



## طراحی و ساخت یک فراماده سه‌بعدی با ساختار ری-انترنت تولید شده به روش پرینت سه بعدی به عنوان جاذب انرژی

رزگار حسن‌زاده<sup>۱\*</sup>، محمد مهدی اشرفیان<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۵ مرداد ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۳ آذر ۱۴۰۴

#### کلیدواژگان:

فرامواد

جذب انرژی

ری-انترنت

پرینت سه‌بعدی

فرود فضایی

فرود ایمن محموله، به‌ویژه در شرایط برخورد با سرعت بالا، یکی از چالش‌های مهم در مأموریت‌های فضایی است. جذب انرژی برخورد، به‌ویژه برای محموله‌های سرنشین‌دار و زیستی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف این مطالعه، طراحی و ارزیابی یک ساختار متامتریال سه‌بعدی بر پایه سلول واحد تورفته دوبعدی به‌عنوان جاذب انرژی مؤثر در مرحله فرود مأموریت‌های فضایی است. یک ساختار متامتریال استوانه‌ای سه‌بعدی نوین با چرخاندن سلول‌های واحد تورفته دوبعدی حول یک محور عمودی مرکزی طراحی شد. برای ساخت نمونه‌ها با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی از دو ماده استفاده گردید: پلی‌پورتان ترموپلاستیک برای ساختارهای دوبعدی و پلی‌لاکتیک اسید برای ساختارهای سه‌بعدی. آزمون‌های فشاری شبه‌استاتیک بر روی نمونه‌های سه‌بعدی انجام شد تا رفتار مکانیکی و عملکرد جذب انرژی آن‌ها ارزیابی شود. نتایج نشان می‌دهند که ساختار فراماده سه‌بعدی پیشنهادی قادر است که انرژی برخورد را به میزان ۱۴۸/۳۹ ژول جذب کند و جذب انرژی ویژه‌ای معادل ۲/۲۳۲ کیلوژول بر کیلوگرم ارائه دهد. بنابراین ساختار توسعه داده شده، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای از دیگر ساختارهای مشابه در تحقیقات پیشین، عملکرد بهتری را نشان داده است. ساختار پیشنهادی متامتریال سه‌بعدی که با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی و بر پایه طراحی سلول واحد تورفته چرخان ساخته شده است، عملکرد بسیار مطلوبی در جذب انرژی دارد. مقدار بالای جذب انرژی ویژه و وزن سبک آن، این ساختار را به گزینه‌ای مناسب برای به‌کارگیری در سیستم‌های کاهش ضربه محموله‌های فضایی تبدیل می‌کند و پتانسیل بالایی برای کاربردهای آینده در حوزه هوافضا دارد.

## Designing and manufacturing a Three-Dimensional metamaterial with re-entrant structure produced by 3D printing for energy absorption

Rezgar Hasanzadeh<sup>1\*</sup>, Mohammad Mahdi Ashrafian<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

\* Corresponding Author's Email: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 16 August 2025

Accepted: 14 December 2025

#### Keywords:

Metamaterials

Energy Absorption

Re-entrant

3D Printing

Space Loading

### Abstract

Ensuring effective energy absorption is especially critical for crewed missions and biological payloads. This study aims to design and evaluate a three-dimensional (3D) metamaterial structure, derived from a two-dimensional (2D) re-entrant unit cell, as an efficient energy absorber during the landing phase of space missions. The primary objective is to develop a lightweight structure with enhanced energy absorption capacity, suitable for integration into space systems. A novel 3D cylindrical metamaterial was developed by rotating 2D re-entrant unit cells around a central vertical axis. Two materials were used for sample fabrication: thermoplastic polyurethane (TPU) for the 2D structures and polylactic acid (PLA) for the 3D structures. All samples were produced using fused filament fabrication (FFF) 3D printing technology. Quasi-static compression tests were performed on the 3D samples to assess their mechanical behavior and energy absorption performance. Force-displacement data were recorded and analyzed to determine the energy absorption metrics. The 3D metamaterial structure demonstrated superior energy absorption capabilities. It was able to absorb a total of 148.39 J of energy and exhibited a specific energy absorption (SEA) of 2.232 kJ/kg. These values significantly surpass those reported in previous studies for comparable structures, indicating the effectiveness of the new design. The proposed 3D metamaterial structure, fabricated via FFF 3D printing and based on a rotated re-entrant unit cell design, exhibits excellent energy absorption performance. Its high SEA and lightweight configuration make it a strong candidate for use in the impact mitigation systems of space payloads, offering promising potential for future space applications.

### Please cite this article using:

Hasanzadeh R, Ashrafian MM. Designing and manufacturing a Three-Dimensional metamaterial with re-entrant structure produced by 3D printing for energy absorption. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Oct 23;12(8):71-81. doi: 10.22034/ijme.2025.541696.2122 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

نیاز به جذب انرژی در فرایند فرود و بازگشت محموله‌های فضایی به‌ویژه برای محموله‌های سرنشین‌دار و زیستی امری حیاتی است. هنگام بازگشت به جو زمین، سرعت وسیله فضایی از حدود هزاران مایل بر ساعت به سرعتی بسیار پایین‌تر، معادل چند فوت بر ثانیه، کاهش می‌یابد. این کاهش سریع سرعت باعث ایجاد مقادیر زیادی انرژی جنبشی می‌شود که باید به طور موثر جذب یا تلف شود تا از آسیب به محموله و تجهیزات جلوگیری گردد. فرایندهای فرود و بازگشت می‌توانند بر روی انواع مختلف بسترهای نرم و سخت مانند خاک، سنگ ریزه، ماسه و حتی سطح آب صورت بگیرند و هر یک از این سطوح، چالش‌های خاص خود را در جذب انرژی برخورد دارند. بنابراین، استفاده از سازوکارهای موثر و کارآمد برای جذب این انرژی‌های عظیم ضروری است تا فرود و بازگشت ایمن و موفقیت‌آمیز محموله‌ها امکان‌پذیر شود.

در دهه‌های گذشته، برای کاهش انرژی برخورد در فرایند فرود و بازگشت محموله‌های فضایی از روش‌های مختلفی همچون کیسه‌های هوا استفاده شده است. این سیستم‌ها به‌عنوان راهکارهای فعال در جذب انرژی عمل می‌کنند و از طریق کاهش سرعت وسیله فضایی، ایمنی فرود را تضمین می‌کنند [۱]. با این حال، این روش‌ها معمولاً نیاز به منابع انرژی خارجی و تجهیزات پیچیده دارند. در کنار این سازوکارهای فعال، استفاده از سیستم‌های کنش‌پذیر مانند مواد جاذب انرژی و سازه‌های تخریب‌شونده، به‌ویژه فوم‌ها [۲] و ساختارهای لانه زنبوری [۳]، به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این سیستم‌ها به‌طور خودکار انرژی برخورد را جذب می‌کنند و شتاب انتقال‌یافته به بخش‌های حیاتی محموله را کاهش می‌دهند. استفاده از چنین سیستم‌هایی باعث افزایش ضریب ایمنی فرود و بازگشت محموله‌ها شده و نیاز به تجهیزات فعال را کاهش می‌دهد.

یکی از جدیدترین و نوآورانه‌ترین سازوکارها برای جذب انرژی‌های ناشی از برخورد، استفاده از فرامواد است [۴، ۵]. فرامواد به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی متفاوت از مواد معمولی است [۶]. این ویژگی‌ها به آن‌ها اجازه می‌دهد که در هنگام برخورد، بیش‌ترین مقدار انرژی را جذب یا تلف کنند و در عین حال وزن کمی داشته باشند که ویژگی اخیر برای کاربردهای فضایی ضروری است. در فرایند فرود محموله‌های فضایی، فرامواد می‌توانند به‌طور موثری انرژی برخورد را جذب کرده و از آسیب به محموله جلوگیری کنند، بدون آنکه به طور محسوسی به حجم یا وزن وسیله فضایی افزوده شود. طراحی این فرامواد به‌ویژه برای جذب انرژی در شرایطی که سرعت برخورد بسیار بالا است، بسیار مهم است. به این ترتیب، استفاده از فرامواد به‌عنوان یک راه‌حل کارآمد و سبک در جذب انرژی‌های ناشی از برخورد، روز به روز در حال گسترش و کاربرد بیشتر در حوزه فضایی است.

یکی از انواع فرامواد پیشنهادی برای کاربردهای جذب انرژی، ساختارهای آگزتیک هستند. آگزتیک به ساختارهایی اطلاق می‌شود که هنگام کشش برخلاف بیشتر مواد معمولی، به جای کاهش ابعاد در جهت عمود، در همان جهت نیز گسترش می‌یابند [۷، ۸]. این ویژگی به علت رفتار غیرمعمول شبکه‌های داخلی آنها است که در صورت اعمال کشش، خود را به شکلی خاص تغییر می‌دهند [۹]. مهم‌ترین ویژگی‌های این ساختارها شامل الاستیسیته بالا، تغییر شکل‌های پیچیده و توانایی جذب انرژی زیاد است [۱۰]. به خصوص در زمینه جذب انرژی، ساختارهای آگزتیک به دلیل امکان تغییر شکل‌های بزرگ و توزیع مناسب تنش، می‌توانند در کاربردهایی مانند حفاظت از آسیب و کاهش ضربه‌ها بسیار موثر باشند [۱۱، ۱۲].

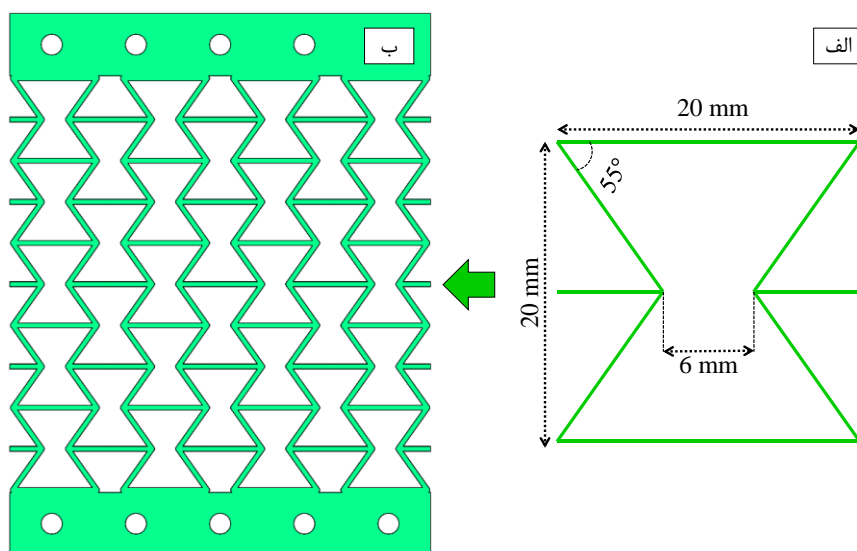
در پژوهش‌های سالیان اخیر، استفاده از ساختارهای شبکه‌ای آگزتیک به منظور جذب انرژی ناشی از بارگذاری‌های مختلف، بسیار مورد توجه بوده است. به طور مشخص می‌توان از شبکه دوبعدی ری-انترنت نام برد که با دارا بودن نسبت پواسون منفی، به عنوان جاذب انرژی‌های ناشی از بارگذاری فشار شبه استاتیک، پیشنهاد شده است [۱۳-۱۵]. عوامل مختلفی در کارایی جاذب‌های انرژی ری-انترنت تاثیرگذار است. از آن جمله می‌توان به جنس ماده، زاویه بین دیواره‌های سلول واحد، استفاده از الیاف یا فوم به عنوان تقویت کننده در ساختار آن‌ها و طراحی تغییرات ضخامت دیواره سلول‌های واحد اشاره نمود. ونگ و همکاران [۱۶] نشان داده‌اند که در صورت استفاده از ساختارهای شبکه‌ای در حالت سه‌بعدی، قابلیت جذب انرژی ویژه‌ی آن‌ها (مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم جاذب)، به طور محسوسی افزایش خواهد یافت. یکی از روش‌های سه‌بعدی نمودن ساختارهای شبکه‌ای دوبعدی، دوران آن‌ها حول یک محور است؛ به گونه‌ای که یک ساختار سه بعدی استوانه‌ای شکل با ساختار مشبک حاصل گردد [۱۷]. از این رو اخیراً ساختارهای شبکه‌ای سه‌بعدی گوناگونی به عنوان جاذب انرژی ناشی از ضربه/برخورد پیشنهاد شده است.

اهمیت و ضرورت تحقیق حاضر در توسعه فراماده سه بعدی برای جذب انرژی ناشی از فرود محموله‌های فضایی به ویژه در شرایط برخوردی با سرعت بالا، به طور چشمگیری در تأمین ایمنی و موفقیت مأموریت‌های فضایی مؤثر است. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در فرایند فرود و بازگشت محموله‌های فضایی، به خصوص محموله‌های زیستی، نیاز به سیستم‌های کارآمد برای جذب و تلف کردن انرژی برخورد امری ضروری است. در این راستا، نوآوری علمی پژوهش حاضر در معرفی یک روش جدید برای سه بعدی سازی شبکه ری-انترنت با استفاده از فرایند چرخش حول محور عمودی و ایجاد یک توپولوژی کاملاً متمایز است که مسیرهای انتقال بار، نحوه اتصال گره‌ها و مکانیسم‌های تخریب را نسبت به ساختارهای مشابه در پیشینه تغییر می‌دهد. همچنین نحوه استقرار سلسله مراتب هندسی در این ساختار با نمونه‌های مشابه متفاوت بوده و منجر به بهبود مکانیزم‌های جذب انرژی و تغییر شکل آگزتیک می‌شود. افزون بر این، نوآوری کاربردی تحقیق در توسعه و ارزیابی یک فراماده سبک وزن و قابل چاپ سه بعدی برای کاربردهای جذب انرژی در سامانه‌های فرود محموله‌های فضایی نهفته است که می‌تواند بدون نیاز به سازوکارهای فعال، انرژی‌های قابل توجه ناشی از برخورد را جذب کند. ساختار پیشنهادی، با جذب انرژی ویژه بالا و قابلیت تولید با فناوری چاپ سه بعدی، می‌تواند زمینه ساز توسعه جاذب‌های انرژی مؤثرتر و کم هزینه تر برای مأموریت‌های فضایی آینده باشد و خلأ علمی موجود در زمینه ارائه ساختارهای آگزتیک سه بعدی قابل چاپ با کارایی بالا در جذب انرژی را تا حد قابل توجهی برطرف کند.

## ۲- مواد و روش‌ها

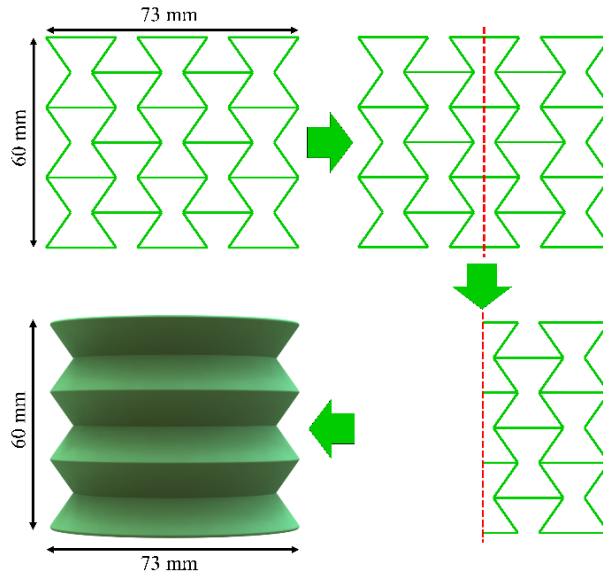
### ۲-۱- طراحی فراماده سه بعدی

فراماده سه بعدی طراحی و ساخته شده در تحقیق حاضر بر اساس ساختار دو بعدی شناخته شده ری-انترنت است و از دوران آن، ساختار سه بعدی حاصل شده است که به عنوان جاذب انرژی ناشی از فرود محموله‌های فضایی ارائه می‌شود. سلول واحد این ساختار دو بعدی ری-انترنت به همراه ابعاد و زوایای لازم برای طراحی آن (ابعاد و زوایا برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده‌اند)، در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین از بسط دادن این سلول واحد در راستاهای افقی و عمودی، ساختار دو بعدی آن نیز حاصل گردید که در شکل ۱ ارائه شده است. ضخامت جداره سلول‌ها،  $0.4$  میلی‌متر انتخاب گردید. شایان ذکر است که از این ساختار دو بعدی برای اندازه‌گیری نسبت پواسون و اثبات آگزتیک بودن رفتار آن استفاده شده است.



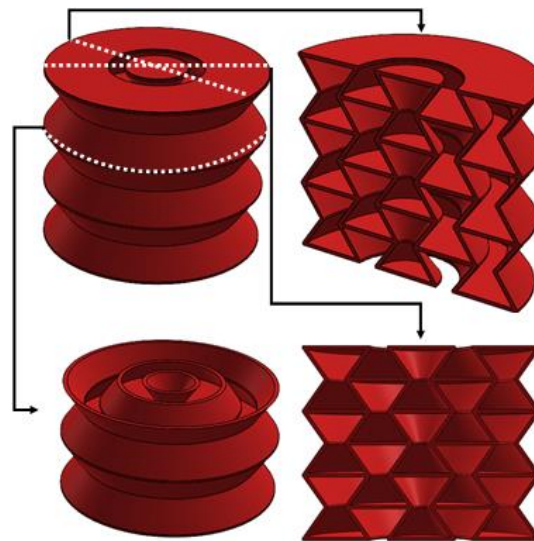
شکل ۱ الف) سلول واحد ری-انترنت در نظر گرفته شده و ب) ساختار دو بعدی بسط داده شده

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، با در نظر گرفتن سه سلول واحد ری-انترنت در کنار یکدیگر، ابعادی برابر با  $73$  میلی‌متر در  $60$  میلی‌متر حاصل می‌گردد. نصف این ساختار در راستای قائم حول محور قرمز رنگ دوران داده می‌شود، تا ساختار فراماده سه بعدی حاصل گردد که استوانه‌ای به قطر  $73$  میلی‌متر و ارتفاع  $60$  میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۲ نحوه دستیابی به ساختار فراماده سه‌بعدی با دوران ساختار دو بعدی ری-انترنت

هم چنین، قطعه سه‌بعدی طراحی شده همراه با سطوح مقاطع مختلف آن در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳ قطعه طراحی شده سه‌بعدی با سطوح مقاطع مختلف

## ۲-۲- مواد

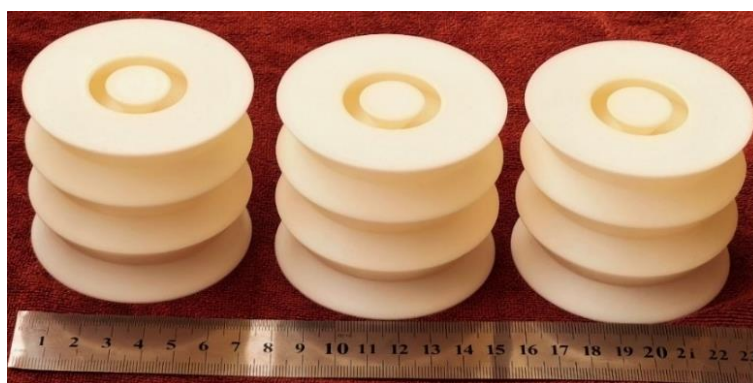
برای تولید نمونه‌ها، از دو نوع ماده مختلف استفاده شد. برای اندازه‌گیری نسبت‌های پواسون لازم بود تا نمونه‌های دو بعدی از شبکه ری-انترنت مورد ارزیابی قرار گیرند. به این منظور با استفاده از روش پرینت سه‌بعدی و فیلامنت‌های ترموپلاستیک پلی‌اورتان ساخت شرکت eSUN با نام تجاری TPU 95A، نمونه‌های دو بعدی تولید شدند. لازم به ذکر است که این ماده خاصیت شکل‌پذیری بالایی دارد و انتخاب مناسبی برای تولید قطعات به روش پرینت سه‌بعدی است. شایان ذکر است که درصد ازدیاد طول این فیلامنت ۸۰٪ گزارش شده است. از سوی دیگر، برای تولید نمونه‌های سه‌بعدی از فیلامنت پلی‌لاکتیک اسید با نام تجاری PLA+ ساخت شرکت eSUN بهره گرفته شد. دمای پرینت مناسب این فیلامنت در بازه‌ی ۲۱۰-۲۳۰ درجه سانتیگراد و دمای صفحه گرم در بازه‌ی ۴۵-۶۰ درجه سانتیگراد توسط شرکت سازنده گزارش شده است. چگالی این ماده ۱/۲۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و استحکام کششی آن ۶۰ مگاپاسکال و شاخص مذاب آن ۵ گرم در ۱۰ دقیقه (در دمای ۱۹۰ درجه سانتیگراد و با جرم ۲/۱۶ کیلوگرم) گزارش شده است.

## ۲-۳- ساخت با پرینت سه بعدی

در روند تولید نمونه ها، از پرینتر شرکت کرلیتی (Creality) مدل Ender-3 V3 Plus استفاده شد. از این رو، ابتدا نمونه ها در نرم افزار SolidWorks طراحی شدند و سپس با کمک نرم افزار Creality Print Slicer جی-کدهای مربوط به تولید نمونه ها استخراج شدند. برای تولید تمامی نمونه های دو بعدی و سه بعدی، تنظیمات دستگاه به صورت قطر نازل ۰/۴ میلی متر، ارتفاع لایه ۰/۲ میلی متر، سرعت فن خنک کاری ۱۰۰٪، چگالی پر شدن ۱۰۰٪، الگوی پر شدن خطی و دمای صفحه گرم ۶۰ درجه سانتیگراد اعمال گردید. به علاوه، برای تولید نمونه های دو بعدی از جنس پلی اورتان، دمای پرینت ۲۳۰ درجه سانتیگراد و سرعت پرینت ۵۰ میلی متر بر ثانیه تنظیم شد. حال آن که برای تولید نمونه های سه بعدی از جنس پلی لاکتیک اسید، از دمای پرینت ۲۲۰ درجه سانتیگراد و سرعت پرینت ۳۰۰ میلی متر بر ثانیه استفاده گردید. شکل ۴ نمونه تولید شده دو بعدی و شکل ۵ نمونه تولید شده سه بعدی را نشان می دهند. شایان ذکر است که از هر قطعه، ۳ نمونه تولید شد و میانگین نتایج مربوط به آزمون این ۳ نمونه به عنوان داده نهایی گزارش گردید.



شکل ۴ نمونه دو بعدی با ساختار ری-انترنت تولید شده به روش پرینت سه بعدی



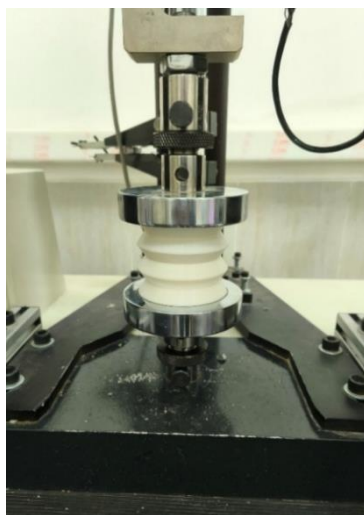
شکل ۵ نمونه با ساختار فراماده سه بعدی تولید شده به روش پرینت سه بعدی

## ۲-۴- بررسی خواص

جهت ارزیابی نسبت پواسون ساختار دو بعدی ری-انترنت، کرنش های طولی متفاوتی شامل ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ به نمونه های پرینت شده وارد شد و نسبت های پواسون آن ها اندازه گیری گردید. برای محاسبه نسبت های یاد شده از یک مکانیزم که توسط نویسندگان طراحی و ساخته شده است، بهره گرفته شد. جزئیات این مکانیزم همراه با تصاویر مربوطه در مرجع [۱۸] قرار دارد. این سیستم شامل

یک صفحه به عنوان پایه‌ای است که نمونه‌ها بر روی آن قرار می‌گیرند و با استفاده از پین‌های مخصوص، کرنش‌های مختلف به آن وارد می‌شود. پس از اعمال این کرنش‌ها، تغییرات عرض نمونه‌ها با استفاده از یک کولیس مدل ۱۱۰۸ از شرکت INSIZE Co, Ltd. با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و نسبت‌های پواسون محاسبه گردید.

در ادامه از آزمون فشار برای بررسی خواص مکانیکی و میزان جذب انرژی نمونه‌های سه بعدی طراحی شده استفاده گردید. این آزمون‌ها با به کارگیری دستگاه آزمون فشار ۲ تن شرکت سنتام STM-20 و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه، انجام گرفتند. شکل ۶ تصویر فراماده سه بعدی طراحی شده را زیر دستگاه فشار نشان می‌دهد.

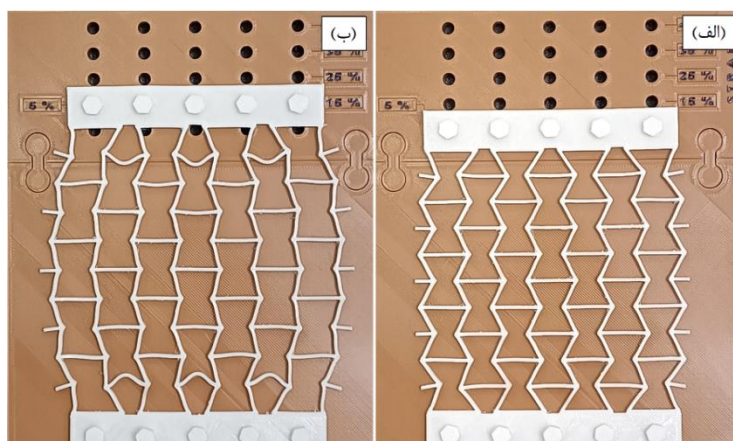


شکل ۶ نمونه با ساختار فراماده سه بعدی حین انجام آزمون فشار

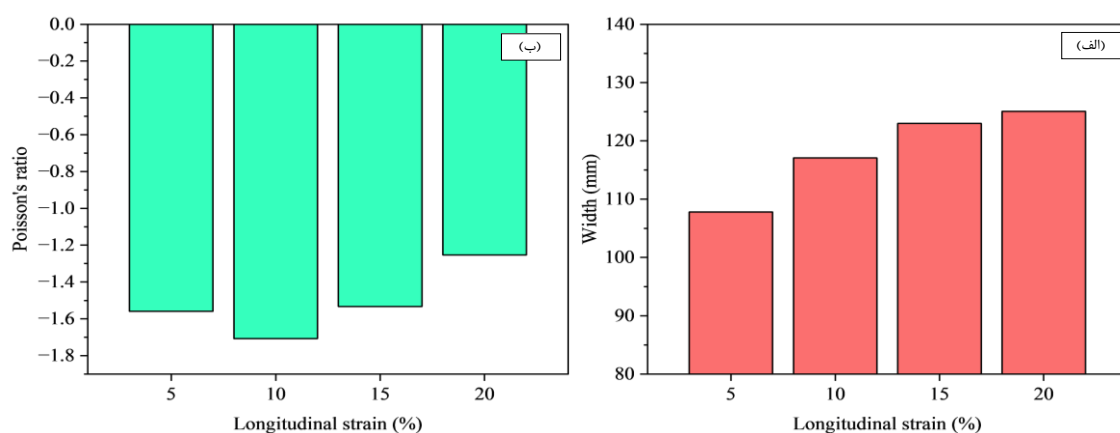
### ۳- نتایج و بحث

همانطور که قبلاً بیان شد، برای اندازه‌گیری نسبت‌های پواسون، کرنش‌های طولی به میزان ۰/۵٪، ۱/۱۰٪، ۱/۱۵٪ و ۲/۲۰٪ به نمونه‌های دو بعدی اعمال شد که شکل ۷ تصویر نمونه‌ها را پس از اعمال کرنش‌های طولی ۰/۵٪ و ۱/۱۵٪ نشان می‌دهد. بررسی شکل ظاهری این نمونه‌ها نشان می‌دهد که با اعمال کرنش‌های طولی، عرض نمونه‌ها افزایش یافته است که این مورد به ویژه در کرنش ۱/۱۵٪ به وضوح مشاهده می‌شود که حکایت از رفتار آگرتیک این ساختار دارد.

تغییرات عرضی نمونه‌های دو بعدی و نسبت‌های پواسون مربوط به آن‌ها در کرنش‌های طولی مختلف اندازه‌گیری و نتایج در شکل ۸ ارائه گردید. همانطور که نتایج نشان می‌دهد عرض نمونه‌ها در کرنش‌های طولی مختلف بیشتر از عرض اولیه (۱۰۰ میلی‌متر) می‌باشد که به معنی افزایش عرض نمونه‌هاست. با افزایش کرنش طولی، عرض نمونه‌ها بیشتر افزایش یافته است. همچنین، نتایج به دست آمده برای نسبت‌های پواسون نشان می‌دهد که در تمامی کرنش‌های طولی، نسبت‌های پواسون به دست آمده، منفی می‌باشند که رفتار آگرتیک این ساختار را به اثبات می‌رساند. شایان ذکر است که در کرنش طولی ۱/۱۰٪، حداکثر نسبت پواسون برابر با ۱/۷۱- حاصل شد. در مقایسه با نتایج تحقیقات پیشین، هدایتی و همکاران [۱۹] با تغییر زوایای داخلی ساختارهای ری-انترنت دو بعدی توانستند بازه گسترده‌ای از نسبت‌های پواسون را از ۰/۹۲- تا ۲/۵۷- بدست آورند که نسبت پواسون بدست آمده در تحقیق حاضر نیز تقریباً در وسط این بازه قرار می‌گیرد. همچنین لی و همکاران [۲۰] دو ساختار دو بعدی اصلاح شده را برای ساختار ری-انترنت مرسوم پیشنهاد دادند. ساختار ری-انترنت مرسوم ساخته شده در تحقیق ایشان دارای نسبت پواسون ۱/۴۲- بود که این مقدار در دو ساختار اصلاح شده به ۱/۱۲- و ۰/۵۸- رسید که در مقایسه با نسبت پواسون ساختار دو بعدی تحقیق حاضر، نسبت پواسون هر دو ساختار ری-انترنت مرسوم و ساختار اصلاح شده، کمتر از تحقیق حاضر بوده است. در تحقیق جین و همکاران [۲۱]، یک ساختار دو بعدی ری-انترنت ادغام شده با ساختار ستاره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها توانستند با تغییر پارامترهای ساختاری مختلف، بازه گسترده‌ای از نسبت‌های پواسون را از ۰/۳۶- تا ۰/۸- بدست آورند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نسبت‌های پواسون حاصل شده در تحقیق حاضر بیشتر از مقادیر بدست آمده در این تحقیق می‌باشد.



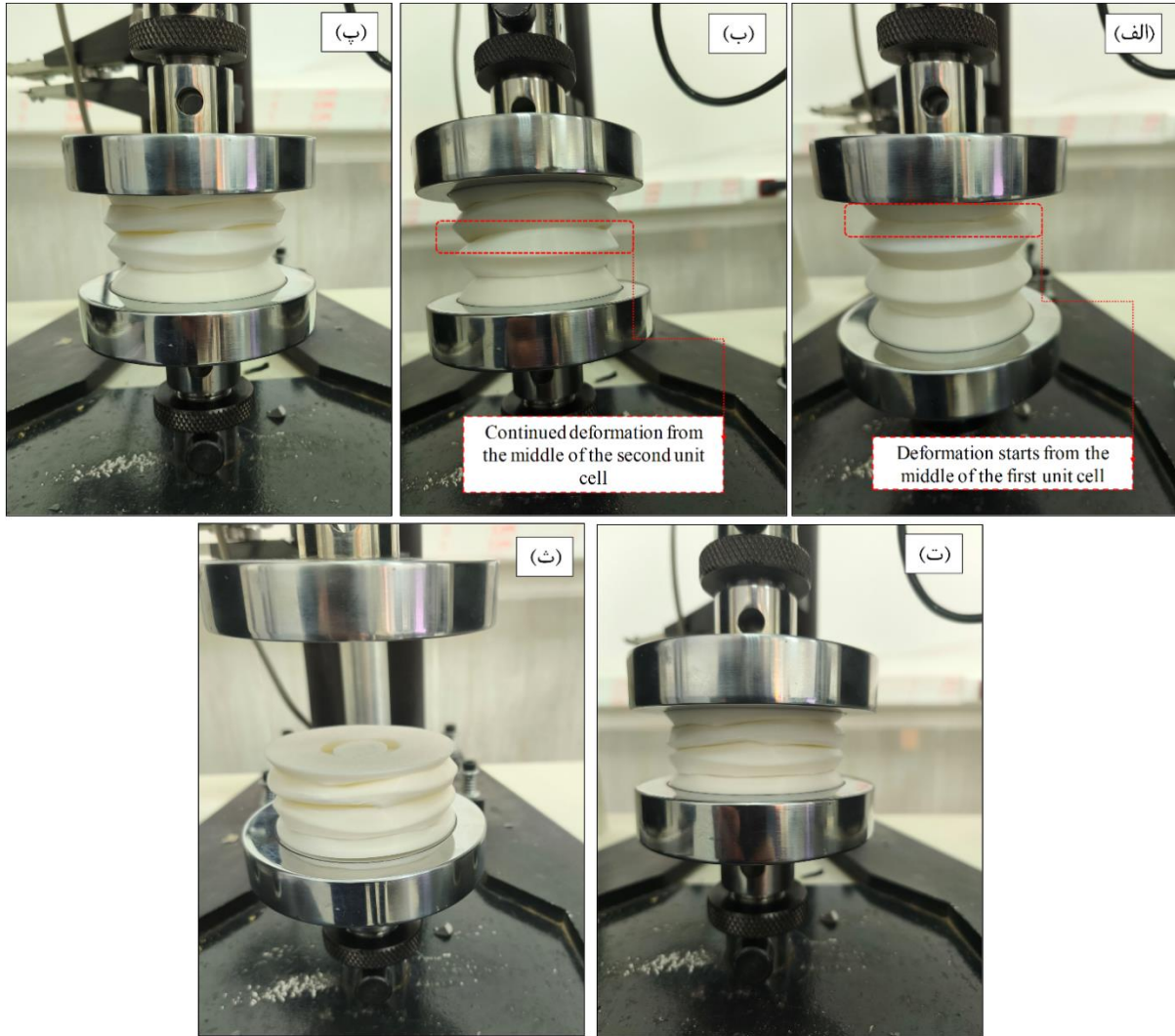
شکل ۷ تغییر شکل نمونه‌های دو بعدی با اعمال کرنش‌های طولی الف) ۵٪ و ب) ۱۵٪.



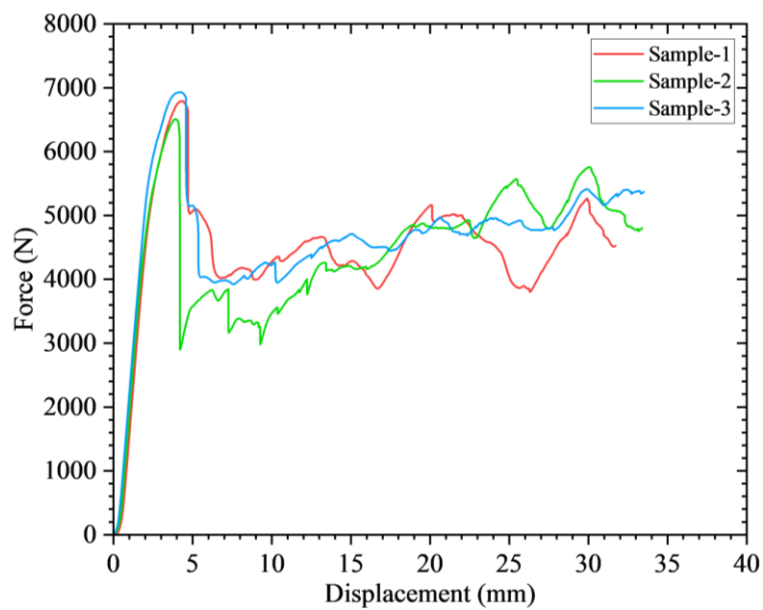
شکل ۸ نتایج مربوط به الف) تغییرات عرضی و ب) نسبت‌های پواسون نمونه‌های دو بعدی به ازای کرنش‌های طولی مختلف

در انتها، به منظور بررسی خواص مکانیکی و میزان جذب انرژی فراماده سه بعدی پیشنهادی در تحقیق حاضر، آزمون فشار بر روی نمونه‌ها مطابق با شکل ۹ صورت گرفت. همانطور که نشان داده شده است، شروع تغییر شکل نمونه‌ها پس از حدود ۵ میلی‌متر جابجایی فک بالایی و از وسط سلول واحد اول بود که با توجه به قطر کوچکتر نمونه در آن ناحیه و تغییر سطح مقطع ناگهانی در آن ناحیه، منطقی به نظر می‌رسد. پس از جابجایی فک بالایی به مقدار حدوداً ۱۵ میلی‌متر، دومین تغییر شکل محسوس و ظاهری قطعه، از وسط سلول واحد دوم شروع گردید. شایان ذکر است که تمامی نمونه‌ها جابجایی بیشتر از ۳۰ میلی‌متر را تجربه کردند که بیش از نصف ارتفاع نمونه‌ها (۶۰ میلی‌متر) بود. از دیدگاه طراحی، هر چه نسبت تغییر طول نمونه آزمون فشار قبل از شروع چگال شدن، به مقدار طول اولیه آن بیش‌تر باشد، عملکرد جذب انرژی بهتر است. مشاهده می‌شود که برای فراماده توسعه داده شده در این پژوهش، این مقدار همواره بالاتر از ۵۰٪ است که مقدار مطلوبی محسوب می‌شود.

نتایج نیرو-جابجایی مربوط به آزمون فشار برای هر سه نمونه با ساختار فراماده سه بعدی در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌ها، نیروی اولیه‌ی حداکثری در حدود ۷۰۰۰ نیوتون را تحمل کرده و جابجایی حدود ۳۵ میلی‌متر را تجربه می‌کنند. از این نتایج برای بررسی میزان جذب انرژی نمونه‌ها استفاده شد. مشاهده می‌شود که شیب ناحیه خطی اولیه برای هر سه نمونه تقریباً یکسان است. این واقعیت را می‌توان به منزله تاییدی بر صحت فرایند ساخت نمونه‌ها در نظر گرفت. به علاوه، از شکل ۱۰ می‌توان دریافت که نیروی وارده به هر سه نمونه، در طول بیش از ۲۵ میلی‌متر تغییر شکل پس از پایان ناحیه الاستیک خطی اولیه، در محدوده مشخصی نوسان داشته است. هر چه طول این ناحیه نوسان نیرو بزرگ‌تر باشد و مقادیر نوسان‌ها کم‌تر باشند، جذب قادر خواهد بود تا انرژی‌های ناشی از برخورد و فرود را به مقدار بیش‌تر و در زمان طولانی‌تری جذب کند و در نتیجه تکانه اولیه وارده به محموله فضایی به شدت کاهش خواهد یافت. مطابق شکل ۱۰، بهترین عملکرد از نظر طول ناحیه مذکور، برای نمونه-۳ قابل تشخیص است.



شکل ۹ تصاویر نمونه‌های با ساختار فراماده سه بعدی در آزمون فشار پس از الف) ۷ میلی‌متر جابجایی سنبه، ب) ۱۷ میلی‌متر جابجایی سنبه، ج) ۲۱ میلی‌متر جابجایی سنبه، د) ۳۲ میلی‌متر جابجایی سنبه و ه) پس از انجام آزمون فشار



شکل ۱۰ نتایج نیرو-جابجایی مربوط به آزمون فشار برای نمونه‌های با ساختار فراماده سه بعدی

نتایج بدست آمده از آزمون فشار شامل نیروی بیشینه اولیه (حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه)، انرژی جذب شده توسط نمونه و جذب انرژی ویژه (نسبت انرژی جذب شده به جرم نمونه)، در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که انحراف معیار نتایج بدست آمده بسیار پایین می‌باشد (کمتر از ۰.۵٪) که حکایت از دقت مطلوب نتایج بدست آمده دارد. مطابق نتایج بدست آمده، نیروی بیشینه اولیه نمونه‌ها، ۶۷۴۴/۷۰ نیوتون بود. همچنین نمونه با ساختار فراماده سه بعدی توانایی جذب انرژی به میزان ۱۴۸/۳۹ ژول را برای جذب انرژی ناشی از فرود محموله‌های فضایی دارد. با مقایسه این میزان جذب انرژی با تحقیق ینگ و همکاران [۱۷] مشخص شد که ساختار فراماده سه بعدی ارائه شده در تحقیق حاضر، عملکرد چشمگیری را در جذب انرژی از خود نشان داده است. در تحقیق ینگ و همکاران [۱۷]، یک ساختار ری-انترنت سه بعدی با استفاده از فولاد ساخته شد و رفتار جذب انرژی آن در آزمون فشار مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر انرژی جذب شده در نمونه‌های سه بعدی ایشان حدود ۱۸۰ ژول بود که با توجه به فولادی بودن نمونه تحقیق ایشان در مقایسه با نمونه‌های پلیمری تحقیق حاضر، نمونه‌های فراماده سه بعدی ارائه شده در تحقیق حاضر، عملکرد بسیار مطلوبی را از خود نشان داده‌اند. نتایج همچنین نشان دادند که جذب انرژی ویژه نمونه‌های با ساختار فراماده سه بعدی ۲/۲۳۲ کیلوژول بر کیلوگرم است. در مقایسه با تحقیقات دیگر، لوگاکانان و همکاران [۲۲] با استفاده از تکنیک مولتی-جت فیوژن نمونه‌های سه بعدی با ساختار ری-انترنت را از پلیمر پلی‌آمید ۱۲ تولید کردند و با تغییرات گسترده در پارامترهای هندسی به جذب انرژی ویژه ۸۹۲ ژول بر کیلوگرم رسیدند. شایان ذکر است که ایشان با کنترل پارامترهای هندسی به نسبت پواسون حداکثر ۱- دست یافتند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که ساختار فراماده سه بعدی ارائه شده در تحقیق حاضر بر اساس هندسه ری-انترنت در مقایسه با تحقیق لوگاکانان و همکاران [۲۲] هم نسبت پواسون بیشتر و هم جذب انرژی ویژه بالاتری ارائه داده است. همچنین ینگ و همکاران [۱۷] در بررسی جذب انرژی ویژه نمونه‌های سه بعدی ری-انترنت خود مشاهده کردند که جذب انرژی ویژه حدود ۳ کیلوژول بر کیلوگرم بود که با کنترل بهینه‌ی پارامترهای ساختاری توانستند مقدار آن را تا حدود ۱۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم بهبود دهند.

جدول ۱ عملکرد جذب انرژی نمونه‌های با ساختار فراماده سه بعدی در آزمون فشار

خروجی	نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۳	میانگین	انحراف معیار
نیروی بیشینه اولیه (نیوتون)	6792.40	6511.40	6930.30	6744.70	213.48
انرژی جذب شده (ژول)	141.05	147.71	156.41	148.39	7.70
جذب انرژی ویژه (کیلوژول بر کیلوگرم)	2.121	2.222	2.353	2.232	0.116

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ساختار فراماده سه بعدی مبتنی بر شبکه ری-انترنت طراحی و ارزیابی شد که هدف آن پیشنهاد برای جذب انرژی ناشی از برخورد در فرایند فرود محموله‌های فضایی بود. نتایج به دست آمده نشان داد که این ساختار قادر به جذب مقادیر بالای انرژی تحت بارگذاری‌های فشار است که می‌تواند به‌طور موثری در کاهش آسیب به محموله‌های فضایی و افزایش ایمنی در فرایندهای فرود و بازگشت کاربرد داشته باشد. با اندازه‌گیری نسبت‌های پواسون در نمونه‌های دو بعدی، مشخص شد که ساختار ری-انترنت رفتار آگزتیک از خود نشان می‌دهد که این ویژگی می‌تواند به جذب انرژی اضافی و کاهش اثرات برخورد کمک کند. این رفتار آگزتیک با مقایسه با تحقیقات پیشین تأیید شد و نشان داد که نسبت‌های پواسون در تحقیق حاضر در مقایسه با دیگر تحقیقات در بازه‌ای معقول قرار دارد. نتایج آزمون‌های فشار بر روی ساختار فراماده سه بعدی نشان داد که این ساختار قادر است انرژی‌های قابل توجهی را جذب کرده و در مقایسه با نمونه‌های مشابه از دیگر تحقیقات، عملکرد برتری از خود نشان دهد. میزان انرژی جذب شده توسط ساختار فراماده سه بعدی در حدود ۱۴۸/۳۹ ژول بود که این مقدار در مقایسه با سایر ساختارهای مشابه، قابل توجه است. علاوه بر این، جذب انرژی ویژه این ساختار برابر با ۲/۲۳۲ کیلوژول بر کیلوگرم بود. با توجه به مزایای قابل توجه این ساختار در جذب انرژی، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک گام مهم در جهت توسعه سیستم‌های جاذب انرژی برای کاربردهای فضایی در نظر گرفته شود. همچنین، استفاده از ساختارهای مشابه در پروژه‌های فضایی می‌تواند منجر به بهبود ایمنی و کاهش هزینه‌های مرتبط با فرود و بازگشت محموله‌های فضایی شود. در پژوهش‌های آتی تلاش خواهد شد تا با ارائه اصلاحات ساختاری در فراماده پیشنهادی، مقدار نیروی بیشینه تا حد

امکان به میانگین نیروی ناحیه نوسانی نزدیک گردد تا بتوان مقدار تکانه اولیه منتقل شده به محموله را در حین برخورد/ فرود نیز به نحو مطلوبی کنترل نمود. همچنین بررسی عملکرد دینامیکی و آزمون‌های ضربه‌ای برای سناریوهای فرود با سرعت بالا می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی باشد.

## منابع مالی/حمایت‌ها

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ط/پ/ص/۱۴۸۲ با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی کرمانشاه انجام شده است.

## References

- [1] Cadogan D, Sandy C, Grahne M. Development and evaluation of the mars pathfinder inflatable airbag landing system. *Acta Astronautica*. 2002 May 1;50(10):633-40. doi: 10.1016/S0094-5765(01)00215-6
- [2] Tomin M, Kmetty Á. Polymer foams as advanced energy absorbing materials for sports applications—A review. *Journal of Applied Polymer Science*. 2022 Mar 5;139(9):51714. doi: 10.1002/app.51714
- [3] Habib FN, Iovenitti P, Masood SH, Nikzad M. Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018 Feb;94(5):2369-80. doi: 10.1007/s00170-017-1037-z
- [4] Li QQ, He ZC, Li E. Dissipative multi-resonator acoustic metamaterials for impact force mitigation and collision energy absorption. *Acta Mechanica*. 2019 May 31;230(8):2905-35. doi: 10.1007/s00707-019-02437-4
- [5] Fancher R, Frankel I, Chin KC, Abi Ghanem M, MacNider B, Shannahan LS, Berry JF, Fermen-Coker M, Boydston AJ, Boechler N. Dependence of the kinetic energy absorption capacity of bistable mechanical metamaterials on impactor mass and velocity. *Extreme Mechanics Letters*. 2023 Sep 1;63:102044. doi: 10.1016/j.eml.2023.102044
- [6] Nian Y, Wan S, Wang X, Zhou P, Avcar M, Li M. Study on crashworthiness of nature-inspired functionally graded lattice metamaterials for bridge pier protection against ship collision. *Engineering Structures*. 2023 Feb 15;277:115404. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115404
- [7] Hasanzadeh R. Designing and manufacturing a novel polymeric hybrid auxetic structure using 3D printing method by combining arrow-head and missing rib structures. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Jan 20;11(11):67-76. doi: 10.22034/ijme.2024.487862.2025
- [8] Joseph A, Mahesh V, Harursampath D. On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: A review. *Advances in Manufacturing*. 2021 Sep;9(3):342-68. doi: 10.1007/s40436-021-00357-y
- [9] Ren X, Das R, Tran P, Ngo TD, Xie YM. Auxetic metamaterials and structures: a review. *Smart materials and structures*. 2018 Feb 1;27(2):023001. doi: 10.1088/1361-665X/aaa61c
- [10] Mir M, Ali MN, Sami J, Ansari U. Review of mechanics and applications of auxetic structures. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014;2014(1):753496. doi: 10.1155/2014/753496
- [11] Francisco MB, Pereira JL, Oliver GA, Roque da Silva LR, Cunha Jr SS, Gomes GF. A review on the energy absorption response and structural applications of auxetic structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022 Dec 14;29(27):5823-42. doi: 10.1080/15376494.2021.1966143
- [12] Aghazadeh S, Nosraty H, Mirdehghan SA. Comparison of energy absorption of composites reinforced with auxetic and non-auxetic weft-knitted fabrics. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 May 22;12(3):24-9. doi: 10.22034/ijme.2025.512820.2067
- [13] Qi C, Jiang F, Remennikov A, Pei LZ, Liu J, Wang JS, Liao XW, Yang S. Quasi-static crushing behavior of novel re-entrant circular auxetic honeycombs. *Composites Part B: Engineering*. 2020 Sep 15;197:108117. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108117
- [14] Etemadi E, Hosseinabadi M, Taghizadeh M, Scarpa F, Hu H. Enhancing the energy absorption capability of auxetic metamaterials through auxetic cells within re-entrant circular units. *Engineering Structures*. 2024 Sep 15;315:118379. doi: 10.1016/j.engstruct.2024.118379
- [15] Zhang J, Lu G. Energy absorption of re-entrant honeycombs in tension and compression. *Engineering Structures*. 2023 Aug 1;288:116237. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116237
- [16] Wang S, Deng C, Ojo O, Akinrinlola B, Kozub J, Wu N. Design and modeling of a novel three dimensional auxetic reentrant honeycomb structure for energy absorption. *Composite Structures*. 2022 Jan 15;280:114882. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114882
- [17] Teng XC, Ren X, Zhang Y, Jiang W, Pan Y, Zhang XG, Zhang XY, Xie YM. A simple 3D re-entrant auxetic metamaterial with enhanced energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022 Sep 1;229:107524. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107524

- [18] Mojaver M, Azdast T, Hasanzadeh R. An experimental and numerical study on an innovative metastructure for 3D printed thermoplastic polyurethane with auxetic performance. *Polymers for Advanced Technologies*. 2024 Feb;35(2):e6298. doi: [10.1002/pat.6298](https://doi.org/10.1002/pat.6298)
- [19] Hedayati R, Yousefi A, Dezaki ML, Bodaghi M. Analytical relationships for 2D Re-entrant auxetic metamaterials: An application to 3D printing flexible implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2023 Jul 1;143:105938. doi: [10.1016/j.jmbbm.2023.105938](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105938)
- [20] Li D, Yin J, Dong L, Lakes RS. Strong re-entrant cellular structures with negative Poisson's ratio. *Journal of Materials Science*. 2018 Mar;53(5):3493-9. doi: [10.1007/s10853-017-1809-8](https://doi.org/10.1007/s10853-017-1809-8)
- [21] Jin YT, Qie YH, Li NN, Li NW. Study on elastic mechanical properties of novel 2D negative Poisson's ratio structure: Re-entrant hexagon nested with star-shaped structure. *Composite Structures*. 2022 Dec 1;301:116065. doi: [10.1016/j.compstruct.2022.116065](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116065)
- [22] Logakannan KP, Ramachandran V, Rengaswamy J, Ruan D. Dynamic performance of a 3D re-entrant structure. *Mechanics of Materials*. 2020 Sep 1;148:103503. doi: [10.1016/j.mechmat.2020.103503](https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103503)