



Experimental Investigation on the Energy Absorption of Lattice Thin-Walled Metal Tubes with Auxetic, Semi-Re-Entrant, and Conventional Honeycomb Cells under Axial Loading

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Najar M.¹,
Ghajar R.^{1*}

How to cite this article

Najar M., Ghajar R, Experimental Investigation on the Energy Absorption of Lattice Thin-Walled Metal Tubes with Auxetic, Semi-Re-Entrant, and Conventional Honeycomb Cells under Axial Loading. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(05):293-303.

¹ Faculty of Mechanical Engineering, K. N. TOOSI University of Technology, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, K. N. TOOSI University of Technology, Tehran, Iran.

ghajar@kntu.ac.ir

Article History

Received: April 15, 2024

Accepted: July 27, 2024

ePublished: August 20, 2024

ABSTRACT

This research aims to experimentally investigate the energy absorption of thin-walled lattice tubes with a square section. The walls of the thin-walled tube are made in the form of a lattice with three types of cells: re-entrant auxetic, semi-re-entrant, and conventional honeycomb structures, and the material of the specimens is considered 304 stainless steels. All three types of lattice cells are produced by the rotary laser cutting method on a conventional tube and are axially compressed by a universal test machine under quasi-static loading at a 5 mm/min velocity. The test evaluation parameters are initial maximum force, mean crushing force, crushing force efficiency, energy absorption, and specific energy absorption. The results show that the thin-walled tube with the re-entrant auxetic structure has more specific energy absorption than the other two structures. The specific energy absorption of this structure is 25% higher than the conventional honeycomb structure. The semi-re-entrant structure has more energy absorption and mean crushing force than the other structures. The crushing force efficiency in the conventional honeycomb structure is higher than that of the other two structures, which has a value of 85%.

Keywords Auxetic, Semi-Re-Entrant, Specific Energy, Thin-Walled Tube, Quasi-Static

CITATION LINKS

1- Energy absorption of structures and ... 2- A new bi-tubular conical-circular structure ... 3- Experimental investigation on the axial ... 4- Dynamic crushing behavior and energy ... 5- Auxetic materials and their potential applications ... 6- Foam structures with a negative ... 7- Dynamic crushing strength analysis of ... 8- Plastic analyses of thin-walled steel ... 9- In-plane dynamic crushing of re-entrant ... 10- Dynamic crushing response of auxetic ... 11- Experimental and Numerical Investigation of ... 12- Crashworthiness assessment of auxetic ... 13- Zero-v cellular honeycomb flexible skins for ... 14- Hexagonal honeycombs with zero ... 15- Mechanical properties and energy absorption ... 16- Effect of auxetic structures on crash ... 17- Deformation behaviors and energy absorption ... 18- Crushing performance of auxetic tubes ... 19- Energy absorption of square tubes with ... 20- Investigation on wire electrical discharge ... 21- Materials for additive manufacturing. 22- Mechanical properties of foam-filled hexagonal ... 23- The effect of CO2 laser cutting parameter on ... 24- Low-cost laser cutting fabricated all-metallic ...

بررسی تجربی جذب انرژی در لوله‌های فلزی جدار نازک مشبک با سلول‌های آگرتیک، نیمه درون‌رو و معمولی تحت بارگذاری محوری

مصیب نجار^۱، رحمت الله قاجار^۲

^۱ گروه طراحی کاربردی، آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تجربی جذب انرژی لوله‌های جدار نازک مشبک با مقطع مربعی است. دیواره‌های لوله‌ی جدار نازک به صورت مشبک با سه نوع سلول شامل آگرتیک درون‌رو، نیمه درون‌رو و لانه زنبوری معمولی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ است. هر سه نوع سلول مشبک با روش برش لیزر دوار روی لوله جدار نازک ایجاد و توسط دستگاه آزمایش یونیورسال تحت بارگذاری شبه-استاتیک با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه به صورت محوری فشرده می‌شوند. نیروی پیشینه اولیه، نیروی متوسط لهیدگی، راندمان نیروی لهیدگی، جذب انرژی و جذب انرژی ویژه به عنوان پارامترهای ارزیابی آزمون در نظر گرفته می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که لوله جدار نازک با ساختار آگرتیک درون‌رو، جذب انرژی مخصوص بیشتری نسبت به دو ساختار دیگر دارد. در این ساختار جذب انرژی ویژه ۲۵٪ نسبت به ساختار لانه زنبوری معمولی بیشتر است. ساختار نیمه درون‌رو، جذب انرژی و نیروی متوسط بیشتری نسبت به دو ساختار دیگر دارد. مقدار راندمان نیروی لهیدگی در ساختار لانه زنبوری معمولی ۸۵٪ بدست می‌آید که نسبت به دو ساختار دیگر بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: آگرتیک، نیمه درون‌رو، انرژی ویژه، لوله جدار نازک، شبه-استاتیک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶

*نویسنده مسئول: ghajar@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

جاذب‌های انرژی انواعی از سازه‌های مکانیکی هستند که برای تبدیل کل یا قسمتی از انرژی جنبشی ناشی از ضربه به شکل‌های دیگر انرژی به کار می‌روند. یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین جاذب‌های انرژی در صنایع مختلف، لوله‌های جدار نازک‌اند که در گروه جاذب‌های برگشت ناپذیر قرار می‌گیرند. این جاذب‌های انرژی با تغییر شکل خود در برابر نیروی محوری و یا جانبی و تبدیل انرژی جنبشی ضربه به کار پلاستیک، انرژی ضربه را مستهلک می‌نمایند^[۱]. عسگری و عظیمی^[۲]، جذب انرژی بر روی ساختارهای دو-لوله‌ای (bi-tubular structure) تحت بارگذاری دینامیکی به صورت اریب و محوری را بررسی کردند. لوله‌ی بیرونی استوانه‌ای شکل از جنس آلومینیوم و لوله‌ی درونی به شکل مخروط ناقص از جنس فولاد و جرم ضربه زننده ۲۰۰ کیلوگرم و سرعت آن در لحظه برخورد، ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. آن‌ها رفتار ساختار تک لوله‌ای و دو-لوله‌ای را با و بدون فوم آلومینیوم بررسی کردند. نتایج نشان داد جذب انرژی

دو-لوله‌ای تحت بارگذاری اریب با افزایش زاویه برخورد کاهش می‌یابد. در ساختار تک لوله‌ای به شکل مخروط ناقص و ساختار دو-لوله‌ای، اضافه کردن فوم باعث افزایش نیروی پیشینه اولیه و کاهش جذب انرژی ویژه می‌شود.

گراسیانو و همکاران^[۳] به معرفی لوله‌های جدار نازک فلزی با مقاطع دایروی و مربعی به عنوان جاذب انرژی تحت بارگذاری شبه-استاتیکی پرداختند. دیواره‌ی این لوله‌های جدار نازک به صورت مشبک و با سلول لوزی شکل است. در این پژوهش زاویه میان قطر بزرگ سلول لوزی شکل و محور افق جهت سلول را مشخص می‌نماید. بررسی تجربی روی این نوع جاذب‌ها نشان داد که ساز و کار فروریزش (Collapse) و ظرفیت جذب انرژی به جهت سلول‌ها بستگی دارد. لوله‌های جدار نازک با سلول صفر درجه دارای فروریزش متقارن و لوله جدار نازک با سلول ۹۰ درجه از قسمت میانی خود دچار کمانش کلی شدند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استحکام لوله به سه عامل توزیع سلول، هندسه سلول و استحکام تسلیم ماده بستگی دارد. همچنین بیان کردند که لوله‌های مشبک مربعی ظرفیت جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی بیشتر نسبت به لوله‌های مشبک دایروی دارند. چن و همکاران^[۴] جذب انرژی سازه‌های استوانه‌ای مشبک با پیکره‌بندی مثلی و شش ضلعی تحت بار ضربه‌ای به صورت تئوری و عددی در دو سرعت ۰/۳۲ و ۶/۳۵ متر بر ثانیه را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها پوسته استوانه‌ای مشبک با سلول مثلی را با روش تولید افزایشی از جنس ABS تولید و نتایج شبیه‌سازی عددی را با آزمون تجربی صحه‌گذاری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای هر دو پوسته استوانه‌ای مشبک، وارد کردن گرادیان مثبت چگالی می‌تواند جذب انرژی را در مراحل اولیه فشرده‌گی در سرعت ۶/۳۵ متر بر ثانیه افزایش دهد.

برخلاف ساختارهای معمولی، ساختارهای آگرتیک (Auxetic) دارای نسبت پواسون منفی (Negative Poisson's ratio) است. هنگامی که این ساختارها کشیده می‌شوند، در راستای عمود بر راستای اعمال نیرو، منبسط و هنگام فشرده شدن در راستای طولی، دچار جمع‌شدگی عرضی می‌شوند^[۵]. لیکز^[۶] در سال ۱۹۸۷ برای اولین بار یک ساختار اسفنجی از فوم پلی اورتان با خاصیت آگرتیک معرفی کرد که با استفاده از فرآیند فشرده‌سازی در سه قالب با اندازه مختلف و حرارت دهی ساخته شد. هو و همکاران^[۷] رفتار لهیدگی درون-صفحه‌ای ساختار آگرتیک درون‌رو (re-entrant Auxetic) را با ساختار لانه زنبوری معمولی را با استفاده از ترکیبی از روش‌های نظری و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که جذب انرژی در ساختار آگرتیک درون‌رو بزرگتر از لانه زنبوری معمولی است. ژو و همکاران^[۸] فشرده‌گی درون-صفحه‌ای ساختار لانه زنبوری درون‌رو با ساختار لانه زنبوری معمولی را به صورت تجربی و تئوری تحت بارگذاری شبه-استاتیک بررسی کردند. نمونه‌ها از جنس فولاد نرم ۴۵

تولید و تحت بارگذاری شبه-استاتیک با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. نتایج نشان داد ساختار لانه زنبوری درون‌رو دارای جذب انرژی بیشتر اما نیروی بیشینه‌ی اولیه کمتر نسبت به ساختار لانه زنبوری معمولی می‌باشد. لیو و همکاران [9] ساختار آگزتیک درون‌رو و لانه زنبوری معمولی با ساختار منظم و نامنظم را تحت بارگذاری دینامیکی درون-صفحه‌ای به صورت عددی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با کرنش لهیدگی یکسان در ساختار منظم، جذب انرژی در ساختار آگزتیک درون‌رو بیشتر از ساختار آگزتیک نامنظم کمتر از ساختار آگزتیک منظم در بارگذاری دینامیکی است. هو و همکاران [10] پاسخ دینامیکی ساختار لانه زنبوری درون‌رو را به صورت نظری و عددی تحت ضربه سرعت ثابت بررسی کردند. آن‌ها تنش لهیدگی لانه زنبوری درون‌رو را بر حسب تابعی از پارامترهای هندسی سلول، سرعت لهیدگی و خواص مکانیکی مواد دیواره سلول بدست آوردند. نتایج نشان داد که تنش لهیدگی با افزایش سرعت لهیدگی افزایش می‌یابد. نجفی و همکاران [11] جذب انرژی سازه‌های آگزتیک ری‌اینترنت (درون‌رو)، سرنیزه‌ای (Arrowhead)، آنتی‌تتراکایرال ((Anti-tetra chiral)) و سازه لانه‌زنبوری معمولی را بررسی کردند. ساخت نمونه برای همه مدل‌ها توسط فرآیند تولید افزایشی (Additive manufacturing) انجام گرفت. نتایج نشان داد که سازه‌های آگزتیک سرنیزه‌ای، آنتی‌تتراکایرال و ری‌اینترنت به ترتیب ۱۶۱٪، ۱۳۶٪ و ۵۷٪ جذب انرژی بیشتری نسبت به سازه لانه‌زنبوری معمولی دارند. محسنی‌زاده و همکاران [12] ضربه‌پذیری لوله‌های مربعی پر شده با فوم آگزتیک را تحت بارگذاری محوری شبه استاتیک به صورت تجربی بررسی کردند. المپیو و گاندی [13] ساختاری با ضریب پواسون صفر (Zero Poisson's ratio) ارائه دادند و آن را لانه زنبوری هیبریدی (Hybrid honeycomb) نامگذاری کردند. گریما و همکاران [14] ساختار جدیدی با ضریب پواسون صفر با نام نیمه درون‌رو (Semi-re-entrant) را به صورت دوبعدی معرفی کردند. شو و همکاران [15] خواص مکانیکی و جذب انرژی بر روی ساختار لانه زنبوری هیبریدی با ضریب پواسون صفر و لانه زنبوری معمولی با دو چیدمان افقی و عمودی را تحت بارگذاری فشاری درون صفحه‌ای بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ساختار لانه زنبوری هیبریدی با چیدمان افقی نسبت به ساختار دیگر جذب انرژی ویژه بالاتری دارد. همچنین ساختار لانه زنبوری هیبریدی با چیدمان عمودی دارای مدول یانگ بالاتر نسبت به سه ساختار دیگر است. لی و همکاران [16] جذب انرژی بر روی لوله‌ی استوانه‌ای با ساختار آگزتیک لانه زنبوری درون‌رو را با لوله‌ی استوانه‌ای معمولی و لوله‌ی استوانه‌ای لانه زنبوری معمولی را با روش اجزای محدود مقایسه کردند. همچنین به منظور بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی، لوله‌ی استوانه‌ای با ساختار آگزتیک

تولید و تحت بارگذاری شبه-استاتیک با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. نتایج نشان داد ساختار لانه زنبوری درون‌رو دارای جذب انرژی بیشتر اما نیروی بیشینه‌ی اولیه کمتر نسبت به ساختار لانه زنبوری معمولی می‌باشد. لیو و همکاران [9] ساختار آگزتیک درون‌رو و لانه زنبوری معمولی با ساختار منظم و نامنظم را تحت بارگذاری دینامیکی درون-صفحه‌ای به صورت عددی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با کرنش لهیدگی یکسان در ساختار منظم، جذب انرژی در ساختار آگزتیک درون‌رو بیشتر از ساختار آگزتیک نامنظم کمتر از ساختار آگزتیک منظم در بارگذاری دینامیکی است. هو و همکاران [10] پاسخ دینامیکی ساختار لانه زنبوری درون‌رو را به صورت نظری و عددی تحت ضربه سرعت ثابت بررسی کردند. آن‌ها تنش لهیدگی لانه زنبوری درون‌رو را بر حسب تابعی از پارامترهای هندسی سلول، سرعت لهیدگی و خواص مکانیکی مواد دیواره سلول بدست آوردند. نتایج نشان داد که تنش لهیدگی با افزایش سرعت لهیدگی افزایش می‌یابد. نجفی و همکاران [11] جذب انرژی سازه‌های آگزتیک ری‌اینترنت (درون‌رو)، سرنیزه‌ای (Arrowhead)، آنتی‌تتراکایرال ((Anti-tetra chiral)) و سازه لانه‌زنبوری معمولی را بررسی کردند. ساخت نمونه برای همه مدل‌ها توسط فرآیند تولید افزایشی (Additive manufacturing) انجام گرفت. نتایج نشان داد که سازه‌های آگزتیک سرنیزه‌ای، آنتی‌تتراکایرال و ری‌اینترنت به ترتیب ۱۶۱٪، ۱۳۶٪ و ۵۷٪ جذب انرژی بیشتری نسبت به سازه لانه‌زنبوری معمولی دارند. محسنی‌زاده و همکاران [12] ضربه‌پذیری لوله‌های مربعی پر شده با فوم آگزتیک را تحت بارگذاری محوری شبه استاتیک به صورت تجربی بررسی کردند. المپیو و گاندی [13] ساختاری با ضریب پواسون صفر (Zero Poisson's ratio) ارائه دادند و آن را لانه زنبوری هیبریدی (Hybrid honeycomb) نامگذاری کردند. گریما و همکاران [14] ساختار جدیدی با ضریب پواسون صفر با نام نیمه درون‌رو (Semi-re-entrant) را به صورت دوبعدی معرفی کردند. شو و همکاران [15] خواص مکانیکی و جذب انرژی بر روی ساختار لانه زنبوری هیبریدی با ضریب پواسون صفر و لانه زنبوری معمولی با دو چیدمان افقی و عمودی را تحت بارگذاری فشاری درون صفحه‌ای بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ساختار لانه زنبوری هیبریدی با چیدمان افقی نسبت به ساختار دیگر جذب انرژی ویژه بالاتری دارد. همچنین ساختار لانه زنبوری هیبریدی با چیدمان عمودی دارای مدول یانگ بالاتر نسبت به سه ساختار دیگر است. لی و همکاران [16] جذب انرژی بر روی لوله‌ی استوانه‌ای با ساختار آگزتیک لانه زنبوری درون‌رو را با لوله‌ی استوانه‌ای معمولی و لوله‌ی استوانه‌ای لانه زنبوری معمولی را با روش اجزای محدود مقایسه کردند. همچنین به منظور بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی، لوله‌ی استوانه‌ای با ساختار آگزتیک

لوله‌های مشبک با مقطع مربعی (a) از روابط ۵ تا ۷ و با استفاده از شکل ۲ و ارتفاع آن‌ها از رابطه ۸ استخراج می‌شود:

$$a_{RE} = m \left[l_1 + 2 \left(\frac{t}{\sin \theta} + \frac{t}{2 \tan \theta} \right) \right] + m(l_1 - 2l_2 \cos \theta) + 2R \quad (۵)$$

$$a_{HO} = m[l_2 + 2l_2 \cos \theta] + ml_2 + m(t \times \tan \theta) + 2R \quad (۶)$$

$$a_{SRE} = m \left[\frac{t \times \tan \theta}{2} + \left(\frac{t}{\sin \theta} + \frac{t}{2 \tan \theta} \right) \right] + m(l_2 + l_1) + 2R \quad (۷)$$

$$H = H_{RE} = H_{HO} = H_{SRE} = 2nl_2 \sin \theta + nt + 2h_1 + h_{bs} \quad (۸)$$

که در آن شعاع انحنا ی گوشه لوله و h_{bs} بخشی از ارتفاع سازه مشبک در قسمت پایینی آن است که به منظور قرارگیری در شیار تکیه‌گاهی در نظر گرفته می‌شود. h_1 اندازه دلخواهی در بالای سازه مشبک است تا توزیع نیرو بر روی تمام سلول‌های محیطی بالای آن، یکنواخت باشد. همچنین به دلیل تقارن سازه مشبک، این اندازه در پایین آن نیز در نظر گرفته می‌شود. با فرض مشخصات هندسی یک سلول مشبک و تعداد سلول‌های افقی و عمودی در یک وجه لوله با مقطع مربعی مطابق با جدول ۱، طول و ارتفاع الگوهای مشبک بدست می‌آید. همچنین با توجه به اندازه و مشخصات هندسی (شعاع انحنا و ضخامت) لوله‌های فولادی زنگ نزن 304 موجود در بازار، لوله با مقطع مربعی با ضلع ۸۰ (a) و ضخامت ۲/۸ (d) میلی‌متر انتخاب می‌شود. ارتفاع تمام لوله‌های جدار نازک مشبک ۱۲۳/۸ (H) میلی‌متر بدست می‌آید. مشخصات هندسی لوله‌های جدار نازک مشبک در جدول ۲ مشاهده می‌شود به منظور ایجاد شرایط مرزی گیردار در پایین سازه‌های مشبک و توزیع نیروی یکنواخت در بالای آن‌ها، دو تکیه‌گاه مطابق با شکل ۳ طراحی می‌شوند. برای تکیه‌گاه پایینی عمق شیار ۱۰ میلی‌متر و عرض آن ۲/۸ میلی‌متر و برای تکیه‌گاه بالایی پله‌ی مربعی به طول ۷۴/۴ میلی‌متر و ارتفاع ۳ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در زمان آزمون تجربی، پله‌ی ایجاد شده در تکیه‌گاه بالایی داخل لوله جدار نازک مشبک قرار می‌گیرد. تمامی لوله‌های جدار نازک مشبک و تکیه‌گاه‌های بالا و پایین با نرم‌افزار سالیدورک طراحی می‌شوند.

۲- فرآیند طراحی و ساخت سازه‌های مشبک

شکل‌های ۱-الف و ۱-پ به ترتیب سلول آگزتیک درون‌رو و لانه زنبوری معمولی را نشان می‌دهد. با ترکیب این دو سلول، یک سلول نیمه درون‌رو بدست می‌آید که در شکل ۱-ث مشاهده می‌شود. سلول لانه زنبوری درون‌رو، یک شش ضلعی منتظم در نظر گرفته می‌شود که هر ضلع آن برابر با طول مورب دیواره سلول آگزتیک درون‌رو (l_2) است. در این بخش روند طراحی سازه‌های جدار نازک مشبک با سه ساختار لانه زنبوری معمولی (H_0)، نیمه درون‌رو (SRE) و آگزتیک درون‌رو (RE) ارائه و سپس فرآیند ساخت آن‌ها بیان می‌شود.

۲-۱- طراحی الگوهای مشبک

برای طراحی لوله‌های مشبک ابتدا می‌بایست ابعاد مجموعه‌ای از سلول‌های مشبک را بر حسب پارامترهای هندسی سلول واحد تعیین کرد. سپس اندازه ضلع مقطع لوله‌ی مربعی را می‌توان بر حسب ابعاد شبکه‌ی سلولی و مشخصات هندسی لوله استخراج کرد. در شکل ۱-الف طول و ارتفاع یک سلول آگزتیک درون‌رو بر حسب طول، ضخامت و زاویه دیواره سلول مشاهده می‌شود. به ازای افزایش یک سلول در راستای افقی و عمودی، ابعاد شبکه‌ی سلولی (طول و ارتفاع) مطابق با شکل ۱-ب بدست می‌آید که میزان افزایش طول و ارتفاع آن مطابق با روابطی است که با رنگ قرمز مشخص شده است. لذا به ازای m سلول در راستای افقی، طول شبکه با سلول‌های آگزتیک درون‌رو ($L_{re,m}$) مطابق با رابطه ۱ استخراج می‌شود. به طور مشابه، طول دو شبکه‌ی سلولی دیگر از روابط ۲ و ۳ با توجه به شکل‌های ۱-پ و ۱-ث بدست می‌آید. همچنین به ازای n سلول در راستای عمودی، ارتفاع هر سه شبکه‌ی سلولی از رابطه ۴ استخراج می‌شود:

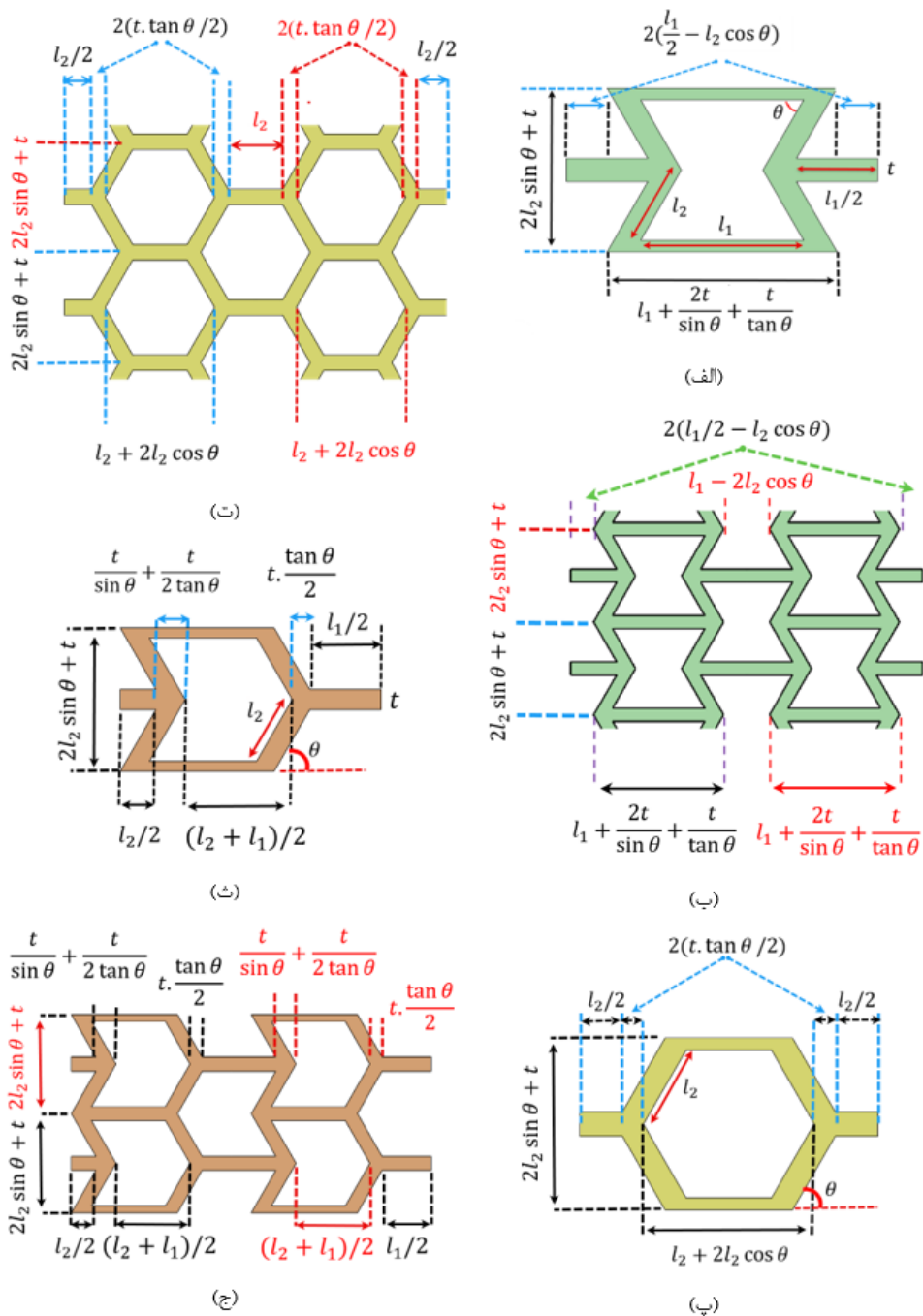
$$L_{re,m} = m \left[l_1 + 2 \left(\frac{t}{\sin \theta} + \frac{t}{2 \tan \theta} \right) \right] + m(l_1 - 2l_2 \cos \theta) \quad (۱)$$

$$L_{ho,m} = m[l_2 + 2l_2 \cos \theta] + ml_2 + m(t \times \tan \theta) \quad (۲)$$

$$L_{sre,m} = m \left[\frac{t \times \tan \theta}{2} + \left(\frac{t}{\sin \theta} + \frac{t}{2 \tan \theta} \right) \right] + m(l_2 + l_1) \quad (۳)$$

$$h_{re,n} = h_{ho,n} = h_{sre,n} = 2nl_2 \sin \theta + nt \quad (۴)$$

که در آن l_1 و l_2 ، t ، θ ، به ترتیب طول افقی، طول مورب، ضخامت و زاویه دیواره سلول می‌باشد. همچنین m و n به ترتیب تعداد سلول افقی و عمودی در هر وجه لوله و L و h به ترتیب طول و ارتفاع شبکه‌ی سلولی است. عرض سطح مقطع



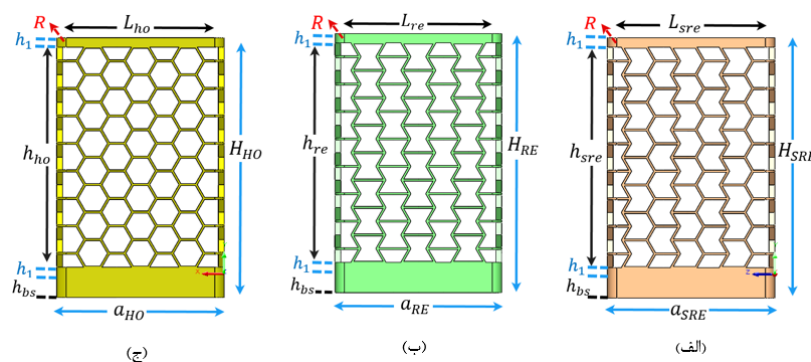
شکل ۱) نمایی از سلول‌های مشبک (الف) یک سلول آگزتیکی درون‌رو، (ب) چهار سلول آگزتیکی درون‌رو، (پ) یک سلول لانه‌زنبوری معمولی، (ت) چهار سلول لانه‌زنبوری معمولی، (ث) یک سلول نیمه درون‌رو و (ج) چهار سلول نیمه درون‌رو

جدول ۱) مشخصات هندسی الگوهای مشبک

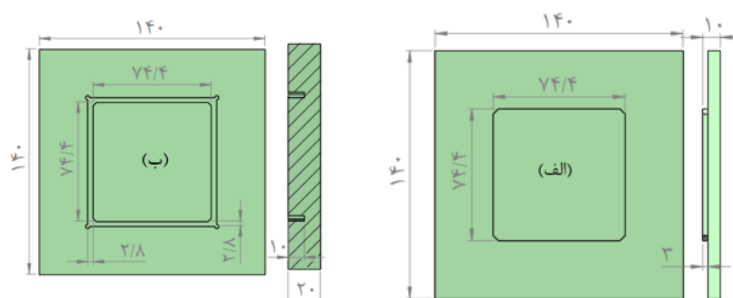
نوع الگوی مشبک	l_1 (mm)	l_2 (mm)	θ (degree)	t (mm)	m	n	h_1 (mm)	h_{bs} (mm)	L (mm)	h (mm)
RE	۱۴	۷	۶۰	۱	۳	۸	۴/۵	۱۰	۷۱/۷	۹۶/۸
SRE	۱۴	۷	۶۰	۱	۳	۸	۴/۵	۱۰	۷۸/۲	۹۶/۸
HO	-	۷	۶۰	۱	۳	۸	۴/۵	۱۰	۷۹/۹	۹۶/۸

جدول ۲) مشخصات هندسی لوله‌های جدار نازک مشبک

H (mm)	a (mm)	d (mm)	R (mm)	لوله جدار نازک مشبک با سلول
۱۲۳/۸	۸۰	۲/۸	۴/۵	RE
۱۲۳/۸	۸۰	۲/۸	۴/۵	SRE
۱۲۳/۸	۸۰	۲/۸	۴/۵	HO



شکل ۲) نمایی از لوله‌های جدار نازک مشبک طراحی شده با سلول، الف) نیمه درون‌رو، ب) آگزتیک و ج) لانه زنبوری معمولی



شکل ۳) تکیه‌گاه‌های طراحی شده برای لوله‌های جدار نازک مشبک، الف) تکیه‌گاه بالا و ب) تکیه‌گاه پایین

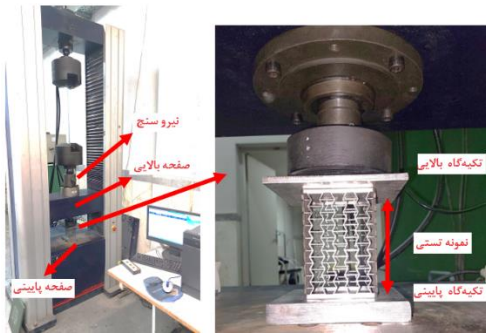
ایجاد می‌شوند. شکل ۴ دستگاه برش لیزر دوار را در زمان ایجاد سلول‌های نیمه درون‌رو روی لوله جدار نازک معمولی نشان می‌دهد. در شکل ۵ سازه‌های مشبک بعد از عملیات براده‌برداری و سمباده زنی مشاهده می‌شوند. شکل ۶ تکیه‌گاه بالا و پایین از جنس فولاد CK45 که با دستگاه فرز CNC تولید شدند، مشاهده می‌شود.

۳- آزمون تجربی بارگذاری شبه-استاتیک

آزمون تجربی برای به دست آوردن نمودار نیرو-جابجایی و بررسی حالت تغییر شکل با دستگاه آزمایش یونیورسال ۳۰۰ کیلو نیوتن در آزمایشگاه مکانیک ضربه‌ای دانشگاه تربیت مدرس انجام می‌شود. هر سه نوع لوله‌های جدار نازک مشبک به اندازه

۲-۲- فرآیند ساخت با برش لیزر دوار

سازه‌هایی با اشکال و الگوهای پیچیده را می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند ماشینکاری تخلیه الکتریکی (Electrical discharge machining) [20]، ساخت افزایشی [21] و برش لیزر [22] تولید کرد. برش لیزری ورق‌های فلزی یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای تولید قطعات است [23]. از جمله مزایای روش برش لیزر نسبت به روش‌های دیگر، ارائه کیفیت و سرعت بالای برش [18] و کاهش زمان و هزینه تولید است [24]. برش لیزریک فرآیند گرمایی است که از انرژی لیزر برای برش استفاده می‌کند. نتایج نشان داده که تاثیر گرمای لیزر بر خواص مکانیکی کم است [18]. سلول‌های مشبک روی لوله جدار نازک معمولی با استفاده از دستگاه برش لیزر دوار با توان ۳ کیلووات و فرکانس ۲۵۰۰ هرتز



شکل ۷) دستگاه آزمایش یونیورسال به همراه نمونه با ساختار آگزتیک درون‌رو

۴- نتایج و بحث

در طراحی جاذب‌های انرژی پارامترهای ذیل تعریف می‌شود که تجزیه و تحلیل نمودار نیرو-جاب‌جایی بر اساس آن‌ها می‌باشد. این پارامترهای ارزیابی در روابط ۹ تا ۱۲ ارائه می‌شوند [18]:

$$EA(x) = \int_0^x F \cdot dx \quad (9)$$

$$SEA(x) = \frac{EA(x)}{m_h} \quad (10)$$

$$MCF = \frac{EA(x)}{x} \quad (11)$$

$$CFE = \frac{MCF}{F_{IPC}} \quad (12)$$

که در آن x ، F ، $EA(x)$ ، $SEA(x)$ ، m_h ، MCF ، F_{mcf} و CFE ، به ترتیب طول لهیدگی، نیرو، جذب انرژی، جذب انرژی ویژه، جرم قسمت مشبک نمونه، نیروی متوسط لهیدگی، نیروی بیشینه‌ی اولیه و راندمان نیروی لهیدگی جاذب انرژی است.

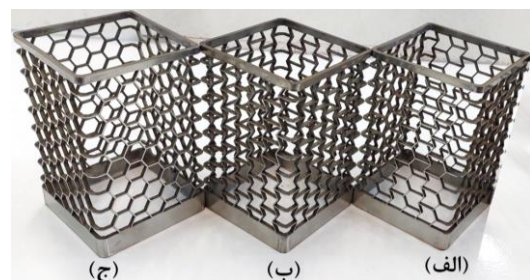
۴-۱- بررسی نحوه‌ی فروریزش لوله‌های مشبک

در شکل ۸ روند فروریزش و تخریب لوله‌های جدار نازک مشبک مشاهده می‌شود. هر لوله جدار نازک در هر وجه دارای ۳ سلول افقی و ۸ سلول عمودی است. سلول‌های نزدیک به تکیه‌گاه پایینی، سلول‌های ردیف اول نامگذاری می‌شوند. در هر لوله جدار نازک هشت ردیف سلولی وجود دارد. لازم به ذکر است که فروریزش هر سه نوع لوله جدار نازک با یکدیگر متفاوت است. در ساختار نیمه درون‌رو با ۱۵ میلی‌متر فشرده‌سازی محوری، در سلول‌های ردیف‌های هفتم و هشتم و برخی از سلول‌های ردیف اول لولای پلاستیک تشکیل می‌شود. تا این مرحله تقریباً می‌توان گفت فروریزش خارج از صفحه برای این ساختار اتفاق نمی‌افتد. مطابق با شکل ۸-پ با افزایش فشرده‌سازی تا ۳۰ میلی‌متر، لولاهای پلاستیک در تمامی ردیف‌های سلولی تشکیل می‌شود و علاوه بر آن تغییر شکل خارج از صفحه نیز رخ می‌دهد.

۷۵ میلی‌متر تحت جابه‌جایی فشاری محوری با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار می‌گیرند. با توجه به طول نمونه‌ها نرخ کرنش بارگذاری 7.3×10^{-4} بر ثانیه بدست می‌آید که کاملاً در محدوده‌ی شبه-استاتیک است. در طول فروریزش نمونه‌ها، صفحه پایینی ثابت و صفحه بالایی دستگاه به سمت پایین حرکت کرده و نیروسنج جایگذاری شده در قسمت بالای صفحه بالایی، مقدار نیروی وارده را ثبت و به کامپیوتر منتقل می‌کند. شکل ۷ تصویر دستگاه آزمایش یونیورسال به همراه نمونه با ساختار آگزتیک درون‌رو را نشان می‌دهد.



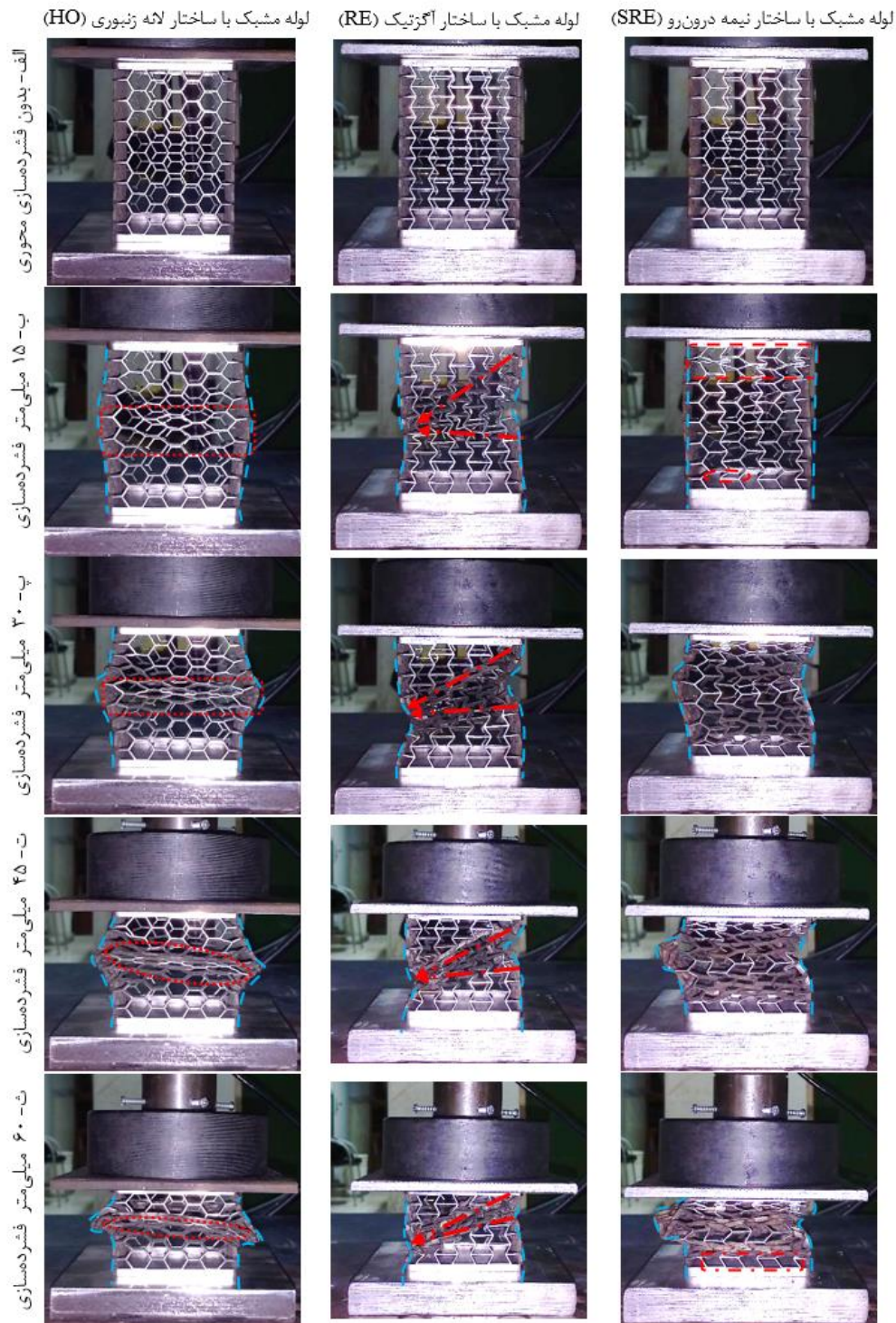
شکل ۴) ایجاد سلول‌های نیمه درون‌رو بر روی لوله جدار نازک معمولی توسط ماشین برش لیزر دوار



شکل ۵) نمایی از لوله‌های جدار نازک مشبک تولید شده از جنس فولاد زنگ نزن 304 با سلول (الف) نیمه درون‌رو، (ب) آگزتیک و (ج) معمولی



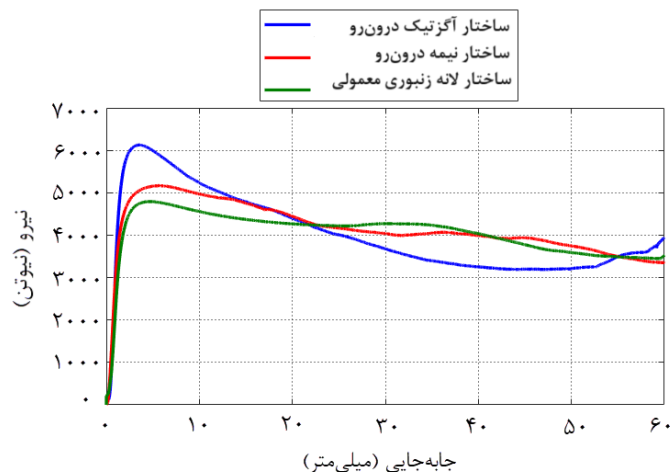
شکل ۶) نمایی از تکیه‌گاه تولید شده برای لوله‌های جدار نازک مشبک، (الف) تکیه‌گاه بالایی و (ب) تکیه‌گاه پایینی



شکل ۸) مقایسه روند فروریزش لوله‌های جدار نازک مشبک

درون رو با ۱۵ میلی‌متر فشردگی محوری، در ناحیه بین دو پیکان قرمز رنگ (نشان داده شده در شکل ۸-ب) لولاهای پلاستیک تشکیل شده و سلول‌های آگزتیک بین این دو پیکان به سمت نوک آن‌ها دچار جمع‌شدگی می‌شوند. همچنین فرورفتگی در دو وجه سمت راست و چپ رخ می‌دهد که سازه، خاصیت آگزتیک خود را به وضوح نشان می‌دهد.

به نحوی که سلول‌های وجه سمت راست دچار فرورفتگی و سلول‌های وجه سمت چپ دچار بیرون‌زدگی نسبت به محور لوله می‌شوند. این روند تا فشردگی ۴۵ میلی‌متر ادامه می‌یابد. از این مرحله، علاوه بر تشکیل لولای پلاستیک و تغییر شکل خارج از صفحه، سلول‌ها در یکدیگر فرو می‌روند. لولای پلاستیک در تمام سلول‌های این ساختار ایجاد می‌شود. در ساختار آگزتیک



شکل ۹) نمودار نیرو-جاب‌جایی برای لوله‌های جدار نازک مشبک تحت بارگذاری شبه-استاتیکی

جدول ۳) نتایج حاصل از بارگذاری شبه-استاتیکی لوله‌های جدار نازک مشبک

راندمان نیروی لهیدگی $CFE\%$	نیروی متوسط لهیدگی $MCF (N)$	نیروی بیشینه اولیه $F_{IPC} (N)$	جذب انرژی ویژه $SEA (J/gr)$	جذب انرژی $EA (J)$	جرم قسمت مشبک نمونه‌ها (m_h) (gr)	لوله جدار نازک مشبک با سلول
۶۶	۴۰۱۸	۶۱۲۶	۲	۲۴۱	۱۲۲	آگزیتیک درون‌رو (RE)
۸۰	۴۱۵۶	۵۱۶۷	۱/۸	۲۴۹	۱۳۷/۸	نیمه درون‌رو (SRE)
۸۵	۴۰۴۹	۴۷۸۹	۱/۶	۲۴۳	۱۵۱/۹	لانه زنبوری (HO)

لولای پلاستیک تشکیل شده و سپس با افزایش فشرده‌سازی، در سلول‌های ردیف دوم، ششم و هفتم نیز لولای پلاستیک تشکیل می‌شود.

۴-۲- پاسخ لهیدگی لوله‌های مشبک

در شکل ۹ نمودار نیرو-جاب‌جایی سه لوله جدار نازک مشبک و در جدول ۳ نتایج حاصل از آن تحت بارگذاری شبه-استاتیکی مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه نمودار نیرو-جاب‌جایی در طول فشرده‌گی ۶۰ میلی‌متر به بعد برای دو نمونه آگزیتیک درون‌رو و لانه زنبوری معمولی، کاملاً روند افزایشی می‌گیرد، نمودار نیرو-جاب‌جایی تا ابتدای ۶۰ میلی‌متر آورده شده است. همچنین در هر سه نمودار، نوسانات نیرویی مشاهده نمی‌شود. با استفاده از روابط ۹ و ۱۱ در ساختار نیمه درون‌رو مقدار EA و MCF به ترتیب ۲۴۹ ژول و ۴۱۵۶ نیوتن بدست می‌آید که نسبت به دو ساختار دیگر بیشتر است. تشکیل لولای پلاستیک در تمام سلول‌های این ساختار می‌تواند دلیل جذب انرژی بیشتر این ساختار نسبت دو ساختار دیگر باشد. در این ساختار مقدار MCF حدود ۳/۵٪ نسبت به ساختار آگزیتیک درون‌رو بیشتر است. مقدار SEA برای لوله‌های جدار نازک با ساختار آگزیتیک درون‌رو، نیمه درون‌رو و لانه زنبوری معمولی به ترتیب برابر با ۱/۸، ۱/۶ و ۱/۶ ژول بر گرم بدست می‌آید. به دلیل وزن سبک‌تر لوله آگزیتیک درون‌رو مقدار SEA در

در این نوع ساختار با افزایش فشرده‌سازی، جمع‌شدگی سلول‌های ما بین دو پیکان بیشتر و فرورفتگی دو وجه سمت راست و چپ این نوع ساختار افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۸-ث تا پایان فشرده‌سازی محوری، در برخی از سلول‌های ردیف اول، دوم و هشتم این ساختار، لولای پلاستیک تشکیل نمی‌شود. مطابق شکل ۸-ب در ساختار لانه زنبوری معمولی با فشرده‌سازی ۱۵ میلی‌متر، بیشتر لولاهای پلاستیک در سلول‌های ردیف سوم تا پنجم تشکیل و این سلول‌ها دچار انبساط متقارن عرضی می‌شوند. به همین دلیل در دو وجه سمت راست و چپ این ساختار بیرون‌زدگی رخ می‌دهد. با افزایش فشرده‌سازی تا ۳۰ میلی‌متر، در سلول‌های ردیف ششم و برخی از سلول‌های ردیف هفتم لولای پلاستیک تشکیل می‌شود. همچنین سلول‌های ردیف سوم تا ششم دچار جمع‌شدگی بیشتر شده و به یکدیگر نزدیک می‌شوند. بیرون‌زدگی دو وجه سمت راست و چپ بیشتر شده و از حالت تقارن خارج می‌شود. با ادامه روند فشرده‌سازی محوری تا ۴۵ میلی‌متر، بیرون‌زدگی غیرمتقارن وجوه سمت راست و چپ نمایان‌تر و در سلول‌های ردیف دوم نیز لولای پلاستیک ایجاد می‌شود. تا پایان فشرده‌سازی محوری، لولای پلاستیک در اکثر سلول‌های ردیف اول و هشتم تشکیل نمی‌شود. در این ساختار ابتدا در سلول‌های ردیف سوم تا پنجم

- ۲- Azimi MB, Asgari M. A new bi-tubular conical-circular structure for improving crushing behavior under axial and oblique impacts. *International journal of mechanical sciences*. 2016 Jan 1;105:253-65.
- 3- 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.
- 4- Chen L, Zhang J, Du B, Zhou H, Liu H, Guo Y, Li W, Fang D. Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load. *Thin-Walled Structures*. 2018 Jun 1;127:333-43.
- 5- Wang Z, Hu H. Auxetic materials and their potential applications in textiles. *Textile Research Journal*. 2014 Sep;84(15):1600-11.
- 6- Lakes R. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*. 1987 Feb 27;235(4792):1038-40.
- 7- Hou X, Deng Z, Zhang K. Dynamic crushing strength analysis of auxetic honeycombs. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2016 Oct;29(5):490-501.
- 8- Zhou Z, Zhou J, Fan H. Plastic analyses of thin-walled steel honeycombs with re-entrant deformation style. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 Mar 14;688:123-33.
- 9- Liu W, Wang N, Luo T, Lin Z. In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure. *Materials & Design*. 2016 Jun 15;100:84-91.
- 10- Hu LL, Zhou MZ, Deng H. Dynamic crushing response of auxetic honeycombs under large deformation: theoretical analysis and numerical simulation. *Thin-Walled Structures*. 2018 Oct 1;131:373-84.
- 11- Najafi M, Ahmadi H, Liaghat GH. Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasi-static Loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2020 Feb 1;20(2).
- 12- Mohsenizadeh S, Alipour R, Rad MS, Nejad AF, Ahmad Z. Crashworthiness assessment of auxetic foam-filled tube under quasi-static axial loading. *Materials & Design*. 2015 Dec 25;88:258-68.
- 13- Olympio K, Gandhi F. Zero- ν cellular honeycomb flexible skins for one-dimensional wing morphing. In 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference 2007 Apr 23 (p. 1735).
- 14- Grima JN, Oliveri L, Attard D, Ellul B, Gatt R, Cicala G, Recca G. Hexagonal honeycombs with zero Poisson's ratios and enhanced stiffness. *Advanced Engineering Materials*. 2010 Sep;12(9):855-62.
- 15- Xu M, Xu Z, Zhang Z, Lei H, Bai Y, Fang D. Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019 Aug 1;159:43-57.
- 16- Lee W, Jeong Y, Yoo J, Huh H, Park SJ, Park SH, Yoon J. Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube. *Composite Structures*. 2019 Jan 15;208:836-46.

آن ۲۵٪ نسبت به ساختار لانه زنبوری معمولی بیشتر است. با استفاده از رابطه ۱۲ راندمان نیروی لهیدگی برای لوله‌های جدار نازک با ساختار آگزتیک درون‌رو، نیمه درون‌رو و لانه زنبوری معمولی به ترتیب برابر با ۷۶٪، ۸۰٪ و ۸۵٪ است که CFE برای ساختار لانه زنبوری معمولی ۲۹٪ نسبت به ساختار آگزتیک درون‌رو بیشتر است.

از آنجایی که فرآیند تشکیل لوله‌های پلاستیک در ساختار لانه زنبوری معمولی به صورت تدریجی رخ می‌دهد، تغییرات نیرویی چندانی برای این ساختار به وجود نمی‌آید. به همین دلیل ساختار لانه زنبوری راندمان نیرویی بالاتری نسبت به دو ساختار دیگر دارد. همچنین نیروی بیشینه اولیه در این ساختار ۴۷۸۹ نیوتن بدست آمد که بین دو ساختار دیگر کمترین مقدار را دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جذب انرژی و مود فروریزش در لوله‌های جدار نازک مشبک مربعی با سه ساختار آگزتیک درون‌رو، نیمه درون‌رو و لانه زنبوری تحت بارگذاری شبه-استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مهم این پژوهش عبارتند از:

- ۱- مقدار SEA در لوله جدار نازک مشبک با ساختار آگزتیک درون‌رو ۲ ژول بر گرم بدست آمد که نسبت به دو ساختار نیمه درون‌رو و لانه زنبوری معمولی به ترتیب ۱۱٪ و ۲۵٪ درصد بیشتر است.
- ۲- در ساختار نیمه درون‌رو مقدار EA و MCF به ترتیب ۴۹ ژول و ۱۵۶ نیوتن بدست آمد که نسبت به دو ساختار دیگر بیشتر است.

۳- مقدار CFE در ساختار لانه زنبوری معمولی ۸۵٪ بدست آمد که نسبت به دو ساختار آگزتیک درون‌رو و نیمه درون‌رو به ترتیب ۲۹٪ و ۷۶٪ بیشتر است.

۴- نیروی بیشینه اولیه در ساختار لانه زنبوری معمولی دارای کمترین مقدار است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان کمال تشکر خود را از داوران محترم بابت نظرات ارزشمند و سازنده آنان اعلام می‌دارند. همچنین از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بابت حمایت‌های مادی و معنوی از این پژوهش قدردانی می‌گردد. **تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت اصول اخلاقی را مد نظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: مطالب این پژوهش هیچ تضاد یا تعارض منافی با فرد یا نهادی ندارد.

منابع مالی: منابع مالی این تحقیق توسط دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تأمین شده است.

منابع

- 1- Lu G, Yu TX. Energy absorption of structures and materials. Elsevier; 2003 Oct 31.

- 17- Guo Y, Zhang J, Chen L, Du B, Liu H, Chen L, Li W, Liu Y. Deformation behaviors and energy absorption of auxetic lattice cylindrical structures under axial crushing load. *Aerospace Science and Technology*. 2020 Mar 1;98:105662.
- 18- Doudaran MO, Ahmadi H, Liaghat G. Crushing performance of auxetic tubes under quasi-static and impact loading. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022 Jun;44(6):230.
- 19- Kim JH, Cho DH, Choi SU, Cho CH, Kim KH. Energy absorption of square tubes with perforations in dynamic axial crush. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2021 Apr;22:567-77.
- 20- Sen R, Paul S. Investigation on wire electrical discharge machining of AISI 304 stainless steel. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;62:1210-4.
- 21- Shi Y, Yan C, Zhou Y, Wu J, Wang Y, Yu S, Ying C. *Materials for additive manufacturing*. Academic Press; 2021 Feb 12.
- 22- Luo HC, Ren X, Zhang Y, Zhang XY, Zhang XG, Luo C, Cheng X, Xie YM. Mechanical properties of foam-filled hexagonal and re-entrant honeycombs under uniaxial compression. *Composite Structures*. 2022 Jan 15;280:114922.
- 23- Patidar D, Rana RS. The effect of CO2 laser cutting parameter on Mechanical & Microstructural characteristics of high strength steel-a review. *Materials Today: Proceedings*. 2018 Jan 1;5(9):17753-62.
- 24- Yu Y, Meng FY, Ding C, Lv JF, He L, Han JQ, Wang C, Zhang K, Xu S, Wu Q. Low-cost laser cutting fabricated all-metallic metamaterial near-field focusing lens. *Heliyon*. 2023 Mar 1;9(3).