



Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasi-static Loading

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Najafi M.¹ MSc,
Ahmadi H.*¹ PhD,
Liaghat G.H.¹ PhD

How to cite this article

Najafi M, Ahmadi H, Liaghat G.H. Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasi-static Loading. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(2):415-424.

ABSTRACT

Human being has always been looking for optimal use of his surrounding materials that has been able to invent various structures through getting inspired by nature. Some of these structures are lattice structures. Due to their lower weight, high compressive strength and high stiffness, lattice structures are widely used in various applications, including energy absorbers. A new type of lattice structure is auxetic structures that have a negative Poisson's ratio due to their geometric structure. This characteristic has caused auxetic structures to have unique properties such as shear strength, indentation resistance, and high-energy absorption. In this study, the experimental and numerical investigation of in-plane uniaxial quasi-static loading on three auxetic structures and one non-auxetic structure have been conducted. The specimens have three different auxetic geometries including re-entrant, arrowhead and anti-tetra chiral and one honeycomb geometry that is non-auxetic. The specimens have been manufactured using additive manufacturing technology (3D printing). Experimental results were compared with finite element simulation results, which were in a good agreement. As expected, auxetic structures showed a much better performance in energy absorption compared to the honeycomb structure. So that the energy absorption of the arrowhead structure was 161% higher than the honeycomb structure.

Keywords Auxetic Structures; Energy Absorption; Additive Manufacturing; Quasi-Static Compression Loading; Finite Element Analysis

¹Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Room No. 321, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Jalal-Al-Ahmad Highway, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 82883391
Fax: +98 (21) 82883391
h_ahmadi@modares.ac.ir

Article History

Received: March 14, 2019

Accepted: June 15, 2019

ePublished: February 01, 2020

CITATION LINKS

[1] The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials [2] Cellular solids: Structure and properties [3] 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance [4] Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain [5] Drop-weight impact characteristics of additively manufactured sandwich structures with different cellular designs [6] Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement [7] Review of mechanics and applications of auxetic structures [8] Auxetic metamaterials and structures: A review [9] The mechanics of two-dimensional cellular materials [10] Foam structures with a negative Poisson's ratio [11] Molecular network design [12] Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs [13] Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G [14] Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs [15] The design of doubly curved sandwich panels with honeycomb cores [16] Behavior of auxetic structures under compression and impact forces [17] Three dimensional modeling of warp and woof periodic auxetic cellular structure [18] Octagonal auxetic metamaterials with hyperelastic properties for large compressive deformation [19] Numerical investigation on dynamic crushing behavior of auxetic honeycombs with various cell-wall angles

بررسی تجربی و عددی جذب انرژی سازه‌های آگزتیک تحت بارگذاری شبه‌استاتیک

میلاد نجفی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

حامد احمدی* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

غلامحسین لیاقت PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

بشر همواره در پی استفاده بهینه از مواد پیرامون خود بوده و در این زمینه با الهام‌گرفتن از طبیعت موفق به ابداع سازه‌های مختلف شده است. یکی از این موارد، سازه‌های مشبک هستند که به دلیل وزن پایین و استحکام فشاری و سفتی بالا، به‌صورت گسترده‌ای در کاربردهای مختلف از جمله جاذب‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوع جدیدی از سازه‌های مشبک، سازه‌های آگزتیک هستند که به دلیل ساختار هندسی خود، ضریب پواسون منفی دارند و همین مشخصه، باعث شده تا سازه‌های آگزتیک ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون مقاومت برشی، مقاومت در برابر فرورفتگی و جذب انرژی بالا داشته باشند. در این مطالعه به بررسی تجربی و عددی بارگذاری فشاری به‌صورت شبه‌استاتیک روی سه سازه آگزتیک و یک سازه غیرآگزتیک پرداخته شده است. نمونه‌های مورد بررسی دارای سه هندسه مختلف آگزتیک ری‌اینترنت، سرنیزه‌ای و آنتی‌تراکاپیرال و یک هندسه غیرآگزتیک لانه‌زنبری بوده و برای ساخت نمونه‌ها از روش ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی) استفاده شده است و نتایج تجربی با نتایج تحلیل اجزاء محدود مقایسه شد که قرابت بسیار خوبی با هم داشتند و همان‌طور که انتظار می‌رفت، سازه‌های آگزتیک به نسبت سازه لانه‌زنبری که سازه‌ای غیرآگزتیک است، عملکرد به مراتب بهتری در جذب انرژی از خود نشان دادند. به‌طوری که جذب انرژی سازه سرنیزه‌ای ۱۶۱٪ بیشتر از سازه لانه‌زنبری بود.

کلیدواژه‌ها: سازه‌های آگزتیک، جذب انرژی، ساخت افزایشی، بارگذاری فشاری شبه‌استاتیک، تحلیل اجزاء محدود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۵

*نویسنده مسئول: h_ahmadi@modares.ac.ir

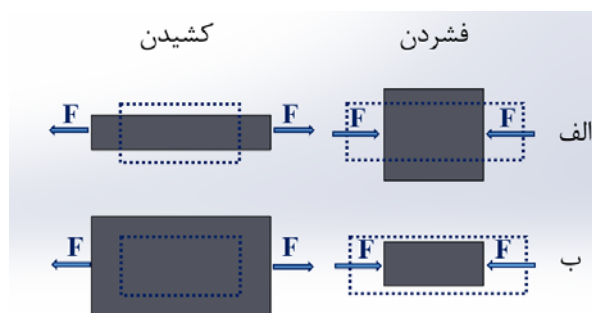
۱-مقدمه

در طول تاریخ انسان‌ها با الهام‌گرفتن از طبیعت به طراحی و استفاده از مواد و امکانات پیرامون خود پرداخته‌اند. سازه‌های مشبکی که در طبیعت یافت می‌شوند نمونه‌ای از همین موارد هستند. این سازه‌ها الهام‌بخش انسان‌ها برای ساخت سازه‌هایی با میزان چگالی پایین و سفتی بالا بوده‌اند که کاربردهای فراوانی در زمینه‌هایی همچون طراحی و معماری بناها، حمل‌ونقل، مهندسی مکانیک، مهندسی پزشکی، مهندسی راه‌آهن و بسیاری دیگر از زمینه‌ها دارند [1, 2].

یک سازه با ساختار مشبک ویژگی‌هایی همچون استحکام و سفتی بالا، چگالی پایین و توانایی جذب انرژی زیاد را برای سازه‌های ساندویچی به ارمغان می‌آورد [3]. محققان با مطالعات بسیار دریافته‌اند که سازه‌های مشبک هنگامی که در راستای خارج از صفحه خود بارگذاری می‌شوند، استحکام و سفتی بسیار بالایی از

خود نشان می‌دهند؛ زیرا در این حالت برای تغییر شکل سازه نیاز به کشیده‌شدن یا فشرده‌شدن دیواره‌های مستحکم سلول واحدها وجود دارد [4, 2]. در مقابل اما سفتی و استحکام داخل صفحه سازه‌های مشبک بسیار پایین‌تر است؛ زیرا تنش‌های داخل صفحه باعث خم‌شدن دیواره‌های سلول واحدها می‌شوند [2]. تلاش محققان بر آن است تا با طراحی بهینه سازه‌ها، هندسه سازه را به گونه‌ای انتخاب نمایند که ضمن داشتن خواص مطلوب در راستای خارج از صفحه، خواص داخل صفحه مناسب و مقبولى نیز داشته باشند [5, 6]. دلیل این امر آن است که در مواردی که این سازه‌ها به‌عنوان جاذب انرژی به کار گرفته می‌شوند، الزاماً تمامی برخوردها با این سازه‌ها از جهت در نظر گرفته‌شده که در راستای خارج صفحه سازه‌ها است، نیست و امکان برخوردی که سازه را در جهت داخل صفحه تحت بارگذاری قرار دهد نیز وجود دارد. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد که طراحی هندسی ما پاسخگوی تمامی احتمالات ممکن در برخورد باشد.

در سالیان اخیر مطالعات گوناگونی راجع به استفاده از سازه‌های مشبک با هندسه‌های گوناگون صورت پذیرفته است. یکی از این سازه‌ها، سازه ری‌اینترنت (Re-entrant) است که توجه محققان زیادی را به خود معطوف ساخته است. این سازه در دسته سازه‌های آگزتیک (Auxetic) جای دارد. مواد و سازه‌های آگزتیک، مواد و سازه‌هایی هستند که ضریب پواسون منفی دارند [7]. ویژگی مهم آگزتیک‌ها که همان ضریب پواسون منفی است، به این مواد و سازه‌ها خواص منحصربه‌فردی بخشیده است. در واقع این مواد و سازه‌ها تحت بارگذاری تک‌محوره، رفتاری عکس مواد و سازه‌های معمولی (ضریب پواسون مثبت) دارند. یعنی همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، برخلاف مواد و سازه‌های معمولی که تحت بارگذاری تک‌محوره کششی دچار انقباض و جمع‌شدگی می‌شوند، مواد و سازه‌های آگزتیک تحت بارگذاری کششی تک‌محوره دچار انبساط و ازدیاد پهنا می‌شوند و همین‌طور در بارگذاری فشاری تک‌محوره، مواد و سازه‌های آگزتیک دچار انقباض و جمع‌شدگی می‌شوند، در حالی که مواد و سازه‌های معمولی تحت همین شرایط منبسط می‌شوند [8].



شکل ۱ الگوی تغییر شکل در بارگذاری فشاری و کششی ماده غیرآگزتیک (الف) و ماده آگزتیک (ب)

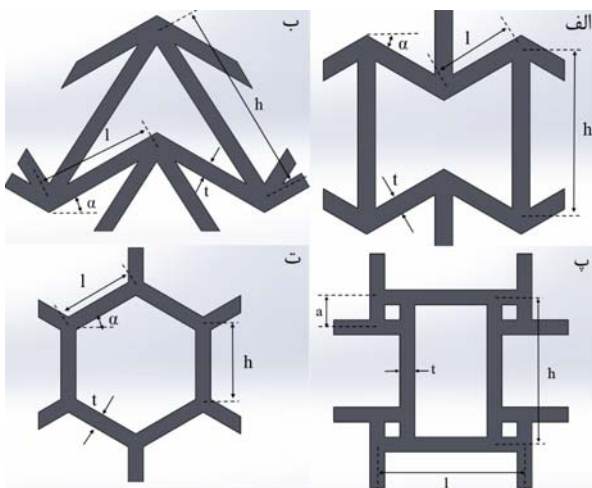
در سال ۱۹۸۲، گیبسون و همکاران [9] اولین ساختار سلولی دوبعدی با ضریب پواسون منفی را به شکل ری‌اینترنت ارائه دادند. معرفی

رایج‌ترین سازه‌ها در کاربرد جذب انرژی است نیز مورد بررسی و مقایسه با سازه‌های آگزتیک قرار می‌گیرد. برای این کار از دو روش تجربی و عددی استفاده شده است. اعتبارسنجی حل عددی از طریق مقایسه نتایج آن با نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های فشار شبه‌استاتیکی روی نمونه‌های ساخته‌شده به کمک فرآیند ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی)، انجام شده است.

۲- ساخت نمونه‌ها و آزمایش‌ها

۱-۲ هندسه سازه‌ها

در کار حاضر سه ساختار هندسی مختلف آگزتیک و یک ساختار هندسی غیرآگزتیک لانه‌زنبوری معمولی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پروفیل هر یک از مدل‌های طراحی‌شده با ساختارهای ری‌اینترنت، سرنیزه‌ای، آنتی‌تتراکایرال و لانه‌زنبوری در شکل ۲ نشان داده شده‌اند؛ ضمن اینکه ابعاد سلول واحد سازنده هر یک از مدل‌ها در جدول ۱ آمده است. پارامترهای طراحی در شکل ۲ (الف تا ت)، برای هر یک از سلول واحدها عبارت‌اند از h : طول ضلع عمودی سلول واحد، l : طول ضلع مورب سلول واحد، α : زاویه ضلع مورب با افق، t : ضخامت اضلاع سلول واحد و a : طول ضلع مربع موجود در سازه آنتی‌تتراکایرال است. زاویه α برای سازه‌های لانه‌زنبوری و سرنیزه‌ای مثبت است و برای سازه ری‌اینترنت منفی است. سعی شده است تا تعداد سلول واحدها و ابعاد کلی سازه‌ها در طول و عرض و ارتفاع تقریباً یکسان باشد تا مقایسه به‌درستی صورت پذیرد. برای طراحی سازه‌ها از نرم‌افزار سالی‌دورکز (SolidWorks) استفاده شده است. شکل ۳ نیز نشان‌دهنده سازه‌های طراحی‌شده است.



شکل ۲) سلول واحد تشکیل‌دهنده هر چهار سازه ری‌اینترنت (الف)، سرنیزه‌ای (ب)، آنتی‌تتراکایرال (پ) و لانه‌زنبوری (ت)

جدول ۱) ابعاد طراحی هر یک از سلول واحدها

ساختار	h (mm)	l (mm)	t (mm)	α (°)	a (mm)
ری‌اینترنت	۱۰	۵	۱	-۳۰	-
سرنیزه‌ای	۱۳/۵	۸/۴۰	۱	۳۰	-
آنتی‌تتراکایرال	۹/۸۰	۹/۸۰	۱	-	۲
لانه‌زنبوری	۵/۲۰	۵/۲۰	۱	۳۰	-

اولین مواد آگزتیک به سال ۱۹۸۷ برمی‌گردد که لیکس^[۱۰] رفتار اولین ساختارهای فومی با نسبت پواسون منفی را گزارش کرد. چهار سال بعد موادی که نسبت پواسون منفی داشتند توسط ایونس و همکاران^[۱۱] به نام مواد آگزتیک نام‌گذاری شدند.

رفسنجانی و یازینی^[۱۲] با الهام‌گرفتن از الگوهای نقش و نگاره‌های موجود در تپه‌های باستانی خرقان در ایران، نوع جدیدی از ساختارهای آگزتیک را ارایه کردند. از جمله خواصی که به‌خاطر همین الگوی غیرمعمول تغییر شکل از مواد و ساختارهای آگزتیک نتیجه می‌شود، می‌توان به افزایش مقاومت در برابر فرورفتگی، افزایش مقاومت برشی، نفوذپذیری متغیر (تراوایی) و بهبود میزان جذب انرژی اشاره کرد. مزایای اشاره‌شده به این مواد و ساختارها، پتانسیل خوبی بخشیده است تا بتوان از آنها در زمینه‌های گوناگونی مثل نساجی، هوافضا، تجهیزات نظامی، پزشکی و وسایل ضدضربه و محافظت‌کننده، حسگرها و فیلترهای هوشمند استفاده کرد^[۸].

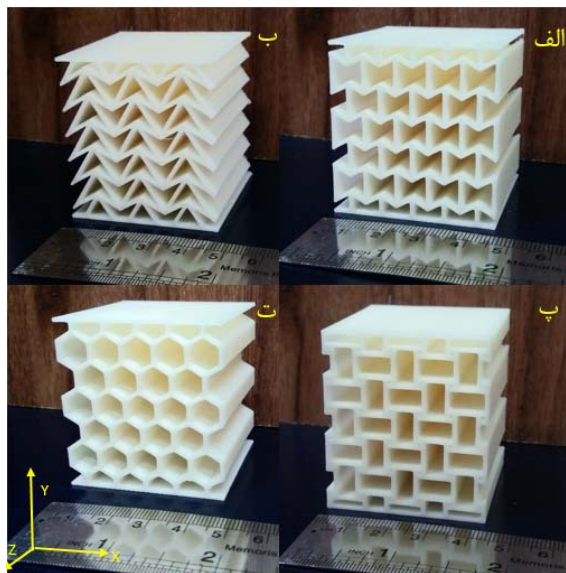
آلدرسون و همکارش^[۱۳]، پیشنهاد کردند که با استفاده از سازه‌های مشبک آگزتیک در ماده سازنده هسته سازه‌های ساندویچی منحنی‌شکل می‌توان خواص خارج از صفحه کل سازه مثل استحکام و سفتی را بالا برد. یک بررسی تحلیلی نشان داد که پانل‌های کامپوزیتی آگزتیک می‌توانند موانع موثری در برابر امواج ضربه باشند^[۱۴]. ایونس^[۱۵] یک نمونه موفق از پانل ساندویچی با هسته مشبک و هندسه آگزتیک ری‌اینترنت ساخت.

یانگ و همکاران^[۱۶] به بررسی عددی بارگذاری استاتیکی و دینامیکی روی سازه‌های آگزتیک و نیز اثر تغییر ضخامت جداره سلول واحدها بر میزان جذب انرژی آن سازه‌ها با هدف استفاده از آنها در بالشتک‌های محافظ بدن پرداختند. صفی‌خانی و اعتمادی^[۱۷] یک مدل جدید از سازه‌های آگزتیک ری‌اینترنت ارایه کردند که سلول واحدها به‌صورت تار و پود (Warp and Woof) به هم متصل شده بودند.

حمزه‌ای و همکاران^[۱۸]، مدل هشت‌ضلعی نوینی ارایه کردند که در تغییر شکل‌های فشاری زیاد، خاصیت آگزتیک از خود نشان می‌داد. ژانگ و همکاران^[۱۹]، رفتار تخریبی دینامیکی داخل صفحه سازه‌های آگزتیک با زوایای مختلف سلول واحد را مورد بررسی قرار دادند. یینگ‌گول و همکاران^[۶] با اصلاح سازه ری‌اینترنت و مقایسه مقادیر جذب انرژی سازه اصلاح‌شده با سازه اصلی دریافتند که ارتباط زیادی بین ساختار هندسی سازه و سلول واحدهای سازنده آن و خواص ماکرومکانیکی و میکرومکانیکی سازه مشبک آگزتیک وجود دارد. به دلیل چالش‌ها و مشکلات زیادی که برای ساخت سازه‌های آگزتیک با هندسه‌های گوناگون وجود دارد، روش ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی) یک روش مناسب برای تولید این سازه‌ها است^[۸].

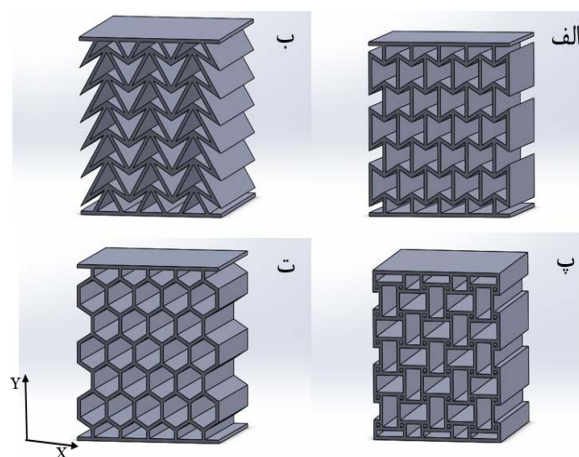
در این تحقیق به بررسی جذب انرژی سه سازه آگزتیک با هندسه‌های ری‌اینترنت، سرنیزه‌ای (Arrowhead) و آنتی‌تتراکایرال (Anti-tetra Chiral) و مقایسه مقادیر جذب انرژی و جذب انرژی ویژه آنها پرداخته می‌شود. ضمناً به‌منظور مقایسه با سازه‌های غیرآگزتیک، سازه لانه‌زنبوری (Honeycomb) را که یکی از

چاپ نمونه‌ها برای تمامی سازه‌ها در جهت Z در نظر گرفته شد تا نیازی به استفاده از ماده نگه‌دارنده و کمکی (Support Material) برای ساخت نمونه‌ها نباشد. لازم به ذکر است که نمونه‌های شکل ۴ برای مشخص شدن هندسه سلول واحدها، در آن راستا عکس‌برداری شده‌اند و راستای چاپ نمونه‌ها همان Z است.



شکل (۴) سازه‌های چاپ‌شده ری‌اینترنت (الف)، سرنیزه‌ای (ب)، آنتی‌تتراکایرال (پ) و لانه‌زنبوری (ت)

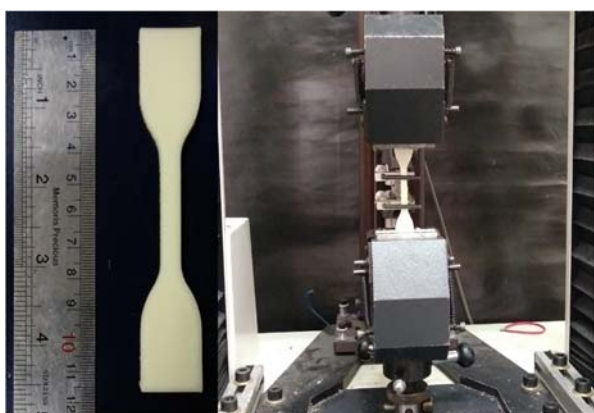
سازه ری‌اینترنت در سال‌های اخیر، مورد بررسی و مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته است و از این رو شناخته‌شده‌ترین سازه آگرتیک است و در این کار به‌عنوان معیار و سنج‌ای برای مقایسه با سه سازه دیگر به کار گرفته شده است. لازم به ذکر است که هندسه سازه‌های آنتی‌تتراکایرال و سرنیزه‌ای نیز جزء هندسه‌های شناخته‌شده دارای خاصیت آگرتیک هستند؛ اما بحث جذب انرژی آنها و مقایسه با سازه‌های دیگر، کمتر مورد توجه محققین بوده است.



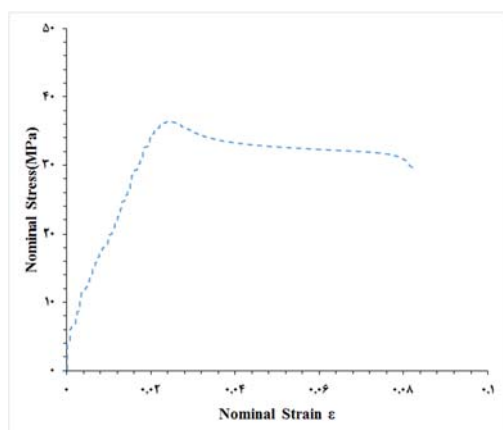
شکل (۳) سازه‌های طراحی‌شده ری‌اینترنت (الف)، سرنیزه‌ای (ب)، آنتی‌تتراکایرال (پ) و لانه‌زنبوری (ت)

۲-۲ ساخت نمونه‌ها

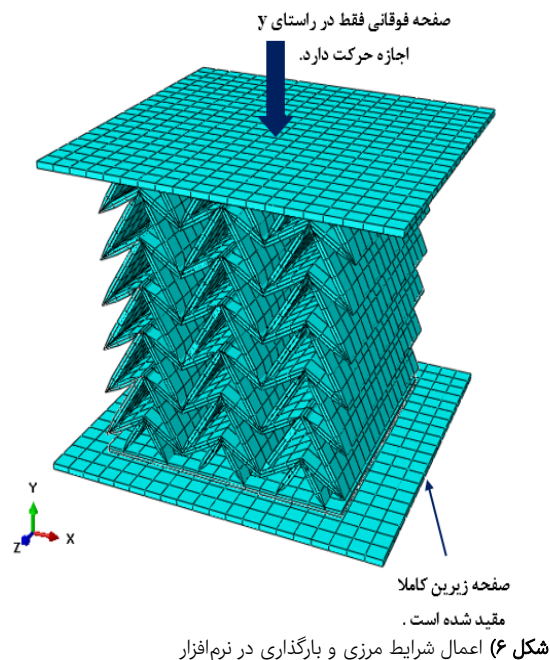
چهار مدل مختلف مورد بررسی با استفاده از ابعاد ذکرشده در جدول ۱ ایجاد شدند. برای ایجاد مدل‌ها از نرم‌افزار سالیدورکز استفاده شد و برای ساخت مدل‌های چاپ‌شده سه‌بعدی نیز از همین مدل‌های طراحی‌شده استفاده شده است. برای ایجاد فایل‌های چاپ سه‌بعدی از نرم‌افزار سیمپلیفای (Simplify3D) که یکی از نرم‌افزارهای رایج و شناخته‌شده برای چاپ سه‌بعدی است، بهره گرفته شده است. شکل ۴ مدل‌های ساخته‌شده توسط فرآیند ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی) را نشان می‌دهد که یکی از روش‌های پیشرفته و نسبتاً جدید برای ساخت نمونه‌ها است. سه نمونه از هر مدل سازه مورد بررسی با استفاده از فرآیند لایه نشانی مذاب (FDM) ساخته شد. چاپگر مورد استفاده برای این کار Quantom-2025 بود و ماده سازنده نیز ABS (آکریلونیتریل بوتادین استایرن) محصول شرکت مجیک فیلامنت است که یکی از مواد پلیمری رایج در فرآیند چاپ سه‌بعدی است. برای یافتن خواص ماده مورد استفاده، مطابق با استاندارد ASTM D638، نمونه‌های آزمون کشش ساخته شده و تحت کشش تک‌محوره قرار گرفتند که شکل نمونه و نمودار تنش- کرنش مهندسی آن در شکل ۵ و نمودار ۱ آمده است و برخی خواص آن در جدول ۲ ذکر شده است. ارتفاع لایه‌های مورد استفاده برای چاپ هر کدام از نمونه‌ها برابر با ۰/۲ میلی‌متر و ضخامت دیواره سلول‌ها نیز برای تمامی سازه‌ها ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. راستای



شکل (۵) تصویر نمونه چاپ‌شده برای انجام آزمون کشش



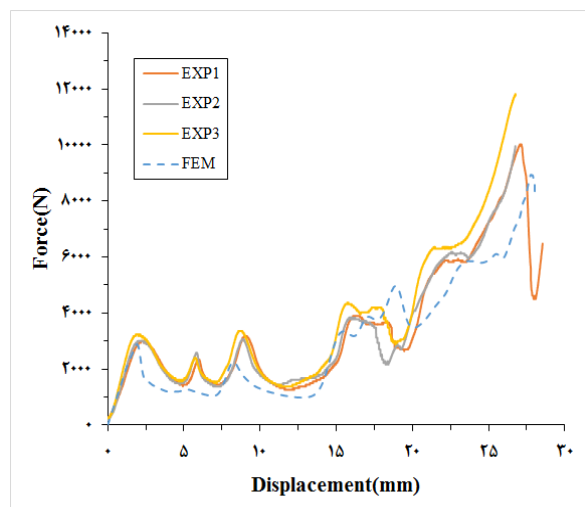
نمودار (۱) نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه آزمون کشش



۴-نتایج و بحث

آزمون‌های فشار روی نمونه‌های ساخته‌شده توسط دستگاه یونیورسال ۳۰۰ کیلو نیوتنی و با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه فک فوقانی انجام شد. برای هر مدل از سازه‌ها سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها همگی تا حدود ۵۰٪ ارتفاع اولیه خود تحت فشار قرار گرفتند.

نمودارهای نیرو-جابجایی فشاری مربوط به همه سازه‌ها در نمودارهای ۲ تا ۵ آمده است. در نمودار ۶ نیز به‌منظور مقایسه، منحنی‌های تجربی هر چهار سازه در یک نمودار آمده است. شکل ۷ نیز مراحل مختلف تغییر شکل سازه‌ها را به‌ترتیب نشان می‌دهد.



نمودار ۷) نمودار نیرو-جابجایی سازه ری‌اینترنت برای نتایج تجربی و عددی

جدول ۲) خواص ماده سازنده

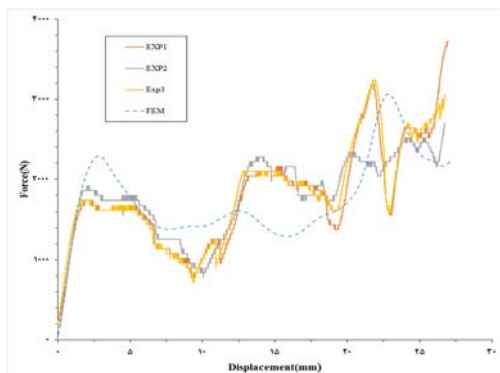
ماده سازنده	مدول الاستیسیته (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون ^[۶]	چگالی (g/cm ³)
ABS	۱۵۰۰	۳۶	۰.۳۵	۱.۰۰

ضمناً برای آنکه اعمال بار به سازه‌ها به‌صورت یکنواخت صورت پذیرد، برای تمامی سازه‌ها در بالا و پایین آنها دو زبانه به ضخامت ۱ میلی‌متر طراحی شد تا اعمال بار به‌صورت یکنواخت صورت بگیرد و تغییر شکل سازه‌ها به‌درستی انجام پذیرد. آزمون فشار تک‌محوره داخل صفحه نمونه‌ها با کمک دستگاه یونیورسال سروو هیدرولیک (Servo-Hydraulic Universal Test Machine) مدل WDW-300E انجام پذیرفت. سرعت جابجایی فک فوقانی دستگاه برای اعمال بار شبه استاتیکی برابر با ۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. نمودارهای نیرو-جابجایی از دستگاه استخراج شدند و برای تحلیل و بررسی‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند.

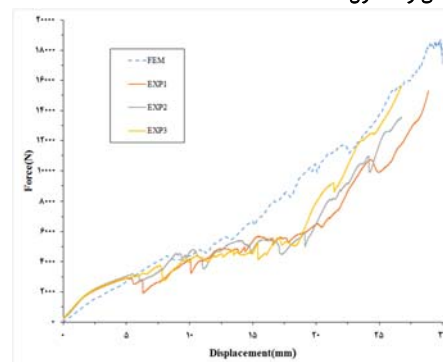
۳- شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود

شبیه‌سازی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس (Abaqus) انجام شده است که یکی از نرم‌افزارهای رایج و پرکاربرد در این زمینه است. مدل‌های صریح به‌صورت المان‌های پوسته (Shell) با ضخامت یک میلی‌متر ساخته شده‌اند. همان‌طور که اشاره شد برای تعیین خواص ماده سازنده سازه‌ها ابتدا نمونه‌های آزمون کشش برای تعیین خواص مکانیکی ماده مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM D-638 چاپ شد و با انجام آزمون کشش تک‌محوره روی آنها نمودار تنش- کرنش مهندسی حاصل شد که در شکل ۵ و نمودار ۱ آمده است. با تبدیل مقادیر آن به تنش و کرنش حقیقی، به‌عنوان ورودی نرم‌افزار برای خواص ماده مورد استفاده قرار گرفت. برای آنکه مقایسه سازه‌ها در شرایط یکسان انجام گیرد، علاوه بر آنکه ابعاد سازه‌ها تقریباً برابر در نظر گرفته شد، طراحی به‌گونه‌ای انجام شد که تعداد سلول واحدهای تمامی سازه‌ها نیز برابر باشد. عمق در نظر گرفته‌شده برای هر مدل هم ۴۵ میلی‌متر است. برای مش‌زدن مدل‌ها نیز از المان‌های S4R استفاده شد و مش مدل‌ها به شکل جاروبی (Sweep) و مربعی غالب (Quad-dominated) است. شرایط مرزی تعریف‌شده در نرم‌افزار نیز به همان صورت که در شکل ۶ نشان داده شده است برای همه مدل‌ها اعمال شد.

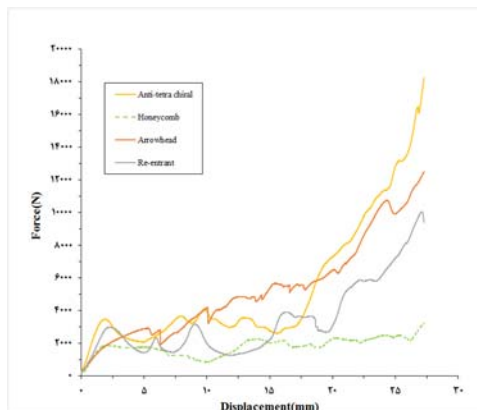
برای شبیه‌سازی دقیق آزمون فشار با اعمال بار تک‌محوره در راستای Y، مدل‌ها بین دو صفحه صلب قرار داده شد. خواص اندرکنشی که برای تماس تعریف شد به‌صورت همه سطوح با هم (All With Self) با رفتار مماسی و ضریب اصطکاک ۰/۲ است. صفحه صلب پایینی به‌صورت کامل ثابت شد و تمامی درجات آزادی آن مقید شد؛ همچنین یک شرایط جابجایی کنترل‌شده برای صفحه صلب بالایی اعمال شد. حرکت صفحه صلب بالایی تنها در راستای Y آزاد گذاشته شده است و میزان جابجایی ۲۵ میلی‌متر برای آن معین شد. از



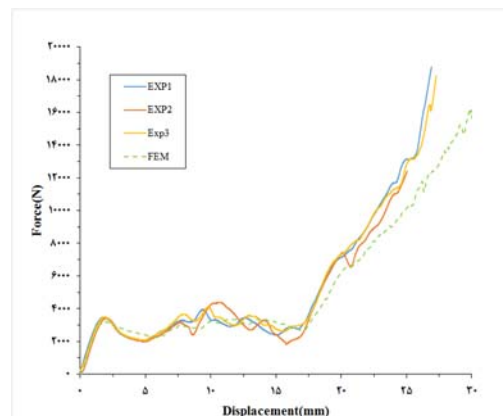
نمودار ۵) نمودار نیرو- جابجایی سازه لانه‌زنبوری برای نتایج تجربی و عددی



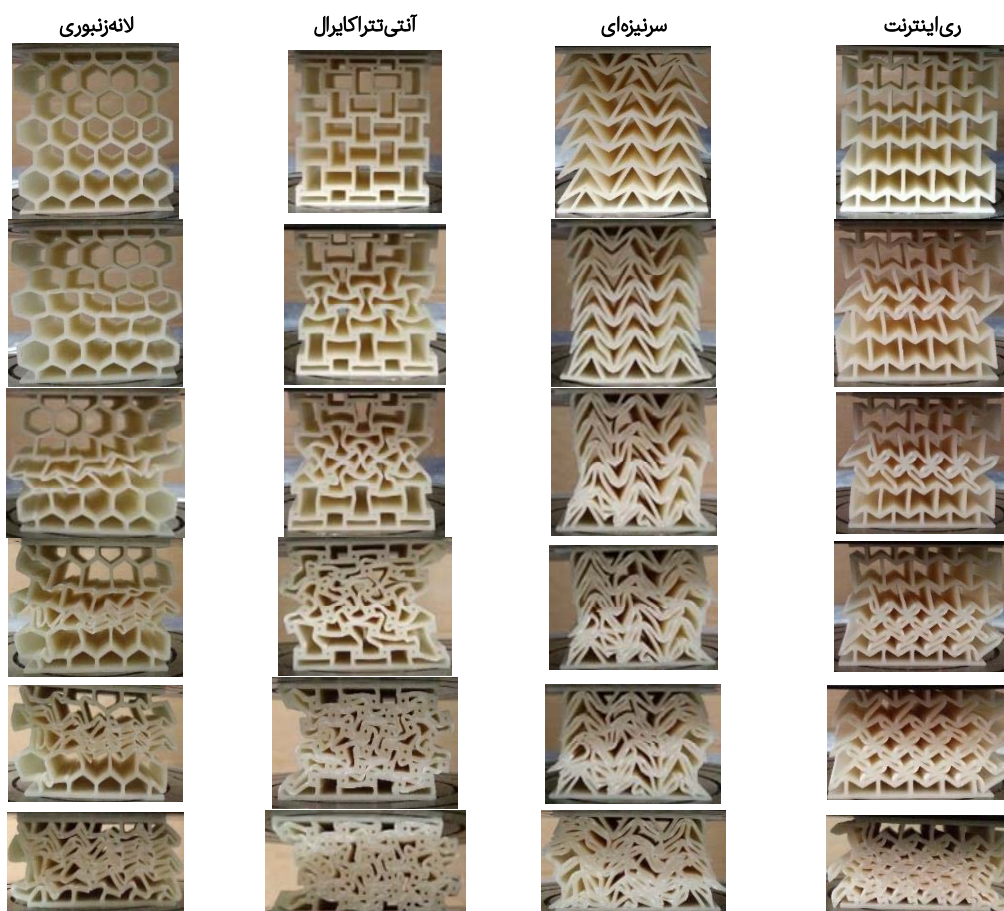
نمودار ۳) نمودار نیرو- جابجایی سازه سرنیزه‌ای برای نتایج تجربی و عددی



نمودار ۶) مقایسه منحنی‌های نیرو- جابجایی هر چهار سازه



نمودار ۴) نمودار نیرو- جابجایی سازه آنتی‌تتراکایرال برای نتایج تجربی و عددی



شکل ۷) مقایسه روند فروریزی و تخریب سازه‌ها

است، آن است که همه آنها رفتاری الاستیک-پلاستیک در تخریب خود نشان می‌دهند. نقاطی که میزان تنش در سازه از حد تسلیم ماده سازنده یعنی ABS عبور کرده، سبب روشن‌تر شدن و سفیدتر شدن رنگ آن نواحی در سازه می‌شود. در شکل ۸ برخی از نواحی که ماده وارد ناحیه پلاستیک شده است، نشان داده شده است. هرچند که در شکل ۷ نیز تغییر رنگ برخی نقاط کاملاً مشهود است. همچنان که اگر در تحلیل اجزاء محدود، خواصی برای ناحیه پلاستیک ماده تعریف نشود و ماده صرفاً الاستیک خطی تعریف شود، اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی بسیار زیاد خواهد بود.



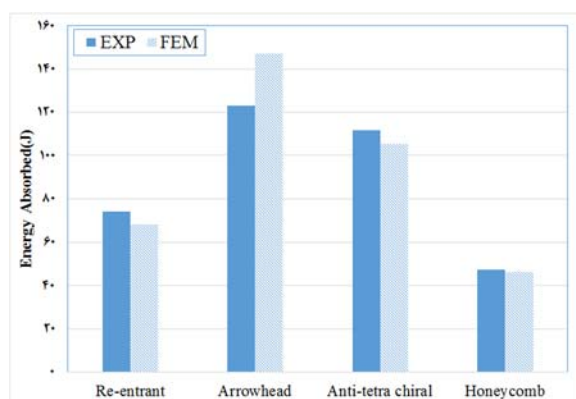
شکل ۸) برخی از نواحی پلاستیک ایجاد شده در سازه آنتی‌تتراکایرال

همان طور که از نمودارهای ۲ تا ۵ مشخص است، برای تمامی سازه‌ها ابتدا یک ناحیه وجود دارد که رابطه نیرو-جابجایی خطی است و پس از آن در سازه‌های لانه‌زنبوری و ری‌اینترنت با شروع تخریب یک به یک ردیف‌های سازه، صعود و نزول مکرر میزان نیرو وجود دارد و این روند تا حدود تغییر ارتفاع ۳۰ درصدی وجود دارد. پس از آن، با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از سازه دچار فروریزی شده است، سفتی سازه افزایش پیدا کرده و میزان نیرو روند صعودی به خود می‌گیرد. اما همان طور که پیش‌تر هم اشاره شد این الگوی صعود و نزول میزان نیرو برای دو سازه دیگر یعنی آنتی‌تتراکایرال و سرنیزه‌ای برقرار نیست. در سازه آنتی‌تتراکایرال بعد از ناحیه خطی ابتدایی، یک ناحیه با نیروی تقریباً ثابت وجود دارد و سپس میزان نیرو به صورت صعودی افزایش پیدا می‌کند تا جایی که سفتی سازه بسیار زیاد می‌شود. اگر به شکل‌های آزمون فشار برای سازه آنتی‌تتراکایرال توجه شود و نمودار نیرو-جابجایی آن مد نظر قرار گیرد، مشاهده می‌شود که ناحیه اول نمودار برای زمانی است که هنوز سازه دچار تغییر شکل چندانی نشده است و در برابر بار اعمالی مقاومت می‌کند. ناحیه دوم مربوط به زمانی است که دیواره‌های عمودی تا حدی دچار خمش شده‌اند و سازه خاصیت آگرتیک خود را به وضوح نشان می‌دهد؛ اما هنوز دیواره‌های عمودی سلول‌ها به هم نرسیده است و به هم برخورد نکرده است. از جایی که دیواره‌ها به هم می‌رسد و ردیف‌های میانی سازه به هم فشرده می‌شوند، میزان نیرو تا حدودی افزایش پیدا می‌کند و قله‌های کوچکی که در ناحیه دوم وجود دارد به همین دلیل ایجاد شده است. بعد از فشرده شدن نسبی ردیف‌های میانی سازه، سفتی سازه کمی افزایش پیدا می‌کند و سطح تنش مدام بالاتر می‌رود تا جایی که کل سازه دچار فروریزی می‌شود و سازه به سمت چگال شدن می‌رود که در

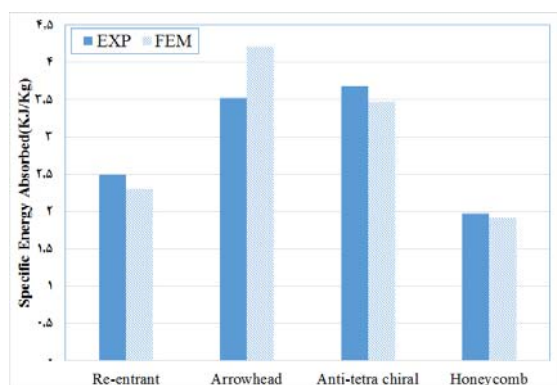
رفتار هر ۴ مدل هنگامی که در راستای y تحت بارگذاری فشاری قرار گرفته باشند، مرحله به مرحله ثبت شده تا بتوان به تحلیل رفتار نیرویی سازه‌ها در مقادیر مختلف جابجایی پرداخت. هنگامی که سازه لانه‌زنبوری تحت بارگذاری فشاری در صفحه خود ($x-y$) قرار می‌گیرد، دیواره سلول‌ها دچار خمش می‌شوند که باعث یک تغییر شکل خطی الاستیک می‌شود. هنگامی که میزان جابجایی به یک حد بحرانی برسد، سلول‌ها به دلایلی مثل کماتش الاستیک یا پلاستیک شروع به فروریزی می‌کنند. اینکه نحوه فروریزی دیواره به چه صورت باشد، بستگی به ماده سازنده آن دارد [۶]. هنگامی که دیواره‌های روبروی هم در یک سلول واحد در اثر فشار به هم می‌رسند، می‌توان گفت که فروریزی سلول به پایان رسیده و بعد از این جذب انرژی نخواهد داشت و اگر چنانچه تمامی سلول‌ها دچار فروریزی کامل شوند، با اعمال فشار بیشتر سفتی سازه بسیار بالا می‌رود و سازه چگال‌تر می‌شود.

گیبسون و اشبی [۲] برای تغییر شکل داخل صفحه سازه لانه‌زنبوری آلومینیومی نمودارهایی به دست آوردند که نشان می‌داد تمامی سازه‌های مشبک در بخش اول تحمل بار خود، در مقابل بار اعمالی مقاومت می‌کنند تا جایی که وقتی ردیف‌ها شروع به تخریب و فروریزی می‌کنند، میزان نیرو دچار افت قابل ملاحظه‌ای می‌شود و سطح نیرو حدوداً در همین مقدار باقی می‌ماند تا فروریزی یک ردیف به اتمام برسد. هنگامی که دیواره‌های سلول‌های تخریب شده به هم فشرده می‌شوند، دوباره میزان نیرو شروع به افزایش چشمگیر می‌کند و این روند صعود و نزول میزان نیرو ادامه پیدا می‌کند تا جایی که تمامی ردیف‌های سازه دچار تخریب کامل و به هم فشرده شوند؛ از اینجا به بعد اگر به فشرده‌تر کردن سازه ادامه داده شود، مقدار نیرو با شیب نزدیک به بی‌نهایت شروع به افزایش می‌کند که نشان‌دهنده چگال شدن سازه است. این روند در مورد سازه‌های لانه‌زنبوری و ری‌اینترنت نیز وجود دارد و تا حدود کاهش ارتفاع ۳۰٪ در راستای y الگوی صعود و نزول میزان نیرو برقرار است. اما در مورد سازه‌های آنتی‌تتراکایرال و سرنیزه‌ای موضوع کمی متفاوت است. دلیل آن هم این است که در این دو سازه و به خصوص در سازه سرنیزه‌ای، رخدادی تحت عنوان فروریزی کامل یک ردیف از سلول واحدها اتفاق نمی‌افتد. در واقع حالت غالب در این دو سازه، کماتش اضلاع عمودی سلول واحدها است که نقش موثر را در نوع تخریب سازه ایفا می‌کند و عملاً تا جایی که سلول واحدها به طور کامل فشرده شوند، تخریب کامل یک ردیف به صورت مجزا از سایر ردیف‌ها را نمی‌توان ملاحظه کرد و به همین دلیل است که الگوی قله‌های پیاپی که در نمودار نیرو-جابجایی سازه ری‌اینترنت و لانه‌زنبوری به دلیل تخریب یک به یک ردیف‌ها وجود دارد، در دو سازه سرنیزه‌ای و آنتی‌تتراکایرال وجود ندارد و میزان نیرو تقریباً به صورت پیوسته در حال افزایش است تا جایی که سازه چگال شود. بین نحوه فروریزی و تخریب سلول واحدها در سازه‌های مختلف تفاوت وجود دارد و همین تفاوت‌ها در میزان جذب انرژی سازه اثرگذار هستند. نکته‌ای که بین هر چهار سازه مورد بحث مشترک

نمودارهای ۲ تا ۸ مشخص است، قرابت بسیار خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی وجود دارد و به‌جز سازه سرنیزه‌ای که تفاوت نتیجه تجربی و عددی در حدود ۱۹٪ است، در بقیه سازه‌ها اختلاف نتیجه تجربی و عددی کمتر از ۸٪ است. همچنین با مقایسه نمودارهای ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که مقدار تجربی جذب انرژی ویژه سازه آنتی‌تتراکایرال بیشتر از سازه سرنیزه‌ای است و این سازه بهترین عملکرد را با در نظر گرفتن عامل مهم وزن به خود اختصاص داده است. نکته جالب توجه آن است که با در نظر گرفتن سازوکار تخریبی که برای هر چهار سازه در بخش قبل گفته شد، دو سازه‌ای که تخریبشان به‌صورت ردیف به ردیف بود، ضعیف‌ترین عملکرد را داشته و سازه‌های آنتی‌تتراکایرال و سرنیزه‌ای که دچار فشردگی همزمان سازه می‌شوند و ردیف‌هایشان به‌تنهایی دچار فروریزی نمی‌شود، بهترین عملکرد را به خود اختصاص داده‌اند. ضمن اینکه گرچه وجود خاصیت آگزتیک در سه سازه ری‌اینترنت و آنتی‌تتراکایرال و سرنیزه‌ای قبلاً به اثبات رسیده و نیازی به اثبات جداگانه و مجدد آن نیست، اما طبق شکل ۷ مشاهده می‌شود که این پدیده در دو سازه‌ای که جذب انرژی و جذب انرژی ویژه بالاتری داشتند، با وضوح بیشتری قابل رویت است. به‌منظور مقایسه نتایج تجربی و عددی، تصویر فروریزی سازه‌ها در آزمایش فشار داخل صفحه و حل عددی کنار هم قرار داده شده و در شکل ۹ آمده است. همان گونه که از شکل ۹ مشخص است، حل عددی در پیش‌بینی نحوه فروریزی سازه‌ها به‌درستی عمل کرده و نتایج آن سازگاری مناسبی با نتایج تجربی دارد.



نمودار (۷) نمودار مقایسه مقادیر جذب انرژی سازه‌ها

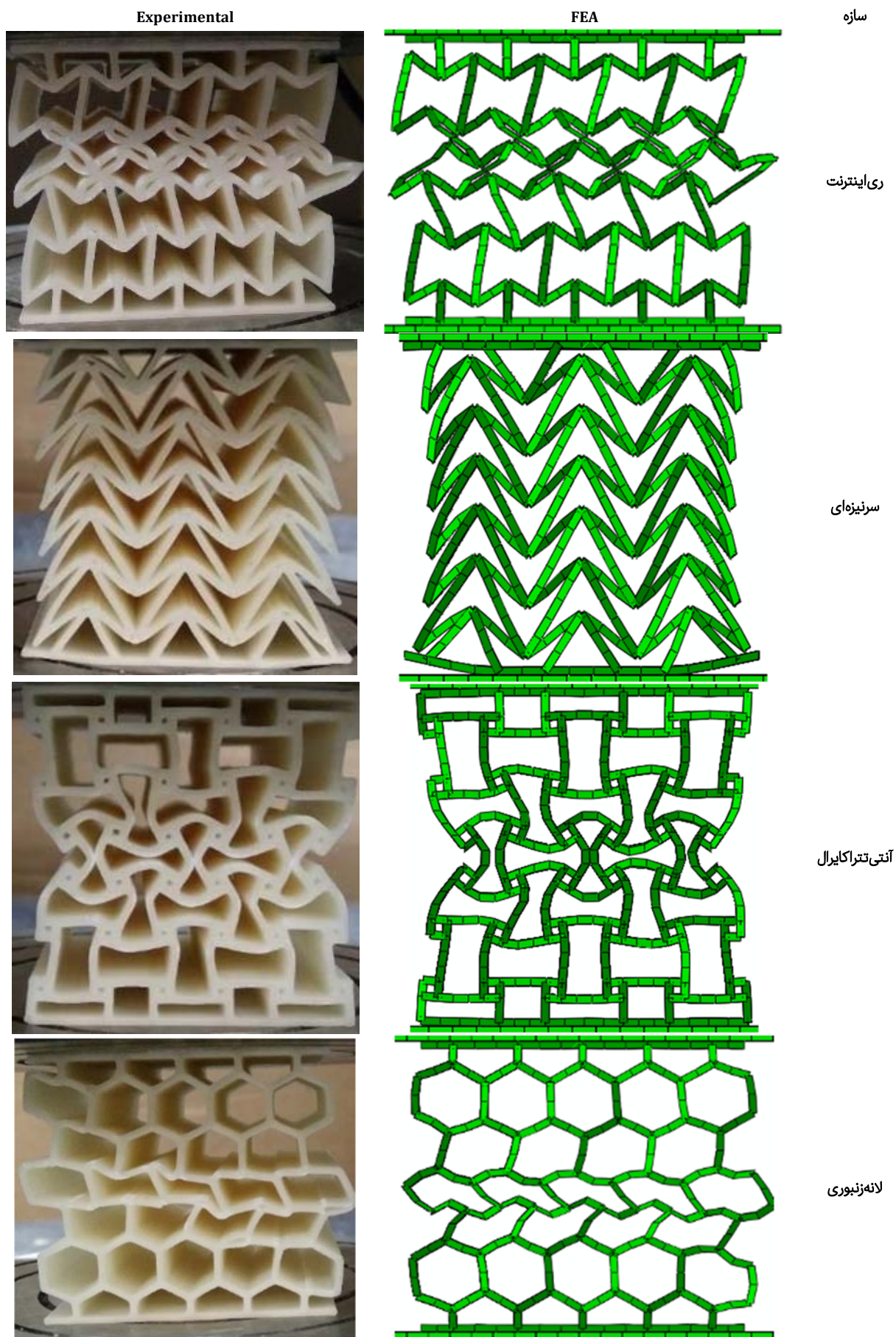


نمودار (۸) نمودار مقایسه مقادیر جذب انرژی ویژه سازه‌ها

واقع ناحیه سوم نمودار معرف این بخش از تغییر شکل است. در مورد سازه سرنیزه‌ای نیز ناحیه اول نمودار برای حالتی است که سازه در مقابل اعمال بار مقاومت کرده و تغییر شکل چندان ندارد. با شروع تغییر شکل سازه، نرخ افزایش نیرو کاهش پیدا می‌کند و در واقع سلول واحدها در حال متمرکز شدن و جمع شدن در میانه سازه هستند که نشانگر خاصیت آگزتیک است. به محض اینکه دیواره سلول‌ها به هم رسیده و دچار جمع‌شدگی می‌شوند، سفتی سازه افزایش پیدا می‌کند و میزان نیرو روند کاملاً صعودی به خود می‌گیرد. ضمن آنکه در این سازه فروریزی کامل برای هیچ کدام از ردیف‌ها رخ نمی‌دهد، زیرا از یک ناحیه به بعد سلول‌های واقع در یک ستون روی هم قرار می‌گیرند (مانند داخل هم جمع شدن سرنیزه‌ها) و این پدیده بر سفتی سازه می‌افزاید.

ثابت‌ماندن تقریبی نیرو بعد از اولین نقطه نیروی بیشینه نشان از این دارد که سازه تغییر شکل یکنواختی داشته و نیرو به‌صورت تقریباً یکسانی توزیع شده است. برای سازه‌های ری‌اینترنت و لانه‌زنبوری، تمرکز نیرو فقط در یکی از ردیف‌ها اتفاق می‌افتد و این سبب صعود و نزول قابل توجه میزان نیرو در نمودار می‌شود (نمودارهای ۲ و ۵) و همان طور که در نمودارهای ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود، برای سازه‌های سرنیزه‌ای و آنتی‌تتراکایرال چنین روندی اتفاق نمی‌افتد. علت این امر نیز آن است که این دو سازه به سمت داخل خود فرو می‌ریزند و این سبب می‌شود که سازه بتواند بار اعمالی را تحمل کند تا جایی که به حالت تراکم و چگال شدن برسد. یکی از مهم‌ترین عوامل که سبب تمایز بین سازه‌های مشبک مختلف می‌شود، ظرفیت جذب انرژی سازه است که به‌خصوص برای کاربردهایی که وزن سازه محدودیت دارد، اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. مجموع انرژی جذب شده توسط هر سازه تحت آزمایش فشار برای همه نمونه‌ها محاسبه شد. مجموع جذب انرژی سازه با انتگرال‌گیری از منحنی نیرو-جابجایی محاسبه می‌شود. در واقع سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی برابر جذب انرژی کل است؛ اما جذب انرژی سازه‌ها به‌تنهایی نمی‌تواند معیار خوبی برای مقایسه باشد. برای در نظر گرفتن وزن سازه، متغیری به نام جذب انرژی ویژه تعریف می‌شود که مقادیر آن از تقسیم جذب انرژی کل سازه بر وزن سازه به‌دست می‌آید. برای یکسان شدن شرایط مقایسه بین سازه‌ها، سطح زیر نمودارها تا میزان جابجایی ۲۵ میلی‌متر (معادل کاهش ارتفاع تقریباً ۵۰ درصدی) برای محاسبه جذب انرژی در نظر گرفته شده است. مقادیر جذب انرژی و جذب انرژی ویژه سازه‌ها به‌ترتیب در نمودارهای ۷ و ۸ آمده است.

همان طور که از نمودار ۷ مشخص است، جذب انرژی هر سه سازه آگزتیک از سازه غیرآگزتیک لانه‌زنبوری بیشتر است. بیشترین میزان جذب انرژی متعلق به سازه سرنیزه‌ای است که در مقایسه با سازه لانه‌زنبوری، جذب انرژی آن ۱۶٪ بیشتر است و این نشان از عملکرد فوق‌العاده سازه‌های آگزتیک در جذب انرژی دارد. همچنین جذب انرژی سازه سرنیزه‌ای به‌ترتیب ۶۶٪ و ۱۰٪ نسبت به سازه‌های ری‌اینترنت و آنتی‌تتراکایرال بیشتر است. همان طور که از



شکل ۹) شکل تغییر یافته سازه‌ها تحت فشار در آزمایش فشار تک‌محوره و شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، خواص فشاری سازه‌های آگزتیک ری‌اینترنت، سرنیزه‌ای، آنتی‌تتراکایرال و سازه غیرآگزتیک لانه‌زنبوری مورد بررسی و بحث قرار گرفت. ساخت نمونه برای همه مدل‌های گفته شده توسط یک فرآیند ساخت افزایشی (چاپ ۳بعدی) به روش لایه نشانی مذاب انجام گرفت و نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده روی نمونه‌ها با نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود، مقایسه شد. سازه سرنیزه‌ای و سازه آنتی‌تتراکایرال عملکرد فوق‌العاده‌ای در جذب انرژی در بارگذاری فشاری تک‌محوره داخل صفحه از خود نشان دادند. سازه‌های آگزتیک سرنیزه‌ای، آنتی‌تتراکایرال و ری‌اینترنت به ترتیب ۱۶۱، ۱۳۶ و ۵۷٪ جذب انرژی بیشتر نسبت به سازه غیرآگزتیک لانه‌زنبوری از خود نشان دادند. از لحاظ جذب انرژی ویژه نیز سازه‌های آنتی‌تتراکایرال و سرنیزه‌ای بهترین عملکرد را داشتند و سازه لانه‌زنبوری ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان داد. همین موضوع نشان‌دهنده آن است که سازه‌های آگزتیک، گزینه خوبی برای جایگزینی به جای سازه‌های موجود در جاذب‌های انرژی و محافظت‌کننده‌های ضدضربه هستند. مطالعات آتی می‌توانند در مورد اثر تغییر طول اضلاع عمودی و افقی و نیز اثر ضخامت بر جذب انرژی باشند.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: میلاد نجفی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ حامد احمدی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ غلامحسین لیاقت (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)

منابع مالی: تمامی هزینه‌های این پژوهش از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس تامین شده است.

علائم

F: نیرو

MPa: مگاپاسکال

E: کرنش مهندسی

h: طول ضلع عمودی سلول واحد

l: طول ضلع مورب سلول واحد

α : زاویه ضلع مورب با افق

t: ضخامت اضلاع سلول واحد

a: طول ضلع مربع موجود در سازه آنتی‌تتراکایرال

g: گرم

cm: سانتی‌متر

منابع

1- Vinson J. The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials. New York: Routledge; 2018.

- 2- Gibson LJ, Ashby MF. Cellular solids: Structure and properties. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.
- 3- Yazdani Sarvestani H, Akbarzadeh AH, Niknam H, Hermenean K. 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. Composite Structures. 2018;200:886-909.
- 4- Ju J, Summers JD. Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain. Materials & Design. 2011;32(2):512-524.
- 5- Beharic A, Egui RR, Yang L. Drop-weight impact characteristics of additively manufactured sandwich structures with different cellular designs. Materials & Design. 2018;145:122-134.
- 6- Ingrole A, Hao A, Liang R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. Materials & Design. 2017;117:72-83.
- 7- Mir M, Najabat Ali M, Sami J, Ansari U. Review of mechanics and applications of auxetic structures. Advances in Materials Science and Engineering. 2014;2014:753496.
- 8- Ren X, Das R, Tran P, Ngo TD, Xie YM. Auxetic metamaterials and structures: A review. Smart Materials and Structures. 2018;27(2):023001.
- 9- Gibson LJ, Ashby MF, Schajer GS, Robertson CI. The mechanics of two-dimensional cellular materials. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. 1982;382(1782):25-42.
- 10- Lakes R. Foam structures with a negative Poisson's ratio. Science. 1987;235(4792):1038-1041.
- 11- Evans KE, Nkansah MA, Hutchinson IJ, Rogers SC. Molecular network design. Nature. 1991;353(6340):124-125.
- 12- Rafsanjani A, Pasini D. Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs. Extreme Mechanics Letters. 2016;9:291-296.
- 13- Alderson A, Alderson KL. Auxetic materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2007;221(4):565-575.
- 14- Imbalzano G, Linforth S, Ngo TD, Lee PV, Tran P. Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs. Composite Structures. 2018;183:242-261.
- 15- Evans KE. The design of doubly curved sandwich panels with honeycomb cores. Composite Structures. 1991;17(2):95-111.
- 16- Yang C, Vora HD, Chang Y. Behavior of auxetic structures under compression and impact forces. Smart Materials and Structures. 2018;27(2):025012.
- 17- Safikhani Nasim M, Etemadi E. Three dimensional modeling of warp and woof periodic auxetic cellular structure. International Journal of Mechanical Sciences. 2018;136:475-481.
- 18- Hamzehei R, Kadkhodapour J, Pourkamali Anaraki A, Rezaei S, Dariushi S, Rezadoust AM. Octagonal auxetic metamaterials with hyperelastic properties for large compressive deformation. International Journal of Mechanical Sciences. 2018;145:96-105.
- 19- Zhang XC, Ding HM, An LQ, Wang XL. Numerical investigation on dynamic crushing behavior of auxetic honeycombs with various cell-wall angles. Advances in Mechanical Engineering. 2015;7(2):679678.