



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



Research Article

Statistical Modeling of Energy Absorption of Grooved Aluminum Tubes Under Axial Compression Loading

Vahid Modanloo ^{a,*} , Mohammad Dashti Kahnouei ^a, Amin Safi Jahanshahi ^a

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

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-07-02

Revised: 2024-10-23

Accepted: 2024-12-03

Keywords:

Grooved tube;
Axial compression;
Simulation;
Design of experiment.

ABSTRACT

In this paper, the energy absorption capability of grooved tubes made of precipitation-hardened aluminum with circular cross-section under axial crushing was investigated. First, the process was modeled using the ABAQUS FE simulation, and the numerical results were verified compared to the experiments. Afterward, 42 experiments were designed via the full factorial design of experiment and performed by simulation. The effect of grooves' dimensions, number, and pattern on the initial peak force (IPF), specific energy absorption (SEA), and crushing force efficiency (CFE) were investigated. In addition, the contribution of the input parameters was determined using the analysis of variance. The obtained results illustrated that the number and width of the grooves are the most important parameters for the IPF (number: 71.29% and width: 27.48% of contribution), SEA (number: 37.10% and width: 54.26% of contribution), and CFE (number: 73.19% and width: 20.52% of contribution), respectively, and the groove pattern has no noticeable effect on the mentioned properties.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.34643.2696>

© 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: v.modanloo@sirjantech.ac.ir

How to cite this article:

V. Modanloo, M. Dashti Kahnouei and A. Safi Jahanshahi, "Statistical modeling of energy absorption of grooved aluminum tubes under axial compression loading," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 157-166, doi: 10.22075/jme.2024.34643.2696

مدل سازی آماری جذب انرژی لوله های آلومینیومی شیاردار تحت بار فشاری محوری

وحید مدانلو^{۱*}، محمد دشتی کهنوئی^۱، امین صفی جهانشاهی^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۳	این مقاله به بررسی قابلیت جذب انرژی لوله های آلومینیومی پیرسخت شده شیاردار با سطح مقطع دایروی در آزمون لهیدگی محوری می پردازد. در ابتدا با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود توسط نرم افزار آباکوس، فرآیند مدل سازی شده و صحت نتایج عددی به کمک نتایج تجربی تایید شد. در ادامه، با استفاده از طراحی آزمایش به روش فول فاکتوریل، تعداد ۴۲ آزمایش طراحی شده و به صورت شبیه سازی اجرا شدند. تاثیر ابعاد، تعداد و الگوی شیارها بر روی نیروی لهیدگی اولیه، جذب انرژی مخصوص و بازده نیروی لهیدگی بررسی شد. به علاوه، با استفاده از آنالیز واریانس میزان مشارکت پارامترهای ورودی مشخص شد. نتایج به دست آمده نشان داد که تعداد و عرض شیارها به ترتیب مهم ترین پارامترها بر روی نیروی لهیدگی اولیه (تعداد: ۷۱/۲۹٪ و عرض: ۲۷/۴۸٪ مشارکت)، جذب انرژی مخصوص (تعداد: ۳۷/۱۰٪ و عرض: ۵۴/۲۶٪ مشارکت) و بازده نیروی لهیدگی (تعداد: ۷۳/۱۹٪ و عرض: ۲۰/۵۲٪ مشارکت) بوده و پارامتر الگوی شیار تاثیر محسوسی بر روی خواص مذکور ندارد.
واژگان کلیدی: لوله شیاردار، فشار محوری، شبیه سازی، طراحی آزمایش.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.34643.2696>

© 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

سازه های جدارنازک به طور گسترده در وسایل نقلیه به عنوان جاذب انرژی استفاده می شوند. لوله های جدارنازک شیاردار یا سوراخدار از جمله این سازه ها می باشند که به دلیل وزن کم، بازده جذب انرژی بالا، در دسترس بودن و امکان ساخت راحت تر کاربرد بیشتری دارند [۱-۳]. امروزه استفاده از لوله های جدارنازک به عنوان جاذب انرژی در ساخت وسایل نقلیه کاربرد وسیعی یافته است [۴]. این لوله ها به هنگام تصادف، انرژی جنبشی ضربه را دفع کرده و منجر به افزایش ایمنی و سلامتی سرنشینان می شوند [۵]. هنگامی که این لوله ها تحت بار فشاری محوری قرار می گیرند، لولاهای ایجاد شده در سازه انرژی جنبشی را به تغییر شکل پلاستیک تبدیل کرده و از میزان آسیب وارده می کاهند [۶].

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه خواص جذب انرژی لوله های جدارنازک آلومینیومی شیاردار تحت آزمون لهیدگی گزارش شده است. منتظری و همکاران [۷] به بررسی تجربی، شبیه سازی و تئوری جذب انرژی لوله های جدارنازک فولادی و آلومینیومی با دو الگوی شیاردار و سوراخدار پرداختند. ضخامت، قطر و طول لوله ها در پژوهش آنها به ترتیب برابر ۲، ۵۴ و ۹۶ میلی متر بود. سطح مقطع لوله ها نیز دایروی بود. آنها دریافتند که به دلیل تمرکز تنش بیشتر در لوله شیاردار نسبت به لوله سوراخدار، نیروی لهیدگی اولیه کمتر است. همچنین برای هر دو جنس، جذب انرژی مخصوص در لوله های شیاردار کمتر از لوله های سوراخدار است. آلبرت و همکاران [۸] تاثیر ایجاد چهار الگوی مختلف شیار بر روی نیروی لهیدگی اولیه، جذب

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

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

استناد به این مقاله:

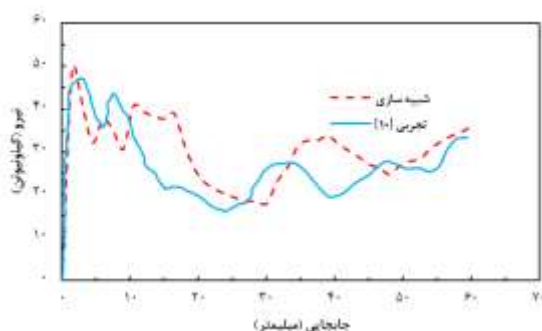
فول فاکتوریل، تعداد ۴۲ آزمایش با استفاده از مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده انجام خواهد شد. سپس میزان مشارکت و تاثیر پارامترهای مذکور بر روی نیروی لهیدگی اولیه، جذب انرژی مخصوص و بازده نیروی لهیدگی با استفاده از آنالیز واریانس، رویه‌های پاسخ و نمودارهای کانتوری بررسی خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این مقاله به دلیل صرفه‌جویی در هزینه و زمان، از روش شبیه‌سازی اجزای محدود به جای اجرای عملی آزمایش‌ها استفاده شد. از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. لوله استفاده شده از جنس آلومینیوم پیرسخت‌شده با ضخامت ۲، قطر متوسط ۴۵/۵ و طول ۱۱۷ میلی‌متر بوده که خواص فیزیکی و مکانیکی این ماده با استفاده از مرجع [۱۰] در تحلیل لهیدگی محوری استفاده شده است. شکل (۱) نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم پیرسخت‌شده را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن قطعه‌کار، به منظور ساده‌سازی و کاهش زمان تحلیل فقط یک‌چهارم از لوله و مجموعه قالب مدل شد. لوله آلومینیومی به صورت شکل‌پذیر و قالب به صورت صلب گسسته مدل شد. از حل‌گر صریح دینامیکی صریح برای تحلیل استفاده شده است. برای تعریف تماس لوله با خود و همچنین با قالب‌ها، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شد. مطابق با مرجع [۱۰]، سرعت بارگذاری ثابت و برابر با ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. برای شبکه‌بندی لوله از المان‌های توپر هشت‌گه‌ای و برای قالب‌ها از المان پوسته‌ای چهارگه‌ای استفاده شده است. با انجام آزمون همگرایی برای نیروی لهیدگی اولیه (IPF) سائز المان نیز برابر با ۱/۸ انتخاب شد که در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین شکل (۳) مدل اجزای محدود طراحی شده را نشان می‌دهد. در این مدل، تعداد ۷ شیار (۳ شیار بیرونی و ۴ شیار داخلی) با عرض ۳ و عمق ۱ میلی‌متر وجود دارد. با استفاده از نتایج تجربی مرجع [۱۰]، نتایج شبیه‌سازی بررسی و صحت آن تایید شد که در شکل (۴) نشان داده شده است. طبق شکل، بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مطابقت قابل قبولی برقرار است. حداکثر اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی برای نیروی لهیدگی اولیه و جذب انرژی کل به ترتیب کمتر از ۶٪ و ۱۰٪ است.

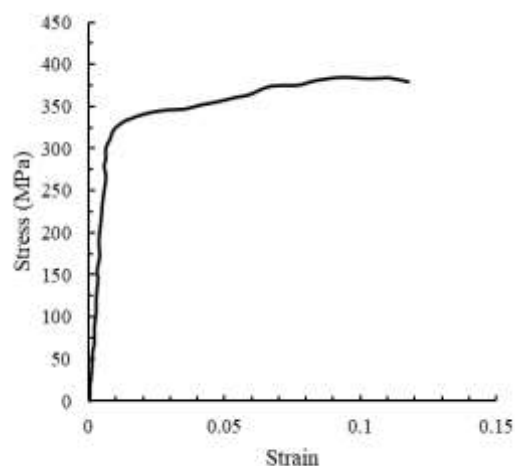
انرژی مخصوص و بازده نیروی لهیدگی لوله‌های جدارنازک آلومینیومی را مورد بررسی قرار دادند. لوله‌ها با سطح مقطع مربعی با ضخامت ۱/۵ و طول ۲۰۰ میلی‌متر بودند. در دو الگو شیارها در دو وجه و در دو الگوی دیگر شیارها در هر چهار وجه لوله‌ها تعبیه شدند. نتایج آنها نشان داد که الگوی یک دارای کمترین میزان نیروی لهیدگی اولیه می‌باشد. در این الگو، عرض شیار ۴ میلی‌متر و زاویه بین شیارها ۳۲/۶۶ درجه می‌باشد. به علاوه، استفاده از الگوی شیاردار نسبت به الگوی بدون شیار، منجر به افزایش جذب انرژی مخصوص و بازده نیروی لهیدگی خواهد شد. یائو و همکاران [۹] به مطالعه تجربی و تئوری خواص جذب انرژی لوله‌های شیاردار هیبریدی فولادی پرشده با فوم آلومینیومی تحت بار فشاری محوری پرداختند. ضخامت و قطر لوله‌ها در پژوهش آنها به ترتیب برابر ۶ و ۳۲/۵ میلی‌متر بود. همچنین طول لوله‌ها ۱۲۳ میلی‌متر و تعداد شیارها ۵ عدد بود. آنها توانستند پیش‌بینی تئوری خواص جذب انرژی را با اختلاف کمی نسبت به نتایج تجربی انجام دهند. نتایج آنها نشان داد که نیروی لهیدگی متوسط، جذب انرژی مخصوص و بازده نیروی لهیدگی با افزایش نسبت ارتفاع به ضخامت لوله‌ها کاهش می‌یابد. رضوانی و همکاران [۱۰] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی تاثیر شکل شیار بر روی خواص جذب انرژی لوله‌های جدارنازک آلومینیومی تحت بار فشاری محوری پرداختند. لوله‌ها با سطح مقطع دایروی و ضخامت ۲ میلی‌متر بودند. آنها چهار نوع شیار مثلثی، مستطیلی، دایروی و دوزنقه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که به جز شیار مثلثی، با افزایش تعداد شیارها نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی مخصوص کاهش می‌یابد. ولی برای همه شیارها، با افزایش تعداد شیار بازده نیروی لهیدگی افزایش می‌یابد.

همانطور که قابل مشاهده است، تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه جذب انرژی لوله‌های جدارنازک آلومینیومی شیاردار تحت بار محوری فشاری انجام شده است. با این وجود، تحقیق جامعی که در آن از ترکیب روش‌های اجزای محدود و طراحی آزمایش جهت بررسی تاثیر ابعاد، تعداد و الگوی شیارها بر روی جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی پیرسخت‌شده تحت بار فشاری محوری استفاده شود یافت نشد. در این مقاله، پس از طراحی آزمایش به کمک روش

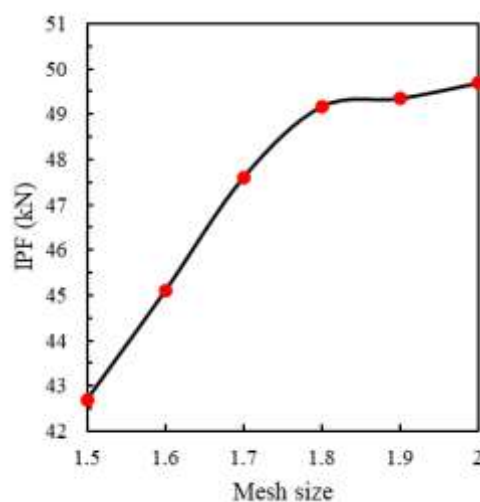


شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی مرجع [۱۰]

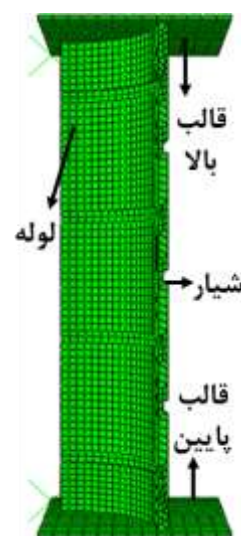
در این مقاله، از روش طراحی آزمایش فول فاکتوریل برای بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر روی خواص جذب انرژی لوله های شیاردار آلومینیومی استفاده شده است. پارامترهای عرض (W)، تعداد (N) و الگوی شیارها (T) به عنوان متغیرهای ورودی و نیروی لهیدگی اولیه، جذب انرژی مخصوص و بازده نیروی لهیدگی به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. عرض شیار در ۳ سطح (۲، ۳ و ۴ میلی متر)، تعداد شیار در ۷ سطح (۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷) و الگوی شیار در دو حالت طبق شکل ۵ در نظر گرفته شدند. در این شکل، ابعاد لوله و شیار نیز به میلی متر مشخص شده است. در هر دو الگو، تعداد شیارها یکی است با این تفاوت که در اولی تعداد شیار داخلی یکی بیشتر از بیرونی و در دومی تعداد شیار بیرونی یکی بیشتر از داخلی می باشد. با در نظر گرفتن پارامترها و سطوح آنها، تعداد ۴۲ آزمایش طبق جدول ۱ طراحی و به صورت شبیه سازی اجرا شدند. برای طراحی آزمایش ها و تحلیل نتایج از نرم افزار مینی تب استفاده شده است [۱۱]. نیروی لهیدگی اولیه (IPF) همان اولین پیک نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون لهیدگی تحت بار محوری می باشد. جذب انرژی مخصوص (SEA) طبق رابطه (۱) از تقسیم سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بر جرم لوله (m) محاسبه می شود. در این رابطه، L جابجایی قالب بالا و P نیروی وارده در هر لحظه می باشد [۱۲]. به علاوه، بازده نیروی لهیدگی (CFE) از تقسیم نیروی لهیدگی متوسط (MCF) بر نیروی لهیدگی اولیه به دست می آید (رابطه ۲). همچنین از تقسیم سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بر جابجایی قالب بالا، نیروی لهیدگی متوسط تعریف می شود (رابطه ۳) [۱۳]. لازم به ذکر است که یک جذب انرژی مطلوب باید دارای مقادیر IPF کمتر و مقادیر SEA و CFE بیشتر باشد [۱۴].



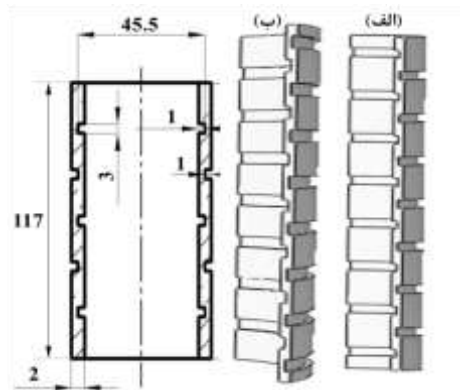
شکل ۱- نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم پیرسخت شده



شکل ۲- همگرایی سائز المان



شکل ۳- مدل اجزای محدود طراحی شده



شکل ۵- الگوی شیپرها: الف) نوع ۱، ب) نوع ۲

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

$$CFE = \frac{MCF}{IPF} \quad (2)$$

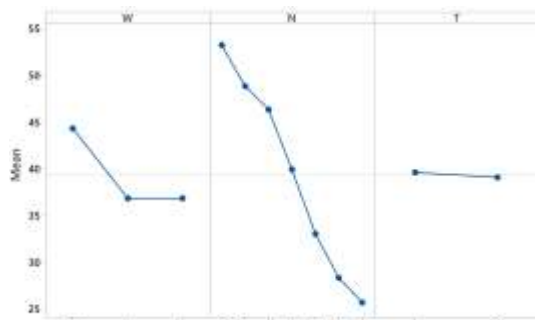
$$MCF = \frac{\int_0^L p(x) dx}{L} \quad (3)$$

جدول ۱- طرح آزمایش‌ها با استفاده از روش فول فاکتوریل

شماره آزمایش	عرض شیار (mm)	تعداد شیار	الگوی شیار	شماره آزمایش	عرض شیار (mm)	تعداد شیار	الگوی شیار
۱	۲	۱۱	۱	۲۲	۳	۱۱	۱
۲	۴	۹	۱	۲۳	۴	۱۱	۱
۳	۳	۵	۱	۲۴	۲	۹	۱
۴	۳	۱۳	۱	۲۵	۳	۱۷	۲
۵	۴	۵	۱	۲۶	۲	۵	۲
۶	۲	۱۱	۲	۲۷	۳	۱۱	۲
۷	۲	۱۵	۲	۲۸	۴	۱۵	۱
۸	۲	۱۷	۲	۲۹	۳	۹	۲
۹	۳	۱۳	۲	۳۰	۲	۵	۱
۱۰	۴	۱۷	۲	۳۱	۴	۵	۲
۱۱	۳	۱۵	۲	۳۲	۳	۵	۲
۱۲	۲	۱۵	۱	۳۳	۲	۱۷	۱
۱۳	۳	۱۷	۱	۳۴	۴	۱۳	۲
۱۴	۲	۹	۲	۳۵	۴	۱۱	۲
۱۵	۴	۱۳	۱	۳۶	۴	۷	۱
۱۶	۲	۷	۱	۳۷	۳	۷	۲
۱۷	۲	۱۳	۱	۳۸	۴	۹	۲
۱۸	۴	۷	۲	۳۹	۴	۱۵	۲
۱۹	۳	۷	۱	۴۰	۲	۷	۲
۲۰	۲	۱۳	۲	۴۱	۳	۹	۱
۲۱	۴	۱۷	۱	۴۲	۳	۱۵	۱

جدول ۲- نتایج آزمایش ها

شماره آزمایش	نیروی لهیدگی اولیه (kN)	جذب انرژی مخصوص (kJ/kg)	بازده نیروی لهیدگی (-)
۱	۴۶/۴۲	۲۰/۹۱	۰/۶۱
۲	۴۳/۸۳	۱۸/۹۰	۰/۵۵
۳	۴۷/۲۰	۲۴/۹۶	۰/۷۵
۴	۳۲/۴۳	۱۶/۴۹	۰/۶۴
۵	۵۳/۱۸	۲۵/۴۲	۰/۶۶
۶	۴۳/۲۷	۱۴/۹۰	۰/۴۷
۷	۳۲/۸۵	۲۳/۷۷	۰/۹۵
۸	۳۰/۷۹	۲۵/۷۲	۱/۰۷
۹	۳۱/۹۲	۱۵/۳۳	۰/۶۰
۱۰	۱۹/۱۳	۱۵/۵۱	۰/۸۷
۱۱	۲۶/۳۱	۱۶/۱۳	۰/۷۵
۱۲	۳۲/۹۳	۲۴/۷۱	۰/۹۹
۱۳	۲۵/۱۷	۱۷/۰۶	۰/۸۰
۱۴	۵۲/۲۶	۱۶/۹۶	۰/۴۵
۱۵	۲۹/۸۸	۱۶/۷۲	۰/۶۶
۱۶	۴۸/۶۸	۲۲/۸۶	۰/۶۶
۱۷	۳۹/۲۶	۲۰/۹۷	۰/۷۱
۱۸	۵۰/۵۸	۲۰/۸۸	۰/۵۵
۱۹	۴۷/۶۱	۲۰/۹۰	۰/۶۰
۲۰	۳۶/۸۴	۲۰/۲۳	۰/۷۳
۲۱	۲۰/۳۴	۱۷/۵۶	۰/۹۲
۲۲	۳۸/۲۴	۱۷/۹۱	۰/۶۲
۲۳	۳۶/۶۲	۱۶/۲۰	۰/۵۴
۲۴	۵۰/۸۲	۲۱/۰۲	۰/۵۷
۲۵	۲۴/۷۶	۱۶/۹۱	۰/۸۰
۲۶	۶۱/۷۰	۳۶/۰۹	۰/۸۴
۲۷	۳۹/۱۱	۱۸/۲۴	۰/۶۰
۲۸	۲۵/۷۳	۱۶/۰۴	۰/۷۰
۲۹	۴۴/۲۴	۱۹/۸۲	۰/۶۰
۳۰	۶۱/۱۰	۳۱/۹۶	۰/۷۵
۳۱	۵۴/۴۷	۳۰/۸۰	۰/۷۸
۳۲	۴۱/۵۱	۱۷/۲۳	۰/۵۸
۳۳	۳۴/۱۲	۲۹/۲۸	۱/۱۰
۳۴	۲۷/۸۲	۱۷/۵۶	۰/۷۴
۳۵	۳۵/۸۲	۱۶/۱۶	۰/۵۵
۳۶	۴۸/۶۱	۱۸/۴۹	۰/۵۳
۳۷	۴۸/۰۴	۲۱/۸۴	۰/۶۲
۳۸	۴۴/۴۰	۱۷/۷۹	۰/۵۱
۳۹	۲۵/۲۹	۱۶/۴۱	۰/۷۳
۴۰	۴۹/۴۴	۱۹/۵۷	۰/۵۶
۴۱	۴۲/۳۹	۱۹/۷۰	۰/۶۲
۴۲	۲۶/۸۲	۱۷/۱۷	۰/۷۸



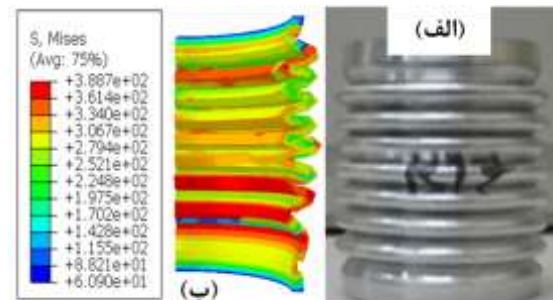
شکل ۷- تاثیر پارامترهای ورودی بر روی نیروی لهیدگی اولیه

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس برای نیروی لهیدگی اولیه

منبع	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
W	۵۲۲/۶۷	۲۶۱/۳۳۴	۲۹/۳۶	۰/۰۰۰
N	۴۰۶۷/۴۸	۶۷۷/۹۱۳	۷۶/۱۶	۰/۰۰۰
T	۲/۸۰	۲/۸۰۳	۰/۳۱	۰/۵۷۹
خطا	۲۸۴/۸۴	۸/۹۰۱	-	-
کل	۴۸۷۷/۷۹	-	-	-

۳- نتایج و بحث

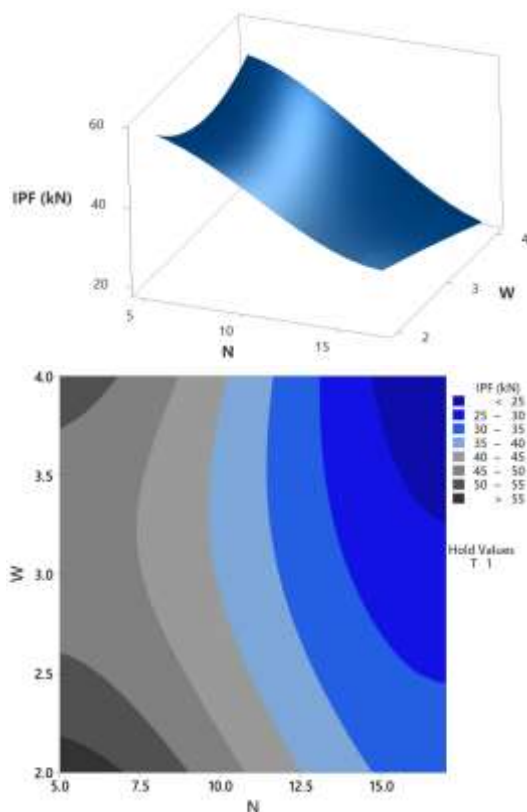
پس از اجرای آزمایش‌های طراحی‌شده، مقادیر نیروی لهیدگی اولیه، جذب انرژی مخصوص و بازده نیروی لهیدگی برای هر آزمایش استخراج شد که در جدول ۲ نشان داده شده است. سپس، هر کدام از خروجی‌های مذکور تحلیل شده و تاثیر پارامترهای ورودی (عرض، تعداد و الگوی شیارها) بر روی آنها مشخص خواهد شد. شکل (۶) یک نمونه لوله پس از لهیدگی را نشان می‌دهد.



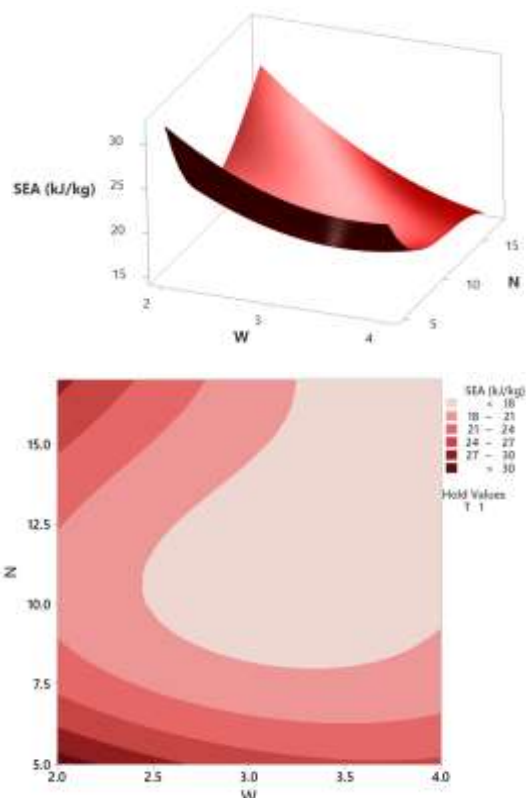
شکل ۶- لوله پس از لهیدگی: (الف) تجربی [۱۰]، (ب) شبیه‌سازی

۳-۱- نیروی لهیدگی اولیه

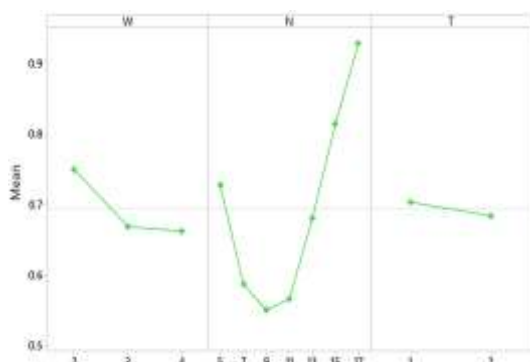
در شکل (۷) تاثیر پارامترهای ورودی بر روی نیروی لهیدگی اولیه نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که پارامترهای تعداد و عرض شیار به ترتیب مهم‌ترین پارامترها بر روی نیروی لهیدگی اولیه هستند. با افزایش تعداد شیارها در لوله، حالت لهیدگی در لوله به سمت متقارن تغییر کرده و در نتیجه لوله به صورت کامل فشرده می‌شود. این امر سبب کاهش پیک نمودار نیرو-جابجایی می‌شود [۱۰]. از طرف دیگر، تاثیر الگوی شیار چندان محسوس نیست، با این وجود الگوی دو (تعداد شیار بیرونی یکی بیشتر از داخلی) اندکی بهتر از الگوی یک است. صحت این مطالب با بررسی بیشتر نتایج آنالیز واریانس (جدول ۳) تایید می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار P-Value برای تعداد و عرض شیار کمتر از ۰/۰۵ و به معنای تاثیرگذاری این پارامترها می‌باشد [۱۵]. میزان مشارکت نیز به مقدار ۷۱/۲۹٪ برای تعداد شیار و ۲۷/۴۸٪ برای عرض شیار به دست آمد. در شکل (۸) رویه سه‌بعدی و نمودار کانتوری دوبعدی نیروی لهیدگی اولیه بر حسب پارامترهای تاثیرگذار یعنی تعداد و عرض شیار نشان داده شده است.



شکل ۸- رویه سه‌بعدی و کانتوری دوبعدی نیروی لهیدگی اولیه بر حسب تعداد و عرض شیار



شکل ۱۰- رویه سه بعدی و کانتوری دوبعدی جذب انرژی مخصوص بر حسب عرض و تعداد شیار



شکل ۱۱- تاثیر پارامترهای ورودی بر روی بازده نیروی لهیدگی

شکل (۱۲) رویه سه بعدی و نمودار کانتوری دوبعدی بازده نیروی لهیدگی بر حسب تعداد و عرض شیار را نشان می دهد.

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس برای بازده نیروی لهیدگی

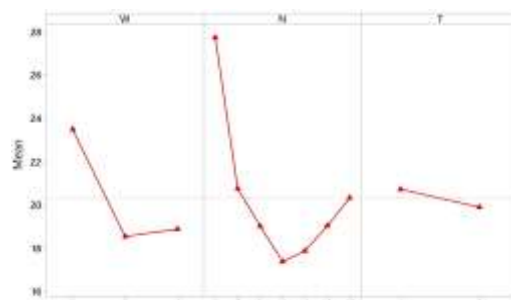
منبع	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
W	۰/۰۶۷	۰/۰۳۳	۵/۳۳	۰/۰۱۰
N	۰/۷۱۳	۰/۱۱۹	۱۹/۰۱	۰/۰۰۰
T	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۶۳	۰/۴۳۲
خطا	۰/۲۰۰	۰/۰۰۶	-	-
کل	۰/۹۸۴	-	-	-

۲-۳- جذب انرژی مخصوص

شکل (۹) تاثیر پارامترهای ورودی بر روی جذب انرژی مخصوص را نشان می دهد. نتایج آنالیز واریانس نیز در جدول ۴ ارائه شده است. طبق جدول، پارامتر عرض با ۵۴/۲۶ مشارکت و پارامتر تعداد شیار با ۳۷/۱۰ مشارکت به ترتیب مهم ترین پارامترها بر روی جذب انرژی مخصوص هستند. همانند خروجی قبلی، تاثیر الگوی شیار چندان محسوس نیست، با این وجود الگوی یک بهتر از الگوی دو است. با افزایش عرض شیار، از جرم لوله کاسته شده و ضمن تغییر شکل لولایی در لوله، جذب انرژی مخصوص کاهش می یابد. در شکل (۱۰) رویه سه بعدی و نمودار کانتوری دوبعدی جذب انرژی مخصوص بر حسب عرض و تعداد شیار نشان داده شده است.

۳-۳- بازده نیروی لهیدگی

در شکل (۱۱) تاثیر پارامترهای ورودی بر روی بازده نیروی لهیدگی نشان داده شده است. به علاوه، جدول ۵ نتایج آنالیز واریانس برای بازده نیروی لهیدگی را نشان می دهد. همانطور که مشخص است، پارامترهای تعداد و عرض شیار به ترتیب با ۷۳/۱۹٪ و ۲۰/۵۲٪ مشارکت مهم ترین پارامترها بر روی بازده نیروی لهیدگی می باشند. همانند دو خروجی قبلی، تاثیر الگوی شیار چندان محسوس نیست، با این وجود الگوی یک بهتر از الگوی دو است.



شکل ۹- تاثیر پارامترهای ورودی بر روی جذب انرژی مخصوص

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس برای جذب انرژی

مخصوص

منبع	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
W	۲۱۳/۹۰۷	۱۰۶/۹۵۳	۱۰/۸۷	۰/۰۰۰
N	۴۳۸/۷۵۵	۷۳/۱۲۶	۷/۴۳	۰/۰۰۰
T	۷/۱۷۹	۷/۱۷۹	۰/۷۳	۰/۳۹۹
خطا	۳۱۴/۸۷۷	۹/۸۴	-	-
کل	۹۷۴/۷۱۸	-	-	-

برای تعیین محدوده بهینه پارامترهای ورودی، از رویه‌های پاسخ و نمودارهای کانتوری برحسب پارامترهای تاثیرگذار استفاده شد. مهم‌ترین نتایج حاصل عبارت است از:

۱. برای نیروی لهدیگی اولیه، تعداد و عرض شیار به‌ترتیب با ۷۱/۲۹٪ و ۲۷/۴۸٪ مشارکت مهم‌ترین پارامترها هستند.

۲. پارامترهای عرض شیار با ۵۴/۲۶٪ مشارکت و تعداد شیار با ۳۷/۱۰٪ مشارکت به‌ترتیب مهم‌ترین پارامترها بر روی جذب انرژی مخصوص هستند.

۳. پارامترهای تعداد و عرض شیار به‌ترتیب با ۷۳/۱۹٪ و ۲۰/۵۲٪ مشارکت، مهم‌ترین پارامترها بر روی بازده نیروی لهدیگی می‌باشند.

۴. برای هر سه خروجی مذکور، پارامتر الگوی شیار تاثیر محسوسی ندارد. با این وجود الگوی یک (تعداد شیار داخلی یکی بیشتر از بیرونی) اندکی بهتر از الگوی دو (تعداد شیار بیرونی یکی بیشتر از داخلی) است.

تعارض منافع

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

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

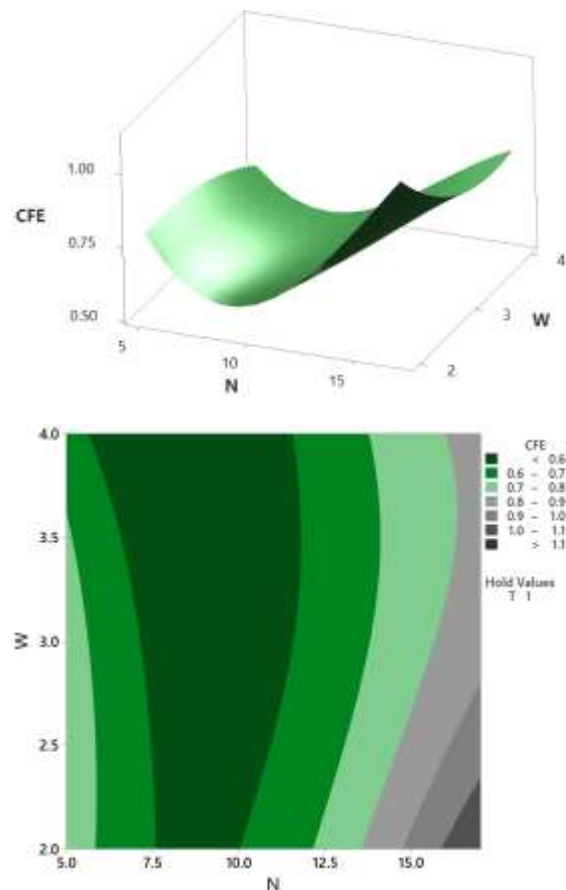
وحید مدانلو: تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیشنویس اصلی.

محمد دشتی کهنوئی: شبیه‌سازی و گردآوری داده‌ها.

امین صفی جهانشاهی: بازبینی و ویرایش.

منابع مالی

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



شکل ۱۲- رویه سه‌بعدی و کانتوری دوبعدی بازده نیروی لهدیگی بر حسب تعداد و عرض شیار

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد جذب انرژی لوله‌های جدارنازک شیاردار با سطح مقطع دایروی از جنس آلومینیوم پیرسخت‌شده تحت لهدیگی محوری با استفاده از ترکیب روش‌های شبیه‌سازی اجزای محدود و طراحی آزمایش بررسی شد. تاثیر ابعاد، تعداد و الگوی شیارها بر روی نیروی لهدیگی اولیه، جذب انرژی مخصوص و بازده نیروی لهدیگی با استفاده از طراحی آزمایش به روش فول فاکتوریل بررسی شد. میزان مشارکت پارامترهای ورودی بر روی خواص جذب انرژی مذکور با استفاده از آنالیز واریانس مشخص شد.

مراجع

- [1] Shariati, Mahmoud, Hatami Hossein, and Damghani Nouri Mohammad. "Experimental investigations on the softening and ratcheting behaviors of steel cylindrical shell under cyclic axial loading." *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)* 2, no. 2 (2013): 11-22.
- [2] Dalvand, Ahmad, Hatami Hossein, and Seyedi Chegini Arezo. "Experimental study of the effect of dynamic loading on rectangular armed panels made of self-compacting composite fiber and lattice sheets." *Journal of Structural and Construction Engineering* 8, no. 1 (2021): 131-151.

- [3] Hatami, Hossein, and Fathollahi AmirBehzad. "Theoretical and numerical study and comparison of the inertia effects on the collapse behavior of expanded metal tube absorber with single and double cell under impact loading." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 50, no. 5 (2018): 999-1014.
- [4] Sepahvand, Hossein, Hosseini Mojtaba, and Hatami Hossein. "Experimental and Numerical Investigation on Concrete Specimens with Expanded Metal Sheet under Impact Loading." *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics* 32, no. 1 (2021): 211-230.
- [5] Modanloo, Vahid, and Majid Elyasi. "Comparison of energy absorption of cylindrical thin-walled aluminum tubes with various geometrical patterns under axial compression loading using multi-criteria decision-making methods." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 46, no. 4 (2024): 257.
- [6] Li, Xianhui, Xiang Zhu, Rui Wang, Tieying Li, Yi Gu, and Qi Zhang. "Experimental study on the impact resistance of hollow thin-walled aluminum alloy tubes and foam-filled aluminum tubes (6063-T5)." *International Journal of Crashworthiness* 29, no. 1 (2024): 95-114.
- [7] Montazeri, Saharnaz, Majid Elyasi, and Amin 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.
- [8] Albert, Prescilla Christy, Amir Radzi Ab Ghani, Mohd Zaid Othman, and M. A. Zaidi. "Axial crushing behavior of aluminum square tube with origami pattern." *Modern Applied Science* 10, no. 2 (2016): 90-108.
- [9] Yao, Ru-yang, Zhen-yu Zhao, Wen-qian Hao, Guan-sheng Yin, and Bei Zhang. "Experimental and theoretical investigations on axial crushing of aluminum foam-filled grooved tube." *Composite Structures* 226 (2019): 111229.
- [10] Rezvani, M. J., M. Damghani Nouri, and H. Rahmani. "Experimental and numerical investigation of grooves shape on the energy absorption of 6061-T6 aluminium tubes under axial compression." *International Journal of Materials and Structural Integrity* 6, no. 2-4 (2012): 151-168.
- [11] Modanloo, Vahid, Majid Elyasi, Hossein Talebi-Ghadikolaee, Farzad Ahmadi Khatir, and Behnam Akhoundi. "The use of MCDM techniques to assess fluid pressure on the bending quality of AA6063 heat-treated tubes." *Journal of Engineering Research* 12, no. 1 (2024): 251-258.
- [12] Elyasi, Majid, Meghdad Roohol Amini Ahangar, and Vahid Modanloo. "Experimental and numerical investigation of energy absorption capability of holed thin-walled circular aluminum tubes under axial compression loading." *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 10, no. 6 (2023): 29-39.
- [13] Fan, Dong, Ma Qi-hua, Gan Xue-hui, and Zhou Tianjun. "Crashworthiness analysis of perforated metal/composite thin-walled structures under axial and oblique loading." *Polymer Composites* 42, no. 4 (2021): 2019-2036.
- [14] Elyasi, Majid, and Vahid Modanloo. "Assessment of energy absorption and crushing performance of perforated thin-walled AA6061-O tubes with irregular holes under axial compression loading." *Arabian Journal for Science and Engineering* (2024): 1-12.
- [15] Babazadeh Asbagh, Emran, Vahid Modanloo, Vali Alimirzaloo, and Ali Donyavi. "Experimental investigation of the effect of process parameters on the surface roughness in finishing process of chrome coated printing cylinders." *International Journal of Engineering* 29, no. 12 (2016): 1775-1782.