

Energy Absorption in Uniform and Functionally Geometrically Graded Auxetic Thin-Walled Tubes: An Experimental and Numerical Study Under Quasi-Static Loading

Mosayeb Najar, Rahmatollah Ghajar^{id*}

Faculty of Mechanical Engineering, *K.N. Toosi University of Technology*, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History

Received: November 08, 2025
Revised: December 27, 2025
Accepted: January 12, 2026
ePublished: April 23, 2026

ABSTRACT

This study aims to experimentally and numerically investigate the energy absorption of square lattice tubes with uniform and functionally geometrically graded distributions of re-entrant auxetic cells. Three stainless steel 304 specimens were fabricated using a rotary laser cutting machine. These specimens included two auxetic tubes with uniform cell distribution and one with a functionally geometrically graded cell distribution. Quasi-static axial compression tests were conducted on the specimens using a 300 kN universal testing machine. Numerical simulations were performed using Abaqus, and the results were validated against experimental data. The influence of cell angle and cell-wall thickness on the energy absorption capacity of uniformly distributed auxetic tubes was evaluated numerically. Additionally, the energy absorption of square auxetic tubes with three types of functionally geometrically graded auxetic cell distributions was investigated using the finite element method. The evaluation parameters for analysis are energy absorption, specific energy absorption, initial peak force, and crushing force efficiency. The functionally geometrically graded distributions of auxetic cells improved the evaluation parameters relative to uniform cell distributions in lattice tubes. Specifically, the optimally performing graded tube (Gt-Re45t1.0t1.6) exhibited 56% higher energy absorption and 65% higher specific energy absorption compared to the best-performing uniform tube (Ut-Re45t1.4t1.4). Furthermore, its crushing force efficiency was 165% higher, while the initial peak force was 41% lower.

Keywords: Auxetic, Specific Energy Absorption, Functionally Geometrically Graded, Uniform Tube.

How to cite this article

Najar, M, Ghajar, R, Energy Absorption in Uniform and Functionally Geometrically Graded Auxetic Thin-Walled Tubes: An Experimental and Numerical Study Under Quasi-Static Loading. *Modares Mechanical Engineering*; 2026;26(06):479-493.

*Corresponding author's email: ghajar@kntu.ac.ir
Corresponding ORCID ID: 0000-0002-3203-733X



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



جذب انرژی در لوله‌های جدار نازک آگزتیک یکنواخت و مدرج تابعی هندسی: مطالعه تجربی و عددی تحت بارگذاری شبه‌استاتیک

مصیب نجار، رحمت الله قاجار*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تجربی و عددی جذب انرژی لوله‌های مربعی مشبک با توزیع یکنواخت و مدرج تابعی هندسی از سلول‌های آگزتیک درون‌رو است. سه نمونه آزمایشگاهی از جنس فولاد ضد زنگ ۳۰۴ با استفاده از دستگاه برش لیزری دوار ساخته شدند. این نمونه‌ها شامل دو لوله آگزتیک با توزیع یکنواخت و یک لوله آگزتیک با توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌ها بود. آزمایش‌های فشار محوری شبه‌استاتیک بر روی آن‌ها با استفاده از دستگاه تست یونیورسال ۳۰۰ کیلو نیوتن صورت گرفت. شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار آباکوس انجام و نتایج حاصل با داده‌های تجربی اعتبارسنجی گردید. تأثیر زوایه سلول و ضخامت دیواره سلول بر ظرفیت جذب انرژی لوله‌های آگزتیک با توزیع یکنواخت سلول با روش عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، جذب انرژی لوله‌های آگزتیک مربعی با سه نوع توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌های آگزتیک، با بهره‌گیری از روش اجزای محدود بررسی شد. پارامترهای ارزیابی برای تحلیل، شامل جذب انرژی، جذب انرژی ویژه، نیروی بیشینه‌ی اولیه و راندمان نیروی لهدگی است. توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌های آگزتیک در مقایسه با توزیع یکنواخت سلول‌ها، منجر به بهبود پارامترهای ارزیابی در لوله‌های مشبک شد. به طور خاص، لوله‌ی مدرج با بهینه‌ترین عملکرد (Gt-Re45t1.0t1.6) در مقایسه با لوله یکنواخت با بهترین عملکرد (Ut-Re45t1.4t1.4)، ۵۶ درصد جذب انرژی بیشتر و ۶۵ درصد جذب انرژی ویژه بیشتر داشت. علاوه بر این، راندمان نیروی لهدگی آن ۱۶۵ درصد بالاتر و نیروی بیشینه‌ی اولیه آن ۴۱ درصد کمتر بود.

کلیدواژه‌ها: آگزتیک، جذب انرژی ویژه، مدرج تابعی هندسی، لوله یکنواخت

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۰۳

نحوه ارجاع به این مقاله

نجار مصیب، قاجار رحمت الله، جذب انرژی در لوله‌های جدار نازک آگزتیک یکنواخت و مدرج تابعی هندسی: مطالعه تجربی و عددی تحت بارگذاری شبه‌استاتیک، مهندسی مکانیک مدرس. ۴۹۳-۴۷۹-۴۷۹(۰۷):۲۶(۰۷):۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghajar@kntu.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0002-3203-733X



۱- مقدمه

علاقه به طراحی جاذب‌های انرژی مشبک جدید با ویژگی‌های سختی، استحکام و سبکی بالا در صنایع خودرو، هوافضا و سایر صنایع افزایش یافته است. در این چارچوب، عملکرد ساختارهای مشبک با بهره‌گیری از رویکردهای گوناگون، از جمله تغییر هندسه یا ترکیب مواد این ساختارها [۱] یا توسعه‌ی معماری‌های نوین الهام‌گرفته از طبیعت [۲] عملکرد ساختارهای مشبک را بهبود بخشند. در کنار این ساختارها، لوله‌های جدار نازک مشبک نیز به‌عنوان جاذب‌های انرژی کارآمد، به دلیل ترکیب مزایای سازه‌های لوله‌ای و معماری‌های مشبک، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات اخیر یافته‌اند. در این راستا، سازه‌های آگرتیک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معماری‌های مشبک غیرمرسوم مورد توجه قرار گرفته‌اند.

سازه‌های مرسوم مشبک تحت بارگذاری کششی یا فشاری محوری، نسبت پواسون مثبت نشان می‌دهند. در مقابل، برای سازه‌های آگرتیک نسبت پواسون منفی (Negative Poisson's Ratio) ثبت شده است. این بدان معنی است که هنگام کشش، عمود بر جهت نیروی اعمالی منبسط و هنگام فشار، عمود بر جهت نیروی اعمالی منقبض می‌شوند [۳]. ایوانز و همکاران [۴] اصطلاح "آگرتیک" را پیشنهاد کردند که امروزه به طور گسترده برای بیان این خاصیت به کار گرفته می‌شود. در سال ۱۹۸۷ برای اولین بار یک ساختار اسفنجی از فوم پلی اورتان با خواص آگرتیک طراحی و ساخته شد [۵]. این ساختار با استفاده از فرآیند فشرده سازی در سه قالب با اندازه‌های مختلف و حرارت‌دهی تولید گردید. تحقیقات گسترده‌ای به تولید ساختارهای آگرتیک مختلف اختصاص یافته است. در این ساختارها، نسبت پواسون منفی باعث ایجاد ویژگی‌های منحصر به فردی مانند مقاومت برشی برجسته [۶]، فرورفتگی (Indentation) متمایز [۷] و افزایش ظرفیت جذب انرژی تحت شرایط بار شبه استاتیکی و ضربه‌ای [۸] شده است. با توجه به این خواص مطلوب ساختارهای آگرتیک، ادغام این ساختارها با لوله‌های مرسوم توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۹-۱۰]. لی و همکاران [۱۱] یک لوله آگرتیک را برای استفاده به عنوان جاذب انرژی در بدنه خودرو بررسی کردند. جذب انرژی لوله‌های استوانه‌ای معمولی، لانه زنبوری و آگرتیک درون‌رو (Re-Entrant Auxetic) به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که لوله‌های آگرتیک و لانه زنبوری نسبت به نمونه معمولی، جذب انرژی ویژه بالاتری را در شرایط ضربه سرعت پایین دارند. وانگ و همکاران [۱۲] یک سیستم سپر جدید متشکل از یک تیر و یک جاذب با نسبت پواسون منفی را ارائه کردند. این سیستم در محافظت از عابر پیاده و مقاومت در برابر تصادف خودرو، عملکرد مطلوبی داشت. نجار و قاجار [۱۳] جذب انرژی در لوله‌های فلزی جدار نازک مشبک با سلول‌های آگرتیک درون‌رو، نیمه-درون‌رو (Re-Entrant-Semi) و لانه زنبوری معمولی (Conventional Honeycomb) را تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی بررسی کردند. در این پژوهش ساختار آگرتیک، جذب انرژی بیشتری نسبت به دوساختار دیگر داشت.

با این حال، هنوز برخی معایب، مانند ناپایداری در فروپاشی وجود دارد که در برخی مطالعات، با اصلاح پیکربندی برطرف شد که منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی ساختارهای آگرتیک گردید. ساختارهای کایرال متقارن محوری (Axisymmetric Chiral Structures) توسط نوک و همکارانش [۱۴] توسعه داده شدند. این ساختارها با استفاده از فناوری تولید افزایشی، تولید و به صورت تجربی تحت بارگذاری فشاری قرار گرفت. نتایج نشان داد که ساختار کایرال متقارن محوری، خواص مکانیکی بهتری نسبت به ساختار معمولی دارد. موده‌های تغییر شکل استوانه‌های مشبک و جذب انرژی آن‌ها توسط گائو و همکاران [۱۵] تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه‌ای با استفاده از روش اجزای مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، چهار نوع پوسته استوانه‌ای مشبک معرفی شد. این پوسته‌ها شامل ساختارهای آگرتیک با ورود مجدد با سلول‌های افقی و عمودی، سلول‌های لانه زنبوری معمولی و سلول‌های سیلیکامپ (SILICOMB) بودند. نتایج نشان داد که پوسته استوانه‌ای سیلیکامپ، هنگام خرد شدن تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت ۶۰ متر بر ثانیه، جذب انرژی ویژه بالاتری نسبت به پوسته استوانه‌ای لانه زنبوری معمولی دارد. نوع جدیدی از ساختار لوله‌ای، با خاصیت آگرتیک در ضخامت دیواره و جهت شعاعی توسط ژانگ و همکاران [۱۶] طراحی و به صورت تجربی بررسی شد. هنگامی که این ساختار تحت فشرده‌سازی (یا کشش) محوری قرار می‌گیرد، قطر بیرونی آن کاهش (افزایش) و قطر داخلی آن افزایش (یا کاهش) می‌یابد. به همین دلیل، برای این ساختار پایداری مناسبی تحت فشار محوری برای مشاهده شد.

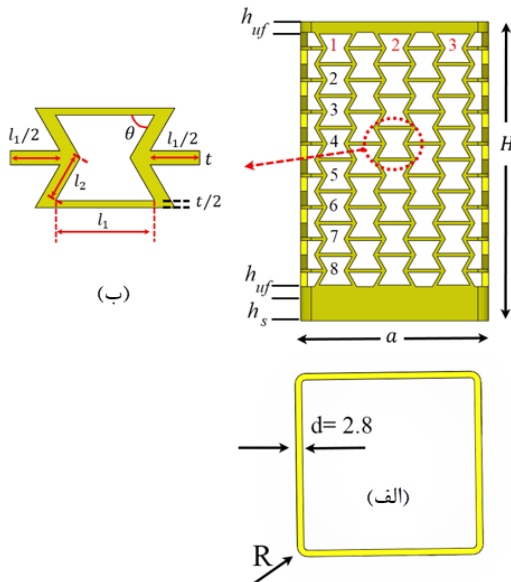
از سوی دیگر، در برخی تحقیقات، از فوم پلی اورتان معمولی و فوم آلومینیوم در داخل سازه‌های آگرتیک جدار نازک برای بهبود پایداری فروپاشی و جذب انرژی استفاده شده است. [۱۷-۱۹]. کمانش لوله‌های آگرتیک استوانه‌ای تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه‌ای توسط دودران و همکاران [۲۰] مورد بررسی قرار گرفت. چهار لوله استوانه‌ای با چهار ساختار آگرتیک درون‌رو، لانه زنبوری، آنتی تترا کایرال (Anti-Tetra Chiral) و نوک پیکانی (Arrowhead) با استفاده از دستگاه برش لیزری دوار ساخته شدند. در حالت شبه‌استاتیکی لوله‌های آگرتیک خالی و پر شده با فوم پلی اورتان، بیشترین مقدار راندمان نیروی لهیدگی را نسبت به سازه لانه زنبوری معمولی ارائه دادند. علاوه بر این، در لوله‌های آگرتیک با هسته فومی، مقدار جذب انرژی ویژه نسبت به سازه لانه زنبوری بیشتر شد. همچنین در ضربه با سرعت پایین، جذب انرژی ویژه، راندمان نیروی لهیدگی و جذب انرژی لوله‌های آگرتیک در مقایسه با سازه لانه زنبوری بیشتر مشاهده شد.

در سال‌های اخیر، به دلیل رفتار مکانیکی خاص سازه‌های آگرتیک، توجه پژوهشگران به بررسی قابلیت جذب انرژی این ساختارها افزایش یافته است. با وجود این، مطالعات انجام شده در زمینه لوله‌های جدار نازک دارای سلول‌های آگرتیک به‌عنوان جاذب انرژی محدود بوده و عمدتاً بر ساختارهایی با توزیع یکنواخت سلول‌ها متمرکز شده‌اند. بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک فلزی با سلول‌های آگرتیک درون‌رو و با توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌ها در راستای طول لوله به‌صورت جامع مورد مطالعه قرار

مشبک در قسمت پایینی آن است که به منظور قرارگیری در شیار تکیه‌گاه پایینی در نظر گرفته می‌شود. همچنین h_{uf} اندازه در نظر گرفته شده در بالای سازه مشبک است تا توزیع نیرو بر روی تمام سلول‌های محیطی بالای آن، یکنواخت باشد. به دلیل تقارن سازه مشبک، این اندازه در پایین آن نیز در نظر گرفته می‌شود. برای تمامی لوله‌های جدار نازک مقادیر $h_s = 10 \text{ mm}$ و $h_{uf} = 4.5 \text{ mm}$ است. برای سلول درون‌رو t, l_1, l_2 و θ به ترتیب ضخامت، طول افقی، طول مورب و زاویه بین دیواره‌های مورب و افقی را نشان می‌دهند. برای بررسی اثرات پارامترهای هندسی بر جذب انرژی ساختارهای آگزتیک، شش لوله آگزتیک طراحی می‌شوند (به جدول ۱ مراجعه شود)، که شامل دو مقدار $1/2$ و $1/4$ میلی‌متر برای ضخامت دیواره سلولی و سه زاویه سلول $60^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ درجه برای هر ضخامت است. برای همه ساختارهای مربعی یکنواخت، تعداد سلول‌های افقی $(m = 3)$ و سلول‌های عمودی $(n = 3)$ می‌باشد. همچنین با انتخاب مقادیر $l_1 = 14 \text{ mm}$ و $l_2 = 7 \text{ mm}$ یک لوله مربعی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با $d = 2.8 \text{ mm}$ و $R = 4.5 \text{ mm}$ انتخاب می‌شود.

۲-۲- طراحی لوله‌های مدرج

با الهام از این مفهوم که طراحی لوله مدرج تابعی هندسی با تغییر اندازه سلول واحد [۲۱-۲۲] حاصل می‌شود، این پژوهش بر تغییر ضخامت دیواره سلولی (t) از یک بخش به بخش دیگر تمرکز دارد، در حالی که سایر ابعاد سلول ثابت می‌ماند. طراحی مفهومی ساختار مدرج در شکل ۲ مشاهده می‌شود. بنابراین، در این مطالعه، با توزیع سلولی مدرج تابعی هندسی، یک گرادینان ضخامت برای لوله‌های آگزتیک ایجاد می‌شود که با تغییر ضخامت دیواره سلولی در امتداد محور طولی از یک ناحیه به ناحیه دیگر طراحی می‌گردد.



شکل ۱ الف-نمایش لوله جدار نازک مشبک یکنواخت از نمای روبرو و بالا، ب-نمایش سلول آگزتیک درون‌رو
Fig. 1 (a) Square uniform auxetic tube from the front view and the top view of the cross-section, (b) re-entrant auxetic cell.

نگرفته است. این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام پژوهشی هدفمند به منظور ارزیابی تأثیر توزیع مدرج سلول‌های آگزتیک بر عملکرد جذب انرژی لوله‌های مشبک را آشکار می‌سازد.

بر این اساس، در این پژوهش رفتار جذب انرژی لوله‌های آگزتیک مربعی با توزیع یکنواخت و مدرج تابعی هندسی سلول‌ها تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، سه نمونه آزمایشگاهی از فولاد ضدزنگ ۳۰۴ توسط دستگاه برش لیزری دوار تولید می‌شود. نتایج عددی شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با داده‌های تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور تحلیل نقش پارامترهای هندسی مؤثر، یک مطالعه پارامتری عددی با تمرکز بر اثر زاویه سلولی ($60^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ درجه) و ضخامت دیواره سلول ($1/2$ و $1/4$ میلی‌متر) بر ظرفیت جذب انرژی لوله‌های آگزتیک با توزیع سلولی یکنواخت انجام می‌پذیرد. علاوه بر این، سه لوله آگزتیک مربعی با سه زاویه سلولی $60^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ درجه و سه نوع توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌ها طراحی می‌گردد. جذب انرژی این سازه‌ها با استفاده از روش اجزای محدود بررسی و به صورت کمی با لوله‌های آگزتیک مربعی با توزیع سلولی یکنواخت مقایسه می‌شوند.

۲- طراحی لوله‌های مشبک مربعی با سلول‌های آگزتیک

به منظور بررسی جذب انرژی در ساختارهای آگزتیک، در این بخش لوله‌های مربعی با توزیع سلولی یکنواخت و مدرج تابعی هندسی طراحی می‌شود. برای اختصار، از این پس در این پژوهش، به جای «لوله» با توزیع یکنواخت سلول آگزتیک «از عبارت «لوله یکنواخت» و به جای «لوله» با توزیع مدرج تابعی هندسی سلول آگزتیک «از عبارت «لوله مدرج» استفاده می‌شود.

۲-۱- طراحی لوله‌های یکنواخت

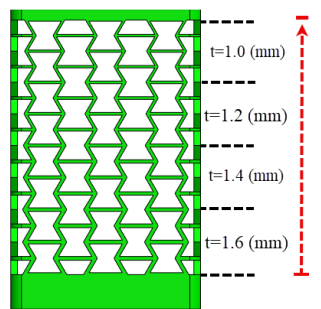
شکل ۱ مشخصات هندسی یک لوله آگزتیک مربعی و یک سلول آگزتیک درون‌رو را نشان می‌دهد. در اینجا، d, a, H, R به ترتیب طول لوله، طول مقطع عرضی، ضخامت دیواره و شعاع گوشه خارجی لوله جدار نازک است. علاوه بر این، اندازه h_s بخشی از ارتفاع سازه

جدول ۱ نام‌های اختصاری و مشخصات هندسی سازه‌های آگزتیک

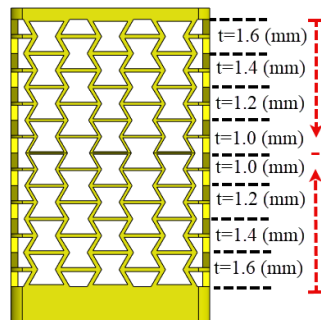
Table 1 Abbreviated names and geometric parameters of auxetic structures

$l_1 = 14 \text{ (mm)}, l_2 = 7 \text{ (mm)}, d = 2.8 \text{ (mm)}, a = 80 \text{ (mm)}, R = 4.5 \text{ (mm)}$					
Abbreviated names of specimens	Mass (g)	H (mm)	Abbreviated names of specimens	Mass (g)	H (mm)
Ut-Re45t1.2t1.2	224	97.8	Gt-Re45t1.6t1.6	241	98.6
Ut-Re45t1.4t1.4	251	99.4	Gt-Re60t1.0t1.6	231	116.2
Ut-Re60t1.2t1.2	216	115.4	Gt-Re60t1.0t1.0	232	116.2
Ut-Re60t1.4t1.4	242	117.0	Gt-Re60t1.6t1.6	232	116.2
Ut-Re75t1.2t1.2	208	126.6	Gt-Re75t1.0t1.6	221	127.4
Ut-Re75t1.4t1.4	232	128.2	Gt-Re75t1.0t1.0	222	127.4
Gt-Re45t1.0t1.6	239	98.6	Gt-Re75t1.6t1.6	222	127.4
Gt-Re45t1.0t1.0	241	98.6			

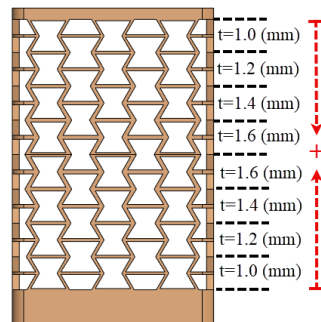
آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام می‌شود. سه نمونه دمبلی شکل از



الف) Gt-Re60t1.0t1.6



ب) Gt-Re60t1.6t1.0

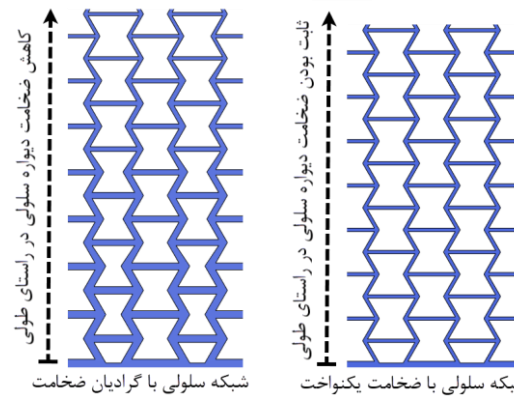


پ) Gt-Re60t1.0t1.6

شکل ۳ لوله‌های مدرج با سه نوع توزیع سلولی و زاویه سلول ۶۰ درجه، الف-لوله مدرج نوع اول، ب-لوله مدرج نوع دوم و پ-لوله مدرج نوع سوم

Fig. 3 Graded tubes with three types of cell distribution and a cell angle of 60 degrees, (a) graded tube first type, (b) graded tube second type, and (c) graded tube third type.

دیواره لوله تهیه و با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال با سرعت ثابت ۲ میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرند. نمونه‌های دمبلی شکل قبل و بعد از آزمایش کشش به ترتیب در شکل ۴-الف و ۴-ب نشان داده شده‌اند. کرنش طولی با یک اکستنسومتر اندازه‌گیری می‌شود. منحنی تنش-کرنش مهندسی (میانگین حاصل از سه آزمایش) در شکل ۵ ارائه می‌شود. خواص به‌دست آمده از فولاد ضد زنگ ۳۰۴ در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲ نمایش شبکه سلولی با گرادیان ضخامت در مقایسه با ضخامت یکنواخت

Fig. 2 Cellular lattice representation with thickness gradient compared to uniform thickness

در شکل ۳ سه نوع لوله مدرج نشان داده شده است. ضخامت دیواره سلولی در نمونه ۳-الف، از پایین به بالا کاهش می‌یابد. در این نمونه هر لوله مربعی به چهار بخش مجزا تقسیم شده است که هر بخش شامل دو ردیف سلولی با ضخامت دیواره سلولی یکسان است. ضخامت دیواره سلولی بین نواحی مجاور ۰/۲ میلی‌متر اختلاف دارد که در این پژوهش مدرج نوع اول نامگذاری می‌شوند. نمونه ۳-ب و ۳-ج به هشت ناحیه مجزا تقسیم می‌شوند که نسبت به وسط لوله جدار نازک تقارن دارند. با این تفاوت که ضخامت دیواره سلولی برای نمونه‌های ۳-ب و ۳-ج از دو سر لوله جدار نازک به سمت وسط آن افزایش (مدرج نوع دوم) و کاهش (مدرج نوع سوم) می‌یابد. گرادیان ضخامت دیواره سلولی برای لوله‌های مدرج به صورتی انتخاب شده است که جرم لوله مدرج طراحی شده معادل میانگین جرم دو لوله یکنواخت با ضخامت‌های ۱/۴ و ۱/۲ میلی‌متر باشد (به جدول ۱ مراجعه شود). هر توزیع سلولی مدرج تابعی هندسی، شامل سه زاویه سلول ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه است که در مجموع نه سازه جدار نازک مشبک مدرج طراحی می‌شود. همچنین برای تمامی لوله‌های مدرج، سایر مشخصات هندسی لوله مشابه با لوله‌های یکنواخت انتخاب می‌شود. جدول ۱ مشخصات هندسی و جرم لوله‌های آگزتیکی طراحی شده را ارائه می‌دهد. نام‌های اختصاری انتخاب شده برای هر نمونه در جدول ۱ ارائه شده است. حروف Gt و Ut به ترتیب بیانگر لوله یکنواخت (Uniform tube) و لوله مدرج (Graded tube) است. حرف RE بیانگر درون‌رو بودن سلول است. عدد دو رقمی اول زاویه سلول را نشان می‌دهد. عدد دوم و سوم به ترتیب مقدار ضخامت دیواره سلولی ردیف اول و هشتم را مشخص می‌کند. تمامی لوله‌های جدار نازک مشبک و تکیه‌گاه‌های بالا و پایین با نرم‌افزار سالی‌دورک طراحی می‌شوند.

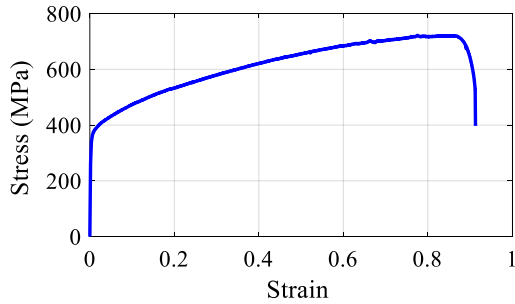
۳- مطالعه تجربی

۳-۱- خواص ماده

برای تعیین خواص مکانیکی لوله مربعی جدار نازک، آزمایش کشش تک محوره مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M-22 [۲۳] در

۳-۲- ساخت لوله‌های مشبک آگرتیک

همانطور که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، هر سه نمونه با استفاده از دستگاه برش لیزر دوار با توان ۳ کیلووات و فرکانس ۲۵۰۰ هرتز ساخته شدند. لوله‌های فلزی آگرتیک مربعی با برش سوراخ‌های شش ضلعی درون‌رو در لوله‌های جدار نازک مربعی شکل تولید می‌شوند. شکل ۶-ب یک لوله مشبک آگرتیک را پس از برش لیزر نشان می‌دهد. بعد از آن، براده‌برداری روی هر سه نمونه انجام و تمام سطوح جانبی نمونه‌ها به ترتیب با کاغذ سنباده با دانه‌بندی ۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ صیقل داده می‌شود. شکل ۷ لوله آگرتیک مدرج نوع اول ساخته شده را پس از عملیات براده‌برداری و صیقل‌کاری به همراه تکیه‌گاه‌های بالا و پایین نشان می‌دهد.



شکل ۵ نمودار تنش- کرنش مهندسی برای فولاد زنگ نزن ۳۰۴
Fig.5 Engineering stress-strain curve for a 304 stainless steel

۴- شبیه‌سازی عددی

۴-۱- مدل‌سازی اجزای محدود

در این بخش، روش اجزای محدود برای بررسی جذب انرژی در ساختارهای آگرتیک معرفی و نتایج عددی با داده‌های تجربی اعتبارسنجی می‌شوند. شبیه‌سازی عددی پانزده ساختار آگرتیک ارائه شده در جدول ۱ با استفاده از حل‌گر اکسپلیسیت در نرم افزار آباکوس (Abaqus/Explicit 2024) انجام می‌شود. یک مدل ماده الاستیک-پلاستیک مستقل از نرخ بارگذاری برای شرایط بارگذاری شبه استاتیکی اتخاذ می‌گردد. برای ناحیه الاستیک، مدول یانگ، نسبت پواسون و چگالی و برای ناحیه پلاستیک از داده‌های تنش- کرنش پلاستیک واقعی به دست آمده از آزمایش‌های کشش استفاده می‌شود.

۴-۱-۱- شرایط مرزی و تعریف تماس

مطابق شکل ۷، سطوح بالا و پایین نمونه‌های مشبک آگرتیک، توسط قید بستن (Tie) به تکیه‌گاه‌های صلب بالا و پایین متصل می‌شود. درجات آزادی تکیه‌گاه پایینی کاملاً بسته شده است (شکل ۸). تکیه‌گاه بالایی فقط در امتداد محور لوله جدار نازک (محور Y) حرکت می‌کند. جابجایی ۷۰ میلی‌متر در نرم افزار به عنوان شرط مرزی جابجایی در نظر گرفته می‌شود. برهمکنش‌ها به صورت تماس عمومی (General contact) و ضریب اصطکاک ۰/۱۵ برای رفتار تماس مماسی [۱۸] منظور می‌گردد. فرمول‌بندی تماس سخت (Hard contact) برای جلوگیری از نفوذ سطوح لوله جدار نازک در تکیه‌گاه‌های بالا و پایین فعال می‌شود.

۴-۱-۲- الگوی مش‌بندی

لوله‌های مشبک آگرتیک و تکیه‌گاه‌های صلب با استفاده از المان‌های آجری خطی ۸ گره‌ای مرتبه اول (C3D8R) تقسیم‌بندی می‌شود. برای رسیدن به جواب‌های همگرا و با دقت مناسب، تحلیل حساسیت مش انجام گردید. برای تعیین الگوی المان‌بندی بهینه، مطابق با شکل ۹ و جدول ۳، پنج حالت مختلف المان‌بندی بررسی می‌شود. مطابق با شکل ۹، N_{I1} و N_{I2} به ترتیب بیان‌گر تعداد المان‌ها در طول دیواره‌ی افقی و عمودی هر سلول آگرتیک است.

۳-۳- آزمایش فشار شبه‌استاتیکی

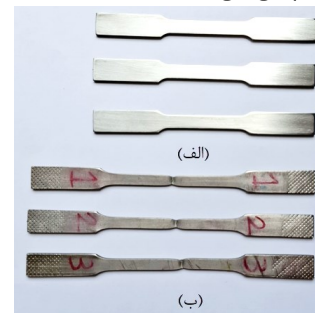
آزمون فشار تک‌محوره‌ی شبه‌استاتیکی، روی هر سه لوله جدار نازک با استفاده از دستگاه آزمایش یونیورسال ۳۰۰ کیلو نیوتن آزمایشگاه مکانیک ضربه‌ی دانشگاه تربیت مدرس انجام می‌شود. همه نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری با سرعت ثابت ۵ میلی‌متر بر دقیقه و تا ۷۰ میلی‌متر فشرده می‌شوند.

جدول ۲ خواص فولاد زنگ نزن ۳۰۴ * مرجع [۲۴]

Table. 2 Properties of 304 stainless steel

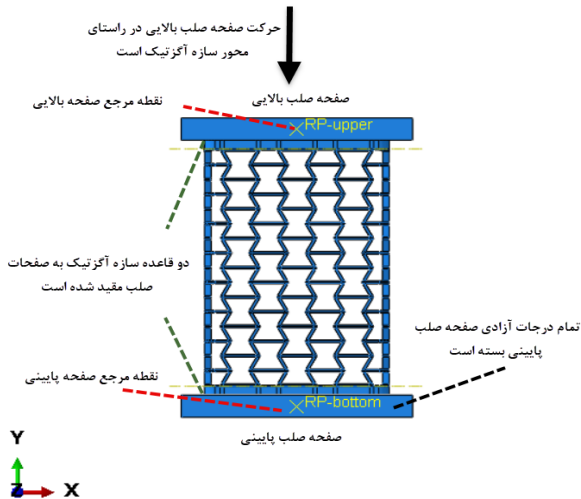
ρ (g/cm ³)	ν^*	E (GPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y	σ_u (MPa)	ϵ_u
8	0.29	193.7	339.4	0.00376	719.1	0.8643

که در آن ρ, E, ν به ترتیب نسبت پواسون، مدول یانگ و چگالی است. $\sigma_u, \epsilon_y, \sigma_y$ به ترتیب تنش تسلیم و کرنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش نهایی می‌باشند.



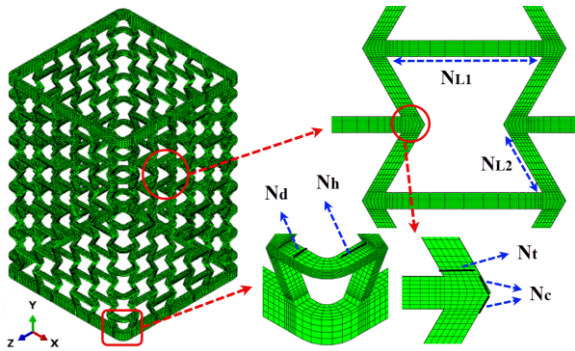
شکل ۴ سه نمونه دمبلی شکل الف- قبل از آزمایش کشش، ب- بعد از آزمایش کشش

Fig. 4 (a) Three dumbbell-shaped specimens before and, (b) after the uniaxial tensile test.



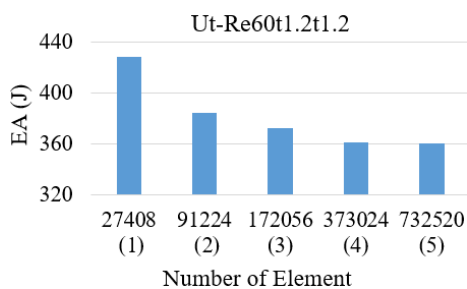
شکل ۸ شرایط مرزی مدل اجزای محدود برای سازه‌ی آگزیٹیک

Fig. 8 FE boundary conditions for auxetic structure.



شکل ۹ الگوی مش‌بندی یک لوله مشبک آگزیٹیک

Fig. 9 The meshing pattern of an auxetic lattice tube



شکل ۱۰ نمودار آنالیز حساسیت انرژی جذب شده بر حسب تعداد المان‌ها برای نمونه‌ی Ut-Re60t1.2t1.2

Fig. 10 Sensitivity analysis of absorbed energy versus the number of elements for the Ut-Re60t1.2t1.2 specimen

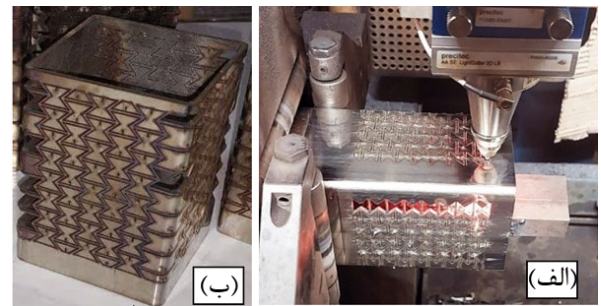
مکان‌های بالقوه ایجاد لولای پلاستیک، مش‌های ریزتر استفاده می‌گردد. این کار با استفاده از ابزارهای نسبت بایاس تک و دوتایی (نسبت بایاس = بزرگترین به کوچکترین اندازه المان در امتداد یک لبه) انجام می‌پذیرد. با فعال کردن گزینه نسبت بایاس دوتایی، مش از وسط لبه به دو طرف دیگر ریزتر می‌شود (N_{I2} , N_{I1}). بایاس

همچنین N_d ، N_t ، N_c ، N_h به ترتیب تعداد المان‌ها در گوشه‌های لوله‌ی جدار نازک، گوشه‌های تیز هر سلول آگزیٹیک، ضخامت لوله‌ی جدار نازک و ضخامت دیواره سلولی را نشان می‌دهد.

جدول ۳ تعداد کل المان‌ها در سازه آگزیٹیک و تکیه‌گاه صلب

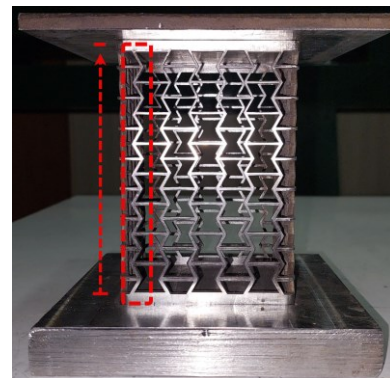
Table 3 Total number of elements in the auxetic structure and support

شماره الگو	تعداد کل المان‌ها	تعداد المان‌ها در هر طول مشخص شده
لوله تکیه‌گاه	بایاس دوتایی	بایاس تک
مقدار ۱۰	مقدار ۵	مقدار ۵
N_d	N_t	N_c
N_h	N_{I2}	N_{I1}
2	1	1
4	2	2
6	3	3
8	4	4
10	5	5
12	6	6
14	7	7
16	8	8
18	9	9
20	10	10
22	11	11
24	12	12
1875	27408	27408
5184	91224	91224
7056	172056	172056
12500	373024	373024
23812	732520	732520



شکل ۶ ساخت نمونه‌ها، الف- برشکاری لوله جدار نازک توسط ماشین لیزر دوار ب- لوله مشبک آگزیٹیک بعد از برشکاری

Fig. 6 Production of the specimens, (a) cutting of a thin-walled tube by a rotary laser machine and (b) an auxetic lattice tube after cutting

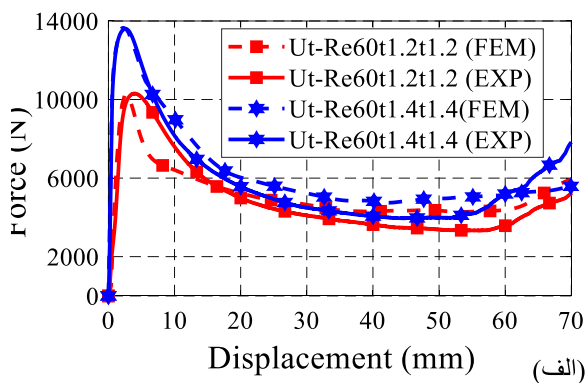


شکل ۷ لوله مدرج Gt-Re60t1.0t1.6 بعد از عملیات برداره‌برداری و پولیش به همراه دو تکیه‌گاه بالا و پایین

Fig. 7 The Gt-Re60t1.0t1.6 graded tube, after the chipping and polishing operations, with two upper and lower supports.

شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ منحنی‌های نیرو-جابجایی و تغییر شکل سازه‌های آگزتیک بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و تجربی را نشان می‌دهند. جدول ۴ مقایسه کمی پارامترهای ارزیابی جذب انرژی را ارائه می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی عددی منحنی‌های نیرو-جابجایی سه جذب انرژی، به‌ویژه نیروهای بیشینه اولیه را با دقت بالا پیش‌بینی می‌کند. به همین دلیل، برای همه آن‌ها، خطای محاسباتی در پارامترهای EA، SEA و CFE در مقایسه با آزمایش‌های تجربی کمتر از ۷ درصد است. شکل ۱۲ مدل اجزای محدود فروپاشی نهایی دو لوله یکنواخت Ut-Re60t1.2t1.2 و Ut-Re60t1.4t1.4 را از نمای بالا در مقایسه با تجربی نشان می‌دهد. به دلیل ناپایداری در فروپاشی (کمانش جانبی) در طول فشرده‌سازی محوری، چین‌خوردگی نامنتزانی در آنها ایجاد می‌شود. حالت فروپاشی نمونه Gt-Re60t1.0t1.6 (نمای جلو/بالا) در طول فشرده‌گی محوری در مقایسه با نتایج تجربی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در لوله مدرج نوع اول، ضخامت از بالا به پایین لوله‌ی آگزتیک افزایش می‌یابد. به همین دلیل از ناپایداری در هنگام فروپاشی جلوگیری می‌شود. از طرفی، در این لوله جدار نازک دو چین‌خوردگی متوالی ایجاد می‌شود. اولین چین‌خوردگی به صورت متقارن و به سمت داخل (تا فشرده‌گی ۳۰ میلی‌متر) و دومین چین‌خوردگی نامنتزانی و به سمت خارج است.

نیروی محوری در طول شروع چین‌خوردگی دوم کاهش می‌یابد، اما پس از آن، به دلیل تراکم سلول و اندرکنش بین آن‌ها افزایش می‌یابد. این مکانیزم فروپاشی بهتر منجر به مقادیر EA، SEA و CFE بالاتر نسبت به دو لوله‌ی یکنواخت دیگر می‌شود. همبستگی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی مطابق با جدول ۴ و شکل-های ۱۱ تا ۱۳ بیانگر دقت مناسب شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی رفتار فروریزش و نمودار نیرو-جابجایی است.



(الف)

تک، مش را از یک سمت لبه به سمت دیگر ریزتر می‌نماید (N_h). در سایر طول‌ها که از نسبت بایاس استفاده نمی‌شود، سایز المان‌ها با یکدیگر برابر است. شکل ۱۰ نمودار انرژی جذب شده بر حسب تعداد المان را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، الگوی مش‌بندی چهارم انتخاب گردید. مطابق این الگو، تعداد کل المان‌ها در نمونه‌های یکنواخت ۳۷۳۰۲۴، برای نمونه‌های مدرج ۳۷۹۴۵۶ و برای هر تکیه‌گاه صلب ۱۲۵۰۰ المان بدست می‌آید.

۲-۴- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی اعتبارسنجی می‌شود. ابتدا پارامترهای ارزیابی جذب انرژی تعریف می‌شوند. جذب انرژی (EA) که برابر با مساحت زیر منحنی بار-جابجایی [۲۵] است، از معادله (۱) محاسبه می‌گردد:

$$EA = \int_0^{\Delta Y} F(x) dx \quad (1)$$

که در آن ΔY و F به ترتیب طول لهیدگی (crushing length) و نیروی لهیدگی هستند. نیروی لهیدگی متوسط (F_{mean}) با معادله (۲) بیان می‌شود [۲۵]:

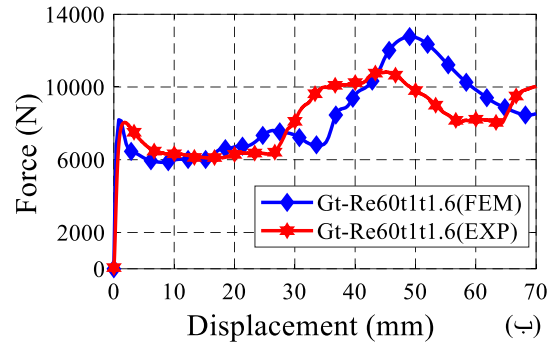
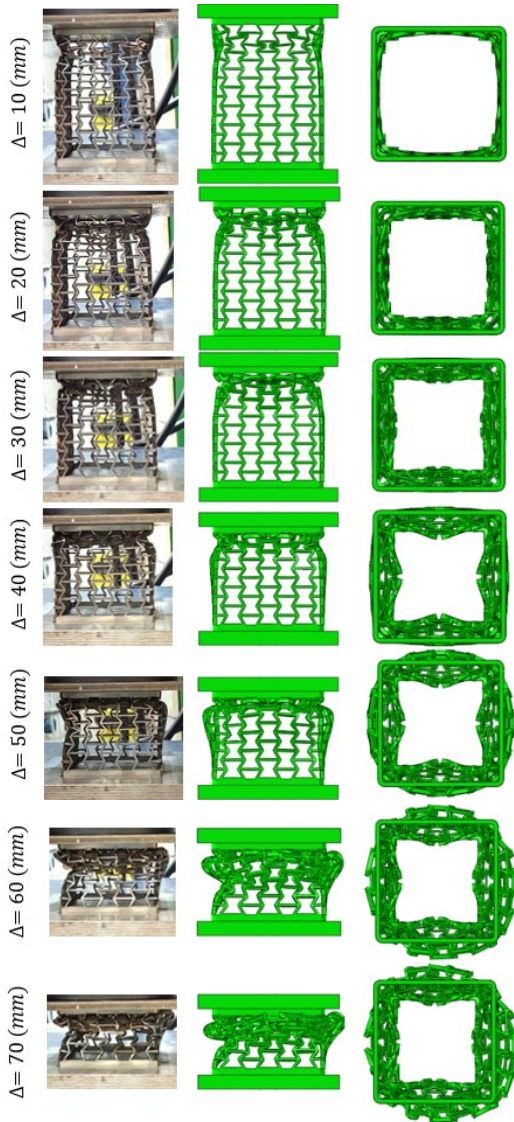
$$F_{mean} = EA/\Delta Y \quad (2)$$

یکی دیگر از پارامترهای ارزیابی، جذب انرژی ویژه (SEA) است. این کمیت از تقسیم انرژی جذب شده بر جرم سازه (M) بدست می‌آید. پارامتر دیگر راندمان نیروی لهیدگی (CFE) است [۲۶]. این پارامتر که اثربخشی جذب انرژی سازه را کمی می‌کند بدون بعد است و به دو صورت تعریف می‌شود: ۱- نسبت نیروی لهیدگی متوسط به نیروی بیشینه مطلق (F_{mean}/F_{app}) [۱۷]، ۲- نسبت نیروی لهیدگی متوسط به نیروی بیشینه اولیه (F_{mean}/F_{ipf}) [۲۶-۲۵].

انتخاب بین این تعاریف به اهداف تحقیق بستگی دارد. تعریف اول برای ارزیابی کلی جذب انرژی مناسب است. تعریف دوم هنگام ارزیابی شدت ضربه اولیه و کاهش اثرات نیروی اولیه بالا به ویژه زمانی که جاذب انرژی برای ایمنی مسافران استفاده می‌شود، کاربرد دارد. چراکه در آن جهش نیروی اولیه با وجود مقادیر بالای نیروی میانگین، خطرات قابل توجهی را می‌تواند برای جان مسافران ایجاد نماید [۲۵-۲۶]. از نظر تحلیلی، مطابق تعریف اول، مقدار پارامتر CFE همواره کمتر از یک است در حالی که مطابق تعریف دوم اگر نیروی متوسط از نیروی بیشینه‌ی اولیه بیشتر باشد مقدار پارامتر CFE بزرگتر از یک بدست می‌آید [۲۶-۲۷]. هدف اصلی این مطالعه طراحی جاذب‌های انرژی با مقادیر بالای SEA و CFE و مقدار پایین F_{ipf} می‌باشد. در این مطالعه از تعریف دوم استفاده می‌شود. این پارامترها در معادلات (۳) و (۴) نشان داده شده است [۲۵]:

$$SEA = EA/M \quad (3)$$

$$CFE = F_{mean}/F_{ipf} \quad (4)$$



شکل ۱۱ مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی تجربی و عددی لوله‌های آگرتیک تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیک (الف) لوله‌های یکنواخت و (ب) لوله مدرج

Fig. 11 Comparison of experimental and numerical force-displacement curves of auxetic tubes under quasi-static axial loading (a) uniform tubes and (b) graded tubes

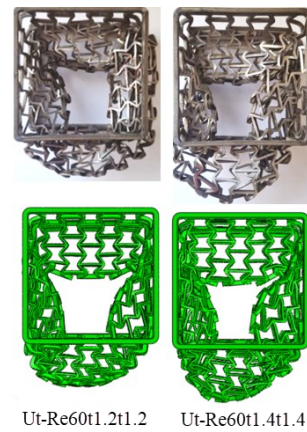
شکل ۱۳ مقایسه‌ی حالت فروپاشی نمونه‌ی Gt-Re60t1.0t1.6 بین نتایج تجربی (تصاویر سمت چپ) و عددی (تصاویر سمت راست) تا ۷۰ میلی‌متر فشردگی محوری

Fig. 13 Comparison of the collapse mode of the Gt-Re60t1.0t1.6 specimen between experimental results (left images) and numerical results (right images) up to 70 mm under axial compactness.

۵- مطالعه پارامتری

۵-۱- پاسخ لهیدگی لوله‌های مشبک

در شکل ۱۴ نمودارهای نیرو-جابجایی و در جدول ۵ نتایج استخراج شده از این نمودارها نشان داده شده است. با کاهش زاویه سلول از ۷۵ به ۴۵ درجه، در لوله‌های یکنواخت و لوله‌های مدرج، نیروی بیشینه‌ی اولیه کاهش می‌یابد. از طرفی در زاویه سلولی یکسان، این نیرو در هر سه نوع سازه آگرتیک مدرج از میانگین نیروی بیشینه اولیه در لوله‌های یکنواخت متناظر آن‌ها کمتر است. همچنین در لوله‌های مدرج نوع دوم، مقدار F_{ipf} نسبت به دو نوع لوله مدرج دیگر در تمامی زوایا بیشتر است. برای نمونه‌های یکنواخت به ازای زوایای سلولی ۶۰ و ۷۵ درجه، نیروی بیشینه‌ی



شکل ۱۲ مقایسه تغییر شکل نهایی تجربی (تصاویر بالا) و عددی (تصاویر پایین) لوله‌های یکنواخت از نمای بالا

Fig. 12 Comparison of experimental (upper images) and numerical (lower images) of the final deformation in the uniform tubes from the top view

جدول ۴ مقایسه نتایج تجربی و عددی سازه‌های آگرتیک تحت بارگذاری محوری شبه استاتیک

Table. 4 Comparison of experimental and numerical results of auxetic structures under quasi-static axial loading

Specimen	Model	EA (J)	SEA (J/g)	F_{mean} (N)	F_{ipf} (N)	CFE %
Ut-Re60t1.2t1.2	FEM	360.6	1.7	5152	10250	50.2
	EXP	338.8	1.6	4840	10300	47.0
	Error (%)		6.4		0.5	6.8
Ut-Re60t1.4t1.4	FEM	440.3	1.9	6289	13657	46.0
	EXP	412.4	1.8	5891	13602	43.3
	Error (%)		6.8		0.4	6.2
Gt-Re60t1.0t1.6	FEM	591.3	2.6	8448	8199	103.0
	EXP	572.6	2.5	8180	8052	101.6
	Error (%)		3.2		1.8	1.4

در لوله‌های یکنواخت با کاهش زاویه سلول از ۷۵ به ۴۵ درجه، در ضخامت دیواره سلول یکسان، تمامی پارامترهای ارزیابی از جمله جذب انرژی ویژه بهبود می‌یابند. کاهش زاویه سلول موجب می‌شود، پایداری سازه در برابر بار لهیدگی بیشتر شود. بنابراین نیروی لهیدگی بیشتر صرف ایجاد لولای پلاستیک می‌گردد. انرژی جذب شده توسط لولای پلاستیک، بیشتر از انرژی مورد نیاز تغییر شکل خارج از صفحه هر وجه می‌باشد. با مقایسه شکل‌های ۱۲ و ۱۵ مشخص می‌شود که با کاهش زاویه سلول آگزتیک از ۷۵ به ۴۵ درجه لولای پلاستیک بیشتری ایجاد می‌گردد. بنابراین با کاهش زاویه سلول، پارامترهای ارزیابی بهبود می‌یابد. همچنین در این جاذب‌های انرژی یکنواخت، با افزایش ضخامت دیواره سلول مقادیر پارامترهای EA، SEA، F_{mean} افزایش ولی پارامتر CFE روند کاهشی دارد. بنابراین در لوله‌های یکنواخت، نمونه‌ی Ut-Re45t1.4t1.4 بهترین جاذب انرژی است که مقادیر پارامترهای EA، SEA، F_{mean} ، F_{ipf} و CFE آن به ترتیب ۵۰۶/۵ ژول، ۲ ژول بر گرم، ۷۲۳۶ نیوتن، ۱۰۱۳۰ نیوتن و ۷۱/۴ درصد است.

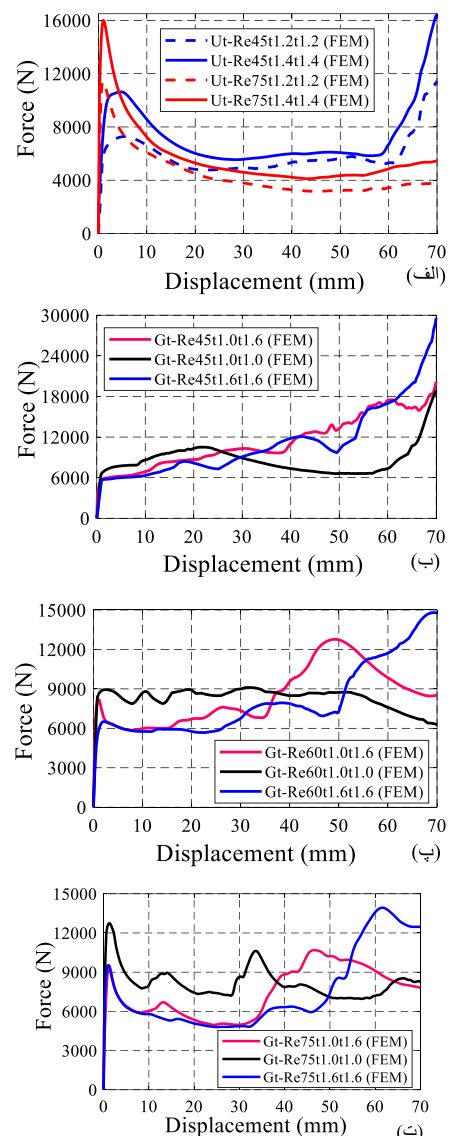
در لوله‌های مدرج با کاهش زاویه سلول از ۷۵ به ۴۵ درجه، در توزیع مدرج سلولی مشابه، مقادیر EA، F_{mean} و CFE افزایش و مقدار F_{ipf} کاهش می‌یابد. همچنین در بین سه نوع توزیع مدرج تابعی هندسی سلولی (در زاویه سلول مشابه)، لوله‌های مدرج نوع اول، از دیدگاه پارامترهای ارزیابی معمولاً شرایط مناسب‌تری نسبت به دو نوع دیگر دارد. به‌نحویکه جذب انرژی و جذب انرژی ویژه آن نسبت به دو نوع دیگر بیشتر است و یا راندمان نیروی لهیدگی آن و یا تمامی پارامترهای ارزیابی آن بیشتر است. نمونه‌ی Gt-Re45t1.0t1.6، بهترین جاذب انرژی، در میان لوله‌های مدرج طراحی شده است. در این سازه‌ی آگزتیک مدرج، مقادیر پارامترهای EA، SEA، F_{mean} ، F_{ipf} و CFE به ترتیب برابر با ۷۹۰/۷ ژول، ۳/۳ ژول بر گرم، ۱۱۲۹۶ نیوتن، ۵۹۶۲ نیوتن و ۱۸۹/۴ درصد می‌باشد.

جدول ۵ نتایج عددی لوله‌های یکنواخت و مدرج.

Table. 5 The FEM results of uniform and graded auxetic tubes

Specimen	EA (J)	SEA (J/g)	F_{mean} (N)	F_{ipf} (N)	F_{apf} (N)	CFE %
Ut-Re45t1.2t1.2	410.2	1.8	5861	6660	11415	85.3
Ut-Re45t1.4t1.4	506.5	2.0	7236	10130	16450	71.4
Ut-Re60t1.2t1.2	360.1	1.7	5152	10250	10250	50.2
Ut-Re60t1.4t1.4	440.3	1.8	6289	13657	13657	46.0
Ut-Re75t1.2t1.2	308.5	1.5	4408	11402	11402	38.6
Ut-Re75t1.4t1.4	397.3	1.7	5676	16007	16007	35.4
Gt-Re45t1.0t1.6	790.7	3.3	11296	5962	20302	189.4
Gt-Re45t1.0t1.0	600.9	2.5	8585	6657	18903	129.0
Gt-Re45t1.6t1.6	777.3	3.2	11104	5962	29599	186.2
Gt-Re60t1.0t1.6	591.2	2.6	8445	8199	12772	103.0
Gt-Re60t1.0t1.0	580.5	2.5	8293	8940	9104	92.7
Gt-Re60t1.6t1.6	565.7	2.4	8081	6514	14801	124.0
Gt-Re75t1.0t1.6	522.8	2.4	7469	9517	10682	78.4
Gt-Re75t1.0t1.0	571.4	2.6	8163	12743	12743	64.1
Gt-Re75t1.6t1.6	526.0	2.4	7513	9517	13933	78.9

اولیه همان نیروی بیشینه مطلق می‌باشد که با توجه به معیارهای ارائه شده در بخش ۴-۲، برای یک جاذب انرژی مطلوب نیست. اما در نمونه‌های مدرج به جزء نمونه Gt-Re75t1.0t1.0 نیروی بیشینه اولیه از نیروی بیشینه مطلق کمتر است (جدول ۵). بنابراین می‌توان گفت توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌های آگزتیک در لوله‌های مدرج باعث کاهش قابل ملاحظه‌ی نیروی بیشینه اولیه نسبت به لوله‌های یکنواخت می‌شود. در بین این پانزده جاذب انرژی دو نمونه‌ی Gt-Re45t1.6t1.6 و Gt-Re45t1.0t1.6 کمترین نیروی بیشینه‌ی اولیه را با مقدار ۵۹۶۲ نیوتن دارند. بالاترین نیروی بیشینه‌ی اولیه با مقدار ۱۶۰۰۷ نیوتن مربوط به نمونه‌ی یکنواخت Ut-Re75t1.4t1.4 است.

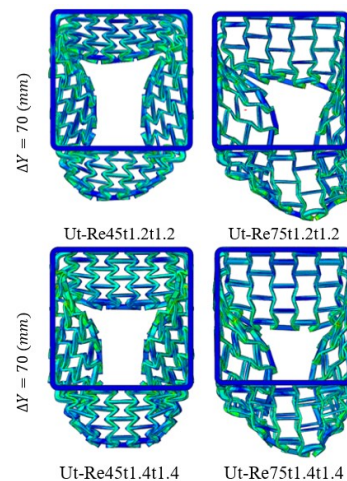


شکل ۱۴ مقایسه منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی لوله‌های آگزتیک الف- لوله‌های یکنواخت با $\theta = 45^\circ$ و $\theta = 75^\circ$ ، ب- لوله‌های مدرج با $\theta = 45^\circ$ ، پ- لوله‌های مدرج با $\theta = 60^\circ$ و ت- لوله‌های مدرج با $\theta = 75^\circ$

خوردگی داخلی و سپس خارجی ایجاد می‌شود. در دو سازه آگزتیک $Gt-Re45t1.0t1.6$ و $Gt-Re75t1.0t1.6$ هر دو چین خوردگی داخلی و بیرونی متقارن است اما در نمونه‌ی $Gt-Re60t1.0t1.6$ چین خوردگی داخلی متقارن، اما چین خوردگی بیرونی نامتقارن است. با تکمیل چین خوردگی دوم در هر سه سازه آگزتیک، نیروی محوری شروع به کاهش می‌نماید.

در دو نمونه مدرج نوع دوم ($Re45t1.0t1.0$ و $Gt-Re60t1.0t1.0$) الگوی تغییر شکل، مشابه یکدیگر است. اما الگوی تغییر شکل در نمونه‌ی $Gt-Re75t1.0t1.0$ کمی متفاوت است (شکل ۱۶). در این سه لوله‌ی مدرج، توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌ها به صورتی است که ضخامت دیوار سلول از دو سر لوله به سمت مرکز آن افزایش می‌یابد. بنابراین مطابق انتظار ابتدا سلول‌های دو سر سازه‌ها دچار فروریزش می‌شوند. برای سازه‌های آگزتیک با زوایای سلولی ۴۵ و ۶۰ درجه از هر دو سر لوله‌های مدرج تشکیل لولای پلاستیک و فروریزش در سلول‌ها رخ می‌دهد اما برای زاویه ۷۵ درجه فروریزش از سلوهای ردیف هشتم (تکیه‌گاه پایین) شروع می‌شود. با ادامه فشردگی محوری لوله‌های مدرج با زاویه سلولی ۴۵ و ۶۰ درجه دچار یک چین خوردگی می‌شوند. به نحویکه که سلول‌ها آگزتیک در دو وجه کناری آن‌ها به سمت داخل و دو وجه دیگر به سمت بیرون دچار کمانش می‌شوند. اما در زاویه ۷۵ درجه دو چین-خوردگی ایجاد می‌شود. ابتدا چین خوردگی به سمت داخل لوله‌ی جدار نازک و سپس با ادامه فشردگی چین خوردگی به سمت بیرون آن ایجاد می‌شود. به دلیل وجود این چین خوردگی‌ها نیروی محوری کاهش می‌یابد اما در سازه آگزتیک با زاویه ۴۵ درجه به دلیل فشردگی بیش از حد سلول‌ها به یکدیگر و اندرکنش بین آن‌ها در انتهای فشردگی محوری، نیروی محوری افزایش می‌یابد.

الگوی فروریزش محوری هر سه نمونه مدرج نوع سوم ($Gt-Re45t1.6t1.6$ ، $Gt-Re60t1.6t1.6$ و $Gt-Re75t1.6t1.6$) مشابه یکدیگر است (شکل ۱۶). ضخامت دیواره‌ی سلول از وسط هر سه لوله‌ی مدرج به سمت دو سر آن افزایش می‌یابد. بنابراین ابتدا در سلول‌های آگزتیک وسط این سازه‌های آگزتیک، کمانش محلی و لولاهای پلاستیک ایجاد می‌شود. با افزایش لهیدگی محوری، فروریزش سلول‌ها، از ناحیه وسط به دو سر لوله‌های مدرج گسترش می‌یابد. از طرفی یک چین خوردگی به سمت داخل لوله‌ی جدار نازک ایجاد می‌شود و تا انتها این چین خوردگی باقی می‌ماند. در ادامه با افزایش فشردگی محوری و وجود این چین خوردگی، فشردگی و اندرکنش سلول‌های آگزتیک به یکدیگر بیشتر می‌شود. بنابراین در انتهای فشردگی محوری در هر سه سازه آگزتیک، نیروی محوری افزایش می‌یابد. به نحویکه نیروی بیشینه مطلق لوله‌های مدرج نوع سوم، به علت فشردگی سلول‌ها به یکدیگر در انتهای فشردگی محوری، نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. نکته قابل توجه در مورد آن‌ها این است که در تمام طول فشردگی محوری،



شکل ۱۵ مقایسه حالت‌های تغییر شکل نهایی لوله‌های مربعی یکنواخت در لهیدگی محوری ۷۰ میلی‌متر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود

Fig. 15 Comparison of the final deformation modes of uniform square tubes under 70 mm axial crushing using FE simulation

۵-۲- بررسی نحوه‌ی فروریزش لوله‌های مشبک

حالت فروپاشی نهایی لوله‌های یکنواخت برای زوایای سلول ۴۵ و ۷۵ درجه و ضخامت دیواره سلول ۱/۲ و ۱/۴ میلی‌متر مشابه با حالت فروپاشی نهایی لوله‌های $Ut-Re60t1.2t1.2$ و $Ut-Re60t1.4t1.4$ می‌باشد. برای این چهار لوله‌ی یکنواخت فروپاشی نهایی از نمای بالا در شکل ۱۵ نشان داده شده است. به دلیل ناپایداری در فروپاشی (کمانش جانبی) در طول فشردگی محوری، چین خوردگی نامتقارنی در آنها ایجاد می‌شود.

برای لوله‌های مدرج به صورت کلی سه نوع الگوی فروریزش در نه سازه‌ی آگزتیک مشاهده می‌شود (شکل ۱۶) که در توزیع مدرج تابعی سلولی یکسان (گرادیان ضخامت یکسان)، الگوی فروریزش در زوایای مختلف تقریباً مشابه یکدیگر است. در هر سه سازه‌ی آگزتیک مدرج نوع اول ($Gt-Re45t1.0t1.6$ ، $Gt-Re60t1.0t1.6$ و $Gt-Re75t1.0t1.6$) تقریباً الگوی فروریزش مشابه دارند که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌ها در این سه لوله‌ی مدرج به صورتی است که ضخامت دیواره سلول از بالا به پایین افزایش می‌یابد. بنابراین ابتدا در سلول‌های ردیف اول لولای پلاستیک ایجاد و این سلول‌ها دچار فروریزش می‌شوند. با افزایش فشردگی محوری، تشکیل لولاهای پلاستیک و فروریزش به سلول‌های ردیف‌های پایین‌تر گسترش می‌یابد. در طول فشردگی محوری، منحنی نیرو دچار نوسانات نامنظم می‌شود. این نوسانات در زوایای مختلف، متفاوت است. اما در هر سه زاویه در زمان تغییر ضخامت دیواره سلول از مقدار کمتر به مقدار بیشتر، نیرو همواره افزایش می‌یابد. در هر سه سازه آگزتیک دو چین خوردگی، یکی در داخل و دیگری در بیرون سازه آگزتیک ایجاد می‌شود. ابتدا چین

این سه لوله‌ی مدرج رفتار آگزتیک از خود نشان می‌دهند و برای همین در تمام طول فشردگی برای آن‌ها نسبت پواسون منفی است.

۶- نتیجه‌گیری

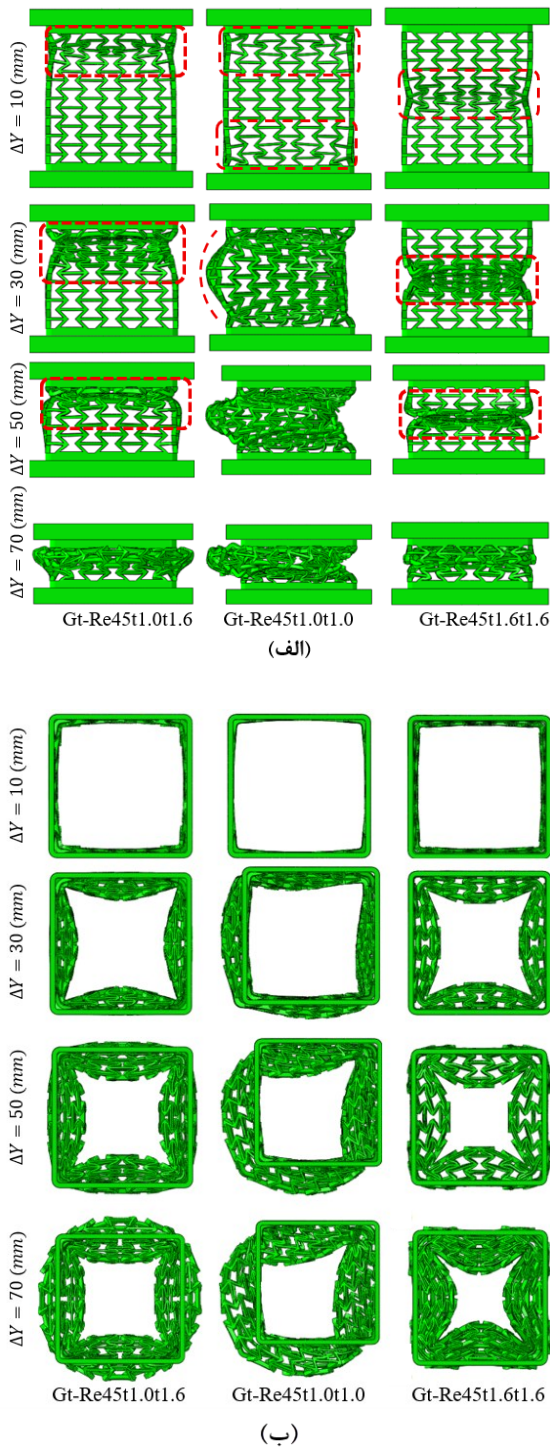
در این پژوهش جذب انرژی و نحوه‌ی فروریزش لوله‌های جدار نازک مشبک مربعی با توزیع مدرج تابعی هندسی و یکنواخت تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مهم این پژوهش عبارتند از:

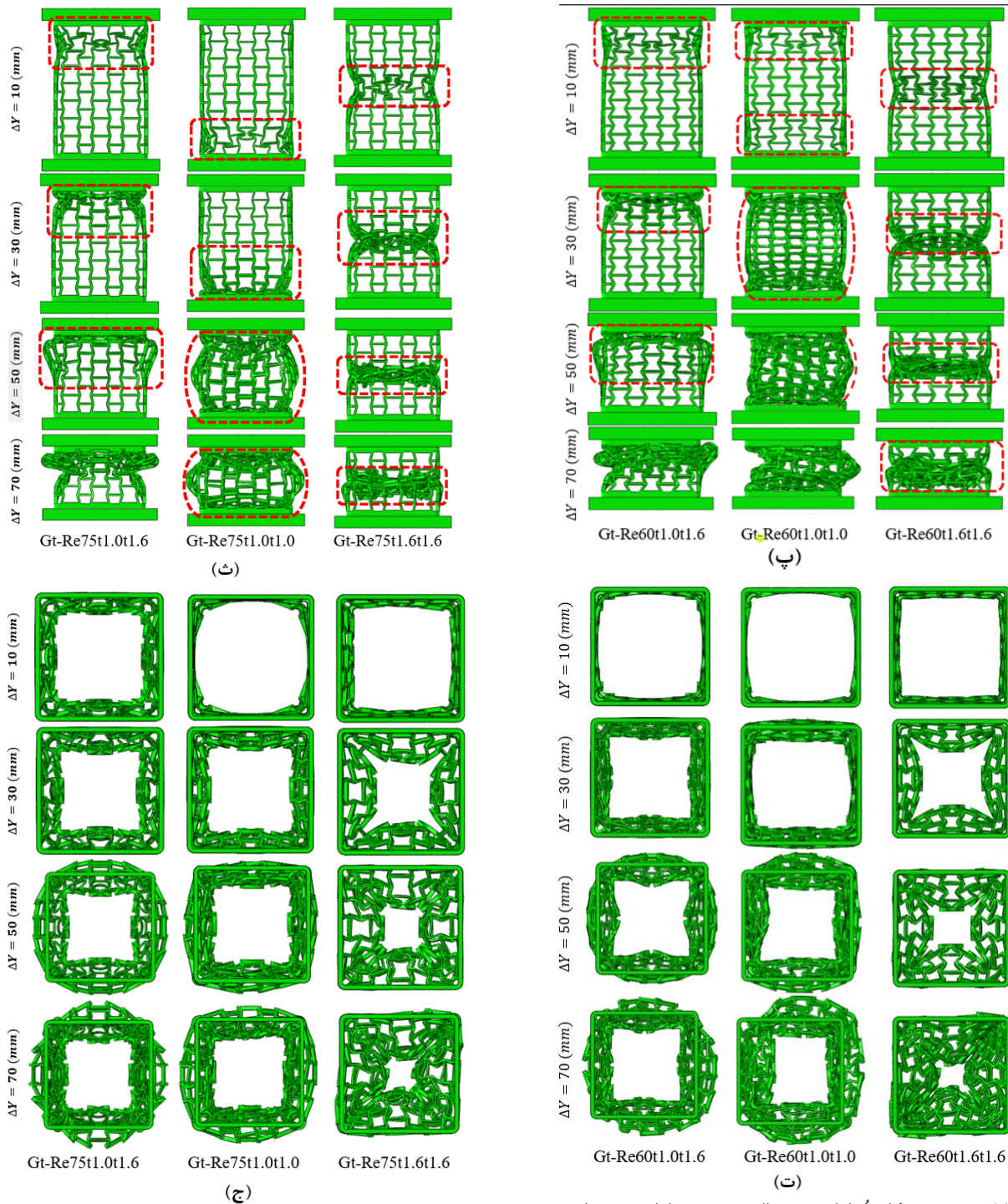
۱- الگوی فروریزش لوله‌های یکنواخت مشابه یکدیگر است. به دلیل ناپایداری در طول فشرده‌سازی محوری، در این نمونه‌ها کمناش جانبی بوجود می‌آید که موجب یک چین‌خوردگی نامتقارن در آن‌ها شده است.

۲- توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌های آگزتیک، باعث پایداری در طول لهیدگی محوری لوله‌های مدرج می‌شود. سه نوع الگوی فروریزش در نه لوله‌ی مدرج مشاهده شد. سازه‌های مشبک مدرج نوع اول، از دیدگاه الگوی فروریزش، بین دو نوع دوم و سوم، اما از منظر پارامترهای جذب انرژی نسبت به دو نوع دیگر، شرایط بهتری دارد. رفتار آگزتیک تا فشردگی محوری ۷۰ میلیمتر، فقط در لوله‌های مدرج نوع سوم مشاهده می‌شود. در دو نوع دیگر قبل از فشردگی محوری ۷۰ میلیمتر، رفتار آگزتیک از میان می‌رود.

۳- توزیع مدرج تابعی هندسی سلول‌های آگزتیک در مقایسه با توزیع یکنواخت سلول‌ها، منجر به بهبود پارامترهای ارزیابی در لوله‌های آگزتیک می‌شود. به طوری‌که حتی لوله مدرج با کم‌ترین عملکرد (Gt- $Re75t1.6t1.6$) در مقایسه با لوله یکنواخت با بالاترین عملکرد (Ut- $Re45t1.4t1.4$)، به ترتیب ۲۰ و ۱۰ درصد SEA و CFE بالاتری نشان داده و ۱۱ درصد سبک‌تر است. همچنین، لوله مدرج با بهینه‌ترین عملکرد (Gt- $Re45t1.0t1.6$) در قیاس با این لوله یکنواخت (Ut- $Re45t1.4t1.4$)، به ترتیب ۵۶، ۶۵ و ۱۶۵ درصد مقادیر EA، SEA، و CFE بالاتری داشته است. علاوه بر آن، نیروی بیشینه اولیه و جرم آن به ترتیب ۴۱ و ۴/۷ درصد کاهش یافته است.

با توجه به جرم پایین لوله‌های مدرج آگزتیک و پارامترهای ارزیابی مناسب آن‌ها، نتایج این پژوهش می‌تواند برای استفاده در صنایع هوافضا به عنوان جاذب انرژی مورد استفاده قرار گیرد.





شکل 16 تغییر شکل نُه لوله مدرج، الف- سه نوع لوله مدرج با $\theta = 45^\circ$ از نمای روبرو، ب- سه نوع لوله مدرج با $\theta = 45^\circ$ از نمای بالا، ت- سه نوع لوله مدرج با $\theta = 60^\circ$ از نمای روبرو، ث- سه نوع لوله مدرج با $\theta = 60^\circ$ از نمای بالا، ج- سه نوع لوله مدرج با $\theta = 75^\circ$ از نمای روبرو و د- سه نوع لوله مدرج با $\theta = 75^\circ$ از نمای بالا.

Fig. 16 Deformation of nine graded tubes, (a) three types of graded tubes with $\theta = 45^\circ$ from the front view, (b) three types of graded tubes with $\theta = 45^\circ$ from the top view, (c) three types of graded tubes with $\theta = 60^\circ$ from the front view, (d) three types of graded tubes with $\theta = 60^\circ$ from the top view, (e) three types of graded tubes with $\theta = 75^\circ$ from the front view, and (g) three types of graded tubes with $\theta = 75^\circ$ from the top view

تشکر و قدردانی: از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بابت حمایت‌های معنوی از این تحقیق قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

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

[13] M. Najar and R. Ghajar, "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*, vol. 24, no. 05, pp. 293-303, 2024.

https://mme.modares.ac.ir/article_11394_86fe37cd03aa605545a7854608e98c35.pdf

[14] N. Novak, A. Mauko, M. Ulbin, L. Krstulović-Opara, Z. Ren, and M. Vesenjak, "Development and characterization of novel three-dimensional axisymmetric chiral auxetic structures," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 17, pp. 2701-2713, 2022.

DOI:10.1016/j.jmrt.2022.02.025.

[15] Y. Guo et al., "Deformation behaviors and energy absorption of auxetic lattice cylindrical structures under axial crushing load," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 98, no. 105662, p. 105662, 2020.

DOI:10.1016/j.ast.2019.105662.

[16] X. Y. Zhang et al., "A novel type of tubular structure with auxeticity both in radial direction and wall thickness," *Thin-Walled Struct.*, vol. 163, no. 107758, p. 107758, 2021.

DOI:10.1016/j.tws.2021.107758.

[17] X. Ren et al., "Mechanical properties of foam-filled auxetic circular tubes: Experimental and numerical study," *Thin-Walled Struct.*, vol. 170, no. 108584, p. 108584, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108584>.

[18] R. Y. Huo et al., "Mechanical properties of auxetic circular and square tubes filled with aluminum foam," *Eng. Struct.*, vol. 281, no. 115732, p. 115732, 2023.

DOI:10.1016/j.engstruct.2023.115732.

[19] N. Novak et al., "Quasi-static and impact behaviour of foam-filled graded auxetic panel," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 178, no. 104606, p. 104606, 2023.

DOI:10.1016/j.ijimpeng.2023.104606.

[20] M. O. Doudaran, H. Ahmadi, and G. Liaghat, "Crushing performance of auxetic tubes under quasi-static and impact loading," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 6, 2022.

DOI:10.1007/s40430-022-03539-2.

[21] J. Li, D. K. Pokkalla, Z.-P. Wang, and Y. Wang, "Deep learning-enhanced design for functionally graded auxetic lattices," *Eng. Struct.*, vol. 292, no. 116477, p. 116477, 2023.

DOI:10.1016/j.engstruct.2023.116477.

[22] W. Hou, X. Yang, W. Zhang, and Y. Xia, "Design of energy-dissipating structure with functionally graded auxetic cellular material," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 23, no. 4, pp. 366-376, 2018.

DOI:10.1080/13588265.2017.1328764.

[23] ASTM E8/E8M-22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International.

DOI:10.1520/e0008m-22.

[24] J.-H. Kim, D.-H. Cho, S.-U. Choi, C.-H. Cho, and K.-H. Kim, "Energy absorption of square tubes with perforations in dynamic axial crush," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 22, no. 4, pp. 567-577, 2021.

DOI:10.1007/s12541-020-00456-z.

[25] T. J. Reddy, V. Narayanamurthy, and Y. V. D. Rao, "Study on crush tube geometric cross sections and topology for axial crashworthiness," *Def. Sci. J.*, vol. 70, no. 3, pp. 249-259, 2020.

DOI:10.14429/dsj.70.14345.

[26] T. J. Reddy, Y. V. D. Rao, and V. Narayanamurthy, "Thin-walled structural configurations for enhanced

نقش نویسندگان: هر دو نویسنده پژوهش گر اصلی و نگارنده بوده و سهم هر یک برابر با ۵۰ درصد است.

منابع مالی: منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

[1] Sarkhosh, R., "Experimental study of energy absorption capacity of spring-reinforced honeycomb Structures filled with polyurethane foam under quasi-static loading," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 3, pp. 2554-2562, 2025.

DOI:10.22068/jstc.2025.2047424.1906

[2] Sarkhosh, R., "Experimental study of energy absorption characteristic of sunflower-inspired foam-filled honeycomb structure under out-of-plane loading," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 2, pp. 2512-2520, 2024.

DOI:10.22068/JSTC.2024.2040117.1897.

[3] D. Atilla Yolcu, F. İlgen, and B. Okutan Baba, "Optimizing the performance of auxetic square tubes under uniaxial compression," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 31, no. 30, pp. 13351-13364, 2024.

DOI:10.1080/15376494.2023.2253531.

[4] K. E. Evans, M. A. Nkansah, I. J. Hutchinson, and S. C. Rogers, "Molecular network design," *Nature*, vol. 353, no. 6340, pp. 124-124, 1991.

DOI:10.1038/353124a0.

[5] R. Lakes, "Foam structures with a negative Poisson's ratio," *Science*, vol. 235, no. 4792, pp. 1038-1040, 1987.

DOI:10.1126/science.235.4792.1038.

[6] R. Lakes, "Advances in negative Poisson's ratio materials," *Adv. Mater.*, vol. 5, no. 4, pp. 293-296, 1993.

DOI:10.1002/adma.19930050416.

[7] T. Gärtner, R. Dekker, D. van Veen, S. J. van den Boom, and L. Amaral, "(In)efficacy of architected auxetic materials for impact mitigation," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 206, no. 105402, p. 105402, 2025.

DOI:10.1016/j.ijimpeng.2025.105402.

[8] Y. Zhang et al., "Static and dynamic properties of a perforated metallic auxetic metamaterial with tunable stiffness and energy absorption," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 164, no. 104193, p. 104193, 2022.

DOI:10.1016/j.ijimpeng.2022.104193.

[9] C. Aktaş, E. Acar, M. A. Güler, and M. Altın, "An investigation of the crashworthiness performance and optimization of tetra-chiral and reentrant crash boxes," *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, vol. 51, no. 12, pp. 6881-6904, 2023.

DOI:10.1080/15397734.2022.2075382.

[10] C. Zhang, F. Lu, B. Lin, X. Ling, and Y. Zhu, "Analysis on the collapse stress of auxetic tubular anti-tetrachiral structures," *Eur. J. Mech. A Solids*, vol. 103, no. 105167, p. 105167, 2024.

DOI:10.1016/j.euromechsol.2023.105167.

[11] W. Lee et al., "Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube," *Compos. Struct.*, vol. 208, pp. 836-846, 2019.

DOI:10.1016/j.compstruct.2018.10.068.

[12] C. Wang, W. Wang, W. Zhao, Y. Wang, and G. Zhou, "Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system," *Compos. B Eng.*, vol. 153, pp. 78-96, 2018.

DOI:10.1016/j.compositesb.2018.07.024.

crashworthiness," Int. J. Crashworthiness, vol. 23, no. 1, pp. 57-73, 2018.

[DOI:10.1080/13588265.2017.1306824](https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1306824)

[27] M. B. Azimi and M. Asgari, "A new bi-tubular conical-circular structure for improving crushing behavior under axial and oblique impacts," Int. J. Mech. Sci., vol. 105, pp. 253-265, 2016.

[DOI:10.1016/j.ijmecsci.2015.11.012](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.11.012)