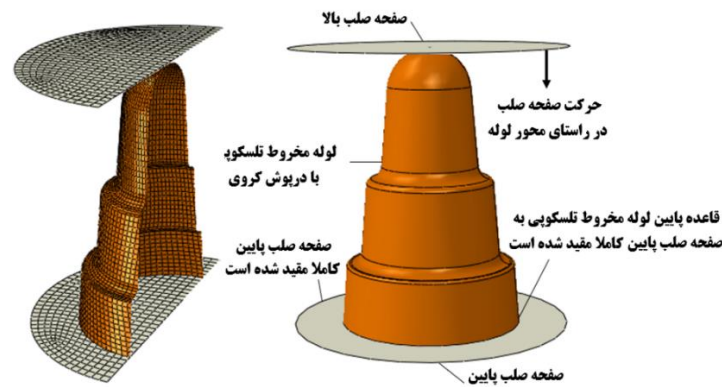
ابعاد (میلی‌متر)	R_2	R_1	d_u	d_b	r	L	L_1	L_2	L_3	t_1	t_2	t_3	t_4	α°
نمونه	۱۵/۳	۳۲/۷۵	۵	۵	۳	۱۰۰	۴۷	۳۱	۲۲	۱	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸	۵

جدول ۲- خواص مکانیکی لوله آلومینیومی

خواص	آلومینیوم
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۲۷۰۰
مدول یانگ (گیگاپاسکال)	۶۹
ضریب پواسون	۰/۳۳
استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	۸۰
استحکام نهایی (مگاپاسکال)	۱۲۰



شکل ۳- منحنی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک لوله آلومینیومی



شکل ۴- نمایی از نحوه مدل‌سازی یک نمونه از پوسته مخروط چند جزئی تحت شرایط مرزی یک سرگیردار

ایزوتروپیک ایجاد می‌شود. برای بررسی پاسخ لوله فقط نیاز است پاسخ آن در بارگذاری تحلیل شود و نیاز به تحلیل در مرحله باربرداری نیست. لذا خطای زیادی ناشی از فرض کار سختی ایزوتروپیک ایجاد نمی‌شود. همانطور که از شکل (۴) مشخص است، مشابه آزمایش فشرده‌سازی تجربی، هر صفحه صلب می‌تواند دارای شش درجه آزادی شامل سه مولفه جابه‌جایی و سه مولفه دوران باشد اما از آنجایی که صفحه صلب پایینی به فک ثابت دستگاه متصل است پس کلیه درجات آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، سطح صلب بالایی به فک متحرک متصل است که کلیه درجات آزادی آن غیر از جابه‌جایی در راستای محور پوسته مقید می‌شود. مطابق شکل (۴) بارگذاری به صورت جابجایی معین صفحه صلب بالایی است. با توجه به اینکه قاعده پایینی لوله‌های مخروط مقید است، لذا گره‌های واقع در انتهای لوله مخروط نمی‌توانند نسبت به گره‌های صفحه صلب پایینی حرکت داشته باشند و بایستی اتصال کاملی بین دو سطح برقرار گردد. قید بستن (Tie) اجازه می‌دهد تا دو ناحیه با مش‌های متفاوت با یکدیگر ترکیب گردد. بنابراین در این شبیه‌سازی برای مقید کردن قاعده پایینی لوله مخروط چند جزئی به صفحه صلب از قابلیت قید بستن استفاده شده است. لوله مخروط و صفحات صلب بالا و پایینی به ترتیب با استفاده از المان پوسته S4R و المان صلب R3D4 مدل‌سازی شدند. به منظور به دست آوردن پاسخ دقیق شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل حساسیت مش انجام گردید. شکل (۵) نمودار متوسط نیرو در مقابل تعداد المان را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌

۳- جزئیات تجربی و عددی

۳-۱ جزئیات تجربی

به منظور بررسی عملکرد جاذب‌های مخروط چند جزئی با درپوش کروی با مکانیزم وارونگی، آزمایش‌های تجربی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی انجام شد. تمام لوله‌های مخروط چند جزئی درپوش کروی، بین یک صفحه صلب متحرک بالایی و یک صفحه صلب ثابت پایینی با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه فشرده شدند. برای بررسی تکرارپذیری و دقت نتایج، آزمایش بر روی سه نمونه یکسان انجام گردید و میانگین مقادیر شاخص‌های عملکردی جاذب انرژی از جمله نیروی بیشینه اولیه، متوسط نیرو، ظرفیت جذب انرژی و جذب انرژی ویژه از نمودار نیرو-جابجایی نمونه استخراج شد. قابل ذکر است که تست‌های تجربی با استفاده از دستگاه کشش-فشار شبه‌استاتیک ۳۰ تنی سنتام انجام گردید.

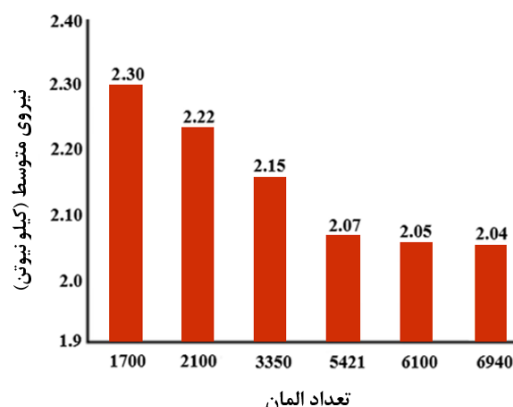
۳-۲ جزئیات شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی‌های عددی شبه‌استاتیک با استفاده از کد اجزاء محدود صریح آباکوس برای مطالعه فرآیند وارونگی و پارامترهای طراحی لوله‌های مخروط چند جزئی درپوش کروی توسعه داده شد. در نرم‌افزار المان محدود برای معرفی ناحیه الاستیک ماده، مدول یانگ و ضریب پواسون مطابق جدول (۲) تعریف می‌شوند و برای تعریف ناحیه پلاستیک، منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک نمونه مطابق شکل (۳) استفاده می‌شود. در این تحقیق با توجه به فروریزش شبه‌استاتیک از پلاستیسیته غیرحساس به نرخ کرنش استفاده می‌شود. همچنین فرض می‌شود که کار سختی

جزء اول نمونه‌ها در حدود ۱۰ درصد، جزء دوم در حدود ۱۵ درصد و جزء سوم در حدود ۲۰ درصد ضخامت اولیه نمونه‌ها تعیین گردید. بنابراین، به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی، ضخامت واقعی هر جزء مطابق جدول (۱) مدل سازی گردید. شکل (۶) مقایسه بین تغییرشکل نهایی آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی پس از اعمال بارگذاری محوری را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، تغییرشکل به شیوه وارونگی رو به داخل و به صورت متقارن محوری ایجاد شده است.

در شکل (۷) منحنی نیرو-جابجایی با توجه به ابعاد نمونه ذکر شده در جدول ۱ به صورت عددی و تجربی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو به طور خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد (ناحیه ۱). این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک نمونه‌ها تحت اثر بار فشاری قبل از آغاز تغییر شکل است. با شروع خمیدگی از ناحیه درپوش کروی، نیرو افت می‌کند (ناحیه ۲). سپس به منظور تغییر شکل در لبه بالایی نیرو افزایش می‌یابد (ناحیه ۳). با افزایش جابه‌جایی و ایجاد پیچیدگی در لبه مذکور، مجدداً نیرو افت می‌کند (ناحیه ۴). سپس با انتقال نیرو در لبه پایینی سبب می‌شود نیرو بار دیگر افزایشی گردد (ناحیه ۵). با افزایش جابه‌جایی و ایجاد پیچیدگی در لبه پایینی نیرو کاهش می‌یابد (ناحیه ۶). این درحالی است که با افزایش جابه‌جایی و ایجاد وارونگی در جزء دوم نیرو افزایش یافته (ناحیه ۷) و با انتقال نیرو جهت ایجاد وارونگی در جزء سوم مجدداً کاهش می‌یابد. بنابراین وجود نوسانات نیرو در نمودار نیرو-جابجایی شکل (۷) پس از اعمال جابه‌جایی به ترتیب مربوط به خمش درپوش کروی، پیچ خوردگی لبه بالا، پیچ خوردگی لبه پایینی، وارونگی جزء دوم و وارونگی جزء سوم می‌باشند.

شود، در مجموع ۵۴۲۱ المان S4R به عنوان مش بهینه برای شبیه‌سازی لوله‌ها انتخاب شدند. تماس بین صفحه صلب متحرک و درپوش کروی با استفاده از تماس سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰/۳ مدلسازی شد. برای در نظر گرفتن تماس بین لبه‌ها و دیواره‌های لوله در طول وارونگی، یک شرط خود تماسی برای جلوگیری از نفوذ بین هر سطح با خود در نظر گرفته شد.



شکل ۵- نیروی متوسط برحسب تعداد المان

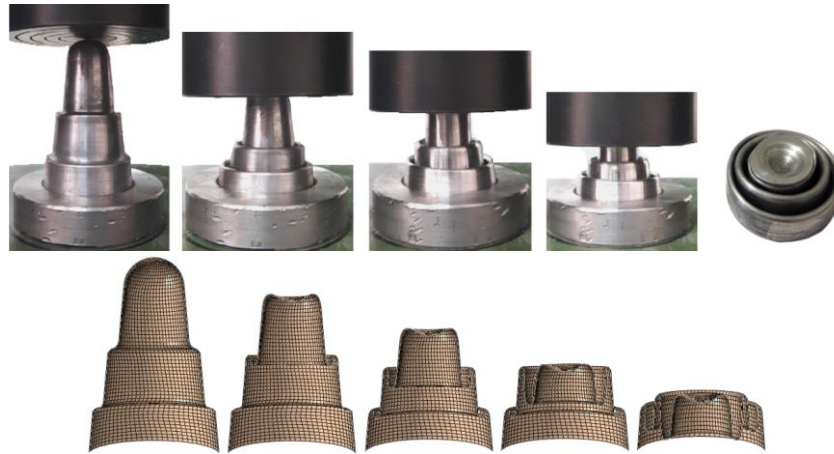
۴- بحث و بررسی

۴-۱- تحلیل وارونگی شبه استاتیکی

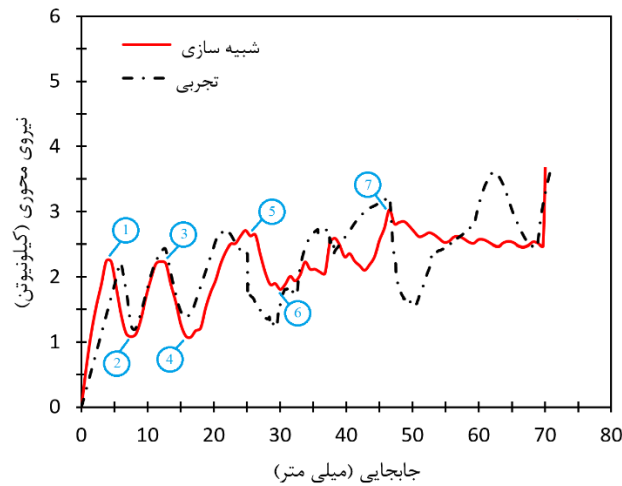
رفتار وارونگی محوری لوله مخروط چند جزئی با درپوش کروی به صورت عددی و تجربی در شرایط بارگذاری شبه‌استاتیک بررسی گردید. در عملیات شکل‌دهی ورق بر روی قالب (فرآیند چرخکاری) و تشکیل لوله‌های مخروط با درپوش کروی، تغییرات ضخامت در هر دیواره لوله مخروط مشاهده شد. ضخامت با استفاده از میکرومتر دیجیتال با حداقل دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. مقدار دقیق ضخامت دیواره لوله مخروط چند جزئی، از ۱ تا ۰/۸ میلی‌متر بدست آمد. تغییر ضخامت یکی از معایب اصلی ساخت نمونه‌های چند جزئی به روش چرخ‌کاری دستی است. پس از بررسی ضخامت دیواره‌ها، مقدار میانگین کاهش ضخامت

جدول ۳- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی لوله مخروط چند جزئی درپوش کروی تحت بار محوری

نتایج	$E_{absorbed} (J)$	$P_m (kN)$	$P_{initial} (kN)$	$SEA (J/g)$
تجربی	۹۴/۳۰	۱/۸۸	۲/۱۳	۳/۱۴
شبیه سازی عددی	۱۰۳/۵۴	۲/۰۷	۲/۲۳	۳/۴۵



شکل ۶- مراحل وارونگی لوله مخروط چندجزئی با درپوش کروی به طور تجربی و شبیه‌سازی عددی



شکل ۷- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی لوله مخروط چند جزئی درپوش کروی در حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی

طور منطقی پیش‌بینی کند.

۴-۲- بررسی پارامترهای هندسی

مطالعه پارامترهای هندسی بر روی لوله مخروط چند جزئی درپوش کروی از طریق شبیه‌سازی عددی انجام می‌شود. پس از اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی با آزمون تجربی مطابق با بخش ۴-۱، ضخامت هر یک از اجزای مخروط و درپوش کروی ثابت و برابر با ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که بقیه پارامترهای هندسی مشابه جدول (۱) می‌باشد.

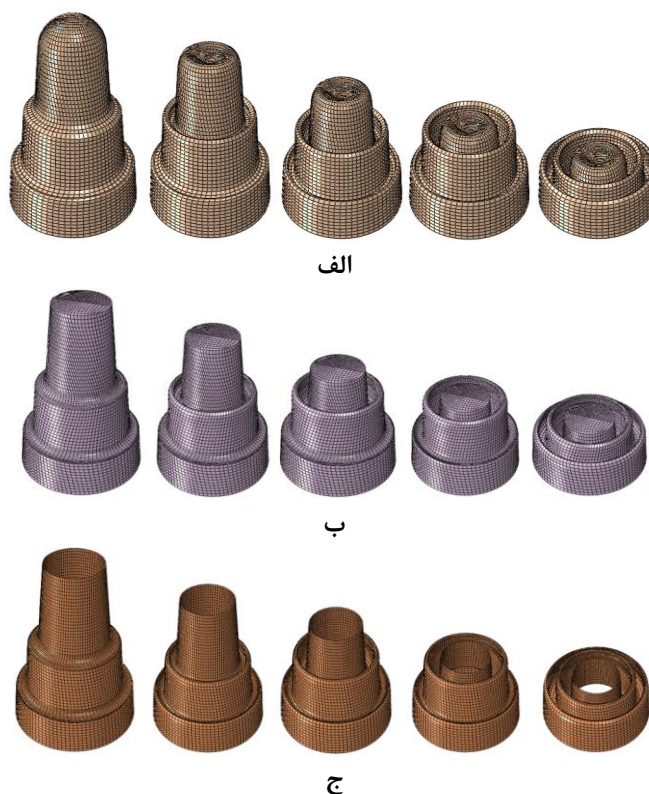
۴-۲-۱- اثر درپوش

الگوی وارونگی و منحنی‌های نیرو-جابجایی لوله‌های مخروط چند جزئی درپوش کروی، درپوش مسطح و بدون درپوش در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است.

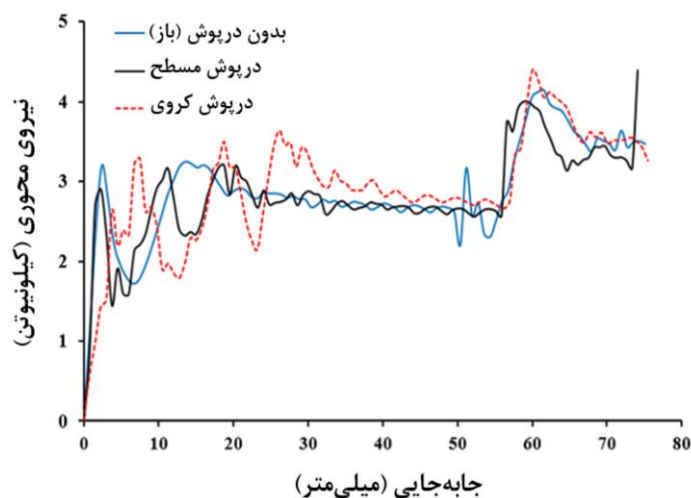
تغییر غیر خطی ضخامت مختلف جزءها و شعاع متفاوت پله‌ها در نمونه تجربی در نوسانات نیرو و اختلاف آن با شبیه‌سازی عددی تاثیر گذار می‌باشد. در جدول ۳ به مقایسه پارامترهای ضربه‌پذیری لوله مخروط چند جزئی درپوش کروی از جمله ظرفیت جذب انرژی (EA)، میانگین نیرو (P_m)، نیروی بیشینه اولیه (P_i) و جذب انرژی ویژه (SEA) در حالت تجربی و شبیه‌سازی پرداخته شده است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، حداکثر اختلاف بین نتایج در حالت تجربی و عددی برای جذب انرژی و نیروی بیشینه اولیه به ترتیب حدود ۹٪ و ۴٪ می‌باشد. بنابراین، اگر چه برخی ناهماهنگی‌ها در منحنی‌های نیرو-جابجایی و در محل شروع وارونگی جزءها وجود دارد، اما شبیه‌سازی عددی می‌تواند رفتار لوله‌ها را به

نیروهای تغییرشکل است. به طوری که با وجود درپوش کروی، بیشینه و کمینه نیروها افزایش می‌یابد. این امر به معنای افزایش سطح زیر نمودار نیرو-جاب‌جایی و یا به عبارت دیگر افزایش قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های مخروط چند جزئی درپوش کروی است.

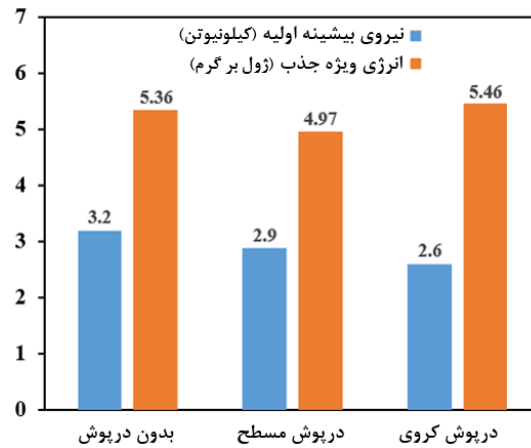
همانطور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود، تغییر شکل لوله‌ها، مشابه هم و بصورت وارونگی داخلی جزءهای لوله در ناحیه لبه بالایی و پایینی است. همچنین مطابق شکل (۹) تفاوت محسوسی در تغییرات نیرو به جز در نیروی بیشینه اولیه وجود ندارد. آنچه منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی سه نوع لوله را از یکدیگر متفاوت می‌کند، بیشینه و کمینه



شکل ۸- مقایسه مراحل تغییرشکل لوله مخروط چند جزئی: الف) درپوش کروی، ب) درپوش تخت، ج) بدون درپوش



شکل ۹- مقایسه نمودارهای نیرو-جاب‌جایی لوله مخروط چند جزئی بدون درپوش، درپوش مسطح و درپوش کروی



شکل ۱۰- مقایسه پارامترهای ضربه‌پذیری لوله‌های مخروط چند جزئی درپوش‌دار و بدون درپوش

جدول ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی لوله مخروط چند جزئی درپوش‌دار و بدون درپوش

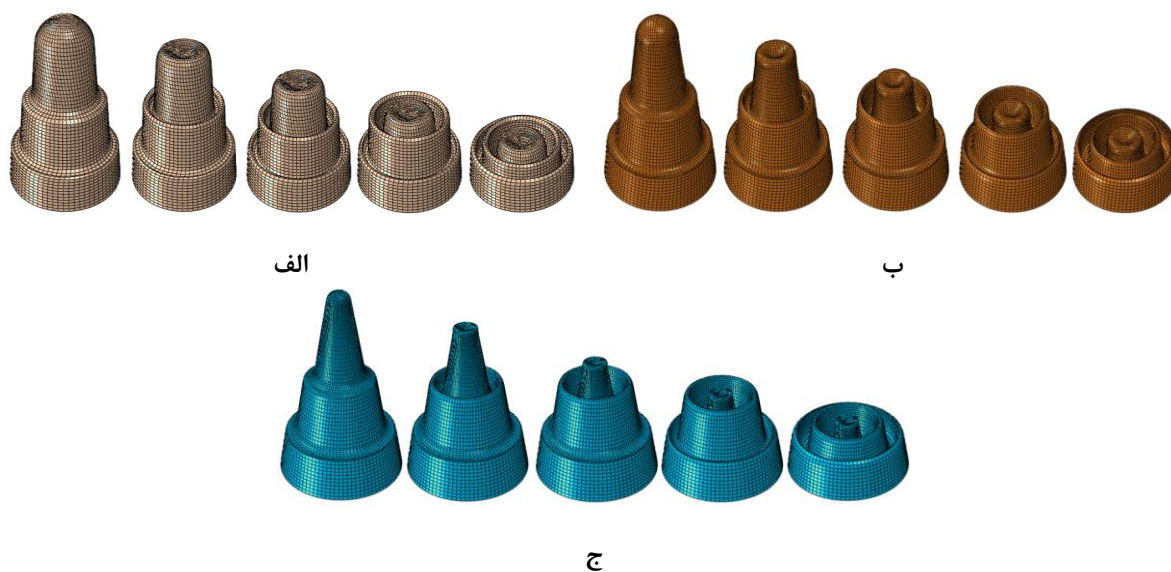
نمونه	$E_{absorbed} (J)$	$P_m (kN)$	$P_{initial} (kN)$	$SEA (J/g)$
بدون درپوش	۲۱۶/۲	۲/۸۷	۳/۲	۵/۳۶
درپوش انتهایی	۲۰۹	۲/۸۲	۲/۹	۴/۹۷
درپوش کروی	۲۲۰/۹	۲/۹۰	۲/۶	۵/۴۶

لازم به ذکر است که شعاع کوچک (R_2) برای زوایای ۵، ۷/۵ و ۱۰ درجه به ترتیب برابر با ۱۵/۳، ۱۰/۸ و ۵/۹ میلی‌متر است و بقیه پارامترهای هندسی ثابت می‌باشند. الگوی وارونگی و منحنی‌های نیرو-جابجایی برای زوایای مختلف در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد که تمامی نمونه‌ها در زوایای مختلف، بطور کامل وارونه شده‌اند و نحوه وارونگی بصورت متقارن محوری و وارونگی روبه داخل است. همچنین مطابق شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه نیم‌راس، نیروی مقاوم در لبه اجزا کاهش یافته و اجزای مخروط با نیروی کمتری وارونه می‌شوند. در شکل (۱۳) پارامترهای ضربه‌پذیری لوله شامل انرژی ویژه جذب و نیروی بیشینه اولیه، برای زوایای نیم‌راس متفاوت مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، با افزایش زاویه نیم‌راس، نیروی بیشینه اولیه کاهش می‌یابد. اگرچه جذب انرژی با افزایش زاویه نیم‌راس کاهش می‌یابد، اما تغییر قابل توجهی در انرژی ویژه جذب دیده نمی‌شود.

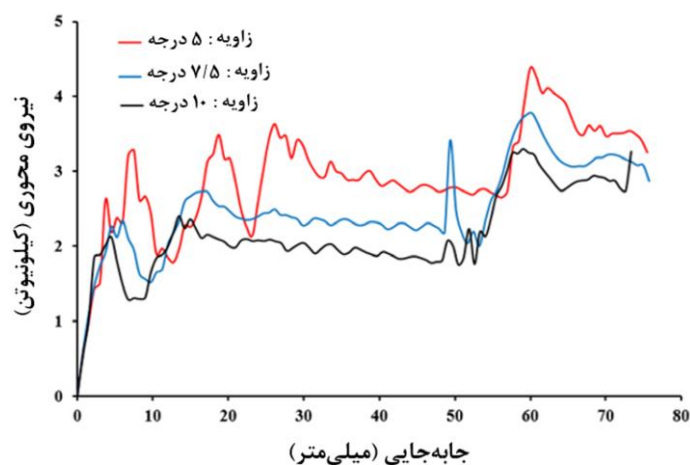
در ادامه برای مقایسه بهتر نتایج عددی، پارامترهای ضربه‌پذیری لوله‌های مخروط چند جزئی درپوش‌دار و بدون درپوش در جدول (۴) و شکل (۱۰) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش جذب انرژی ویژه و کاهش بیشینه نیروی اولیه در لوله درپوش کروی، محسوس‌تر است. بنابراین یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های لوله‌های با درپوش کروی، کاهش بیشینه نیرو و به تبع آن جلوگیری از اعمال بار ناگهانی به سازه اصلی است. قابل ذکر است که جذب انرژی ویژه لوله با درپوش کروی نسبت به لوله درپوش مسطح و بدون درپوش به ترتیب در حدود ۱۰ و ۲ درصد بیشتر و نیروی بیشینه اولیه آن نیز به ترتیب در حدود ۱۰ و ۱۸ درصد کمتر است.

۴-۲-۲- اثر زاویه نیم‌راس مخروط

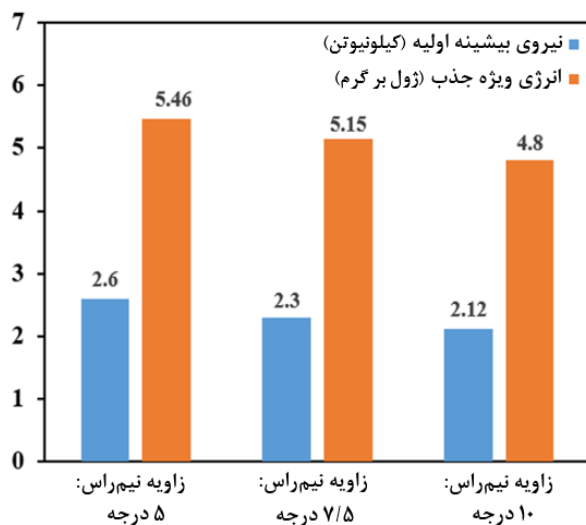
در این بخش، تاثیر زاویه نیم‌راس بر الگوی وارونگی و پارامترهای ضربه‌پذیری لوله مخروط چند جزئی با درپوش کروی بررسی شده است. برای انجام این کار، زوایای نیم‌راس ۵ درجه، ۷/۵ درجه و ۱۰ درجه مدل شده است.



شکل ۱۱- مراحل وارونگی لوله مخروط چند جزئی درپوش کروی با زوایای نیم‌راس متفاوت (الف) ۵ درجه، (ب) ۷/۵ درجه و (ج) ۱۰ درجه



شکل ۱۲- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی لوله مخروط چند جزئی درپوش کروی با زوایای نیم‌راس متفاوت



شکل ۱۳- مقایسه پارامترهای ضربه‌پذیری لوله چند جزئی درپوش کروی با زوایای نیم‌راس متفاوت

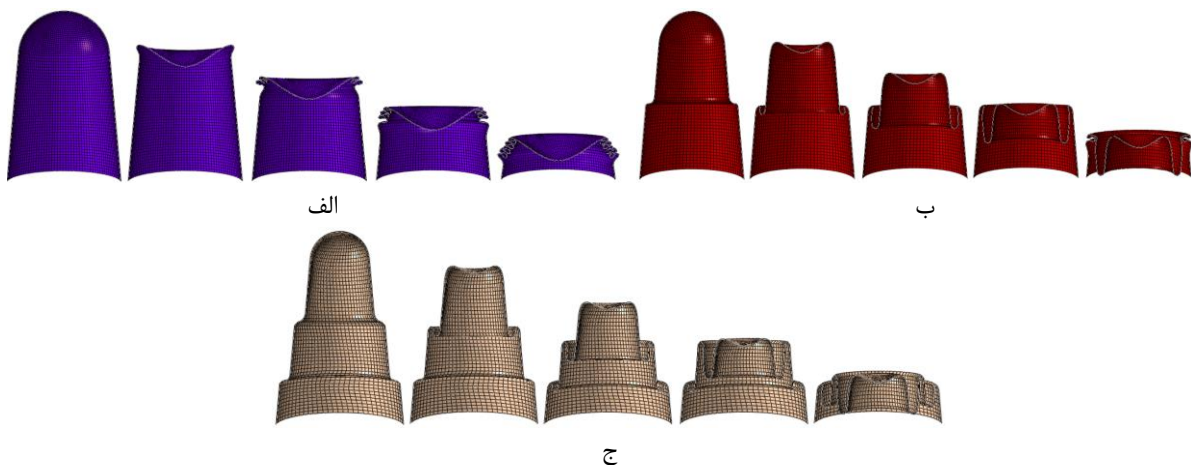
۴-۲-۳- اثر تعداد جزءهای مختلف مخروط

در این بخش، تأثیر تعداد اجزاء لوله به صورت عددی بر روی حالت تغییرشکل و پارامترهای ضربه‌پذیری لوله‌های مخروط یک جزئی (لوله ساده)، دو و سه جزئی با درپوش کروی بررسی شده است. برای این منظور، نمونه‌ها مطابق جدول (۵) مدلسازی شده‌اند. شکل (۱۴) مراحل تغییرشکل نمونه‌ها را تحت بارگذاری محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو مکانیسم متفاوت تغییرشکل وجود دارد: مکانیسم لهیدگی (فروریزش) برای لوله مخروط ساده و مکانیسم وارونگی برای لوله‌های چند جزئی (چندجزئی). در لوله مخروط ساده، جذب انرژی توسط لولاها و چین‌های پلاستیکی در طول لوله، ایجاد می‌شود، در حالی که در لوله‌های مخروط دو و سه جزئی، انرژی با وارونه شدن هر جزء مخروط داخل جزء دیگر و در یک الگوی تلسکوپ، تلف می‌شود. مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی برای لوله‌های مخروط ساده و چند جزئی (دو جزئی و سه جزئی) در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌گردد که نیروی لهیدگی محوری لوله مخروط ساده بصورت غیریکنواخت می‌باشد. هنگامی که نیروی محوری اعمال می‌شود، در ابتدا، رفتار لوله به صورت الاستیک بوده و نیرو

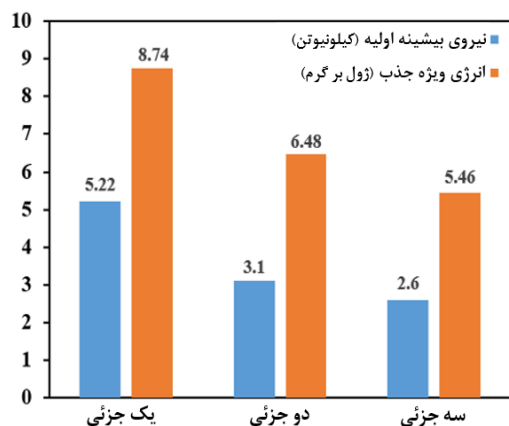
افزایش می‌یابد. سپس لوله تسلیم شده و با ایجاد لولایی پلاستیک محیطی، چین خوردگی ایجاد می‌شود. بنابراین، نوسانات زیاد نیرو در لوله مخروط ساده، به دلیل ایجاد چین خوردگی در فرآیند لهیدگی (فروریزش) می‌باشد. در مقایسه با لوله مخروط ساده، لوله‌های مخروط دو و سه جزئی دارای نیروی تغییرشکل یکنواخت در طول فرآیند وارونگی هستند. در شکل (۱۶) به مقایسه پارامترهای ضربه‌پذیری لوله با تعداد اجزای مختلف پرداخته شده است. براساس شکل، مشهود است که برای نمونه‌های مورد بررسی، افزایش تعداد جزءها منجر به کاهش نیروی بیشینه اولیه و کوچک‌تر شدن مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی و در نتیجه جذب انرژی کمتر در مرحله وارونگی می‌شود. به طور کلی، با افزایش تعداد اجزاء، انرژی ویژه جذب و نیروی بیشینه اولیه کاهش می‌یابد. نیروی بیشینه اولیه بالا می‌تواند باعث صدمات جدی به مسافران و آسیب جدی به سازه‌های اصلی شود. لذا برای جلوگیری از آسیب، نیروی بیشینه اولیه باید تا حد امکان کاهش یابد تا ایمنی سرنشینان و خودرو تضمین شود. بنابراین استفاده از جاذب‌های مخروط چند جزئی تأثیر بسزایی در کاهش نیروی بیشینه و یکنواختی نیروی تغییرشکل دارند.

جدول ۵- ابعاد نمونه‌های مخروط با تعداد جزءهای مختلف

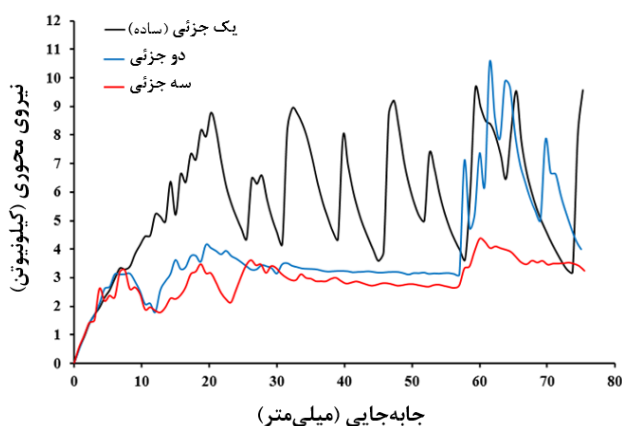
تعداد جزءها	R_2	R_1	d	r	L	L_1	L_2	L_3	t_1	t_2	t_3	t_4	α°
یک جزء (لوله ساده)	۲۶/۱۹	۳۲/۷۵	-	-	۱۰۰	-	-	-	۱	۱	-	-	۵
دو جزء	۲۰/۷۴	۳۲/۷۵	۵	۳	۱۰۰	۵۵	۴۵	-	۱	۱	۱	-	۵
سه جزء	۱۵/۳	۳۲/۷۵	۵	۳	۱۰۰	۴۷	۳۱	۲۲	۱	۱	۱	۱	۵



شکل ۱۴- مراحل تغییرشکل نمونه‌های مخروط (الف) مخروط ساده (یک جزئی)، (ب) مخروط دو جزئی و (ج) مخروط سه جزئی



شکل ۱۶- مقایسه پارامترهای ضربه‌پذیری نمونه‌های مخروط با تعداد جزءهای متفاوت



شکل ۱۵- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی با تعداد جزءهای مختلف مخروط

۵- نتیجه‌گیری

- با بررسی اثر تعداد جزءهای مخروط مشخص گردید که جذب انرژی لوله مخروط ساده ناشی از ایجاد لولاهای پلاستیک و چین‌خوردگی بوده ولی اتلاف انرژی در لوله‌های دو و سه جزئی به دلیل وارونگی جزءها رخ داده است.

- مقایسه بین لوله‌ها با تعداد جزءهای مختلف نشان داد که با افزایش تعداد جزءها، جذب انرژی ویژه و بیشینه نیروی اولیه کاهش یافت.

- با افزایش زاویه نیم‌راس، نیروی مقاوم در لبه جزءها کاهش یافته و جزءهای مخروط با نیروی کمتری وارونه می‌شوند. بنابراین، با افزایش زاویه نیم‌راس، بیشینه نیروی اولیه کاهش یافت. با این وجود تغییر قابل توجهی در جذب انرژی ویژه مشاهده نگردید.

- بیشینه نیروی اولیه بالا می‌تواند باعث صدمات جدی به سرنشینان و آسیب جدی به سازه‌های اصلی شود. برای جلوگیری از آسیب، بیشینه نیروی اولیه یکی از مهمترین پارامترهای طراحی بوده است که باید تا حد امکان کاهش یابد تا ایمنی سرنشینان و خودرو تضمین شود. بنابراین استفاده از جاذب‌های مخروط چند جزئی درپوش کروی تاثیر به‌سزایی در کاهش نیروی بیشینه و یکنواختی نیروی تغییرشکل دارد.

در مطالعه حاضر، فرآیند وارونگی آزاد و ویژگی‌های ضربه‌پذیری لوله‌های مخروط چند جزئی درپوش کروی به طور تجربی و شبیه‌سازی عددی شبه‌استاتیک بررسی گردید. به منظور ایجاد وارونگی آزاد در جاذب مخروط، لوله‌های مخروط چند جزئی با طول جزءها و قطرهای مختلف ساخته شدند. بعد از اعمال بارگذاری محوری، اتلاف انرژی با پیچش لبه‌ها و وارونه شدن جزءهای مخروط داخل یکدیگر بوجود آمد. در این جاذب جدید، یک مطالعه پارامتری برای بررسی تأثیر عوامل هندسی مانند درپوش، تعداد جزءها و زاویه نیم‌راس انجام گردید. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- مقایسه لوله‌های مخروط چندجزئی درپوش‌دار و بدون درپوش نشان داد که نیروی بیشینه اولیه در لوله مخروط چند جزئی درپوش کروی کمتر و جذب انرژی ویژه آن بیشتر از لوله‌های درپوش مسطح و بدون درپوش (باز) است. همانطور که مشاهده گردید، جذب انرژی ویژه لوله مخروط چندجزئی با درپوش کروی نسبت به لوله درپوش مسطح و بدون درپوش به ترتیب در حدود ۱۰ درصد و ۲ درصد بیشتر و بیشینه نیروی اولیه آن نیز به ترتیب در حدود ۱۰ درصد و ۱۸ درصد کمتر است.

مراجع

- [1] S. Azarakhsh, A. Ghamarian, and M. J. Rezvani, "Effect of hole, angle and direction of applied oblique load on crashworthiness parameters of end capped circular tubes: A numerical simulation and experimental study," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 20, no. 68, 2022.
- [2] M. J. Rezvani and H. Souzangarzadeh, "Effects of triggering and polyurethane foam on energy absorption of thin-walled circular tubes under the inversion process," *Journal of Energy Storage*, vol. 27, 2020, p. 101071.
- [3] Z. Ahmad and D. Thambiratnam, "Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading," *Materials & design*, vol. 30, no. 7, 2009, pp. 2393-2403.
- [4] A. Alavi Nia and S. Chahardoli, "Experimental and numerical investigation of hole and edge radius effect on collapse properties of cylindrical absorbers under axial impact loading," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 16, no. 53, 2018, pp. 53-65.
- [5] S. Al-Hassani, W. Johnson, and W. Lowe, "Characteristics of inversion tubes under axial loading," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 14, no. 6, 1972, pp. 370-381.
- [6] N. Jafarian and M. J. Rezvani, "Crushing behavior of multi-component conical tubes as energy absorber: a comparative analysis between end-capped and non-capped conical tubes," *Engineering Structures*, vol. 178, 2019, pp. 128-135.
- [7] G. Sekhon, N. Gupta, and P. Gupta, "An analysis of external inversion of round tubes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 133, no. 3, 2003, pp. 243-256.
- [8] A. Niknejad and M. Moeinifard, "Theoretical and experimental studies of the external inversion process in the circular metal tubes," *Materials & Design*, vol. 40, 2012, pp. 324-330.
- [9] X. M. Qiu, L. H. He, J. Gu, and X. H. Yu, "An improved theoretical model of a metal tube under free external inversion," *Thin-Walled Structures*, vol. 80, 2014, pp. 32-37.
- [10] Y. Liu, X. Qiu, and T. Yu, "A theoretical model of the inversion tube over a conical die," *Thin-Walled Structures*, vol. 127, 2018, pp. 31-39.
- [11] R. Rajabiehfarid, A. Darvizeh, M. Alitavoli, R. Ansari, and E. Maghdouri, "Experimental, numerical and analytical investigations into the internal inversion of mild steel tubes under high velocity axial impact using a die," *Thin-Walled Structures*, vol. 125, 2018, pp. 21-37.
- [12] Y. Li and Z. You, "External inversion of thin-walled corrugated tubes," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 144, 2018, pp. 54-66.
- [13] S. Chahardoli, M. Shabanzadeh, and S. M. Marashi, "Introducing a new mechanism for energy absorption through simultaneous inversion-folding process," *International journal of crashworthiness*, vol. 27, no. 1, 2022, pp. 92-106.