



# Improving Energy Absorption of AA6061 Holed Thin-Walled Cylindrical Tubes

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Elyasi M.<sup>1\*</sup>,  
Rooholamini Ahangar M.<sup>1</sup>,  
Modanloo V.<sup>2</sup>

### How to cite this article

Elyasi M., Rooholamini Ahangar M., Modanloo V. Improving Energy Absorption of AA6061 Holed Thin-Walled Cylindrical Tubes. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(11):587-595.

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

<sup>2</sup> Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

### \*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

elyasi@nit.ac.ir

### Article History

Received: July 26, 2023  
Accepted: October 10, 2023  
ePublished: November 25, 2023

## ABSTRACT

Thin-walled tubes play a significant role in increasing the energy absorption in energy absorbing systems. Holed thin-walled tubes are a suitable option for use in these systems due to the ease of production and the lack of geometry complexity. In this paper, a new geometric pattern for holed thin-walled cylindrical tubes made of aluminum alloy 6061 is presented, to improve the energy absorption characteristics. To this aim, the Taguchi design of experiment method has been used to find the optimal levels of the geometrical parameters of the tube to achieve the maximum energy-to-weight ratio and the minimum effective equivalent strain. The number of rows of holes, the number of holes in each row, the diameter of the small hole and the diameter coefficient of the small hole were considered as the geometric (input) parameters of the tubes. The initial crushing force, the total absorbed energy, the ratio of energy to weight and the ratio of the maximum initial force to the average force were compared for the optimal layouts. Examining the results showed that the arrangement of the holes in the middle with 3 rows of holes, 8 holes in each row, diameter of the small hole of 5 mm and the diameter coefficient of 1.2 (the large diameter is 6 mm) will lead to the best energy absorption result.

**Keywords** Energy Absorption, Holed Thin-Walled Tubes, Geometrical Parameters, Axial Loading.

## CITATION LINKS

1- A novel axially half corrugated thin-walled tube for energy absorption under Axial loading 2- Energy absorption investigation of octagonal multi-layered origami thin-walled tubes under quasi-static axial loading 3- Study on the layout strategy of diaphragms to enhance the energy absorption of thin-walled square tubes 4- Developing a New Thin-Walled Tube Structure and Analyzing its Crushing Performance for AA 60601 and Mild Steel Under Axial Loading 5- Prediction and application of energy absorption characteristics of thin-walled circular tubes based on dimensional analysis 6- Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes 7- Axial crushing tests of thin-walled steel square tubes with pyramid patterns 8- An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes 9- Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes 10- Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load 11- Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing 12- Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns 13- Compression Behavior and Energy Absorption of Aluminum Alloy AA6061 Tubes with Multiple Holes 14- Experimental and finite element simulation investigation of axial crushing of grooved thin-walled tubes 15- Axial Crushing in a Novel Technique of Thin-Walled Tube 16- Investigating the energy absorption, SEA and crushing performance of holed and grooved thin-walled tubes under axial loading with different materials

## بهبود قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

مجید الیاسی<sup>۱\*</sup>، مقدار روح الامینی آهنگر<sup>۱</sup>، وحید مدانلو<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

### چکیده

لوله‌های جدارنازک نقش بسزایی در افزایش قابلیت جذب انرژی در سیستم‌های جاذب انرژی دارند. لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار به دلیل سهولت تولید و عدم پیچیدگی هندسه گزینه مناسبی برای استفاده در این سیستم‌ها می‌باشند. در این مقاله، یک الگوی هندسی جدید برای لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ جهت بهبود ویژگی‌های جذب انرژی ارائه شده است. به این منظور، از روش طراحی آزمایش تاگوشی برای یافتن سطوح بهینه پارامترهای هندسی لوله جهت دستیابی به بیشینه نسبت انرژی به وزن و کمینه کرنش معادل موثر استفاده شده است. تعداد ردیف سوراخ‌ها، تعداد سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک و ضریب قطر سوراخ کوچک به عنوان پارامترهای هندسی (ورودی) لوله‌ها در نظر گرفته شدند. نیروی اولیه لهیدگی، انرژی جذب شده کل، نسبت انرژی به وزن و نسبت نیروی بیشینه اولیه به نیروی متوسط برای چیدمان‌های بهینه با هم مقایسه شدند. بررسی نتایج نشان داد که چیدمان سوراخ‌ها به صورت یکی‌درمیان با ۳ ردیف سوراخ، ۸ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و ضریب قطر ۱/۲ (قطر بزرگ ۶ میلی‌متر) منجر به بهترین نتیجه جذب انرژی خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** جذب انرژی، لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار، پارامترهای هندسی، بارگذاری محوری.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸

\*نویسنده مسئول: elyasi@nit.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه کاربرد سیستم‌های جاذب انرژی در صنایع مختلفی نظیر صنایع هوایی، کشتی‌سازی و خودروسازی از اهمیت بسیاری برخوردار شده است. عملکرد سیستم‌های جاذب انرژی به گونه‌ای می‌باشد که پس از اعمال نیرو، لهیدگی و تغییرشکل رخ داده که با جذب انرژی و استهلاک نیروی اعمالی همراه است. افزایش میزان انرژی جذب شده و کاهش نیروی آغازین لهیدگی در این سیستم‌ها حائز اهمیت می‌باشد. کاربرد این قطعات نه تنها در پشت سپر، ستون و فرمان خودرو می‌باشد، بلکه در قسمت‌های در معرض ضربه کشتی‌ها و قطارها و همچنین کف آسانسورها، هلیکوپترها و فضاپیماها به منظور نشست نرم، حفاظت از مواد بسته‌بندی شده و تجهیزات و همچنین مخازن سوخت نیز استفاده می‌شود<sup>[1-4]</sup>. بدین منظور از مدل‌های مختلفی برای بررسی جذب انرژی استفاده می‌شود که از جمله آنها می‌توان به لهیدگی محوری لوله‌های جدارنازک اشاره کرد. تغییرشکل ناشی از این روش به

چهار حالت آکاردئونی، الماسی، اوپلری و خمراهی می‌باشد<sup>[5]</sup>. مدل دیگری از روش‌های بررسی لهیدگی، بارگذاری مورب می‌باشد که به جای برخورد مستقیم و محوری با سطح مقطع قطعه، نیرو با ضربه و با زاویه نسبت به محور تقارن اعمال می‌شود. فشار جانبی و وارونش از دیگر روش‌های بررسی میزان جذب انرژی می‌باشد که می‌توان به آنها اشاره کرد. تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه استفاده از لوله‌های جدارنازک در سیستم‌های جاذب انرژی گزارش شده است. گراسیانو و همکاران<sup>[6]</sup>، میزان لهیدگی لوله‌های مربعی و دایروی به همراه شبکه‌های محیطی را بررسی کردند. همچنین تاثیر زوایای سلول‌های به کار برده شده در دو راستای اصلی بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که زاویه سلول‌ها در کمترین حالت خود پاسخ‌های با ثبات‌تر و قابل کنترلی نتیجه خواهد داد. همچنین در این حالت احتمال ایجاد کمانش به کمترین مقدار خود می‌رسد. ما و همکاران<sup>[7]</sup>، لهیدگی و جذب انرژی در لوله‌های جدارنازک مربعی از جنس فولاد را که دارای الگوی هرمی بر سطح لوله بود بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد نمونه‌ای که بعد از لهیده شدن به حالت هشت ضلعی درآمد از جذب انرژی بهتری برخوردار است. علوی‌نیا و همکاران<sup>[8]</sup>، قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک آلومینیومی با مقطع دایره‌ای و مربعی را بررسی کردند. آنها اثرات طول و زاویه را در رفتار مکانیکی لوله‌ها ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که فرایند لهیدگی و تشکیل لولا در لوله‌های دایره‌ای بهتر از نمونه‌های مربعی می‌باشد. صالح غفاری و همکاران<sup>[9]</sup>، قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک فولادی را تحت بارگذاری محوری بررسی کردند. آنها در سمت خارجی لوله‌ها رینگ‌هایی ایجاد کردند و اثر تغییرات آن را بر جذب انرژی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که این رینگ‌ها به شکل‌پذیری بهتر نمونه و افزایش میزان جذب انرژی کمک می‌کند. تالی و همکاران<sup>[10]</sup>، بر روی جذب انرژی لوله‌های دایره‌ای با سوراخ بیضوی پژوهش‌هایی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که رفتار لهیدگی تحت تاثیر محل قرار گرفتن و تقارن سوراخ می‌باشد. سانگ و همکاران<sup>[11]</sup>، ساختار لوله‌های جدارنازک آلومینیومی سبک وزن تحت فشار محوری را مورد مطالعه قرار دادند. آنها پنجره‌هایی روی نمونه مستطیلی ایجاد کردند و پس از بررسی اندازه پنجره‌ها دریافتند که با تغییر متناسب اندازه پنجره‌ها می‌توان جذب انرژی را افزایش داد. تانگ و همکاران<sup>[12]</sup>، میزان جذب انرژی لوله‌های چندسلولی با مقاطع مختلف را بررسی نمودند. نتایج عددی پژوهش آنها نشان داد که لوله‌های چندسلولی با مقطع دایره‌ای کارایی بیشتری در جذب انرژی نسبت به لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای دارند. همچنین بررسی پارامتریک نشان داد که ضخامت و تعداد سلول‌ها به طور آشکار بر روی میزان جذب انرژی موثر هستند. سیم‌هاچلام و همکاران<sup>[13]</sup>، لهیدگی و میزان جذب انرژی لوله آلومینیومی ۶۰۶۱ همراه با ۲ سوراخ دایره‌ای در سطح را به صورت استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی نمودند. نتایج شبیه‌سازی استاتیکی آنها نشان داد که با توجه به افزایش نسبت

## ۲-۲- چیدمان‌های پیشنهاد شده برای لوله‌های سوراخ‌دار

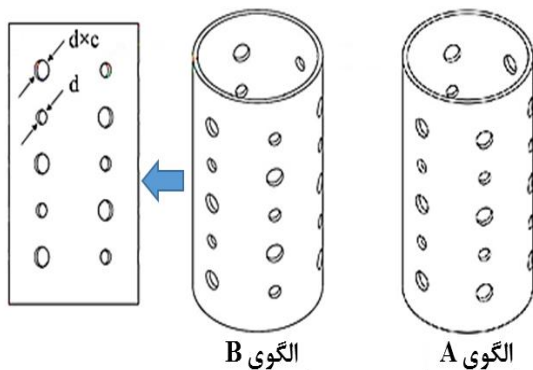
در این مقاله، به منظور بهبود قابلیت جذب انرژی، دو الگوی هندسی A و B انتخاب شد که در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این الگوها مطابق با چگونگی لهیدگی لوله‌های سوراخ‌دار، در محیط لوله سوراخ‌هایی تعبیه شد تا پیش‌بینی چگونگی لهیدگی آسان گردد. در الگوی A، در هر ردیف نسبت به ردیف دیگر، قطر سوراخ‌ها به ترتیب کوچک و بزرگ می‌شود. دلیل انتخاب چیدمان A این است که به کمک تغییرات قطر بتوان مراکز خم‌شدگی در لوله را کنترل کرد. چیدمان در طرح B به‌گونه‌ای است که در یک ردیف قطر سوراخ‌ها یک‌درمیان کوچک و بزرگ می‌شود. دلیل این انتخاب الگوی سوراخ در طرح B این است که سطح مقطع قسمت‌هایی که سوراخ بر روی آن ایجاد شده یکسان باشد تا از بروز کمانش کلی در لوله جلوگیری گردد.

## ۲-۳- آزمایش‌های تجربی لهیدگی تحت بار محوری

به‌منظور استخراج منحنی نیرو-جابجایی، آزمون‌های تجربی با استفاده از یک دستگاه پرس انیورسال سنتام با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها فک پایین ثابت و اعمال جابجایی از طریق فک بالا صورت گرفت. سرعت جابجایی فک بالا برابر ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. برای بررسی و مقایسه مناسب نمودارها سعی شد آزمایش‌های نهایی با جابجایی کلی ۶۰ میلی‌متر انجام شود.

## ۲-۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این مقاله، از نرم‌افزار آباکوس جهت شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. فک‌های بالا و پایین دستگاه پرس به‌صورت پوسته صلب در نظر گرفته شدند. لوله‌های سوراخ‌دار با تعداد ۱۴۰۰۰ المان توپر C3D8R مش‌بندی شدند به‌طوری‌که در راستای ضخامت تعداد دو المان در نظر گرفته شد. خواص مکانیکی ماده به‌صورت همسانگرد به نرم‌افزار معرفی گردید. تماس بین فک‌های پرس و دو انتهای لوله و نیز تماس لوله با خود در حین لهیدگی توسط مدل



شکل ۱) تصویر شماتیک دو طرح پیشنهاد شده

قطر به ضخامت میزان الماسی شدن افزایش می‌یابد. میرمحمدصادقی و همکاران<sup>[14]</sup>، به بررسی لهیدگی لوله‌های جدار نازک دایروی با شیارهایی در سطح استوانه پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با افزایش فاصله شیارها، تغییرشکل‌ها از حالت آکاردئونی به الماسی تغییر کرده و پیک اولیه نیرو افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله میان شیارها، جذب انرژی نیز تغییر می‌کند. الیاسی و همکاران<sup>[15]</sup>، طرح لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار را برای اولین بار مطرح کردند. سپس عملکرد لهیدگی لوله‌هایی از جنس آلومینیوم و فولاد را برای این طرح مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با ایجاد سوراخ در لوله‌های جدارنازک سعی در بهبود ویژگی‌هایی مانند انرژی جذب شده و نیروی اولیه داشتند. با بررسی پارامتریک متغیرها، بهترین حالت بدست آمده زمانی بود که ۵ ردیف ۱۲ سوراخ با قطر ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده بود.

مطابق با پیشینه پژوهش، تاکنون قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک در مدل‌های مختلف و هندسه‌های متفاوتی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت وزن نهایی سیستم-های انرژی که در راستای بهبود پارامتر نسبت انرژی به وزن سیستم می‌باشد، در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای مشبک‌سازی لوله‌های جدارنازک صورت گرفته است. اما با وجود گستردگی طرح‌های موجود و بررسی شده، چند عامل برای انتخاب طرح مناسب وجود دارد. عدم پیچیدگی و دشواری در فرآیند ایجاد شبکه (سوراخ) در لوله‌های جدارنازک را می‌توان به اولین ویژگی انتخاب طرح عنوان کرد. سادگی هندسی دیگر ملاک ارزیابی طرح‌های متفاوت برای لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار می‌باشد. در این پژوهش، دو الگوی هندسی جدید از لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به منظور بهبود قابلیت جذب انرژی ارائه شده است. در همین راستا، برای طراحی و تحلیل از روش‌های تاگوچی، مدل‌سازی اجزای محدود و آزمایشگاهی استفاده شده است. نیروی اولیه لهیدگی، انرژی جذب شده کل، نسبت انرژی به وزن و نسبت نیروی پیشینه اولیه به نیروی متوسط در فرآیند بارگذاری محوری با استفاده از آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- خواص مکانیکی لوله

در این پژوهش از لوله‌های جدارنازک آلومینیومی ۶۰۶۱ با قطر خارجی ۵۵، ضخامت ۲ و طول ۹۶ میلی‌متر استفاده شد. جهت تعیین رفتار مکانیکی لوله‌ها، از آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8-11 به کمک دستگاه کشش انیورسال سنتام با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن استفاده شد که خواص مکانیکی ماده عبارت است از چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تنش تسلیم ۲۲۰ مگاپاسکال، مدول یانگ ۶۹ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۳.

[16]

جدول (۱) نمونه جدول مورد قبول مجله

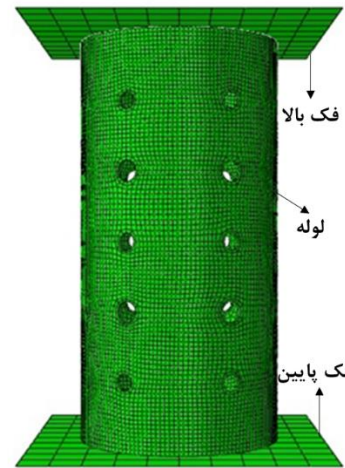
پارامتر	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
تعداد ردیف	N	۳	۵	۷	۹
تعداد سوراخ در هر ردیف	S	۴	۶	۸	۱۲
قطر سوراخ کوچک (میلی‌متر)	d	۴	۵	۶	۷
ضریب قطر کوچک	c	۱/۲	۱/۴	-	-

دو پارامتر نسبت انرژی به وزن و نسبت نیروی پیشینه اولیه به نیروی متوسط نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. در رابطه با خروجی دوم، هر چقدر این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده آن است که ضربات متعادل‌تری به سیستم وارد شده است. به عبارت دیگر، قله و دره کمتری در نمودار نیرو-جابجایی دیده می‌شود.

$$E = \int_0^L P(x) dx \quad (1)$$

جدول (۲) طرح آزمایشات با استفاده از آرایه متعامد L16 تاگوجی

شماره آزمایش	N	S	d	c
۱	۳	۴	۴	۱/۲
۲	۳	۶	۵	۱/۲
۳	۳	۸	۶	۱/۴
۴	۳	۱۲	۷	۱/۴
۵	۵	۴	۵	۱/۴
۶	۵	۶	۴	۱/۴
۷	۵	۸	۷	۱/۲
۸	۵	۱۲	۶	۱/۲
۹	۷	۴	۶	۱/۲
۱۰	۷	۶	۷	۱/۲
۱۱	۷	۸	۴	۱/۴
۱۲	۷	۱۲	۵	۱/۴
۱۳	۹	۴	۷	۱/۴
۱۴	۹	۶	۶	۱/۴
۱۵	۹	۸	۵	۱/۲
۱۶	۹	۱۲	۴	۱/۲



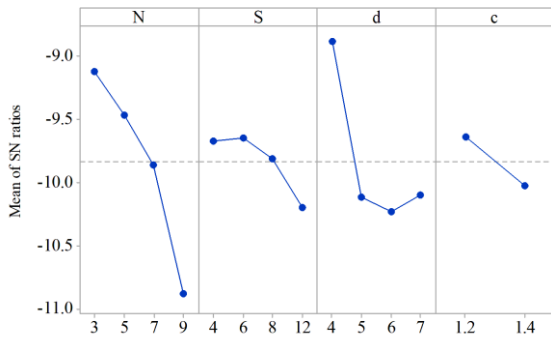
شکل (۲) مدل المان محدود استفاده شده

اصطکاکی کولمب با ضریب اصطکاک ۰/۲ تعریف گردید. در شبیه‌سازی، فک پایینی به‌طور کامل مقید شده و فک بالایی در راستای عمودی با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تا رسیدن به میزان جابجایی ۶۰ میلی‌متر به سمت پایین حرکت می‌کند. شکل ۲ مدل المان محدود طراحی شده را نشان می‌دهد.

## ۲-۵- طراحی آزمایش به روش تاگوجی

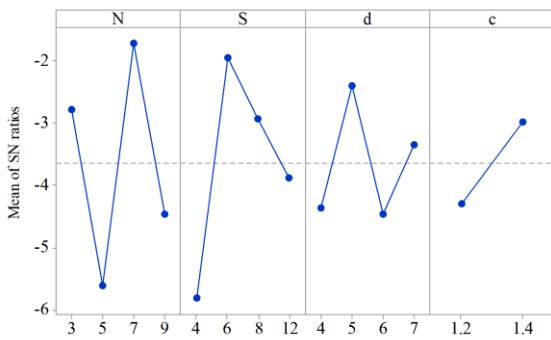
برای بررسی اثر پارامترهای ورودی بر روی قابلیت جذب انرژی لوله‌ها، از روش طراحی آزمایش تاگوجی استفاده شد. تعداد ردیف سوراخ‌ها، تعداد سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک و ضریب قطر سوراخ کوچک که با ضرب آن در قطر کوچک می‌توان مقدار قطر سوراخ بزرگ‌تر را به‌دست آورد به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. جدول ۱ پارامترهای مورد مطالعه و سطوح انتخابی برای هر پارامتر را نشان می‌دهد. برای طراحی آزمایش از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. مطابق با جدول ۲، آزمایش‌ها با استفاده از آرایه متعامد L16 برای هر کدام از دو الگوی A و B انجام شد و نسبت انرژی به وزن (E/W) و کرنش معادل موثر (PEEQ) برای هر آزمایش اندازه‌گیری شد. همچنین برای مقایسه الگوهای پیشنهادی، مقدار انرژی جذب شده کل و نیروی اولیه لهیدگی نیز استخراج شدند. مقدار انرژی جذب شده پارامتر مهمی در سیستم‌های جذب انرژی می‌باشد که مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بوده و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۶]. در این رابطه، L جابجایی صورت گرفته و P نیروی وارده در هر لحظه می‌باشد. نیروی اولیه لهیدگی یا همان مقدار نیروی لازم برای ایجاد اولین لولا، در ضربه‌پذیری سیستم‌های جاذب انرژی بسیار اهمیت دارد. نیروی اولیه لهیدگی معادل مقدار نیرویی است که در نمودار نیرو-جابجایی اولین پیک را در نمودار ایجاد می‌کند. اما لزوماً مقدار زیاد انرژی جذب شده ملاک خوبی برای انتخاب یک جاذب انرژی نیست. به همین منظور برای ارزیابی مناسب‌تر،

نسبت سیگنال به نویز خروجی PEEQ برای چیدمان A را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح بهینه پارامترها برای دستیابی به جواب بهینه به صورت N3S2d2c2 خواهد بود. به بیان دیگر، سطح سوم ردیف (۷ ردیف)، سطح دوم سوراخ در هر ردیف (۶ سوراخ)، سطح دوم قطر (۵ میلی‌متر) و سطح دوم ضریب قطر (۱/۴) کمترین میزان کرنش موثر معادل را نتیجه خواهد داد. به همین ترتیب با بررسی نمودار نسبت سیگنال به نویز خروجی E/W برای چیدمان B که در شکل ۵ آمده است، بهترین سطوح



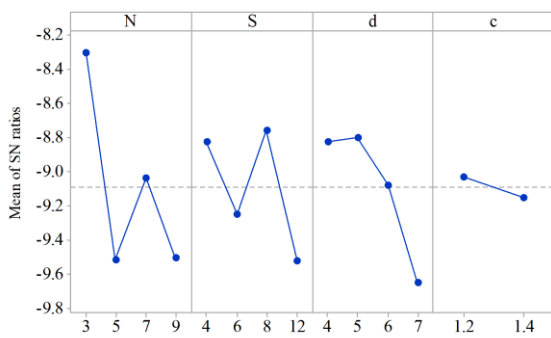
Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۳) نمودار نسبت سیگنال به نویز خروجی E/W برای چیدمان A



Signal-to-noise: Smaller is better

شکل ۴) نمودار نسبت سیگنال به نویز خروجی PEEQ برای چیدمان A



Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۵) نمودار نسبت سیگنال به نویز خروجی E/W برای چیدمان B

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

برای اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی از نتایج آزمون تجربی استفاده شد. با مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تجربی و شبیه‌سازی نمونه سوراخ‌دار شماره ۱۱ جدول ۲ (با طرح B) مشخص شد که در حدود ۲٪ اختلاف در میزان نیروی اولیه وجود دارد که قابل قبول می‌باشد. در نتیجه صحت مدل اجزای محدود تایید شده و در ادامه از آن برای اجرای آزمایش‌های طراحی شده با روش تاگوچی استفاده خواهد شد.

#### ۳-۲- نتایج طراحی آزمایش

در این قسمت، نتایج نسبت انرژی به وزن و کرنش پلاستیک معادل حاصل از ۱۶ آزمون طراحی شده با استفاده از روش تاگوچی و اجرا شده توسط شبیه‌سازی اجزای محدود در جدول ۳ ارائه شده است.

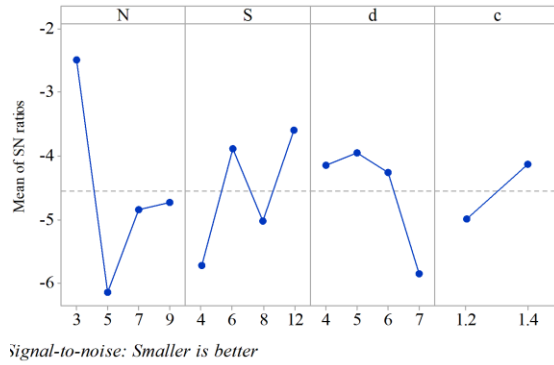
جدول ۳) نمونه جدول مورد قبول مجله

شماره آزمایش	PEEQ(A)	E/w(A)(Kj/Kg)	PEEQ(B)	E/w(B)(Kj/Kg)
۱	۲/۲۱۷	۱۸/۷۲	۱/۶۵۴	۱۷/۶۹
۲	۱/۱۸۸	۱۴/۳۴	۰/۱۱۹	۲۰/۳۲
۳	۱/۲۳۸	۱۳/۶۴	۱/۱۹۱	۱۸/۸۸
۴	۱/۱۰۵	۱۳/۴۵	۱/۳۴۳	۱۶/۹۶
۵	۱/۶۳۳	۱۵/۲۸	۱/۸۵۱	۱۶/۸
۶	۱/۵۸۷	۱۷/۲۳	۱/۷۷۹	۱۴/۳۱
۷	۲/۲۸	۱۴/۰۴	۲/۹۰۶	۱۱/۵۵
۸	۲/۲۴۶	۸/۵۹	۱/۷۶۶	۱۱/۳۱
۹	۱/۸۷۱	۱۳/۸۴	۲/۱۲۳	۱۹/۶۳
۱۰	۰/۸۶۳	۱۳/۲۶	۱/۷۷۳	۱۲/۲۴
۱۱	۱/۰۹۷	۱۳/۹۶	۱/۶۰۳	۱۸/۸
۱۲	۱/۲۴۳	۷/۹۲	۱/۵۴۳	۱۱/۴۳
۱۳	۲/۱۵۴	۵/۱۸	۲/۱۴۳	۱۱/۲۳
۱۴	۱/۵۰۲	۷/۶۲	۱/۵۹۶	۱۱/۶۳
۱۵	۱/۲۴۷	۸/۰۱	۱/۸۱۸	۱۷/۲۲
۱۶	۱/۹۳۱	۱۴/۱۷	۱/۴۲۶	۱۴/۱

در شکل ۳ نمودار نسبت سیگنال به نویز خروجی E/W برای چیدمان A نشان داده شده است. مطابق با شکل، سطح ۱ برای پارامتر N، سطح ۲ برای پارامتر S، سطح ۱ برای پارامتر d و سطح ۱ برای پارامتر C منجر به بهترین جواب خواهد شد. به عبارت دیگر، با ایجاد تعداد ۳ ردیف ۶ سوراخه با قطر سوراخ ۴ میلی‌متر و ضریب سوراخ ۱/۲ (سوراخ بزرگ ۴/۸ میلی‌متر) نسبت جذب انرژی به وزن لوله بیشینه خواهد شد. همچنین شکل ۴ نمودار



شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی آزمایش C1 (هر دو تکرار) را نشان می‌دهد که در آن روند تغییر شکل لوله در آزمایش C1-2 نیز آمده است. مطابق با شکل، لوله از وسط در راستای محوری شروع به تغییر شکل کرده است. دلیل این امر وجود سوراخ‌هایی با قطر بزرگ‌تر نسبت به ردیف‌های دیگر در ردیف دوم می‌باشد. این امر موجب تسهیل در کمانش موضعی لوله شده و فرایند لولاشدگی در ردیف‌های دیگر صورت نمی‌گیرد. مطابق با شکل، بعد از جابجایی به میزان ۵/۵ میلی‌متر، اولین لولای پلاستیک در نمونه تشکیل می‌شود. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که اولین نشانه‌های پارگی در نمونه دیده شود. شروع پارگی بعد از جابجایی ۳۲ میلی‌متر آغاز می‌شود. همچنین، بعد از به دست آمدن اولین نیروی لهیدگی بیشینه، نیرو به شدت کاهش یافته که دلیل آن تشکیل لولای پلاستیک در نمونه است. بعد از لولاشدگی آغازین، چین‌خوردگی منظم ثابت مانده و در ادامه چین‌خوردگی نامنظم رخ می‌دهد. زمانی که حفره در میانه نمونه قرار می‌گیرد تغییر شکل به صورت خم‌شدگی موضعی در وسط لوله اتفاق می‌افتد که در این صورت توانایی جذب انرژی کاهش می‌یابد. شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی آزمایش C2 به همراه روند تغییر شکل نمونه C2-2 را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است در این نمونه با توجه به پارگی ایجاد شده، در نمودار نیرو-جابجایی افت زیادی بعد از شروع پارگی رخ داده است. این موضوع باعث کاهش میزان جذب انرژی شده است. شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی آزمایش C3 را به همراه روند تغییر شکل نمونه C3-2 نشان می‌دهند. طبق شکل، نمونه C3-2 با پارگی کمتری و در عین حال با فاصله زمانی بیشتری شروع به پارگی کرده است. اولین لولا بعد از جابجایی ۵/۵ میلی‌متر آغاز شده است. همچنین در نمونه C3 مشابه نمونه C1، وجود قطر بزرگ‌تر سوراخ‌ها در ردیف وسط نمونه موجب شده کمانش موضعی در لوله رخ دهد. شکل ۱۰ نمودار نیرو-جابجایی



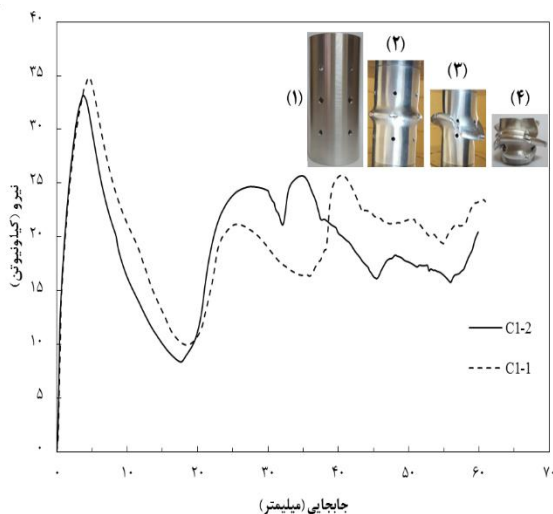
شکل ۶) نمودار نسبت سیگنال به نویز خروجی PEEQ برای چیدمان B برای پارامترهای N, S, d, c به ترتیب سطوح اول (۳ ردیف سوراخ)، سوم (۸ سوراخ در هر ردیف)، دوم (قطر سوراخ ۵ میلی‌متر) و اول (ضریب ۱/۲) خواهد بود. همچنین طبق شکل ۶ (نمودار نسبت سیگنال به نویز خروجی PEEQ برای چیدمان B)، سطوح اول (۳ ردیف سوراخ)، چهارم (۱۲ سوراخ در هر ردیف)، دوم (قطر سوراخ ۵ میلی‌متر) و دوم (ضریب ۱/۴) که به ترتیب برای پارامترهای N, S, d, c می‌باشند بهترین سطوح جهت دستیابی به کمترین میزان کرنش می‌باشند.

### ۳-۳- نتایج تجربی آزمایش‌های بهینه

نمودارهای نسبت سیگنال به نویز (شکل‌های ۳ تا ۶) ترکیب‌های متفاوتی از سطوح بهینه پارامترها را جهت دستیابی به خروجی‌های بهینه برای هر یک از دو چیدمان ارائه می‌کنند. این ترکیب‌ها (هندسه‌ها) با نام‌های C1 تا C4 در جدول ۴ آمده است. اگر مناسب‌ترین مقدار بر مبنای نسبت انرژی به وزن (E/W) انتخاب گردد، آزمایش C1 برای چیدمان A و آزمایش C3 برای چیدمان B بهترین ترکیب سطوح پارامترها را ارائه می‌دهد. همچنین اگر مناسب‌ترین مقدار با ارزیابی کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) انتخاب شود، آزمایش‌های C2 و C4 به ترتیب برای چیدمان‌های A و B بهترین ترکیب سطوح پارامترها را ارائه می‌دهند. آزمایش‌های (ترکیب‌های بهینه سطوح پارامترها) جدول ۴ به صورت تجربی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفتند. برای اطمینان از تکرارپذیری چهار آزمایش به دست آمده، هر آزمون دو بار انجام شد. نام‌گذاری آزمایش‌های تجربی نهایی به صورت  $C_i$  نامگذاری شده که  $i$  بیانگر شماره آزمایش و  $j$  بیانگر شماره تکرار آزمایش می‌باشد.

جدول ۴) ترکیب‌های بهینه پارامترها حاصل از نمودارهای سیگنال به نویز

نوع چیدمان	نام آزمایش	N	S	d	c
A	C1	۳	۶	۴	۱/۲
	C2	۷	۶	۵	۱/۴
	C3	۳	۸	۵	۱/۲
B	C4	۳	۱۲	۵	۱/۴

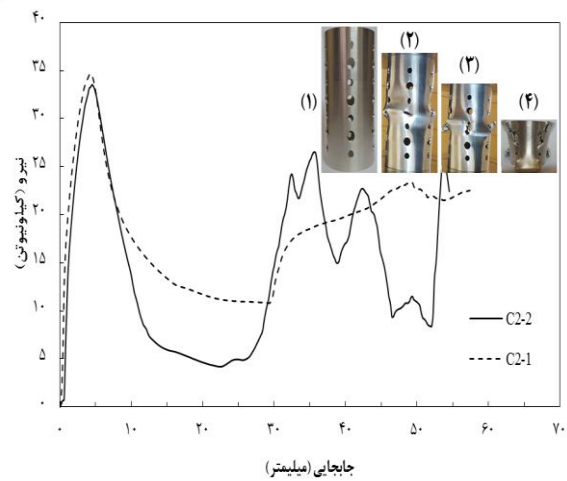


شکل ۷) نیرو-جابجایی آزمایش C1

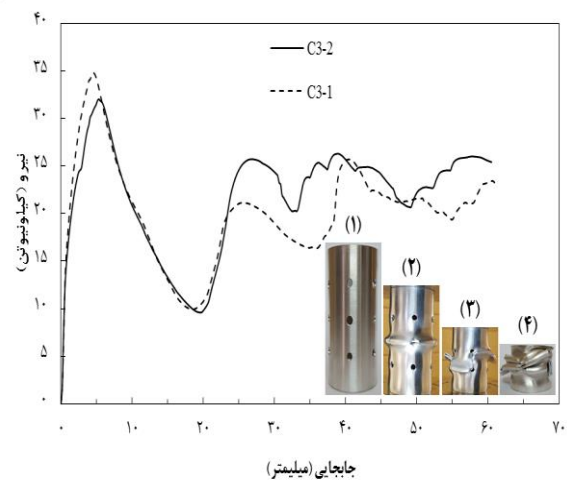
آزمایش C4 به همراه روند تغییرشکل نمونه C4-2 را نشان می‌دهد. در نمونه C4-2 که بدون هیچ‌گونه پارگی، لهیدگی صورت گرفته است، نمونه بسیار تمایل به تغییرشکل منظم داشته است. به عبارت دیگر، اگر هدف دستیابی به تغییرشکلی منظم و بدون پارگی باشد هندسه C4 بهترین گزینه در بین چهار آزمایش نهایی می‌باشد. درحالی‌که هدف از استفاده از این سیستم‌ها، افزایش میزان جذب انرژی وارده می‌باشد.

### ۳-۴- مقایسه قابلیت جذب انرژی آزمایش‌های بهینه

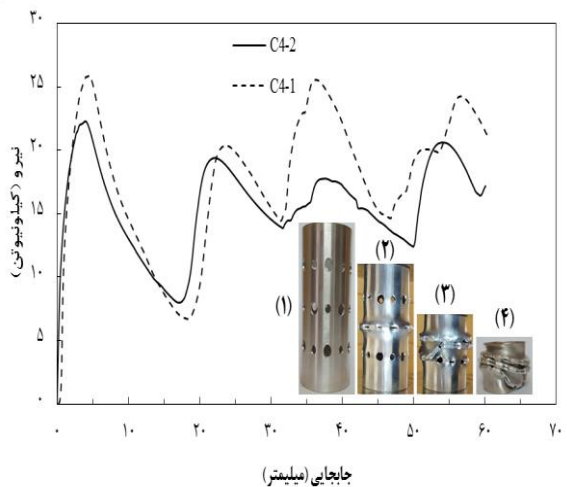
در این قسمت، قابلیت جذب انرژی آزمایش‌های بهینه (C1 تا C4) مقایسه و در نهایت بهترین الگوی هندسی انتخاب خواهد شد. در جدول ۵، هندسه‌های C1 تا C4 به ترتیب از نقطه نظر نیروی اولیه لهیدگی، انرژی جذب شده کل، نسبت انرژی به وزن (E/W) و نسبت نیروی بیشینه اولیه به نیروی متوسط ( $F_{max}/F_{ave}$ ) با هم مقایسه شده‌اند. طبق جدول، در سه هندسه C1، C2 و C3 تغییرات در نیروی اولیه به‌طور میانگین کمتر از ۳٪ بوده که مقدار آن به‌طور میانگین  $33/35$  کیلو نیوتن می‌باشد. درحالی‌که در نمونه C4 مقدار نیروی اولیه تا مقدار  $22/39$  کیلو نیوتن کاهش یافته است. این کاهش به‌خودی‌خود باعث کاهش ضربه‌پذیری نمونه خواهد شد. اما برای انتخاب هندسه مناسب باید فاکتورهای دیگر نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین جدول ۵ نشان می‌دهد که ارتباط مستقیمی بین تعداد سوراخ‌های موجود در لوله و نیروی اولیه وارده به قطعه وجود ندارد. هندسه C3 دارای بیشترین جذب انرژی بوده و نتیجه مناسب‌تری نسبت به هندسه‌های دیگر در نسبت انرژی به وزن داشته است. با توجه به کاهش وزن و وجود سوراخ بیشتر در هر ردیف (۸ سوراخ)، استحکام قطعه در برابر ضربه کمتر شده و مقاومت در برابر لولاشدگی کمتر خواهد کرد. در نتیجه نمودار نیرو-جابجایی دارای روند متعادل‌تری خواهد بود که این موضوع منجر می‌شود سطح زیر نمودار بیشتر شده و در نتیجه نسبت انرژی به وزن بیشتری حاصل شود. با مقایسه جدول ۵ می‌توان دریافت که هندسه C3 در میزان نیروی اولیه لهیدگی در حدود ۲۹٪ نسبت به نمونه C4 افزایش را نشان می‌دهد. شرایط انرژی جذب شده و نسبت انرژی به وزن برای نمونه C3 نسبت به نمونه C4 کمی بهتر است. در نهایت، نسبت نیروی اولیه به نیروی متوسط (به‌طور میانگین) نمونه C3 نسبت به نمونه C4 در حدود ۲۳٪ بیشتر است. با وجود این، به دلیل اینکه انتخاب چیدمان مناسب بر مبنای نسبت انرژی به وزن می‌باشد، چیدمان C3 ( $B:N1S3d2c1$ ) مناسب‌ترین چیدمان است. لازم به یادآوری است که در هندسه C3، چیدمان سوراخ‌ها از نوع طرح B با تعداد ۳ ردیف سوراخ، ۸ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و ضریب قطر  $1/2$  (قطر بزرگ ۶ میلی‌متر) می‌باشد.



شکل ۸) نمودار نیرو-جابجایی آزمایش C2



شکل ۹) نمودار نیرو-جابجایی آزمایش C3



شکل ۱۰) نمودار نیرو-جابجایی آزمایش C4

جدول ۵) مقایسه قابلیت‌های جذب انرژی آزمایش‌های مختلف

C4-1	C4-2	C3-1	C3-2	C2-1	C2-2	C1-1	C1-2	-
۲۵/۹۲	۲۲/۳۹	۳۴/۸۳	۳۲/۰۴	۳۴/۶۶	۳۲/۹۱	۳۴/۸۳	۳۲/۳۴	نیروی اولیه (کیلونیتون)
۱/۰۷	۱/۰۴	۱/۳۲	۱/۲۲	۰/۷۸	۱/۰۵	۱/۱۵	۱/۲۲	انرژی کل (کیلوژول)
۱۴/۰۷	۱۳/۵۵	۱۵/۶۴	۱۶/۹۲	۱۲/۸۰	۹/۵۱	۱۴/۵۲	۱۳/۶۹	نسبت انرژی به وزن (کیلوژول/کیلوگرم)
۱/۴۵	۱/۰۱	۱/۷۲	۱/۴۶	۱/۸۸	۲/۴۸	۱/۶۸	۱/۶۸	نسبت نیروی بیشینه اولیه به نیروی متوسط

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، دو هندسه برای لوله‌های جدارنازک سوراخ‌دار آلومینیومی ۶۰۶۱ با هدف بهبود قابلیت جذب انرژی ارائه شد. با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و مدل شبیه‌سازی اجزای محدود صحت‌سنجی شده با نتایج تجربی، سطوح بهینه پارامترهای هندسی با توجه به معیارهای نسبت انرژی به وزن و کرنش پلاستیک معادل برای دو هندسه پیشنهادی به‌دست آمد. تعداد ردیف، تعداد سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک و ضریب قطر سوراخ کوچک به عنوان پارامترهای هندسی در نظر گرفته شدند. در پایان، چهار هندسه به عنوان آزمایش‌های بهینه انتخاب شده و به‌صورت تجربی تحت آزمون لهیدگی محوری قرار گرفتند. با بررسی نتایج مشخص شد که:

۱. چیدمان سوراخ‌ها تأثیر فراوانی در نوع تغییرشکل خواهد داشت. با افزایش تعداد سوراخ‌ها در هر ردیف نیروی آغازین لهیدگی کاهش می‌یابد. افزایش قطر سوراخ‌ها نیز در کاهش نیروی آغازین لهیدگی موثر می‌باشد.
۲. با تغییر تعداد و اندازه قطر سوراخ و نیز نوع چیدمان آن، میزان جذب انرژی و نسبت انرژی به وزن تغییر می‌کند.
۳. از بین نمونه‌های بهینه حاصل از طراحی آزمایش، نمونه C3 به‌عنوان بهترین هندسه انتخاب گردید که در آن چیدمان سوراخ‌ها طرح B با تعداد ۳ ردیف سوراخ، تعداد ۸ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و ضریب قطر ۱/۲ (قطر بزرگ ۶ میلی‌متر) می‌باشد.

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

**منابع مالی:** تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

#### منابع

- 1- Sadighi A, Eyvazian A, Asgari M, Hamouda AM. A novel axially half corrugated thin-walled tube for energy absorption under axial loading. *Thin-Walled Structures*. 2019 Dec 1;145:106418.
- 2- Aghamirzaie M, Najibi A, Ghasemi-Ghalebahman A. Energy absorption investigation of octagonal multi-layered origami thin-walled tubes under quasi-static axial loading. *International Journal of Crashworthiness*. 2023 Jul 4;28(4):511-22.
- 3- Xing J, Xu P, Yao S, Zhao H, Zhao Z, Wang Z. Study on the layout strategy of diaphragms to enhance the energy absorption of thin-walled square tubes. *InStructures* 2021 Feb 1 (Vol. 29, pp. 294-304). Elsevier.
- 4- Moradpour A, Elyasi M, Montazeri S. Developing a new thin-walled tube structure and analyzing its crushing performance for aa 60601 and mild steel under axial loading. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016 Jul;69:1107-17.
- 5- Yao S, Yan K, Lu S, Xu P. Prediction and application of energy absorption characteristics of thin-walled circular tubes based on dimensional analysis. *Thin-Walled Structures*. 2018 Sep 1;130:505-19.
- 6- Graciano C, Martínez GA, Smith D. Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes. *Thin-Walled Structures*. 2009 Aug 1;47(8-9):953-61.
- 7- Ma J, Le Y, You Z. Axial crushing tests of thin-walled steel square tubes with pyramid patterns. *AIAA*. 2010.
- 8- Nia AA, Badnava H, Nejad KF. An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thin-walled tubes. *Materials & Design*. 2011 Jun 1;32(6):3594-607.



- 9- Salehghaffari S, Rais-Rohani M, Najafi A. Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes. Thin-walled structures. 2011 Mar 1;49(3):397-408.
- 10- Tai YS, Huang MY, Hu HT. Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load. Theoretical and applied fracture mechanics. 2010 Feb 1;53(1):1-8.
- 11- Song J, Chen Y, Lu G. Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing. International journal of mechanical sciences. 2013 Jan 1;66:239-48.
- 12- Tang Z, Liu S, Zhang Z. Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns. Thin-Walled Structures. 2013 Jan 1;62:75-84.
- 13- Simhachalam B, Rao CL, Srinivas K. Compression behavior and energy absorption of aluminum alloy AA6061 tubes with multiple holes. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics. 2014 May 4;15(3):232-41.
- 14- Mirmohammadsadeghi SE, Khalili KH, Ahmadi SY, Hosseinipour SJ. Experimental and finite element simulation investigation of axial crushing of grooved thin-walled tubes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015 Apr;77:1627-43.
- 15- Elyasi M, Moradpour A, Montazeri S. Axial crushing in a novel technique of thin-walled tube. Key Engineering Materials. 2014 Oct 15;622:709-16.
- 16- Montazeri S, Elyasi M, Moradpour A. Investigating the energy absorption, SEA and crushing performance of holed and grooved thin-walled tubes under axial loading with different materials. Thin-Walled Structures. 2018 Oct 1;131:646-53.