



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



Research Article

Analyzing and Modeling of Energy Absorption Properties of Holed Cylindrical Metallic Dampers

Vahid Modanloo^{a,*} , Majid Elyasi^b , Amin Safi Jahanshahi^a

^a Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

^b Mechanical Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-08-02

Revised: 2024-10-30

Accepted: 2024-11-27

Keywords:

Axial crushing;
Thin-walled tubes;
Energy absorption;
Simulation.

ABSTRACT

In this research, the energy absorption performance of metallic thin-walled dampers under axial compression loading was investigated. At first, steel tubes with a thickness of 2 mm and a holed pattern were subjected to the crushing test. Afterward, a finite element (FE) model was designed using the Abaqus software. After experimental validation of the FE model, 27 experiments were designed using a full factorial design and then performed. The angle between the holes, the hole diameter, and the number of hole rows were considered input parameters. The outputs were assumed to be the initial peak force, the mean crushing force, and the specific energy absorption. After analyzing the variance and determining the effect of input parameters and their contribution, regression equations were extracted to estimate the outputs. The results demonstrated that the hole diameter is the most important parameter for the energy absorption performance of the holed steel tubes. Moreover, using the TOPSIS method, it was found that an angle of 60°, a diameter of 5 mm, and 6 rows of holes lead to the best energy absorption while simultaneously considering all mentioned criteria.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.34938.2715>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: elyasi@nit.ac.ir

How to cite this article:

تحلیل و مدل سازی خواص جذب انرژی ضربه گیرهای فلزی سوراخ دار استوانه ای

وحید مدانلو^{۱*}، مجید الیاسی^۲، امین صفی جهانشاهی^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۲ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷	این پژوهش به بررسی عملکرد جذب انرژی ضربه گیرهای جدارنازک فلزی تحت بار فشاری محوری می پردازد. در ابتدا، لوله های فولادی با ضخامت ۲ میلی متر با الگوی سوراخ دار تحت آزمون لهیدگی قرار گرفتند. سپس، یک مدل اجزای محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس طراحی شد. پس از صحت سنجی مدل به کمک نتایج تجربی، تعداد ۲۷ آزمایش با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل، طراحی و سپس اجرا شدند. زاویه بین سوراخ ها، قطر سوراخ و تعداد ردیف سوراخ ها به عنوان پارامترهای ورودی و پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص به عنوان خروجی ها در نظر گرفته شدند. پس از انجام آنالیز واریانس و تعیین تاثیر و میزان مشارکت پارامترها، معادلات رگرسیونی برای تخمین خروجی های مذکور بر اساس پارامترهای ورودی استخراج شد. نتایج نشان داد که قطر سوراخ مهم ترین پارامتر در جذب انرژی لوله های سوراخ دار فولادی می باشد. همچنین با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره تاپسیس مشخص شد که زاویه ۶۰ درجه، قطر ۵ میلی متر و تعداد ردیف ۶ منجر به بهترین حالت جذب انرژی با در نظر گرفتن همزمان معیارهای خروجی خواهد شد.
واژگان کلیدی: لهیدگی محوری، لوله های جدارنازک، جذب انرژی، شبیه سازی.	
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.34938.2715	
© 2025 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)	

۱- مقدمه

با توسعه روزافزون صنعت، نیاز به کاهش خسارت وارده و افزایش امنیت سرنشینان توجه محققان را به سیستم های جذب انرژی جدید جلب نموده است. کاربرد چنین سیستم هایی در صنایع مختلف به ویژه خودروسازی به عنوان راه حلی برای افزایش ایمنی از اهمیت ویژه ای برخوردار شده است [۱]. مکانیزم عملکرد ضربه گیرها به دو دسته کلی بازگشت پذیر و بازگشت ناپذیر تقسیم می شود که جریان سیال و تغییر شکل پلاستیک به ترتیب مثال هایی از این دو دسته اند. لوله های جدارنازک از نوع از ضربه گیرهای برگشت ناپذیر بوده که با لهیدگی، انرژی جنبشی ضربه را به کار پلاستیک تبدیل کرده و ضربه را مستهلک می نمایند.

لوله های جدارنازک جاذب انرژی ضربه دارای مزایایی از جمله طول لهیدگی زیاد، ظرفیت جذب انرژی بالا، در دسترس بودن و نسبت جذب انرژی به وزن بالا می باشند که سبب شده از آنها به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده شود [۲]. بهبود قابلیت جذب انرژی چنین لوله هایی و در نتیجه جلوگیری از شدت نیروی وارده به سرنشینان، همواره مورد توجه متخصصان بوده تا از روش های متفاوتی برای این موضوع استفاده کنند. ایجاد ساختارهای مختلف نظیر سوراخ و شیار با سطح مقطع ها و الگوهای مختلف در لوله های جدارنازک به منظور بهبود قابلیت جذب انرژی بسیار رایج می باشد [۳]. مطالعه پیک اولیه نیرو یا همان نیروی لهیدگی، جذب انرژی کل، نسبت انرژی به وزن یا

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: v.modanloo@sirjantech.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

استناد به این مقاله:

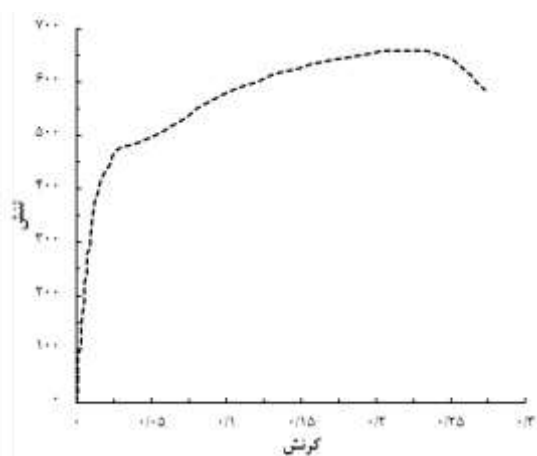
همان جذب انرژی مخصوص و میانگین نیروی ضربه بخش اصلی پژوهش‌هایی می‌باشد که تاکنون در زمینه لوله‌های جدارنازک فلزی تک‌لایه به‌عنوان جاذب انرژی تحت بار فشاری انجام شده است. دادرسی و همکاران [۴] رفتار جذب انرژی لوله‌های فلزی با سطح مقطع مربعی با سوراخ بیضوی تحت بار فشاری محوری را به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی ارزیابی کردند. لوله از جنس فولاد کم‌کربن با ضخامت ۱ میلی‌متر بود. آنها تاثیر نسبت ابعاد سطح مقطع و نسبت ابعاد قطرهای سوراخ را بر روی ویژگی‌های جذب انرژی شامل پیک اولیه نیرو و جذب انرژی مخصوص بررسی نمودند. آنها نتایج را با سه روش رویه پاسخ خطی، رویه پاسخ درجه دو و شبکه عصبی تحلیل کرده و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی پرداختند. تابع هدف آنها بیشینه جذب انرژی مخصوص و کمینه پیک اولیه نیرو بود. با بررسی خطای میانگین مربعات مشخص شد که مدل رویه پاسخ درجه دوم کمترین میزان خطا را دارد. همچنین تاثیر نسبت سطح مقطع بیشتر از نسبت قطر می‌باشد. آنها گزارش دادند که بهترین نسبت ابعاد سطح مقطع یک بوده و نسبت قطرهای بیضی باید $0/7$ باشد. منتظری و همکاران [۵] جذب انرژی لوله‌های فولاد کم‌کربن با ضخامت ۲ میلی‌متر تحت بار فشاری محوری را به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. سطح مقطع لوله‌ها دایروی با سوراخ‌های دایروی و شیار مربعی بود. آنها تاثیر جنس لوله و الگوهای مختلف سوراخ‌دار و شیاردار را بر روی ویژگی‌های جذب انرژی بررسی نمودند. آنها دریافتند که لوله‌های سوراخ‌دار چه آلومینیومی و چه فولادی دارای رفتار مقارنی در هنگام لهیدگی بوده و جذب انرژی آنها بیشتر از لوله‌های شیاردار است. رای و همکاران [۶] به بررسی قابلیت جذب انرژی لوله‌های فلزی با سطح مقطع دایروی با مکانیزم ماشه‌ای توسعه یافته (حالت الماسی با سه لوب محیطی) در حالت‌های سوراخ‌دار و حالت فیلت انتهایی و شیار محیطی تحت بار فشاری محوری پرداختند. آنها در پژوهش خود از هر دو روش تجربی و شبیه‌سازی استفاده کردند. جنس لوله‌ها فولاد E235 با ضخامت ۲ میلی‌متر بود. آنها تاثیر مکانیزم‌های ماشه‌ای مختلف را بر روی ویژگی‌های جذب انرژی شامل پیک اولیه نیرو و جذب انرژی مخصوص بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که حالت سوراخ‌دار (تک و دوسوراخ که در ابتدای لوله قرار می‌گیرند) بدلیل نامتقارن بودن باعث ناپایداری سازه می‌شود و حالت سه‌سوراخ را

بدلیل ماهیت مقارنی آن برگزیدند. همچنین در حالت فیلت ابتدایی، شعاع ۶ میلی‌متر را به‌عنوان شعاع بهینه انتخاب کردند. آنها همچنین دریافتند که مکانیزم ماشه‌ای محیطی با شعاع‌های فیلت (۳ و ۴ و ۱۰ میلی‌متر) باعث به تاخیر افتادن پیک اولیه نیرو می‌شود. سانگ و همکاران [۷] رفتار جذب انرژی لوله‌های فلزی مربعی با سوراخ‌های پنجره‌ای تحت بار فشاری محوری را به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی ارزیابی کردند. جنس لوله فولاد کم‌کربن با ضخامت $1/4$ میلی‌متر بود. آنها تاثیر اندازه پنجره‌ها بر روی لهیدگی لوله‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند که پیک اولیه نیرو در لوله‌های پنجره‌دار در حدود 63% کمتر از لوله‌های معمولی می‌باشد. از نظر انرژی جذب شده در تراکم 72% طول لوله، نمونه پنجره‌دار ظرفیت جذب انرژی 23% بیشتر از لوله معمولی را دارد. همچنین پیک اولیه نیرو و جذب انرژی به طور یکنواخت با افزایش نسبت ابعاد پنجره کاهش می‌یابند. فان و همکاران [۸] جذب انرژی لوله‌های فلزی با سطح مقطع شش ضلعی، هشت ضلعی، دوازده و شانزده ضلعی بدون سوراخ و شیار تحت بار فشاری محوری را به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی کردند. جنس لوله فولاد کم‌کربن با ضخامت $1/5$ میلی‌متر بود. آنها تاثیر سطح مقطع‌های مختلف را با فرض ثابت بودن مساحت بر روی ویژگی‌های جذب انرژی بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش تعداد لبه‌های داخلی باعث بهبود عملکرد جذب انرژی می‌شود. در حالت کلی لوله با سطح مقطع ۱۲ ضلعی بهترین قابلیت جذب را دارد. مهمت و همکاران [۹] رفتار جذب انرژی لوله‌های فولاد کم‌کربن با سطح مقطع‌های دایروی، مربعی و شش ضلعی با سوراخ‌های دایره‌ای و مربعی و همچنین شیار با سطح مقطع دایره با ضخامت‌های مختلف تحت بار فشاری محوری را به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. آنها همچنین زاویه مخروطی شکل در محدوده ۵ تا 14° درجه را در نظر گرفتند. آنها بیان کردند که جاذب‌هایی با مقطع مربعی کمترین بازه نیروی لهیدگی را دارند. راندمان نیروی لهیدگی برای جاذب دایره‌ای با زاویه $12/5^\circ$ درجه و ضخامت ۲ میلی‌متر حالت بهینه بوده که با افزودن شیار و سوراخ به سازه می‌توان نیروی عکس العمل ناشی از لهیدگی را کاهش داد. همچنین ضخامت بیش از $2/5$ میلی‌متر در این سازه‌ها باعث افزایش پیک اولیه نیرو شده و افزایش زاویه مخروط باعث کاهش اندک جذب انرژی کل و کاهش نیروی لهیدگی

در این مقاله، برای شبیه سازی لهیدگی لوله های جدارنازک فولادی از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شد. به علت تقارن، تنها نصف مساله به صورت سه بعدی مدل شد. قطر خارجی لوله ۵۴ میلی متر، طول و ضخامت آن به ترتیب ۹۶ و ۲ میلی متر می باشد. لوله به صورت شکل پذیر و صفحات بالا و پایین به صورت صلب گسسته مدل سازی شدند. برای معرفی خواص لوله به نرم افزار از نتایج تست کشش تک محوره استفاده شد. خواص مکانیکی ماده به صورت همسانگرد در نظر گرفته شد. جدول ۱ خواص مکانیکی استفاده شده در شبیه سازی را نشان می دهد. همچنین، نمودار تنش- کرنش مهندسی لوله فولادی در شکل (۱) نشان داده شده است. برای مش بندی لوله از المان C3D8R به تعداد ۴ در ضخامت استفاده شد. بعلاوه، برای مش بندی صفحات نیز از المان C3D8R استفاده شد. برای تعریف تماس بین دو انتهای لوله با صفحات و نیز تماس لوله با خود از مدل اصطکاکی کولمبی با ضریب اصطکاک ۰/۲ استفاده شد. صفحه پایین در جای خود مقید و صفحه بالا با سرعت ثابت ۱۰ میلی متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت کرده تا به جابجایی ۵۵ میلی متر برسد. شکل (۲) مدل اجزای محدود طراحی شده را نشان می دهد. در این مدل، زاویه بین سوراخ ها ۳۰ درجه، قطر سوراخ ها ۳ میلی متر و تعداد ۵ ردیف سوراخ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی استفاده شده در شبیه سازی

پارامتر (واحد)	مقدار
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۷۸۰۰
مدول یانگ (گیگاپاسکال)	۲۱۰
ضریب پواسن	۰/۳



شکل ۱- نمودار تنش-کرنش مهندسی لوله فولادی

می گردد. بعلاوه پیک اولیه نیرو در مدل های سوراخ دار بیشتر از مدل های شیاردار می باشد. رئوف و همکاران [۱۰] به مطالعه تجربی و شبیه سازی رفتار جذب انرژی لوله های فولادی از جنس St37 و پر شده با پلی اتیلن ارتالون پرداختند. آنها تاثیر چهار مدل سوراخکاری با قطرهای مختلف در ماده پرکننده را با لوله فولادی بدون پرکننده مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از ماده پرکننده منجر به افزایش نیروی میانگین لهیدگی خواهد شد. همچنین، استفاده از ماده پرکننده سبب یکنواختی در بار انتقالی شده و میزان پیک اولیه نیرو کاهش می یابد.

تاکنون تحقیقات ارزشمندی در خصوص بررسی قابلیت جذب انرژی لوله های (ضربه گیرهای) جدارنازک استوانه ای کم کرن فولادی گزارش شده است. با این وجود، تحقیق جامعی در خصوص مدل سازی آماری تاثیر ایجاد سوراخ در لوله های جدارنازک فولادی و پیش بینی عملکرد جذب انرژی این لوله ها با روش رگرسیون یافت نشد.

روش های سنتی برای پیش بینی خواص جذب انرژی در خصوص لهیدگی لوله های جدارنازک فلزی معمولاً بر پایه آزمون و خطا و یا دیدگاه های تجربی می باشند. این موضوع علاوه بر صرف وقت زیاد، منجر به دوباره کاری و افزایش هزینه می گردد. امروزه محققان این حوزه، همزمان با توسعه روش های محاسباتی نظیر روش های حل عددی، طراحی آزمایش و تصمیم گیری چندمعیاره، توانسته اند از هزینه های فرایند به میزان قابل توجهی بکاهند. ایجاد سوراخ های دایروی بر روی لوله های جدارنازک فلزی از نظر ساخت نسبتاً آسان می باشد ولی ایجاد سوراخ با تعداد ردیف، قطر و زاویه مناسب به منظور دستیابی به مقادیر مطلوب خواص جذب انرژی تحت آزمون لهیدگی حائز اهمیت می باشد. در این تحقیق، ترکیبی از روش های تجربی، شبیه سازی اجزای محدود، طراحی آزمایش، رگرسیون و تصمیم گیری چندمعیاره برای مطالعه رفتار جذب انرژی لوله های جدارنازک سوراخ دار فولادی با سطح مقطع استوانه ای استفاده شده است. پارامترهای ورودی شامل زاویه بین هر سوراخ در سطح مقطع، قطر سوراخ و تعداد ردیف سوراخ و پارامترهای خروجی شامل پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص می باشند.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- شبیه سازی اجزای محدود

سطح لوله مماس شده و سپاس با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت کرده تا لوله لهیده شود. پس از انجام آزمون لهیدگی، نمودار نیرو جابجایی استخراج شده و مقادیر پیک اولیه نیرو (IPF)، نیروی لهیدگی متوسط (MCF) و جذب انرژی مخصوص (SEA) محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که پیک اولیه نیرو همان اولین قله در نمودار نیرو-جابجایی است. نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص نیز به ترتیب طبق روابط (۱) و (۲) از تقسیم سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بر جابجایی فک بالایی پرس (d) و جرم لوله (m) به دست می‌آیند [۱۱].

$$MCF = \frac{\int_0^L f(x)dx}{d} \quad (۱)$$

$$SEA = \frac{\int_0^L f(x)dx}{m} \quad (۲)$$

۲-۳- طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل

برای طراحی آزمایش از روش فاکتوریل کامل و نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. تعداد ۳ پارامتر ورودی شامل زاویه بین هر سوراخ در سطح مقطع ($\emptyset$)، قطر سوراخ (d) و تعداد ردیف سوراخ (n) هر کدام در سه سطح در نظر گرفته شدند که در جدول ۲ نشان داده است. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح مربوطه تعداد ۲۷ آزمایش طراحی شد. پس از طراحی، آزمایش‌ها به صورت شبیه‌سازی اجرا و خروجی‌های موردنظر یعنی پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص برای هر آزمایش استخراج شد. در جدول ۳ آزمایش‌های طراحی شده به روش فاکتوریل کامل به همراه خروجی‌های مربوطه نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای ورودی و سطوح مربوطه

پارامتر (واحد)	سطح		
	کم	متوسط	زیاد
زاویه (درجه)	۳۰	۴۵	۶۰
قطر (میلی‌متر)	۳	۵	۷
ردیف (-)	۴	۵	۶



شکل ۲- مدل اجزای محدود طراحی شده

۲-۲- مراحل تجربی

از یک دستگاه پرس انیورسال با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن برای انجام آزمایش‌های لهیدگی محوری انجام شد. در شکل (۳) لوله سوراخ‌دار بر روی فک پرس نشان داده شده است.



شکل ۳- لوله سوراخ‌دار بر روی فک پرس

مطابق با شبیه‌سازی، زاویه بین سوراخ‌ها ۳۰ درجه، قطر سوراخ‌ها ۳ میلی‌متر و تعداد ردیف سوراخ‌ها ۵ می‌باشد. پس از قرارگیری لوله روی فک پایین پرس، فک بالا ابتدا به

جدول ۳- طراحی آزمایش ها به همراه خروجی های مربوطه

شماره آزمایش	$\emptyset$	d	n	IPF (kN)	MCF (kN)	SEA (kJ/kg)
۱	30	3	5	159.05	96.35	21.41
۲	30	5	5	146.74	95.15	22.21
۳	30	7	5	132.17	84.95	21.43
۴	45	5	6	159.80	110.56	25.40
۵	45	7	6	137.73	88.13	21.52
۶	60	5	6	161.69	113.31	25.64
۷	60	7	5	148.04	88.94	20.72
۸	45	7	5	141.25	87.34	20.88
۹	45	3	4	160.90	104.90	23.03
۱۰	60	7	6	148.16	96.59	22.85
۱۱	30	5	6	148.56	96.48	22.87
۱۲	45	7	4	143.52	98.01	22.95
۱۳	30	5	4	145.43	102.04	23.45
۱۴	30	7	6	116.81	70.74	18.45
۱۵	60	3	6	166.73	103.65	22.79
۱۶	60	3	4	164.44	107.16	23.44
۱۷	60	7	4	149.15	100.31	23.02
۱۸	30	7	4	132.38	90.67	22.14
۱۹	30	3	4	159.59	105.98	23.43
۲۰	60	5	4	157.67	107.20	23.90
۲۱	45	5	5	156.88	102.82	23.39
۲۲	45	3	6	164.09	109.03	24.10
۲۳	60	3	5	163.52	108.69	23.84
۲۴	60	5	5	158.90	103.73	23.30
۲۵	45	5	4	153.47	107.19	24.13
۲۶	45	3	5	163.20	106.93	23.56
۲۷	30	3	6	158.18	105.97	23.68

(۳). در این رابطه $\bar{t}$ تعداد گزینه ها (۲۷) و $\bar{j}$ تعداد معیارها (۳) است.

$$R_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad (۳)$$

گام دوم: تشکیل ماتریس تصمیم وزن دار با استفاده از رابطه (۴). در این رابطه W_j وزن معیارهاست که در این تحقیق برای هر ۳ معیار یکسان در نظر گرفته شده است.

$$V_{ij} = R_{ij}W_j \quad (۴)$$

گام سوم: تعیین حل های ایده آل مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از روابط (۵) و (۶).

۲-۴- تصمیم گیری چندمعیاره به روش تاپسیس

استفاده از این روش زمانی اهمیت می یابد که انتخاب بهترین حالت از بین چند گزینه با توجه همزمان به چند معیار مدنظر باشد. در این پژوهش، مقادیر کمتر پیک اولیه نیرو و مقادیر بیشتر نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص مطلوب خواهد بود. با توجه به تعداد ۲۷ آزمایش در نظر گرفته شده، انتخاب بهترین ساختار لوله سوراخ دار با در نظر گرفتن همزمان معیارهای مذکور حائز اهمیت خواهد بود. در این مقاله، از روش تاپسیس برای انتخاب بهترین گزینه استفاده شده است. مراحل این روش به صورت زیر است [۱۴-۱۲]:

گام اول: بی بعد سازی ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه



شکل ۵- لوله فولادی پس از لهیدگی

۳-۲- پیک اولیه نیرو

پس از انجام آنالیز واریانس، نتایج مطابق با جدول ۴ به دست آمد. همچنین شکل شماره (۶) تاثیر پارامترهای ورودی را بر روی پیک اولیه نیرو نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش قطر سوراخ و کاهش زاویه بین سوراخ‌ها در سطح مقطع، پیک نیروی اولیه کاهش می‌یابد. همچنین پارامتر تعداد ردیف تاثیر چندانی بر روی پیک اولیه نیرو ندارد. به عبارت دیگر پارامتر قطر با مشارکت ۶۷٪ و پارامتر زاویه با درصد مشارکت ۲۲٪ به ترتیب مهم‌ترین پارامترها بر روی پیک اولیه نیرو هستند. با افزایش قطر سوراخ، مقدار ماده بیشتری از لوله کم شده و فاصله لبه پایینی ردیف بالایی تا لبه بالایی ردیف پایینی سوراخ‌ها (مقدار ماده بین دو ردیف سوراخ) کاهش می‌یابد. این امر سبب کاهش پیک نمودار نیرو-جابجایی می‌شود. به عبارت دیگر، لوله برای لهیده شدن به بیشینه نیروی کمتری نیاز دارد. در ادامه، معادلات رگرسیون درجه اول، دوم و سوم مطابق با روابط (۱۰) تا (۱۲) حاصل شد. کفایت مدل‌ها نیز به تریب برابر با ۸۵/۹۰، ۹۶/۳۰ و ۹۹/۱۳٪ حاصل شد. همانطور که مشخص است، با افزایش درجه رگرسیون کفایت مدل بهبود می‌یابد.

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس پیک اولیه نیرو

منبع	Adj SS	F-Value	P-Value
∅	۸۲۸/۵۵	۲۰/۴۰	۰/۰۰۰
d	۲۵۵۰/۶۱	۶۲/۸۰	۰/۰۰۰
n	۳/۶۰	۰/۰۹	۰/۹۱۵
خطا	۴۰۶/۱۵	-	-
کل	-	-	-

$$L^+ = \{V_1^+ V_2^+ \dots V_n^+\} \quad (۵)$$

$$L^- = \{V_1^- V_2^- \dots V_n^-\} \quad (۶)$$

گام چهارم: محاسبه فاصله گزینه‌ها از حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از روابط (۷) و (۸).

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (۷)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (۸)$$

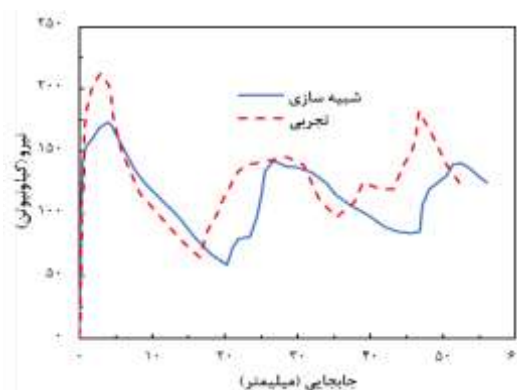
گام پنجم: تعیین نزدیکی نسبی به حل ایده‌آل با استفاده از رابطه (۹). گزینه‌ای که بیشترین مقدار T_i را داشته باشد به عنوان بهترین گزینه انتخاب خواهد شد.

$$T_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (۹)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی

شکل (۴) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی لوله سوراخ‌دار را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است بین نتایج تطابق قابل قبولی برقرار بوده صحت مدل اجزای محدود تایید شد. حداکثر اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی برای جذب انرژی کل (سطح زیر نمودار) کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. شکل (۵) لوله فولادی پس از لهیدگی را نشان می‌دهد. در ادامه هر کدام از خروجی‌های عملکرد جذب انرژی به صورت مجزا تحلیل شده و معادلات رگرسیون مربوطه استخراج خواهند شد.

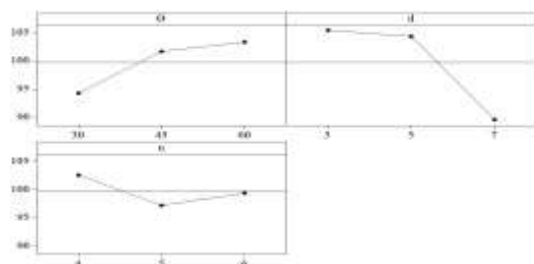


شکل ۴- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی

نتیجه، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی (جذب انرژی کل) کاهش می‌یابد. از آنجاکه نیروی لهیدگی متوسط از تقسیم جذب انرژی کل به کورس سنبه به دست می‌آید، با کاهش سطح زیر نمودار این مقدار نیز کاهش خواهد یافت. روابط (۱۳) تا (۱۵) به ترتیب معادلات رگرسیون حاصل با درجه اول، دوم و را نشان می‌دهد که میزان کفایت آنها به ترتیب برابر با ۶۳/۵۰، ۸۹/۲۲ و ۹۳/۹۲٪ به دست آمد.

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس نیروی لهیدگی متوسط

منبع	Adj SS	F-Value	P-Value
ϕ	۴۱۶/۶۳	۸/۷۵	۰/۰۰۲
d	۱۴۱۳/۹۲	۲۹/۶۸	۰/۰۰۰
n	۱۳۲/۶۶	۲/۷۹	۰/۰۸۶
خطا	۴۷۶/۳۱	-	-
کل	-	-	-

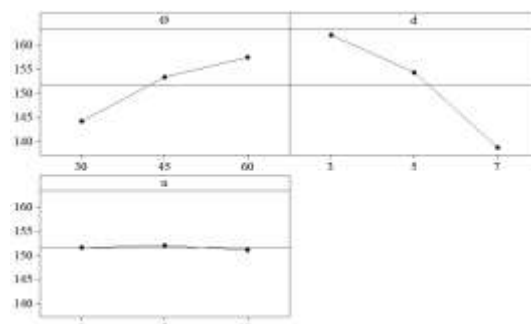


شکل ۷- تاثیر پارامترهای ورودی بر روی نیروی لهیدگی متوسط

$$MCF (kN) = 114.10 + 0.3009 \phi - 3.971 d - 1.61 n \quad (13)$$

$$MCF (kN) = 156.7 + 0.383 \phi + 16.64 d - 38.4 n - 0.01281 \phi \times \phi - 1.703 d \times d + 3.78 n \times n + 0.0785 \phi \times d + 0.1355 \phi \times n - 1.423 d \times n \quad (14)$$

$$MCF (kN) = 165 - 0.71 \phi - 4.8 d - 18.5 n + 0.0284 \phi \times \phi + 3.20 d \times d + 0.23 n \times n - 0.173 \phi \times d + 0.09 \phi \times n - 0.5 d \times n - 0.00015 \phi \times \phi \times d - 0.00809 \phi \times \phi \times n - 0.0146 \phi \times d \times d + 0.0822 \phi \times d \times n + 0.036 \phi \times n \times n - 0.850 d \times d \times n + 0.384 d \times n \times n \quad (15)$$



شکل ۶- تاثیر پارامترهای ورودی بر روی پیک اولیه نیرو

$$IPF (kN) = 162.44 + 0.4422 \phi - 5.847 d - 0.27 n \quad (10)$$

$$IPF (kN) = 130.4 + 0.258 \phi + 3.53 d + 6.7 n - 0.01098 \phi \times \phi - 0.964 d \times d - 0.62 n \times n + 0.1281 \phi \times d + 0.1064 \phi \times n - 1.101 d \times n \quad (11)$$

$$IPF (kN) = 210 + 0.78 \phi - 51.6 d + 2.9 n + 0.0310 \phi \times \phi + 3.32 d \times d - 2.44 n \times n + 0.031 \phi \times d - 0.805 \phi \times n + 13.60 d \times n - 0.00249 \phi \times \phi \times d - 0.00592 \phi \times \phi \times n + 0.0095 \phi \times d \times d + 0.0453 \phi \times d \times n + 0.1217 \phi \times n \times n - 0.942 d \times d \times n - 0.732 d \times n \times n \quad (12)$$

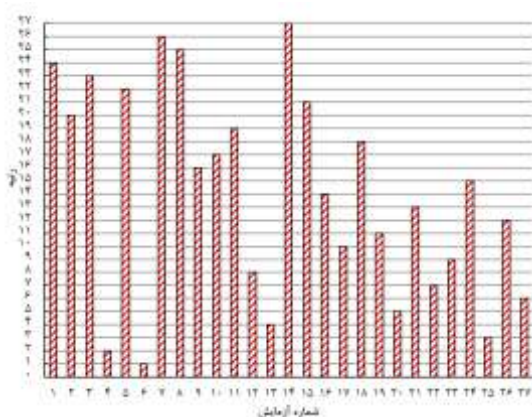
۳-۳- نیروی لهیدگی متوسط

جدول ۵ نتایج آنالیز واریانس برای نیروی لهیدگی متوسط را نشان می‌دهد. تاثیر پارامترهای ورودی را بر روی نیروی لهیدگی متوسط نیز در شکل شماره (۷) نشان داده شده است. طبق یافته‌ها، پارامتر قطر (۵۸٪ مشارکت) بیشترین و پارامتر تعداد ردیف (۵٪ مشارکت) کمترین تاثیر را بر روی نیروی لهیدگی متوسط دارند. با کاهش قطر سوراخ و افزایش زاویه بین سوراخ‌ها در سطح مقطع، نیروی لهیدگی متوسط افزایش می‌یابد. همچنین تعداد ۴ ردیف سوراخ منجر به بیشترین نیروی لهیدگی متوسط می‌شود. همانطور که پیشتر ذکر شد، با افزایش قطر سوراخ، حجم لوله کاهش یافته و به نیروی کمتری برای فشردن نیاز دارد. در

$$\begin{aligned}
 SEA (kJ/kg) = & 32.5 - 0.04 \phi \\
 & - 1.07 d - 3.1 n \\
 & + 0.0061 \phi \times \phi \\
 & + 0.794 d \times d \\
 & - 0.07 n \times n \\
 & - 0.060 \phi \times d \\
 & - 0.013 \phi \times n \\
 & + 0.06 d \times n \\
 & + 0.000128 \phi \times \phi \quad (18) \\
 & \times d \\
 & - 0.00181 \phi \times \phi \times n \\
 & - 0.00349 \phi \times d \times d \\
 & + 0.0184 \phi \times d \times n \\
 & + 0.0112 \phi \times n \times n \\
 & - 0.198 d \times d \times n \\
 & + 0.084 d \times n \times n
 \end{aligned}$$

۳-۵- نتایج تصمیم‌گیری چندمعیاره

رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش تاپسیس در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- نتایج رتبه‌بندی با استفاده از روش تاپسیس

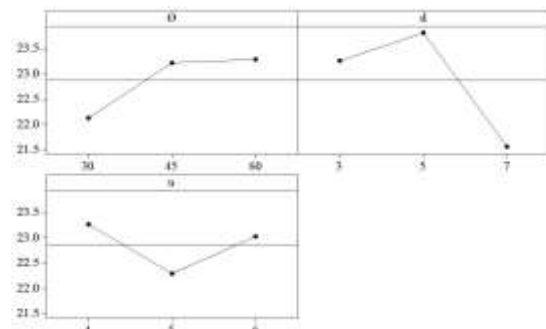
همانطور که قابل مشاهده است، آزمایش شماره ۶ بهترین گزینه انتخاب شد. در این ساختار زاویه بین هر سوراخ برابر با ۶۰ درجه، قطر سوراخ برابر با ۵ میلی‌متر و تعداد ردیف سوراخ برابر با ۶ می‌باشد. مقادیر پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص این آزمایش به ترتیب برابر با ۱۶۱/۶۹ کیلو نیوتن، ۱۱۳/۳۱ کیلو نیوتن و ۲۵/۶۴ کیلوژول بر کیلوگرم می‌باشد. این گزینه در مقایسه با سایر گزینه‌ها، دارای بیشترین نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص بوده و بهترین مقدار از نظر پیک اولیه نیرو نمی‌باشد. به علاوه، آزمایش شماره ۴ به عنوان دومین گزینه برتر انتخاب شد. در این آزمایش، زاویه ۴۵ درجه، قطر ۵ میلی‌متر و تعداد ردیف ۶ می‌باشد. همچنین، در این گزینه مقادیر پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص به ترتیب برابر با ۱۵۹/۸۰

۳-۴- جذب انرژی مخصوص

نتایج آنالیز واریانس برای جذب انرژی مخصوص در جدول ۶ آمده است. شکل شماره (۸) نیز تاثیر پارامترهای ورودی را بر روی جذب انرژی مخصوص نشان می‌دهد. همانند دو خروجی قبلی، برای جذب انرژی مخصوص نیز قطر سوراخ با مشارکت ۴۴٪ تاثیرگذارترین پارامتر می‌باشد به طوریکه قطر ۵ میلی‌متر منجر به بیشترین جذب انرژی مخصوص می‌شود. با افزایش زاویه بین سوراخ‌ها در سطح مقطع نیز جذب انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. مشارکت این پارامتر نیز ۱۳٪ است. همچنین تعداد ۴ ردیف سوراخ منجر به بیشترین جذب انرژی مخصوص خواهد شد. معادلات رگرسیون درجه اول، دوم و سوم مطابق با روابط (۱۶) تا (۱۸) حاصل شد. مقایسه مدل‌ها نیز نشان داد که مدل درجه سوم بیشترین کفایت را دارد (کفایت مدل درجه اول: ۳۴/۰۱، درجه دوم: ۷۵/۴۹ و درجه سوم: ۸۶/۰۷٪).

جدول ۶- نتایج آنالیز واریانس جذب انرژی مخصوص

منبع	Adj SS	F-Value	P-Value
ϕ	۷/۶۷۸۱	۳/۸۹	۰/۰۳۷
d	۲۴/۸۹۵۷	۱۲/۶۳	۰/۰۰۰
n	۴/۶۲۶۴	۲/۳۵	۰/۱۲۲
خطا	۱۹/۷۱۹۱	-	-
کل	-	-	-



شکل ۸- تاثیر پارامترهای ورودی بر روی جذب انرژی مخصوص

$$SEA (kJ/kg) = 23.86 + 0.0387 \phi - 0.426 d - 0.121 n \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 SEA (kJ/kg) = & 34.3 + 0.067 \phi \\
 & + 3.95 d - 8.64 n \\
 & - 0.00231 \phi \times \phi \\
 & - 0.3514 d \times d \\
 & + 0.853 n \times n \quad (17) \\
 & + 0.00840 \phi \times d \\
 & + 0.0275 \phi \times n \\
 & - 0.249 d \times n
 \end{aligned}$$

لهیدگی متوسط تقریباً بدون تاثیر ولی بر روی جذب انرژی مخصوص (با ۱۳٪ مشارکت) تاثیر جزئی دارد.

۳. کفایت مدل رگرسیون برای هر سه خروجی جذب انرژی با افزایش درجه معادله از یک به سه افزایش می یابد.

۵. با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره تاپسیس مشخص شد که لوله ای با ۶۰ درجه زاویه بین سوراخ و تعداد ۶ ردیف سوراخ با قطر ۵ میلی متر بهترین الگو با در نظر گرفتن همزمان معیارهای جذب انرژی مذکور می باشد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت های نویسندگان

وحید مدانلو: تحقیق و گردآوری داده ها، شبیه سازی، تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیشنهادی اصلی.

مجید الیاسی: تحلیل، بازبینی و ویرایش.

امین صفی جهانشاهی: تصمیم گیری چندمعیاره و ویرایش.

منابع مالی

در این تحقیق، کمک مالی خاصی از هیچ سازمانی دریافت نشده است.

کیلونیوتن، ۱۱۰/۵۶ کیلونیوتن و ۲۵/۴۰ کیلوژول بر کیلوگرم به دست آمد. از طرف دیگر، آزمایش شماره ۱۴ به عنوان بدترین گزینه انتخاب شد. در این آزمایش، زاویه ۳۰ درجه، قطر ۷ میلی متر و تعداد ردیف ۶ می باشد. به علاوه، در این گزینه مقادیر پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص به ترتیب برابر با ۱۱۶/۸۱ کیلونیوتن، ۷۰/۷۴ کیلونیوتن و ۱۸/۴۵ کیلوژول بر کیلوگرم می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، خواص جذب انرژی ضربه گیرهای فلزی استوانه ای مشبک از جنس فولاد کم کربن تحت بار فشاری محوری بررسی شد. با ترکیب روش های شبیه سازی، تجربی، طراحی آزمایش و تصمیم گیری چندمعیاره تاثیر پارامترهای زاویه بین سوراخ ها، قطر و تعداد ردیف سوراخ بر روی پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص تحلیل و مدل سازی شد. مهم ترین نتایج این تحقیق عبارت است از:

۱. قطر سوراخ بیشترین تاثیر را بر روی پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص به ترتیب با ۶۷، ۵۸ و ۴۴٪ مشارکت دارد.

۲. با افزایش قطر سوراخ پیک اولیه نیرو، نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص کاهش می یابند.

۳. تعداد ردیف سوراخ بر روی پیک اولیه نیرو و نیروی

مراجع

- [1] D. Henao-Leon, L.F. Fadel Miguel, and J.D. Villalba-Morales. "A proposal for the optimization of the geometric configuration of a hollow cylindrical steel damper with slots." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 45, no. 3 (2023): 152.
- [2] Z. Gao, and D. Ruan. "Axial crushing of novel hierarchical multi-cell square tubes." *Engineering Structures* 286 (2023): 116141.
- [3] K.D. Karantza, I.G. Papantoniou, S.S. Lykaios, and D.E. Manolakis. "Oblique Crashworthiness Analysis of Steel Circular Tubes: Parametric Study on Wall Thickness Effect and Critical Loading Angle Identification." *Machines* 11, no. 5 (2023): 542.
- [4] A. Dadrasi, A.R. Albooyeh, S. Fooladpanjeh, M. Danaei Shad, and M. Beynaghi. "RSM and ANN modeling of the energy absorption behavior of steel thin-walled columns: a multi-objective optimization using the genetic algorithm." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42, no. 11 (2020): 563.
- [5] S. Montazeri, M. Elyasi, and A. Moradpour. "Investigating the energy absorption, SEA and crushing performance of holed and grooved thin-walled tubes under axial loading with different materials." *Thin-Walled Structures* 131 (2018): 646-653.
- [6] V. Rai, H. Ghasemnejad, J.W. Watson, J.A. Gonzalez-Domingo, and P.F. Webb. "Developed trigger mechanisms to improve crush force efficiency of aluminium tubes." *Engineering Structures* 199 (2019): 109620.
- [7] J. Song, Y. Chen, and G. Lu. "Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing." *International Journal of Mechanical Sciences* 66 (2013): 239-248.

- [8] Z. Fan, G. Lu, and K.J.E.S. Liu. "Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes." *Engineering Structures* 55 (2013): 80-89.
- [9] M.A. Guler, M.E. Cerit, B. Bayram, B. Gerçeker, and E. Karakaya. "The effect of geometrical parameters on the energy absorption characteristics of thin-walled structures under axial impact loading." *International Journal of Crashworthiness* 15, no. 4 (2010): 377-390.
- [10] F. Raouf, J. Rezapour, S. Gohari Rad, and R. Rajabiehfarid. "Investigating the Energy Absorption Parameters of Steel Cylindrical Shells Filled with Polyethylene Subjected to Quasi-static Loading." *Journal of Aerospace Mechanics* 18, no. 4 (2022): 65-76.
- [11] H. Yang, and Y. Ren. "Crashworthiness design of CFRP/AL hybrid circular tube under lateral crushing." *Thin-Walled Structures* 186 (2023): 110669.
- [12] A. Nafei, S. Pourmohammad Azizi, S.A. Edalatpanah, and C.Y. Huang. "Smart TOPSIS: a neural Network-Driven TOPSIS with neutrosophic triplets for green Supplier selection in sustainable manufacturing." *Expert Systems with Applications* 255 (2024): 124744.
- [13] S. Yaghoubi, M. Seidi, and F. Fereshteh-Saniee. "Optimal Experiment Selection in Hydroforming Process of Bimetallic Sheets Using CRITIC, MEREC and TOPSIS Techniques." *Iranian Journal of Materials Forming* 10, no. 1 (2023): 13-25.
- [14] A. Keikha. "Generalized hesitant fuzzy numbers and their application in solving MADM problems based on TOPSIS method." *Soft Computing* 26, no. 10 (2022): 4673-4683.