



بررسی تجربی و شبیه‌سازی قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدار نازک دایروی سوراخ‌دار آلومینیومی تحت بار فشاری محوری

مجید الیاسی^{۱*}، مقصد روح‌الامینی آهانگر^۲، وحید مدانلو^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: elyasi@nit.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۱ مرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۶ آذر ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

لوله‌های جدار نازک

نیروی لهدگی

نسبت انرژی به وزن

شبیه‌سازی اجزای محدود

لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار به عنوان یک گزینه جذب انرژی مناسب، همواره مورد توجه محققان بوده است. در این پژوهش، قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار با الگوی نامنظم با لوله‌های جدار نازک بدون سوراخ و سوراخ‌دار منظم مقایسه شده است. در همین راستا، از لوله‌های جدار نازک استوانه‌های از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ تحت بارگذاری محوری استفاده شده است. در ابتدا فرآیند با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود مدل‌سازی و صحت نتایج عددی با استفاده از نتایج تجربی تایید شد. سپس با استفاده از آرایه متعامد L16 تاگوچی، تاثیر پارامترهای هندسی بر روی نسبت انرژی به وزن لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار با الگوی نامنظم بررسی شد. در ادامه، با استفاده از تحلیل سیگنال به نویز، چیدمان بهینه به منظور دستیابی به بیشینه نسبت انرژی به وزن حاصل شد. در پایان، آزمایش‌های تجربی بر روی لوله با چیدمان بهینه، لوله بدون سوراخ و لوله سوراخ‌دار منظم انجام شد. با مقایسه قابلیت جذب انرژی لوله‌های مختلف مشخص شد که با چیدمان بهینه، نسبت انرژی به وزن نسبت به لوله‌های بدون سوراخ و سوراخ‌دار منظم به ترتیب در حدود ۱۹ و ۲۶٪ افزایش می‌یابد. همچنین با استفاده از الگوی پیشنهادی جدید، نسبت نیروی اولیه به نیروی متوسط نسبت به نمونه‌های بدون سوراخ و سوراخ‌دار منظم به ترتیب در حدود ۱۷ و ۱۹٪ کاهش می‌یابد.

Experimental and numerical investigation of energy absorption capability of holed thin-walled circular aluminum tubes under axial compression loading

Majid Elyasi^{1*}, Meghdad Roohol amini Ahangar², Vahid Modanloo³

1- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- MSc Graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

* Corresponding Author's Email: elyasi@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 2 August 2023

Accepted: 17 December 2023

Keywords:

Thin-Walled Tubes

Crushing Force

Energy to Weight Ratio

Finite Element Simulation

Abstract

Perforated thin-walled tubes have always been the focus of researchers as an appropriate energy absorption alternative. In this research, the energy absorption capability of perforated thin-walled tubes with irregular pattern has been compared with thin-walled tubes without holes and regular holes. In this regard, cylindrical thin-walled tubes made of aluminum alloy 6061 have been used under axial loading. At first, the process was modeled using the finite element simulation, and the accuracy of the numerical results was verified using the experimental results. Then, using Taguchi's L16 orthogonal array, the effect of geometrical parameters on the energy-to-weight ratio of the perforated thin-walled tubes with irregular pattern was investigated. Afterward, the optimal arrangement was obtained to achieve the maximum energy-to-weight ratio using the signal-to-noise analysis. Finally, experimental tests were carried out on the tube with the optimal arrangement, the tube without holes and the tube with regular holes. By comparing the energy absorption ability of various tubes, it was found that with the optimal arrangement, the energy-to-weight ratio increases by 19 and 26%, respectively, compared to the non-perforated and regular perforated tubes. Also, using the new proposed pattern, the initial force to average force is reduced by 17 and 19%, respectively, compared to the non-perforated and regular perforated samples.

Please cite this article using:

Elyasi M, Rooholamini Ahangar M, Modanloo V. Experimental and numerical investigation of energy absorption capability of holed thin-walled circular aluminum tubes under axial compression loading. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 August 23;10(6):29-39. doi: 10.22034/IJME.2023.409379.1813 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

سیستم‌های جاذب انرژی به‌طور گسترده در هواپیما، کشتی، بالابر و ماشین‌آلات استفاده می‌شوند [۱]. هدف استفاده از این سیستم‌ها، جذب مقدار انرژی در تصادف یا نیروی ضربه برای کاهش خسارات است. [۲]. بنابراین، سیستمی که بتواند مقدار زیادی انرژی را جذب کند بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۳]. از پرکاربردترین مواد در این سیستم‌ها، فلزاتی نظیر آلومینیوم و فولاد می‌باشند [۴]. از مزیت‌های آلومینیوم می‌توان به سبکی و قابلیت شکل‌پذیری بالا اشاره نمود [۵]. همچنین مزیت فولاد بر خورداری از استحکام بالا می‌باشد [۶]. امروزه، ارائه مدل‌هایی که بتواند با داشتن کمترین وزن، انرژی بیشتری را جذب کنند توجه محققان را به خود معطوف کرده است. لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار به دلیل سهولت تولید، عدم پیچیدگی هندسه و نسبت انرژی به وزن پایین گزینه مناسبی برای استفاده در سیستم‌های جاذب انرژی می‌باشند [۷]. تاکنون پژوهش‌های بسیاری در خصوص سیستم‌های جاذب انرژی تحت بارگذاری محوری صورت گرفته است. برای افزایش جذب انرژی در لوله‌های جدار نازک، سطح مقطع‌های مختلف و لوله‌هایی با مدل هندسی متفاوت مورد تحلیل قرار گرفته است. به‌علاوه تغییر شکل لوله‌ها با توجه به منحنی نیرو-جابجایی مورد بررسی قرار گرفته است.

همودا و همکاران [۸] میزان جذب انرژی را در لوله‌هایی با سطح مقطع مربعی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در نمونه با سطح مقطع دایره‌ای، ایجاد حلقه می‌تواند به تشکیل لولا در نیروی کمتری کمک کند. همچنین با تغییر در فاصله حلقه، محل قرارگیری لولاها کنترل می‌شود. ایجاد حلقه‌های نامتقارن در نمونه‌ها باعث شکل‌پذیری بهتری نسبت به نمونه‌های متقارن می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد که ضخامت و طول نمونه‌ها تاثیر قابل توجهی بر نحوه لهیده شدن دارند.

آداچی و همکاران [۹] میزان جذب انرژی را در لوله‌های دندان‌دار تحت نیروی محوری بررسی کردند. آن‌ها به منظور افزایش میزان جذب انرژی، اثر فاصله دندان‌ها را به صورت متقارن و نامتقارن مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که یک فاصله مناسب میان دندان‌ها وجود دارد که باعث تقارن یا عدم تقارن حین لهیدگی می‌شود.

ژنگ و همکاران [۱۰] با ایجاد تغییراتی در ضخامت دیواره در مقطع لوله مربعی به بهبود خواص این نوع جاذب‌های انرژی پرداختند. آن‌ها با بررسی مکانیزم ایجاد چین‌خوردگی به این نتیجه رسیدند که اگر در گوشه‌های مربع ضخامت بیشتر از سایر نقاط اضلاع باشد قابلیت جذب انرژی آن‌ها افزایش می‌یابد. نتایج آن‌ها نشان داد با انتخاب بهینه پارامترهای تغییر ضخامت می‌توان بدون افزایش در پیک اولیه نیرو (نیروی لهیدگی) خواص جذب انرژی را بهبود بخشید.

علوی‌نیا و پارساپور [۱۱] رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک با مقاطع مختلف چند ضلعی در حالات تک‌سلولی و چندسلولی مورد مطالعه قرار دادند. سطح مقطع‌های بررسی شده به‌صورت مثلثی، مربعی، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی بودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ایجاد سلول‌های داخلی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار جذب انرژی دارد. همچنین با انتخاب مناسب چیدمان و تعداد سلول‌ها می‌توان خواص جذب انرژی را بهبود بخشید.

نیک‌خواه و همکاران [۱۲] رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۰ تحت بارگذاری دینامیکی را به صورت تجربی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود LS-DYNA مورد مطالعه قرار دادند. سطح مقطع لوله‌های در نظر گرفته شده به‌صورت دایروی، شش‌ضلعی و مربعی بود. همچنین آن‌ها از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ و روش تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS برای انتخاب بهترین حالت استفاده کردند. پارامترهای نسبت انرژی به وزن و همچنین پیک نیروی اولیه به عنوان معیارهای انتخاب در نظر گرفته شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که لوله با سطح مقطع دایروی با سوراخ مربعی بهترین عملکرد و همچنین لوله با سطح مقطع مربعی بدون سوراخ بدترین عملکرد را دارد.

گراچیانو و همکاران [۱۳] لهیدگی لوله‌های مربعی و دایروی با شبکه‌های محیطی از جنس فولاد کربن‌دار را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین تاثیر زوایای سلول‌های به کار برده شده در دو راستای اصلی را بررسی کردند. نیروی محوری توسط یک عملگر هیدرولیکی با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن و جابجایی ۳۰۰ میلی‌متر اعمال شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کمترین زاویه سلول‌ها منجر به پاسخ‌های با ثبات‌تر و قابل‌کنترلی خواهد شد. همچنین در این حالت احتمال ایجاد کمناش به کمترین مقدار خود می‌رسد.

پیرمحمد و اسماعیلی مرزدشتی [۱۴] به بررسی تاثیر هندسه و ابعاد حفره بر عملکرد لهیدگی سازه‌های دو جداره مربعی و هشت ضلعی تحت بارگذاری محوری و مورب پرداختند. سازه‌های مورد بررسی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ عملیات حرارتی شده بودند. سطح مقطع حفره‌ها به‌صورت مستطیلی، شش ضلعی و بیضی در نظر گرفته شد. آن‌ها برای شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزار اجزای

محدود LS-DYNA استفاده کردند. نسبت انرژی به وزن و پیک نیروی اولیه به عنوان معیارهای جذب انرژی در نظر گرفته شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از حفره بر روی دیواره‌های سازه‌ها منجر به بهبود قابل توجهی در کنترل میزان جذب انرژی خواهد شد. همه ساختارهای حفره‌دار در مقایسه با ساختارهای بدون حفره نیروی اولیه لهیدگی کمتری را نشان دادند. نهایتاً، سازه با سطح مقطع مربعی با حفره‌های شش ضلعی به‌عنوان بهترین گزینه جذب انرژی انتخاب شد.

تنگ و همکاران [۱۵] میزان جذب انرژی لوله‌های چند سلولی 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 جدار نازک استوانه‌های دارند. همچنین بررسی پارامتریک نشان داد که ضخامت و تعداد سلول‌ها به طور آشکار بر روی میزان جذب انرژی موثر هستند.

رهی و همکاران [۱۶] میزان انرژی جذب شده و نحوه لهیدگی لوله‌های دوجداره آلومینیومی با سطح مقطع‌های دایره‌ای و مربعی را تحت بارگذاری محوری به روش عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند. آن‌ها برای شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده نمودند. آن‌ها در پژوهش خود اثر پارامترهای مختلفی از جمله تقویت کننده چندسلولی و درپوش مسطح را بر روی قابلیت‌های جذب انرژی شامل نیروی اولیه لهیدگی و متوسط آن، انرژی جذب شده کل و نسبت انرژی به وزن مورد بررسی قرار دادند.

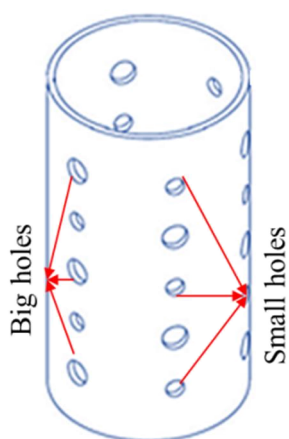
همانطور که قابل مشاهده است، تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص بررسی انواع مختلف سیستم‌های جذب انرژی تحت بار محوری انجام شده است. با این وجود، پژوهشی در خصوص استفاده از لوله‌های جدار نازک آلومینیومی استوانه‌های با الگوی نامنظم سوراخ‌ها تحت بارگذاری محوری یافت نشد. میزان جذب انرژی در لوله‌های جدار نازک به دلیل وجود هندسه‌های متفاوت و همچنین وزن نهایی سیستم حائز اهمیت است. لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار به دلیل عدم پیچیدگی و دشواری در فرآیند ایجاد شبکه، گزینه مطلوبی برای استفاده در سیستم‌های جذب انرژی می‌باشند. در این مقاله، با ترکیب روش طراحی آزمایش‌ها با استفاده از آرایه متعام تاگوچی و نیز روش‌های شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایشگاهی، چیدمان بهینه سوراخ‌ها برای لوله‌های جدار نازک استوانه‌های از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به دست آمده است. در پایان، ویژگی‌های جذب انرژی در حالت بهینه لوله سوراخ‌دار نامنظم، با لوله‌های بدون سوراخ و سوراخ‌دار منظم مقایسه شده است. نوآوری اصلی این تحقیق، وجود سوراخ‌های دایروی با قطرهای غیر هم‌اندازه با چینش یکی در میان در لوله‌های جدار نازک می‌باشد که منجر به بهبود قابلیت جذب انرژی آن‌ها خواهد شد.

۲- مراحل تجربی

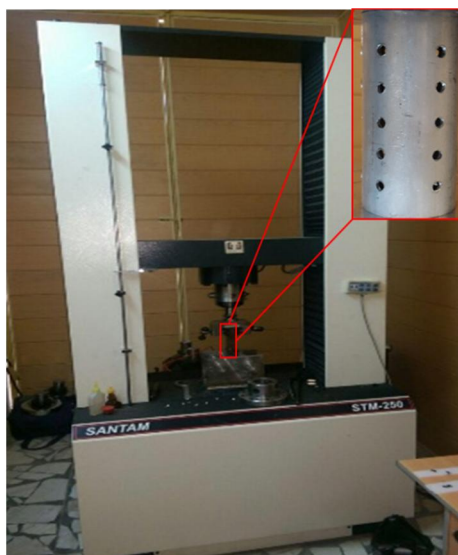
در این تحقیق، از لوله‌های جدار نازک استوانه‌های از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات هندسی لوله‌های جدار نازک را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش‌های تجربی لهیدگی تحت بار محوری، از یک دستگاه پرس سنتام با ظرفیت ۲۵ تن استفاده شد. پس از قرارگیری نمونه‌ها بین دو فک پرس، فک بالا با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت کرده و حرکت آن به وسیله کامپیوتر متصل به دستگاه تا جابجایی ۶۰ میلی‌متر کنترل شد. شکل ۱ (الف) دستگاه پرس استفاده شده و لوله سوراخ‌دار منظم برای آزمون لهیدگی و شکل ۱ (ب) شماتیک لوله سوراخ‌دار نامنظم پیشنهاد شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. طبق شکل، در هر ردیف قطر سوراخ‌ها یک در میان کوچک و بزرگ می‌شود. دلیل این انتخاب، جلوگیری از بروز کماتش کلی در قسمت‌هایی که سوراخ بر روی آن ایجاد شده می‌باشد.

جدول ۱ مشخصات هندسی لوله‌های جدار نازک

مقدار	مشخصه (واحد)
۹۶	طول (mm)
۵۵	قطر خارجی (mm)
۲	ضخامت (mm)



(ب)

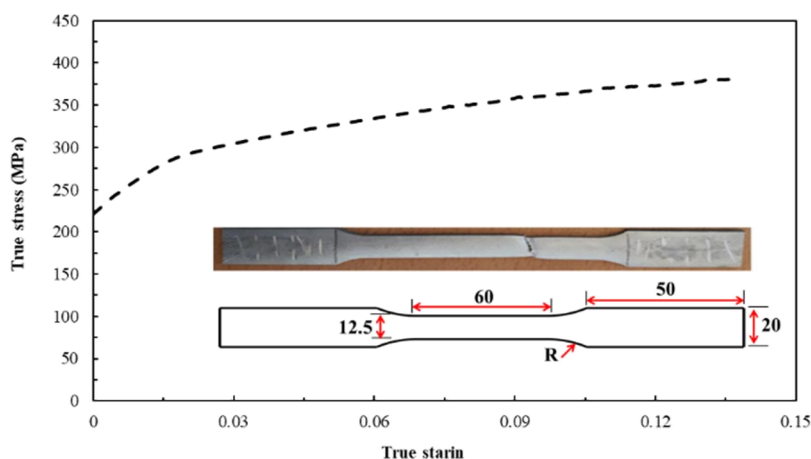


(الف)

شکل ۱ الف) اجرای آزمون لهیدگی بر روی دستگاه پرس، ب) چیدمان سوراخ‌ها در الگوی پیشنهادی

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

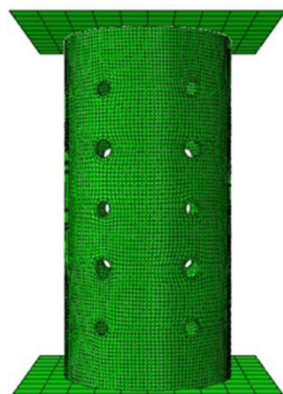
جهت شبیه‌سازی آزمون لهیدگی لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. لوله‌های موردنظر به صورت توپر شکل‌پذیر و فک‌های پرس به صورت پوسته صلب مدل شدند. به منظور معرفی رفتار تغییر شکل پلاستیک ماده به نرم‌افزار، از نمودار تنش-کرنش حقیقی مطابق با شکل ۲ استفاده شد. این نمودار خروجی آزمون کشش انجام شده مطابق با استاندارد ASTM E8-11 می‌باشد.



شکل ۲ نمودار تنش-کرنش لوله آلومینیومی ۶۰۶۱

برای تعریف تماس لوله با فک‌های پرس، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. مطابق با مرجع [۱۷]، ضریب اصطکاک بین لوله با فک‌ها و نیز تماس لوله با خود در حین لهیدگی با ورق ۰/۲ در نظر گرفته شد. فک بالا با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در راستای عمودی جابجا می‌شود. برای شبکه‌بندی لوله از المان توپر هشت‌گه‌ای استفاده شد. مدل اجزای محدود فرآیند در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار انرژی جذب شده پارامتر مهمی در سیستم‌های جذب انرژی است. برای محاسبه انرژی جذب شده از مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی استفاده می‌شود. در این مقاله، از رابطه ۱ برای محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی و در نهایت نسبت انرژی به وزن (SEA) استفاده شد که در آن L میزان جابجایی، P نیروی وارده در هر لحظه و W وزن نمونه می‌باشد.

$$SEA = \frac{\int_0^L P(x) dx}{w} \quad (1)$$



شکل ۳ مدل اجزای محدود فرآیند

۴- طراحی آزمایش

در این مقاله، از آرایه متعامد L_{16} تاگوچی به منظور مطالعه اثر پارامترهای هندسی بر روی جذب انرژی لوله‌های سوراخ‌دار نامنظم استفاده شده است. مطابق با جدول ۲، تعداد ردیف سوراخ‌ها در چهار سطح، تعداد سوراخ در هر ردیف در چهار سطح، قطر سوراخ کوچک در چهار سطح و ضریب قطر سوراخ کوچک در دو سطح به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که ضریب قطر عددی است که با ضرب آن در قطر کوچک می‌توان قطر سوراخ بزرگ را بدست آورد. همچنین نسبت SEA لوله‌ها به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد. از آنجا که بیشینه SEA مطلوب می‌باشد، از رابطه ۲ برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز استفاده شد [۱۸]. در این رابطه، y_i مقدار پاسخ و n تعداد تکرارها می‌باشد.

جدول ۲ پارامترهای ورودی به همراه سطوح آن‌ها

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 (mm)	d	۴	۵	۶	۷
ضریب قطر کوچک	c	۱/۲	۱/۴	-	-

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i} \right)^2 \right) \quad (2)$$

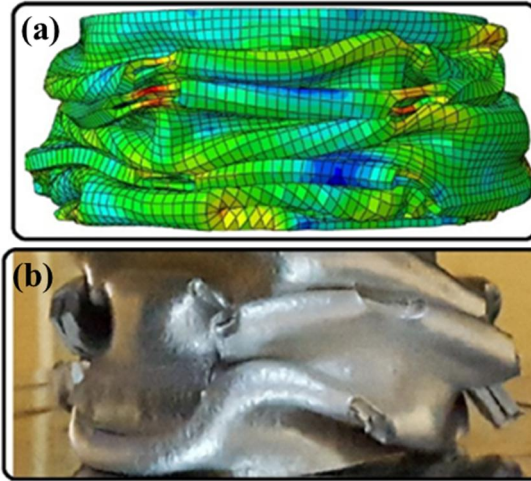
۵- نتایج و بحث

آزمایش‌های طراحی شده با روش تاگوچی، با استفاده از مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده با نتایج تجربی انجام شدند. جدول ۳ نتایج نسبت SEA برای هر آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی می‌باشند. همانطور که مشخص است، مطابقت قابل قبولی بین نتایج برقرار بوده و در نتیجه صحت مدل اجزای محدود تایید شد. در این مقاله از تحلیل سیگنال به نویز برای انتخاب سطوح بهینه پارامترها استفاده شد. شکل ۶ نمودار سیگنال به نویز برای خروجی SEA را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، این تابع از نوع بزرگتر بهتر بوده و مقادیر بیشینه آن مطلوب است [۱۹]. طبق شکل،

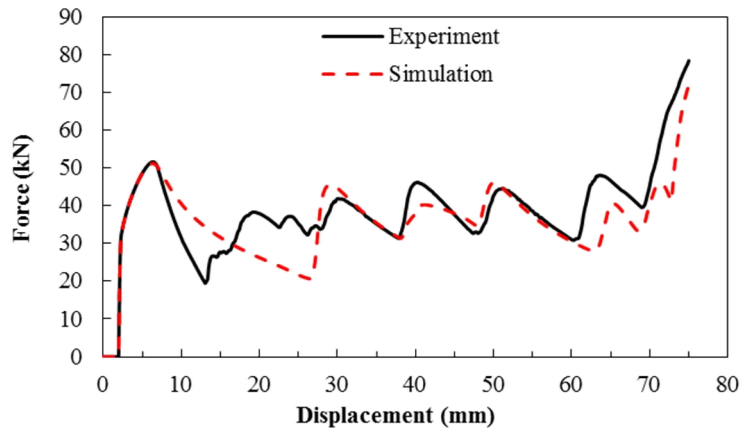
بهترین سطوح برای پارامترهای N ، S ، d و c به ترتیب سطوح اول (۳ ردیف سوراخ)، سوم (۸ سوراخ در هر ردیف)، دوم (قطر سوراخ ۵ میلی‌متر) و اول (ضریب ۱/۲) می‌باشد (N1S3d2c1). در نتیجه، آزمایش تجربی با سطوح مذکور انجام و نتایج با لوله بدون سوراخ و سوراخ‌دار منظم مقایسه خواهد شد. در ادامه برای مقایسه قابلیت جذب انرژی حالت‌های مختلف، نمونه سوراخ‌دار نامنظم با چیدمان بهینه به صورت C3، نمونه بدون سوراخ به صورت S1 و نمونه سوراخ‌دار منظم به صورت T1 در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که سوراخ‌های تعبیه شده در نمونه T1 همگی دارای قطر یکسان (۶ میلی‌متر) هستند. همچنین تعداد ردیف سوراخ‌ها پنج ردیف می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که ابعاد هندسی لوله T1 مطابق با بهترین نتیجه قبلی نویسندگان مقاله حاضر می‌باشد [۱۷]. شکل ۷ مراحل تغییر شکل نمونه C3 را نشان می‌دهد. در شکل ۸ نیز نمونه‌های S1 و T1 بعد و قبل از آزمون لهیدگی نشان داده شده است.

جدول ۳ نتایج نسبت SEA برای آزمایش‌های طراحی شده

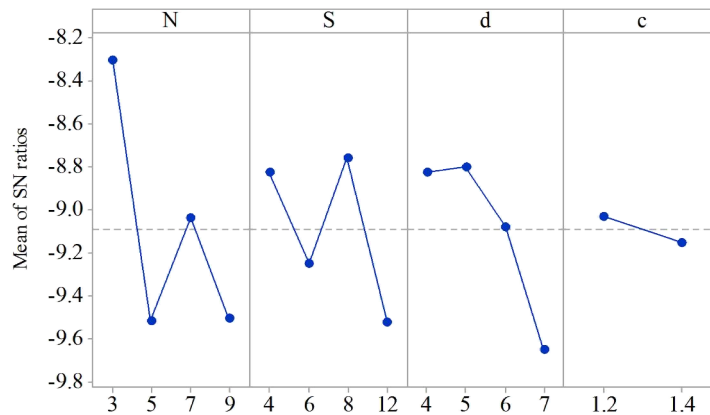
شماره آزمایش	N	S	d	c	SEA (kJ/kg)
۱	۳	۴	۴	۱/۲	۱/۶۵۴
۲	۳	۶	۵	۱/۲	۱/۱۹۰
۳	۳	۸	۶	۱/۴	۱/۱۹۱
۴	۳	۱۲	۷	۱/۴	۱/۳۴۳
۵	۵	۴	۵	۱/۴	۱/۸۵۷
۶	۵	۶	۴	۱/۴	۱/۷۷۹
۷	۵	۸	۷	۱/۲	۱/۹۰۶
۸	۵	۱۲	۶	۱/۲	۱/۷۶۶
۹	۷	۴	۶	۱/۲	۱/۱۲۳
۱۰	۷	۶	۷	۱/۲	۱/۷۷۳
۱۱	۷	۸	۴	۱/۴	۱/۶۰۳
۱۲	۷	۱۲	۵	۱/۴	۱/۵۴۳
۱۳	۹	۴	۷	۱/۴	۱/۱۴۳
۱۴	۹	۶	۶	۱/۴	۱/۵۹۶
۱۵	۹	۸	۵	۱/۲	۱/۸۱۸
۱۶	۹	۱۲	۴	۱/۲	۱/۴۲۶



شکل ۴ لوله سوراخ‌دار نامنظم لهیده شده، الف) شبیه‌سازی، ب) تجربی

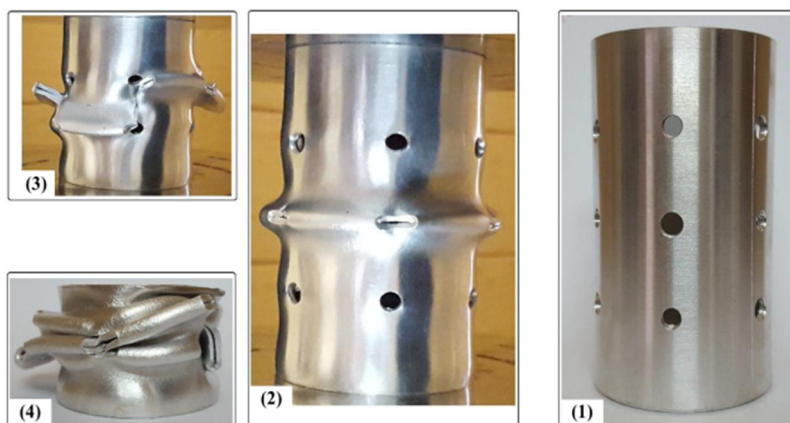


شکل ۵ مقایسه نمودار نیرو-جابجایی لوله سوراخ‌دار نامنظم لهیده شده

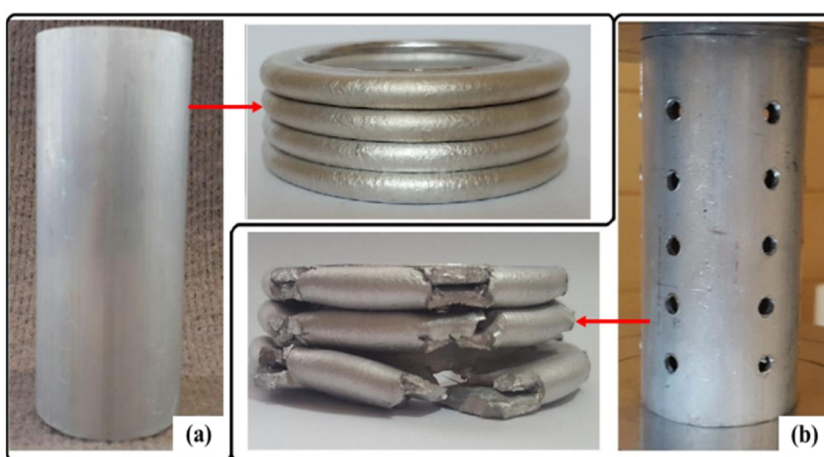


Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۶ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای خروجی SEA



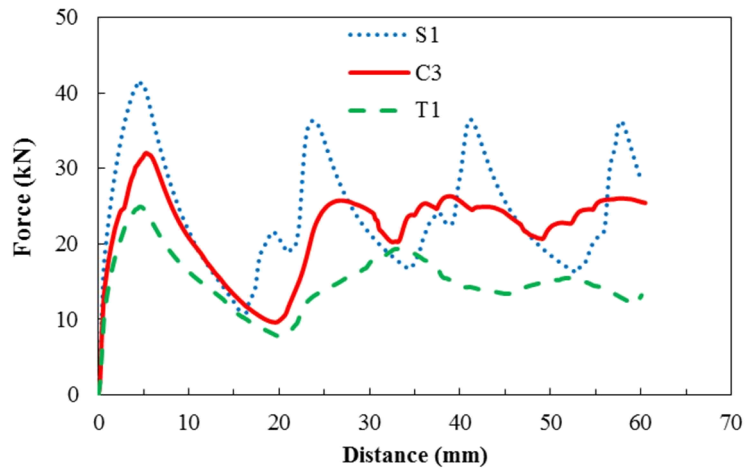
شکل ۷ مراحل تغییر شکل لوله C3



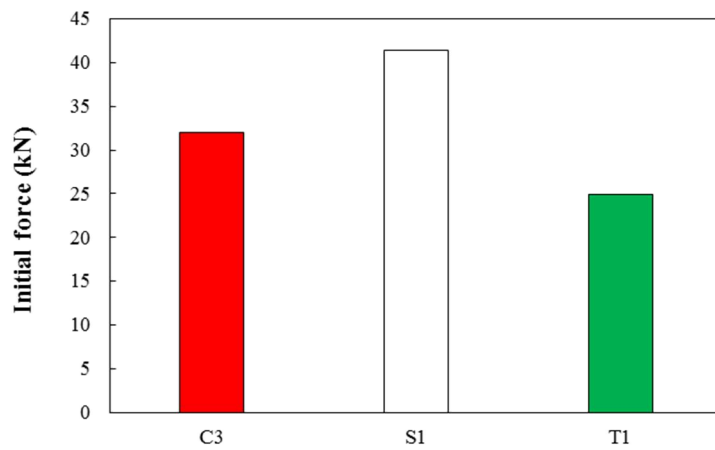
شکل ۸ لوله قبل و بعد از لهیدگی الف (S1، ب) T1

برای مقایسه بهتر ویژگی‌های جذب انرژی، چهار ویژگی نیروی اولیه جذب شده، میزان انرژی جذب شده کل، نسبت انرژی به وزن و نسبت نیروی بیشینه اولیه به نیروی متوسط بررسی شده‌اند. اولین پیک در نمودار نیرو-جابجایی بیانگر نیروی اولیه لهیدگی یا همان مقدار نیروی لازم برای ایجاد اولین لولا بوده که در ضربه‌پذیری سیستم‌های جاذب انرژی بسیار مهم است [۱۷]. از طرف دیگر، مقدار زیاد انرژی جذب شده (سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی) به تنهایی ملاک خوبی برای انتخاب یک جاذب انرژی نیست. به همین منظور برای ارزیابی مناسب‌تر، دو پارامتر SEA و نسبت نیروی بیشینه اولیه به نیروی متوسط نیز باید بررسی و ارزیابی شوند. هر چقدر این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده آن است که ضربات متعادل‌تری به سیستم وارد شده است. به عبارت دیگر، قله و دره کمتری در نمودار نیرو-جابجایی دیده می‌شود. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی برای هر یک از سه لوله S1، T1 و C3 در شکل ۹ آمده است. طبق شکل، اولین قله برای نمونه C3 کمتر از نمونه S1 و بیشتر از نمونه T1 می‌باشد. نتایج مقایسه سه نمونه S1، T1 و C3 با توجه به پارامترهای جذب انرژی مذکور در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ آمده است. با بررسی نتایج مشخص شد که نیروی بیشینه اولیه برای نمونه C3 برابر با ۳۲/۰۴ کیلونیوتن بوده که نسبت به نمونه S1 در حدود ۲۳٪ کمتر است. در حالی که این مقدار در مقایسه با نمونه T1 در حدود ۲۳٪ بیشتر است. میزان انرژی جذب شده در هندسه C3 نسبت به لوله S1 تا حدود ۹٪ کاهش یافته اما در مقایسه با لوله T1 تا حدود ۲۱٪ افزایش یافته است. همچنین، نمونه بدون سوراخ توان بیشتری در جذب انرژی داشته که دلیل آن عدم وجود تمرکز تنش در سطح لوله بوده که دلیلی بر مقاومت لوله در برابر خم‌شدگی تا سطح نیروی بالاتر می‌باشد. در نتیجه میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. مقایسه نسبت SEA نشان می‌دهد که به علت وجود سوراخ در نمونه C3 و در نتیجه کاهش وزن لوله، مطابق انتظار مقدار SEA در نمونه C3 نسبت به نمونه S1 در حدود ۱۹٪ بیشتر می‌باشد. افزایش ۲۶٪ این نسبت در لوله C3 در مقایسه با لوله T1،

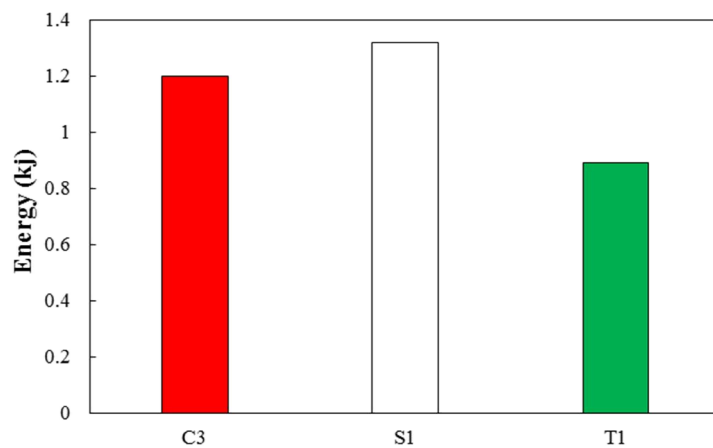
بیانگر بهبود قدرت جذب انرژی در لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار با چیدمان پیشنهاد شده در این تحقیق می‌باشد. به‌علاوه، نمونه C3 دارای تغییرات نیروی کمتری بوده که بیانگر اعمال ضربات متعادل‌تر به سیستم می‌باشد.



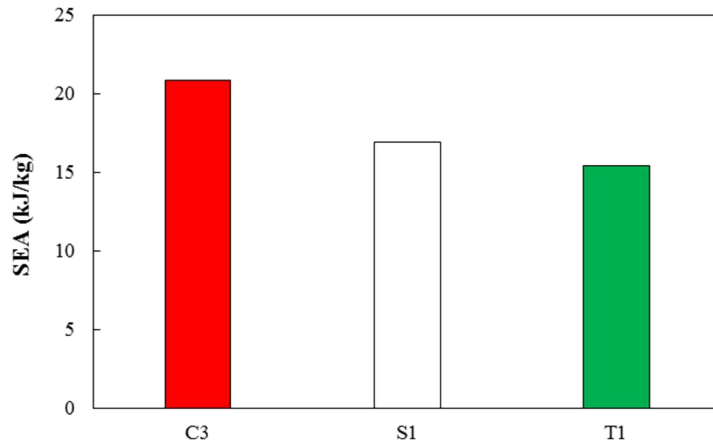
شکل ۹ مقایسه نمودار نیرو-جابجایی لوله‌های S1، T1 و C3



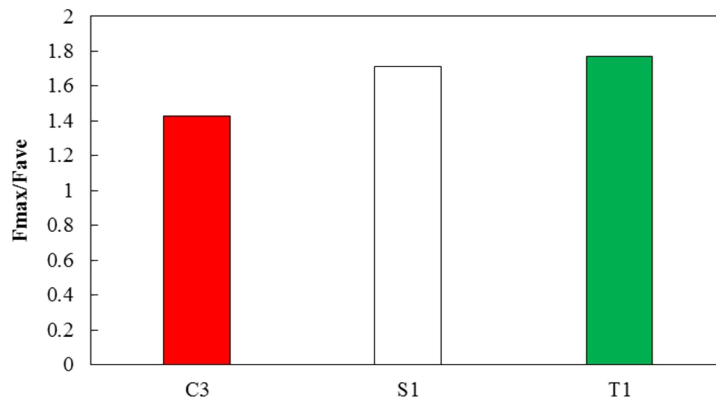
شکل ۱۰ مقایسه مقدار نیروی اولیه جذب شده



شکل ۱۱ مقایسه میزان انرژی جذب شده



شکل ۱۲ مقایسه نسبت SEA



شکل ۱۳ مقایسه نسبت نیروی اولیه به نیروی متوسط

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک الگوی جدید چیدمان سوراخ‌ها در لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار استوانه‌های از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ ارائه شد. جهت انتخاب بهترین چیدمان سوراخ‌ها به منظور دستیابی به بیشینه نسبت انرژی به وزن، پارامترهای تعداد ردیف سوراخ، تعداد سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک و ضریب قطر سوراخ کوچک با استفاده از آرایه متعامد L_{16} تاگوچی و نسبت سیگنال به نویز تحلیل و بررسی شدند. در ادامه، لوله بهینه به صورت تجربی تحت آزمایش لهیدگی قرار گرفت و نتایج جذب انرژی با لوله‌های بدون سوراخ و سوراخ‌دار منظم مقایسه شد. بررسی نتایج نشان داد که:

۱- طراحی لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار با استفاده از الگوی پیشنهادی (سوراخ‌های نامنظم یکی در میان)، به طور کلی منجر به بهبود قابلیت جذب انرژی نسبت به حالت سوراخ‌دار منظم شده است.

۲- لوله سوراخ‌دار نامنظم با تعداد ۳ ردیف سوراخ، تعداد ۸ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و ضریب قطر $1/2$ (قطر بزرگ ۶ میلی‌متر) به‌عنوان بهترین چیدمان (C3) برای دستیابی به بیشترین نسبت انرژی به وزن انتخاب شد.

۳- مقدار نیروی اولیه لهیدگی برای نمونه C3 در مقایسه با نمونه بدون سوراخ (S1) در حدود ۲۳٪ کمتر و در مقایسه با نمونه سوراخ‌دار منظم (T1) در حدود ۲۳٪ بیشتر به دست آمد.

۴- مقدار نسبت انرژی به وزن حاصل از هندسه C3 نسبت به نمونه S1 و نمونه T1 به ترتیب ۱۹ و ۲۶٪ بهبود یافت.

۵- نسبت نیروی بیشینه به نیروی متوسط لوله C3 نسبت به لوله S1 و لوله T1 به ترتیب ۱۷ و ۱۹٪ کاهش یافت.

References

- [1] Elyasi M, Moradpour A, Montazeri S. Axial Crushing in a Novel Technique of Thin-Walled Tube, Key Engineering Materials. 2014; 622-623: 709-716. doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.709](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.709)
- [2] Elyasi M, Montazeri S, Moradpour A. Investigating the effect of material type in the new design of thin-walled tubes under axial loading, Advances in Materials and Processing Technologies. 2015;1(3-4): 375-383. doi: [10.1080/2374068X.2015.1133759](https://doi.org/10.1080/2374068X.2015.1133759)
- [3] Lu H, Wang X, Chen T. In-plane dynamics crushing of a combined auxetic honeycomb with negative Poisson's ratio and enhanced energy absorption, Thin-Walled Structures. 2021; 160: 107366. doi: [10.1016/j.tws.2020.107366](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107366)
- [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; 69: 1107-1117. doi: [10.1007/s12666-015-0629-2](https://doi.org/10.1007/s12666-015-0629-2)
- [5] Elyasi M, Modanloo V, Talebi-Ghadikolaee H, Ahmadi-Khatir F, Akhoundi B. Investigating the effect of heat treatment in hydraulic rotary draw bending of AA6063 tubes, Modares Mechanical Engineering. 2023; 23 (4): 257-264. [In Persian]
- [6] Modanloo V, Akhoundi B, Mashayekhi A, Talebi-Ghadikolaee H, Zeinolabedin Beygi A. The study of forming of steel cups using hydrodynamic deep drawing process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022; 9(8): 56-64. [In Persian]
- [7] Tayyebati M, Ahmadi H, Liaghat G. Experimental and numerical investigation on crushing of metal-composite hybrid energy absorber under a quasi-static loading, Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020; 6(8): 54-66. [In Persian]
- [8] Hamouda AM, Saied RO, Shuaieib FM. Energy absorption capacities of square tubular structures, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2007; 24(1): 36-42.
- [9] Adachi T, Tomiyama A, Araki W, Yamaji A. Energy absorption of a thin-walled cylinder with ribs subjected to axial impact, international journal of impact engineering. 2008; 35(2): 65-79. doi: [10.1016/j.ijimpeng.2006.11.005](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.11.005)
- [10] Zhang X, Wen Z, Zhang H, Axial crushing and optimal design of square tubes with graded thickness, Thin-Walled Structures. 2014; 84: 263-274. doi: [10.1016/j.tws.2014.07.004](https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.07.004)
- [11] Nia AA, Parsapour M. Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections, Thin-Walled Structures. 2014; 74: 155-165. doi: [10.1016/j.tws.2013.10.005](https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.10.005)
- [12] Nikkiah H, Baroutaji A, Olabi AG. Crashworthiness design and optimisation of windowed tubes under axial impact loading, Thin-Walled Structures. 2019; 142: 132-148. doi: [10.1016/j.tws.2019.04.052](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.052)
- [13] Graciano C, Martínez GA, Smith D. Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes, Thin-Walled Structures. 2009; 47(8-9): 953-961. doi: [10.1016/j.tws.2009.02.002](https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.02.002)
- [14] Pirmohammad S, Esmaeili-Marzdashti S. Multi-objective crashworthiness optimization of square and octagonal bitubal structures including different hole shapes, Thin-Walled Structures. 2019; 139: 126-138. doi: [10.1016/j.tws.2019.03.004](https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.004)
- [15] Tang Z, Liu S, Zhang Z. Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns, Thin-Walled Structures. 2013; 62: 75-84. doi: [10.1016/j.tws.2012.05.019](https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.05.019)
- [16] Rahi A. Controlling energy absorption capacity of combined bitubular tubes under axial loading, Thin-Walled Structures. 2018; 123: 222-231. doi: [10.1016/j.tws.2017.11.032](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.032)
- [17] 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; 131: 646-653. doi: [10.1016/j.tws.2018.07.024](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.024)
- [18] Modanloo V, Talebi-Ghadikolaee H, Akhoundi B, Mashayekhi A, Ahmadi Khatir F, Zeinolabedin Beygi A. Investigation of process parameters of the hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure using Taguchi and finite element methods, Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022; 1. 9 (10): 11- 20. doi: [10.22034/IJME.2023.390896.1762](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.390896.1762) [In Persian]
- [19] Moradian M, Doniavi A, Modanloo V, Alimirzaloo V. Process parameters optimization in gas blow forming of pin-type metal bipolar plates using Taguchi and finite element methods, International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology. 2017; 2: 102-108.