DOI: 10.30511/jmms.2026.2096456.1071 - ISSN: 3060-8384 - Vol 2(3), 2026

MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: http://jmss.qut.ac.ir/

QOM UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Numerical Analysis of the Energy Absorption Performance of Modified Chiral Structures under Compressive Loading

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Mahdi mardani [1*], Erfan taherkhani[2], Mohammad reza Parsaeiyan[3]

[1] Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills, Tehran, Iran
mehdimardani20457@gmail.com
[2] M.Sc. in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Applied Design Major, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
erfan.taherkhani2128@gmail.com
[3] PhD Student in Mechanical Engineering (Applied Design), Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.
m.r.parsaeiyan@gmail.com

**** Correspondence***
Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills, Tehran, Iran.
mehdimardani20457@gmail.com

Article History
Received: August 2, 2026
Accepted: October 10, 2026
ePublished: October 26, 2026

ABSTRACT

Auxetic structures have attracted considerable attention due to their unique mechanical response, stable deformation behavior, and high energy absorption capacity. This study investigates the quasi-static in-plane compressive performance of a base chiral structure and its innovative modified configurations. The mechanical properties of PLA+ were first determined through tensile testing of FDM-printed standard specimens. Three-dimensional models were then developed in SolidWorks and numerically analyzed in Abaqus. To enhance energy absorption performance, six novel geometrical configurations, including square-reinforced, central-reinforced, arched, rhombic, circular, and cross-shaped designs, were evaluated against the base structure. The results showed that the normalized specific energy absorption (SEA) values for the base, square, central-reinforced, arched, rhombic, circular, and cross-shaped structures were 22, 40.5, 42, 38.6, 38.2, 44.2, and 39.7, respectively. Among the examined configurations, the circular structure exhibited the best overall performance, achieving the highest SEA and the maximum mean crushing force (MCF) of 0.57, while the square configuration showed the lowest peak crushing force (PCF). These findings demonstrate that the proposed geometric modifications provide an effective strategy for simultaneously improving SEA and PCF in chiral auxetic structures.

Keywords: Chiral structures, Specific energy absorption, Finite element analysis, 3D printing (FDM), Geometric optimization.

تحلیل عددی عملکرد جذب انرژی ساختارهای کایرال اصلاح‌شده تحت بارگذاری فشاری

۱- مهدی مردانی*

هیات علمی،گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲-عرفان طاهرخانی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک،دانشکده فنی مهندسی، گرایش طراحی کاربردی دانشگاه بو علی سینا،همدان، ایران

۲-محمد رضا پارساییان

دانشجو دکتری مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی، دانشگاه بو علی سینا، همدان، ایران

چکیده

ساختارهای آگزتیک به‌دلیل رفتار مکانیکی ویژه، تغییرشکل پایدار و ظرفیت بالای جذب انرژی، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. در این پژوهش، پاسخ فشاری شبه‌استاتیک درون‌صفحه‌ای یک ساختار کایرال پایه و پیکربندی‌های اصلاح‌شده نوآورانه آن بررسی شد. ابتدا خواص مکانیکی ماده +PLA از طریق آزمون کشش نمونه‌های چاپ سه‌بعدی FDM تعیین گردید. سپس مدل‌های سه‌بعدی در سالیدورکس ساخته و در آباکوس تحلیل عددی شدند. برای ارتقای عملکرد جذب انرژی، شش پیکربندی هندسی نوآورانه شامل تقویت چهارگوش، تقویت مرکزی، کمانی، لوزی، دایره‌ای و ضربدری نسبت به ساختار پایه ارزیابی شدند. نتایج نشان داد مقادیر SEA نرمال‌شده برای ساختار پایه، چهارگوش، تقویت مرکزی، کمانی، لوزی، دایره‌ای و ضربدری به‌ترتیب ۲۲، ۴۰/۵، ۴۲، ۳۸/۶، ۳۸/۲، ۴۴/۲ و ۳۹/۷ است. در میان پیکربندی‌های بررسی‌شده، ساختار دایره‌ای با بیشترین SEA و بالاترین MCF برابر با ۰/۵۷، بهترین عملکرد را از نظر جذب انرژی و پایداری تغییرشکل نشان داد؛ در حالی‌که ساختار چهارگوش کمترین PCF را ارائه کرد. این نتایج نشان می‌دهد که اصلاحات هندسی پیشنهادی، مسیر مؤثری برای بهینه‌سازی هم‌زمان SEA و PCF در ساختارهای کایرال فراهم می‌کنند.

کلید واژه‌ها

ساختارهای کایرال، جذب انرژی ویژه، تحلیل المان محدود، چاپ سه‌بعدی(FDM) ، بهینه‌سازی هندسی.

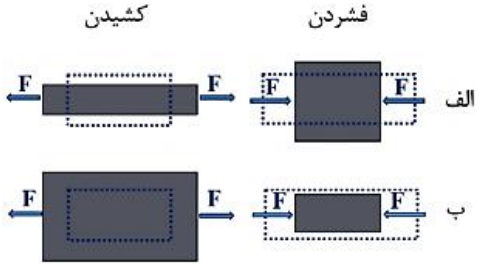
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵۰/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۸

* نویسنده مسئول: mehdimardani20457@gmail.com

۱ مقدمه

ساختارهای سلولی آگزتیک، به‌دلیل نسبت پواسون منفی و قابلیت بروز تغییرشکل‌های غیرمتعارف تحت بارگذاری مطابق شکل۱، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را در حوزه‌ی طراحی سازه‌های سبک‌وزن و جاذب انرژی به خود جلب کرده‌اند. در میان این ساختارها، هندسه‌های کایرال و نسخه‌های اصلاح‌شده‌ی آن‌ها به‌عنوان یکی از رویکردهای مهم در بهبود عملکرد مکانیکی مطرح شده‌اند. در این ساختارها، جایگزینی المان‌های مستقیم با المان‌های منحنی و اعمال تغییرات هدفمند در آرایش هندسی، می‌تواند موجب تغییر در مسیر انتقال بار، افزایش ظرفیت جذب انرژی، بهبود پایداری در برابر لهیدگی، و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در سراسر سازه شود[8–1] .



شکل ۱ الگوی تغییر شکل در بارگذاری فشاری و کششی ماده الف: غیر آگزتیک و ب: ماده آگزتیک[۷]

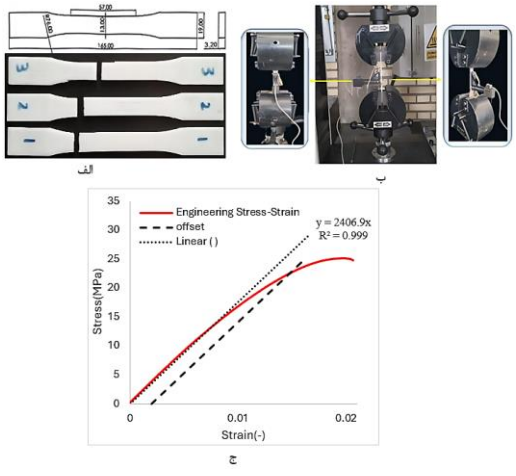
ساختارهای سلولی آگزتیک به‌واسطه‌ی نسبت پواسون منفی و قابلیت بروز تغییرشکل‌های غیرمتعارف، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را در زمینه‌ی طراحی سازه‌های سبک‌وزن و جاذب انرژی به خود جلب کرده‌اند. پژوهش‌های پیشین بر توسعه و بهینه‌سازی هندسه‌های مختلف این ساختارها متمرکز بوده‌اند. لیکس و همکاران [۹] نخستین بار مفاهیم بنیادی ساختارهای آگزتیک را با معرفی هندسه کایرال مطرح کردند؛ هندسه‌ای که در آن دیواره‌های سلولی به‌جای امتداد مستقیم، به سمت داخل متمایل هستند. این رویکرد، راه را برای توسعه هندسه‌های آگزتیک متنوعی از جمله چرخش صلب، ستاره‌ای، اوریگامی، کیریگامی و پیکانی هموار کرد که هر یک از طریق سازوکارهایی نظیر چرخش اعضا، خم‌شدن دیواره‌ها و تغییر آرایش اتصالات، رفتار پواسون منفی را ایجاد می‌کنند. لیو و همکاران [۱۰] با الهام از الگوهای ساختاری درخت نخل و بامبو، لوله‌های مربعی چندسلولی طراحی کردند و نشان دادند که تقسیم مقطع به سلول‌های متعدد می‌تواند پایداری تغییرشکل و ظرفیت جذب انرژی ویژه (SEA) را به‌مراتب بهبود بخشد. جیانگ و همکاران [۱۱] ساختار لانه‌زنبوری کایرال هم‌مرکز را معرفی کردند که به‌دلیل دارا بودن نواحی حلقوی متعدد و دیواره‌های فرورونده، پاسخ تغییرشکل متفاوتی نسبت به مدل‌های متداول داشت. نتایج آنان نشان داد که این معماری، از طریق فروپاشی تدریجی، مانع از تمرکز تنش شدید شده و توانایی بالایی در انباشت انرژی ناشی از بارگذاری ضربه‌ای دارد. هوانگ و شو [۱۲] نیز با طراحی لوله‌های چندسلولی زیست‌الهام‌گرفته از ساختار گرزکوب میگوی آخوندکی، نشان دادند که به‌کارگیری تقسیم‌بندی داخلی و آرایش هوشمندانه سلول‌ها، کنترل مکانیزم کمانش و توزیع یکنواخت بار را ممکن می‌سازد. در پژوهشی دیگر، ژانگ و همکاران [۱۳] با الگوبرداری از پوسته لاک‌پشت، ساختار لانه‌زنبوری کایرال قوسی‌شکل را توسعه دادند؛ در این طرح، جایگزینی اعضای مستقیم با دیواره‌های منحنی، مسیر انتقال نیرو را تغییر داده و پاسخ مکانیکی پایدارتر و ظرفیت جذب انرژی مناسب‌تری در برابر ضربه‌های درون‌صفحه‌ای ایجاد کرد. زو و همکاران [۱۴] با ارائه روشی نوین برای طراحی لوله‌های جدارنازک بر پایه معماری بامبو، تأکید کردند که تعبیه گره‌ها و بخش‌های تقویت‌شده، ضمن حفظ وزن کم، ناپایداری‌های موضعی را کاهش می‌دهد. یانگ و همکاران [۱۵] با بهینه‌سازی پارامترهای هندسی سلول واحد آگزتیک، از جمله ضخامت اعضا و زاویه دیواره‌ها، دسته جدیدی از فراماد مکانیکی را توسعه دادند و نشان دادند که بهینه‌سازی شکل می‌تواند ضمن حفظ ویژگی پواسون منفی، خواصی مانند سختی و جذب انرژی را به‌شدت تقویت کند. در حوزه تحلیل عددی، ژنگ و همکاران [۱۶] روش‌های مبتنی بر تحلیل حساسیت را برای پایدارسازی فرایند بهینه‌سازی تکاملی دوسویه به کار گرفتند که منجر به دستیابی به ساختارهای آگزتیک قابل‌اعتمادتر شد. نگوین و همکاران [۱۷] نیز با بهره‌گیری از تحلیل ایزوژئومتریک و کاهش مرتبه مدل، مسیر طراحی و ارزیابی فراماد آگزتیک سه‌بعدی را با کاهش هزینه محاسباتی تسهیل کردند. در نهایت، شو و همکاران [۱۸] با ترکیب سلول‌های کایرال و لانه‌زنبوری شش‌ضلعی، ساختار AuxHex را معرفی کردند که به دلیل هم‌افزایی قابلیت‌های تغییرشکل جانبی و پایداری هندسی، عملکرد مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی بالاتری نسبت به سلول‌های سازنده به‌صورت منفرد ارائه داد. در ادامه و در حوزه نوآوری نقی‌زاده و همکاران [۱۹] با تلفیق یک ساختار لانه‌زنبوری شش‌ضلعی مرسوم و پیکربندی بازگشت‌ور، یک ساختار ترکیبی با ضریب پواسون نزدیک به صفر توسعه دادند، نتایج مدل اجزای محدود اعتبارسنجی‌شده نشان داد که این ساختار در مقایسه با نمونه بازگشت‌ور سنتی، مدول یانگ و جذب انرژی ویژه بالاتری دارد. کریمی و همکاران [۲۰] روشی کم‌هزینه برای ساخت یکپارچه پنل‌های ساندویچی با چاپ هم‌زمان پوسته‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته و هسته گرمانرم ارائه کردند. نتایج آزمون ضربه کم‌سرعت با انرژی ۱۸ ژول نشان داد که نمونه‌های یکپارچه، در مقایسه با نمونه‌های چسبی و بدون الیاف، مقاومت ضربه‌ای و جذب انرژی بیشتری دارند. همچنین، کاهش چشمگیر قطر و عمق فرورفتگی در این نمونه‌ها، آسیب‌دیدگی کمتر و

عملکرد مکانیکی بهتر آن‌ها را نشان داد. قدوسی و همکاران [۲۱] ساختارهای لوله‌ای متامتریال الهام‌گرفته از الگوهای زیگزاگی طبیعی را با افزودن سخت‌کننده‌های محیطی بررسی کردند.آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی نشان داد که این سخت‌کننده‌ها با افزایش سختی و تغییر نسبت پواسون کلی، جذب انرژی و مدول مؤثر را بهبود می‌دهند. حاجی‌قاسمی و همکاران [۲۲] با بهره‌گیری از یک روش مبتنی بر هندسه، نوعی فراساختار هوشمند با سختی مؤثر متغیر طراحی کردند. نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش فشاری نمونه ساخته‌شده با روش مدل‌سازی رسوب ذوبی نشان داد که مدول یانگ مؤثر ساختار می‌تواند تا ۱۴۲ درصد افزایش یابد.

با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در طراحی فرامواد آگزتیک، هنوز فضای قابل‌توجهی برای ارتقای عملکرد در حوزه‌ی تلفیق هندسه‌های کایرال با تغییرات ساختاری هدفمند وجود دارد. اغلب مطالعات پیشین بر رفتار کلی ساختار یا جنبه‌های خاص بهینه‌سازی متمرکز بوده‌اند و تحلیل دقیق اثرات پارامترهای هندسی نوآورانه بر مکانیزم لهیدگی تدریجی و بیشینه‌سازی جذب انرژی ویژه (SEA) در ساختارهای بافت‌حلقه‌ای کایرال، خلأ پژوهشی محسوب می‌شود. مقاله حاضر با هدف پرکردن این شکاف، ساختارهای کایرال جدیدی را با اعمال تغییرات هندسی هدفمند معرفی و ارزیابی می‌کند. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک الگوی طراحی بهینه‌شده است که از طریق بازتنظیم پارامترهای هندسی (مانند ضخامت، شعاع انحنا و زاویه اتصال)، نه‌تنها پایداری سازه را در حین تغییرشکل‌های بزرگ افزایش می‌دهد، بلکه با کنترل مسیر انتقال تنش، منجر به بهبود چشمگیر ظرفیت جذب انرژی ویژه می‌گردد. این پژوهش از طریق شبیه‌سازی عددی پیشرفته، ارتباط میان این اصلاحات هندسی و عملکرد مکانیکی سازه را تحت بارگذاری فشاری استخراج کرده و نتایج را به‌عنوان راهکاری نوین برای کاربردهای مهندسیِ نیازمند جذب انرژی ارائه می‌دهد.

۲ تعیین خواص مکانیکی

پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) یک پلیمر زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر است که از منابع گیاهی مانند نشاسته ذرت و نیشکر تولید می‌شود. نسخه بهبودیافته آن، یعنی PLA+، با افزودنی‌های خاص تقویت شده است تا مقاومت مکانیکی و حرارتی بالاتری داشته باشد. دمای ذوب PLA+ معمولاً بین ۲۰۵ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد است که آن را برای چاپ سه‌بعدی ایده‌آل می‌کند. این ماده به‌دلیل خواص ارتقایافته، در تولید قطعات مهندسی با نیاز به تحمل فشار و دمای بیشتر کاربرد فراوانی دارد. همچنین، PLA+ به‌دلیل چاپ‌پذیری مناسب، پایداری نسبی خواص مکانیکی و امکان تولید نمونه‌هایی با دقت ابعادی قابل‌قبول، برای ساخت نمونه‌های این پژوهش انتخاب شد. برای تعیین خواص PLA+، آزمون کشش مطابق با استاندارد ۶۳۸ASTM-D انجام گرفت [23]. هندسه نمونه مطابق شکل (۲ب) و نمونه‌های مورد استفاده در این آزمون با استفاده از دستگاه سنتام موجود در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی‌سینا مطابق شکل (۲الف) مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل۲ آزمایش کشش PLA+ (الف) نمونه نصب شده در دستگاه Santam، (ب) سه نمونه استاندارد ، (ج) نمودار تنش-کرنش

همان‌طور که در شکل (۲ج) نشان داده شده است، خواص مکانیکی ماده‌ی PLA+ از طریق آزمون کشش تعیین گردید. به منظور

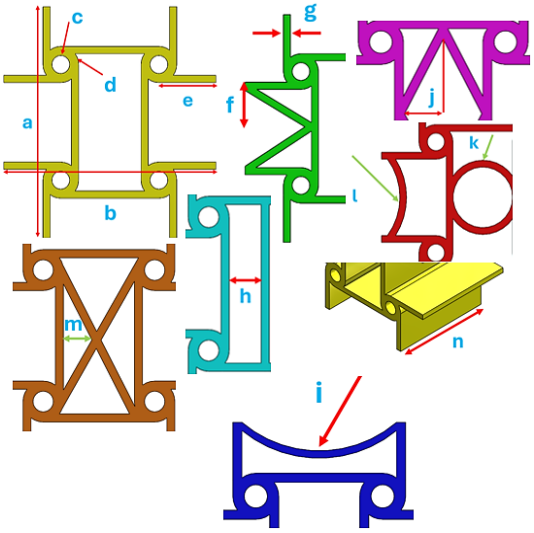
استخراج دقیق مدول یانگ و نقطه‌ی تسلیم، از روش افست ۰/۰۰۲ استفاده شد. در این روش، خطی موازی با بخش الاستیک خطیِ منحنی تنش-کرنش واقعی ترسیم گردید تا با منحنی مذکور تلاقی کند. نقطه‌ی تلاقی این دو خط، به‌عنوان تنش تسلیم در نظر گرفته شد و شیب خط موازی، مدول یانگ ماده را تعیین نمود. این مقادیر برای تعریف رفتار الاستیک و الاستیک-پلاستیک ماده در مدل‌سازی عددی به‌کار گرفته شدند.

جدول۱ خواص مکانیکی pla+

چگالی(kg/m̃) [24]	ضریب پواسون [24]	مدول یانگ(MPa)	تنش تسلیم (MPa)
1250	۰/۳	۲۴۰۶/۹	۲۲/۴۷

۲-۱ طراحی ساختار کایرال

در این پژوهش، مدل‌سازی هندسی ساختارهای شبکه‌ای آگزتیک با مبنای هندسه کایرال، با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks Premium 2017انجام شد. سپس، مدل‌های هندسی به محیط Abaqus/CAE 2017 منتقل شدند تا مدل اجزای محدود، شرایط مرزی، تماس‌های داخلی و شبیه‌سازی عددی رفتار فشاری آن‌ها تعریف شود. جزئیات سلول واحد، پارامترهای هندسی و آرایش نهایی شبکه در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳ هندسه سلول‌های واحد آگزتیک با مبنای کایرال و تغییرات هندسی اعمال‌شده

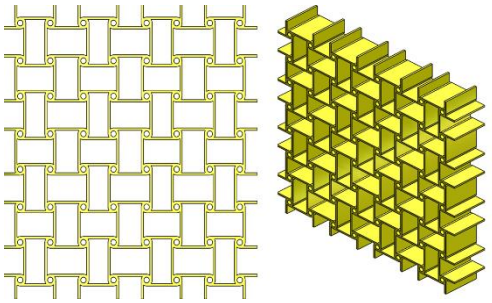
مراحل مدل‌سازی هندسی ساختار شبکه‌ای آگزتیک با هندسه کایرال به‌طور دقیق در نرم‌افزار سالیدورکس و مطابق با الگوهای اولیه نشان داده‌شده در شکل (۳) انجام پذیرفت. شبکه نهایی مورد مطالعه، از طریق تکرار منظم و پیوسته سلول‌های واحد طراحی‌شده شکل گرفته است. به منظور تضمین صحت مدل و امکان بازتولید، مقادیر دقیق کلیه پارامترهای هندسی تعیین‌کننده ابعاد سلول واحد و ساختار کلی، در جدول (۲) به‌صورت جامع ارائه شده است.

جدول۲ اندازه و ابعاد پاراکتر های هندسی ساختار های کایرال

پارامتر هندسی	نماد	اندازه
ارتفاع کلی ساختارها	a	۲۰(mm)
طول کلی ساختارها	b	۲۰(mm)
قطر دایره مرکزی کلی	c	۲ (mm)
قطر دایره بیرونی کلی	d	4 (mm)
طول اندازه بله های کوچیک کلی	e	۵ (mm)
عرض کلی ساختارها	n	۲۰(mm)
ارتفاع بالک های ساختار چهارگوش	f	۵ (mm)
ضخامت کلی همه ساختارها	g	3 (mm)
طول ستون ساختار تقویت مرکزی	h	۵ (mm)
قطر کمان ساختار کمانی	i	30(mm)
طول تیر ساختار لوزی	j	۵ (mm)
قطر دایره ساختار دایره ای	k	۱۰ (mm)
کمان ساختار دایره ای	l	30(mm)
طول ساختار ضربدری	m	۵ (mm)

۲-۲ طراحی ساختار پایه کایرال

بر مبنای پارامترهای ابعادی و هندسی دقیق ارائه‌شده در جدول ۲، فرآیند مدل‌سازی هندسی ساختار پایه کایرال انجام پذیرفت. مطابق با تصویر ارائه‌شده در شکل ۴، این ساختار شبکه‌ای از طریق تکرار منظم و پیوسته سلول‌های واحد در دو جهت اصلی شکل گرفته است که منجر به ایجاد یک هندسه‌ی تناوبی با پیوستگی ساختاری بالا می‌شود. تحلیل هندسی این پیکربندی نشان می‌دهد که اتصال گره‌های کایرال به دیواره‌های پیرامونی، مسیرهای انتقال نیروی هوشمندانه‌ای را ایجاد کرده است. در این آرایش، هر سلول واحد علاوه بر مدیریت بارگذاری‌های موضعی، از طریق تعامل با سلول‌های مجاور، در رفتار کلی شبکه مشارکت می‌کند. ویژگی کلیدی این طراحی، استفاده از انحناهای هندسی در محل گره‌ها است که ضمن حذف تمرکز تنش در زوایای تیز، امکان چرخش آزادانه‌ی اجزا و بازآرایی ساختاری را تحت فشار فراهم می‌آورد. این مکانیزم هندسی، عامل اصلی بروز رفتار آگزتیک و تسهیل لهیدگی تدریجی لایه‌ها در طول فرآیند فشردگی است.

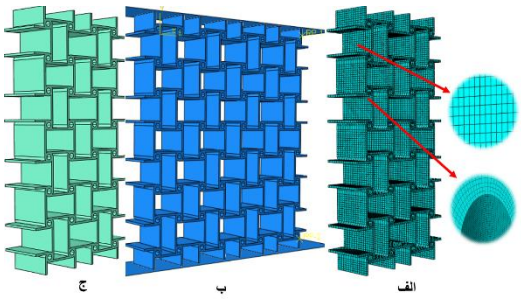


شکل ۴ مدل‌سازی هندسی ساختار آگزتیک پایه کایرال

۲-۳ شبیه سازی المان محدود

تحلیل عددی ساختارهای پیشنهادی با استفاده از روش اجزای محدود و در محیط نرم‌افزار اباکوس انجام شد. مدل‌های هندسی سه‌بعدی ابتدا در نرم‌افزار سالیدورکس ایجاد و سپس در قالب فایل STEPبه آباکوس منتقل شدند. پس از ورود هندسه به ماژول‌های پارت و مونتاژ، شرایط لازم برای شبیه‌سازی آزمون فشاری شبه‌استاتیک فراهم شد. در این راستا، فک‌های بالایی و پایینی به‌صورت سطوح صلب مدل‌سازی شدند تا شرایط مرزی آزمون با دقت مناسب بازتولید شود. با وجود آن‌که بارگذاری مورد مطالعه از نوع شبه‌استاتیک بود، از حلگر Dynamic Explicit استفاده شد. دلیل این انتخاب، وجود تغییرشکل‌های بزرگ، تماس‌های چندگانه، غیرخطی‌های هندسی قابل‌توجه و احتمال بروز مشکلات همگرایی در حلگرهای ضمنی بود. برای جلوگیری از ورود اثرات اینرسی و حفظ ماهیت شبه‌استاتیک پاسخ، بارگذاری به‌صورت جابجایی کنترل‌شده و با استفاده از تابع دامنه هموار و تدریجی اعمال شد تا از ایجاد نوسانات ناگهانی در ابتدای بارگذاری جلوگیری شود. علاوه بر این، در طول تحلیل، تاریخچه انرژی‌های مختلف مدل مورد پایش قرار گرفت و شبه‌استاتیکی بودن تحلیل از طریق ناچیز بودن انرژی جنبشی نسبت به انرژی داخلی در ادامه مورد تأیید قرار خواهد گرفت (مطابق شکل ۷ب). به‌منظور تعریف دقیق رفتار مکانیکی ماده در شبیه‌سازی، از مدل الاستیک-پلاستیک همسانگرد برای PLA+ استفاده شد. در این راستا، نتایج حاصل از آزمون کشش تجربی نمونه‌های دمبلی، مستقیماً به‌عنوان ورودی اصلی برای کالیبراسیون مدل عددی به کار گرفته شد. بدین صورت که خواص الاستیک (مدول یانگ) و رفتار پلاستیک (منحنی تنش-کرنش حقیقی) از آزمون کشش استخراج و به نرم‌افزار معرفی گردید تا دقت پاسخ سازه در برابر بارگذاری فشاری و محاسبه شاخص‌های جذب انرژی تضمین شود. لازم به ذکر است که با توجه به تمرکز پژوهش بر مرحله لهیدگی پایدار و استخراج شاخص‌هایی نظیر SEA وCFE ، در این سطح از تحلیل، رفتار ماده تا پیش از وقوع گسیختگی مدنظر بوده و از مدل‌های آسیب یا شکست المان صرف‌نظر شده است. همچنین به‌منظور پیش‌بینی شروع تسلیم، از معیار تسلیم ون میسزاستفاده شد که برای توصیف پاسخ همسانگرد ماده در این سطح از تحلیل مناسب است. این شیوه سبب شد که مدل عددی بر مشخصات واقعی ماده مصرفی در فرآیند ساخت استوار باشد و از اتکا به داده‌های عمومی موجود در منابع اجتناب شود. شرایط تماس بین نمونه و فک‌های بارگذاری با استفاده از تماس سطح-به-سطح تعریف شد. در راستای نرمال،

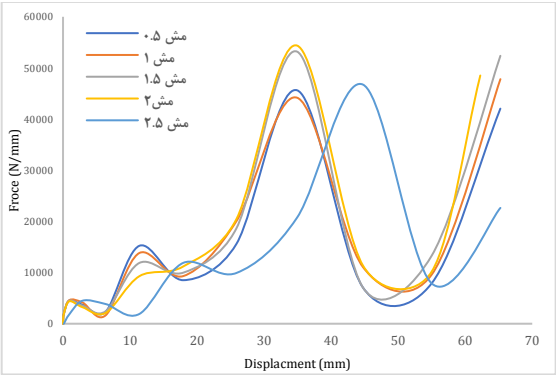
از General Contact برای جلوگیری از نفوذ غیرواقعی استفاده شد. این انتخاب با توجه به ماهیت آزمون و به‌منظور ایجاد تعادل میان واقع‌گرایی فیزیکی و پایداری عددی انجام شد. در اعمال شرایط مرزی، فک پایینی به‌طور کامل مقید شد، در حالی‌که برای فک بالایی تنها جابجایی در راستای محور بارگذاری مجاز بود. به‌منظور اعمال دقیق جابجایی و استخراج پاسخ سازه، برای هر فک یک نقطه مرجع تعریف شد و سطح صلب متناظر به آن کوپل گردید. سپس جابجایی تجویزی به نقطه مرجع فک بالایی اعمال و نیروی واکنش حاصل از همان نقطه برای استخراج منحنی نیرو-جابجایی ثبت شد .[21] به‌منظور افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی، فرآیند مدلسازی و اعتبارسنجی عددی با تکیه بر رویکردهای گزارش‌شده در مطالعه اشفق و همکاران. انجام شد؛ در این مرجع نیز خواص ماده ابتدا از آزمون‌های مکانیکی استخراج شده و سپس مدل اجزای محدود بر اساس داده‌های تجربی کالیبره و با نتایج آزمایش تطبیق داده شده است[25]. بر همین اساس، در پژوهش حاضر نیز به‌جای استفاده از خواص عمومی و کتابخانه‌ای ماده، خواص مکانیکی مستقیماً از آزمون کشش نمونه های دمبلی چاپ‌شده به‌دست آمد و به‌عنوان ورودی مدل عددی مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد سبب شد رفتار واقعی ماده تولیدشده، شامل پاسخ مکانیکی ناشی از شرایط ساخت و چاپ، با دقت بیشتری در شبیه‌سازی لحاظ شود. در ادامه، تنظیمات مدل عددی، شرایط مرزی، نحوه بارگذاری و پاسخ نیرو-جابجایی با هدف انطباق هرچه بیشتر با شرایط آزمایشگاهی انتخاب شدند؛ مشابه آنچه در مرجع مذکور برای کالیبراسیون و تطبیق مدل عددی با نتایج تجربی گزارش شده است [21]. این روند در نهایت امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تر رفتار فشاری ساختار و افزایش اعتبار مطابق شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی را فراهم ساخت.



شکل ۵ شبیه سازی المان محدود به ترتیب الف) نوع مش بندی توسط نرم افزار آباکوس ب)اعمال بارگذاری ج) اعمال خواص

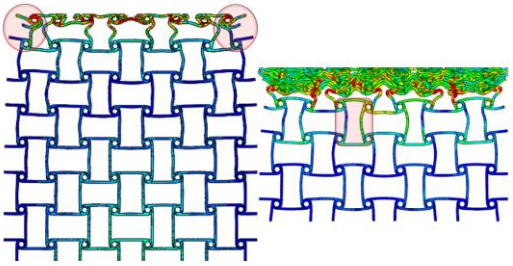
با توجه به وجود تغییرشکل‌های بزرگ، تماس‌های متعدد بین اجزای ساختار، غیرخطی هندسی و رفتار الاستیک–پلاستیک ماده، حلگر آباکوس برای انجام تحلیل اجزای محدود انتخاب شد. این حلگر قابلیت مناسبی برای مدل‌سازی مسائل تماسی پیچیده، چرخش‌های بزرگ اعضا، بازآرایی هندسی سلول‌های کایرال و لهیدگی پیش‌رونده ساختار در طی بارگذاری فشاری دارد. تماس میان سطوح نمونه و فک‌های بارگذاری با استفاده از الگوریتم General Contact تعریف شد. همچنین، ضریب اصطکاک بین سطوح تماس برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شد [26]. به‌منظور گسسته‌سازی مدل، از المان سه‌بعدی پیوسته هشت‌گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته، R۸D۳C، استفاده شد. این المان به دلیل توانایی مناسب در بازنمایی تغییرشکل‌های بزرگ و هزینه محاسباتی کمتر نسبت به المان‌های با انتگرال‌گیری کامل، برای تحلیل فشاری ساختارهای شبکه‌ای و آگزتیک مناسب است. با این حال، به‌منظور کنترل احتمال بروز مودهای تغییرشکل صفرانرژی ناشی از انتگرال‌گیری کاهش‌یافته، تنظیمات کنترل ساعت‌شنی کنترل ساعتشنی پیش‌فرض نرم‌افزار فعال بوده و سهم انرژی ساعت‌شنی در مقایسه با انرژی داخلی مدل پایش شد تا از ناچیز بودن آن اطمینان حاصل شود. برای بررسی تأثیر اندازه المان بر پاسخ عددی و انتخاب شبکه‌ای با توازن مناسب میان دقت و زمان محاسباتی، مطالعه حساسیت مش انجام گرفت. در این راستا، ساختار کایرال تحت بارگذاری فشاری با پنج اندازه مش یکنواخت شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌متر تحلیل شد. معیار مقایسه،

منحنی‌های نیرو–جابجایی، مقدار نیروی اوج و روند کلی تغییرشکل سازه بود. تمامی مدل‌ها الگوی کلی مشابهی از پاسخ فشاری را نشان می‌دهند که شامل افزایش اولیه نیرو، وقوع قله‌های ناشی از کمانش/چرخش موضعی اعضای کایرال، افت نیرو در اثر بازآرایی هندسی و سپس افزایش مجدد مقاومت در مراحل بعدی فشردگی است. وجود افت‌وخیز در منحنی‌ها ناشی از ماهیت مرحله‌ای لهیدگی و انتقال متوالی بار میان اجزای ساختار است و نباید به‌عنوان ناپایداری عددی یا خطای داده تفسیر شود. بررسی نتایج نشان داد که مش‌های ریزتر، به‌ویژه در نواحی اتصال لیگامان‌ها به گره‌های کایرال و همچنین اطراف انحناهای هندسی، قادرند تمرکز تنش و مکانیزم چرخش موضعی اجزا را با دقت بیشتری بازنمایی کنند. در مقابل، با افزایش اندازه المان، سختی مؤثر سازه و مقدار پیش‌بینی‌شده نیرو در برخی مراحل بارگذاری دچار تغییر می‌شود؛ زیرا مش درشت‌تر توانایی کمتری در ثبت دقیق انحنا، تمرکز کرنش و تماس‌های موضعی دارد. با این حال، مقایسه منحنی‌های نیرو–جابجایی نشان می‌دهد که روند کلی پاسخ و توالی مراحل تغییرشکل در تمام اندازه‌های مش حفظ شده است. مطابق شکل ۶، بیشترین هم‌پوشانی پاسخ در ناحیه ابتدایی بارگذاری و مراحل اصلی لهیدگی میان مش‌های ۱، ۱/۵ و ۲میلی‌متر مشاهده می‌شود؛ در حالی‌که مش ۰/۵ میلی‌متر، با وجود ارائه جزئیات بیشتر، مستلزم تعداد المان و زمان حل به‌مراتب بالاتری است. از سوی دیگر، مش‌های درشت‌تر، به‌ویژه ۲/۵میلی‌متر، اختلاف بیشتری در پیش‌بینی قله‌های نیرو و جابجایی متناظر با آن‌ها نشان می‌دهند. بنابراین، اندازه مش ۱ یا ۱/۵ میلی‌متر به‌عنوان مش نهایی انتخاب شد؛ زیرا این اندازه ضمن بازنمایی مناسب پاسخ نیرو–جابجایی و مکانیزم‌های تغییرشکل ساختار کایرال، هزینه محاسباتی تحلیل را نیز در سطح قابل قبول حفظ می‌کند.



شکل ۶ بررسی همگرایی مش ساختار کایرال

مطابق شکل ۷، توزیع تغییرشکل و تنش نشان می‌دهد که پاسخ فشاری ساختار کایرال به‌صورت یکنواخت و هم‌زمان در تمام سلول‌ها رخ نمی‌دهد؛ بلکه فرایند لهیدگی به‌طور غالب از ردیف‌های بالایی، یعنی ناحیه مجاور فک بارگذاری، آغاز می‌شود. در این ناحیه، تمرکز تنش و کرنش در محل اتصال لیگامان‌ها به گره‌های کایرال و همچنین در بخش‌های خمیده اعضا مشاهده می‌شود. این تمرکز موضعی ناشی از ترکیب چرخش گره‌ها، خمش لیگامان‌ها و انتقال بار میان سلول‌های مجاور است. با افزایش جابجایی، تغییرشکل به‌صورت پیش‌رونده از لایه‌های بالایی به ردیف‌های پایین‌تر منتقل می‌شود؛ در حالی‌که بخش‌های پایین ساختار در مراحل اولیه عمدتاً ظرفیت باربری خود را حفظ می‌کنند. این مکانیزم لهیدگی لایه‌ای سبب می‌شود سازه به‌جای شکست ناگهانی، انرژی ورودی را از طریق خمش، چرخش و بازآرایی تدریجی اجزای کایرال مستهلک کند. بنابراین، تمرکز تغییرشکل در ناحیه فشرده‌شده و سالم ماندن نسبی لایه‌های پایین‌تر، بیانگر عملکرد مطلوب ساختار در کنترل مسیر فروپاشی و ایجاد جذب انرژی پایدار است.



شکل ۷ رفتار ساختار کایرال تحت شبیه سازی شبه استاتیک از چپ به راست

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، رفتار آگزتیک ساختار پیشنهادی با دو دایره نشان داده شده است که ناشی از بازآرایی هندسی کایرال تحت بارگذاری فشاری است. با اعمال فشار محوری، اعضای ساختار دچار چرخش موضعی و بازشدگی نسبی در نواحی اتصال می‌شوند که این سازوکار از انقباض جانبی متعارف جلوگیری کرده و منجر به ظهور ضریب پواسون مؤثر منفی در یک بازه مشخص از کرنش می‌شود. با افزایش بیشتر کرنش، ساختار به‌تدریج از فاز آگزتیک به سمت فاز تراکم منتقل می‌شود. کرنش محوری و کرنش عرضی به‌ترتیب از تغییر طول ساختار در راستای بارگذاری و تغییر عرض مطابق رابطه(۱) آن در راستای عمود بر بارگذاری به‌دست آمدند[27]:

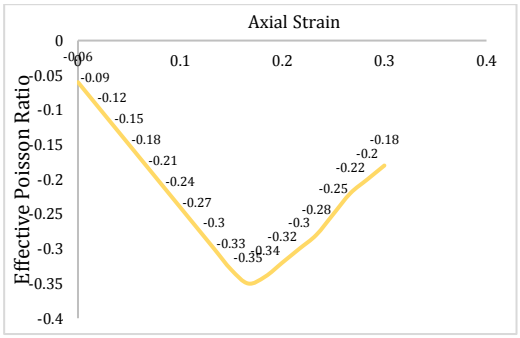
$$\varepsilon_{axial} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{transverse} = \frac{W - W_0}{W_0} \quad (2)$$

سپس ضریب پواسون مؤثر از رابطه (۳) محاسبه شد[27].

$$veff = -\frac{transverse}{axial} \quad (3)$$

نمودار شکل ۸ نیز این رفتار را به‌صورت کمی نشان می‌دهد. بر اساس روند تغییرات ضریب پواسون مؤثر بر حسب کرنش محوری، مقدار $veff$ در ناحیه ابتدایی و میانی تغییرشکل منفی باقی می‌ماند که بیانگر حفظ پاسخ آگزتیک ساختار در این بازه است. همچنین روند نمودار نشان می‌دهد که با افزایش کرنش، شدت رفتار آگزتیک ابتدا تقویت شده و ضریب پواسون به مقادیر منفی‌تری می‌رسد؛ اما در کرنش‌های بالاتر، با نزدیک شدن اجزای ساختار به یکدیگر و آغاز تراکم موضعی، مقدار ضریب پواسون به‌تدریج از حالت شدیداً منفی فاصله می‌گیرد. این تغییر روند بیانگر گذار تدریجی ساختار از مرحله بازآرایی هندسی به مرحله تراکم و تماس گسترده‌تر میان اجزا است.



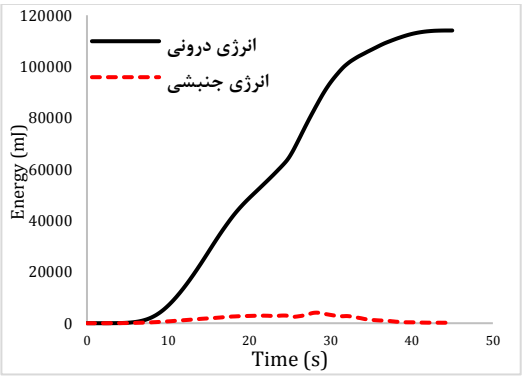
شکل۸. تغییرات ضریب پواسون مؤثر بر حسب کرنش محوری برای ساختار پیشنهادی؛ منفی بودن $veff$ در مراحل اولیه و میانی تغییرشکل، رفتار آگزتیک ساختار را تأیید می‌کند.

به‌منظور ارائه جزئیات عددی رفتار ضریب پواسون مؤثر که در شکل ۸ ترسیم شده است، مقادیر منتخب داده‌ها در جدول (۳) گردآوری شده‌اند. این مقادیر، تغییرات ضریب پواسون مؤثر را در سطوح مختلف کرنش محوری نشان می‌دهند و امکان تحلیل کمی دقیق‌تری از رفتار ساختار را فراهم می‌آورند.

جدول۳ داده ها کرنش محوری و ضریب پواسون موثر ساختار کایرال

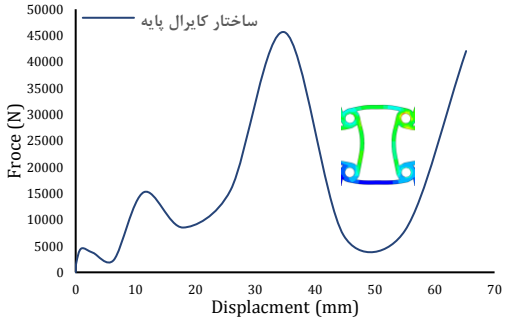
کرنش محوری	ضریب پواسون موثر
۰/۰۵	-۰/۱۵
0/10	-۰/۲۴
0/15	-۰/۳۳
0/20	-۰/۳۲
0/25	-۰/۲۵

به‌منظور ارزیابی دقیق پایداری و دقت شبیه‌سازی شبه‌استاتیک انجام‌شده، انرژی‌های جنبشی[۶] و داخلی[۷] به عنوان معیارهای کلیدی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که در شکل۹ مشهود است، انرژی جنبشی در طول فرآیند بارگذاری، روندی صاف و پایدار را دنبال کرده و به طور قابل‌توجهی پایین‌تر از انرژی داخلی باقی مانده است. عدم مشاهده‌ی نوسانات چشمگیر در منحنی انرژی جنبشی، مؤید انتخاب صحیح پارامتر مقیاس جرم و تضمین‌کننده‌ی ثبات عددی شبیه‌سازی در تمامی مراحل فرایند است.



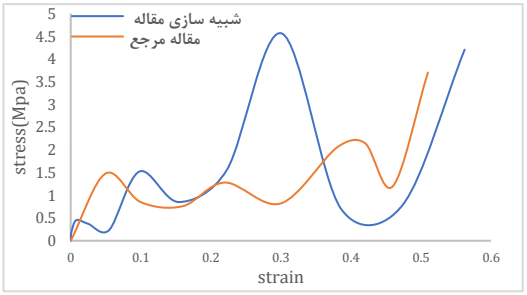
شکل۹ نمودار انرژی جنبشی به انرژی درونی

ظهور قله‌های متوالی در منحنی نیرو–جابجایی مطابق شکل ۱۰، مستقیماً با مکانیزم تغییرشکل سلول‌به-سلول و صلبیت لحظه‌ای هندسه کایرال در ارتباط است. قله‌های اولیه (در جابجایی‌های پایین) ناشی از مقاومت لیگامان‌ها در برابر خمش و پایداری گره‌ها در برابر چرخش هستند؛ به طوری که هر قله نشان‌دهنده رسیدن یک ردیف از سلول‌ها به آستانه تحمل باربری خود پیش از شروع لهیدگی است. علت وجود قله اصلی در محدوده جابجایی ۳۵ میلی‌متر، تجمع سختی ناشی از درگیری هم‌زمان تعداد بیشتری از لیگامان‌ها و ایجاد اولین تماس‌های موضعی میان اجزای داخلی سلول‌هاست. در این لحظه، ساختار به بیشترین صلبیت هندسی خود می‌رسد. افت نیرو پس از هر قله، به دلیل بازآرایی هندسی و وقوع تسلیم پلاستیک در لیگامان‌ها رخ می‌دهد؛ به عبارت دیگر، وقتی یک لایه از سلول‌ها دچار تغییرشکل بزرگ (فروپاشی کنترل‌شده) می‌شود، مقاومت سازه موقتاً کاهش یافته تا بار به لایه زیرین که هنوز صلب مانده است، منتقل شود. این فرآیندِ تجمع نیرو و آزادسازی آن تا رسیدن به مرحله تراکم نهایی ادامه می‌یابد که باعث شکل‌گیری ماهیت نوسانی و وجود قله‌ها در نمودار می‌گردد.



شکل ۱۰ نمودار نیرو- جابه جایی ساختار کایرال پایه

به‌منظور اعتبارسنجی مدل المان محدود توسعه‌یافته، منحنی تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج عددی گزارش‌شده در مرجع [25] مقایسه شده است (شکل ۱۱). همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، مدل حاضر قادر است روند کیفی پاسخ فشاری ساختار بازگشتی را به‌طور دقیق بازتولید کند. این هم‌خوانی شامل تمامی مراحل اصلی تغییر شکل، از جمله سخت‌شوندگی اولیه، افت تنش ناشی از کمانش اعضا، و سخت‌شوندگی ثانویه در کرنش‌های بالاتر است. اختلافات جزئی مشاهده‌شده در مقادیر مطلق تنش، به‌ویژه در نواحی پس از کمانش، ناشی از تفاوت در پارامترهای مدل‌سازی ماده است. از آنجا که مرجع [25] تمامی جزئیات مربوط به منحنی رفتار مکانیکی ماده را ارائه نکرده است، در پژوهش حاضر خواص ماده بر اساس داده‌های استخراجیِ مرتبط با نمونه‌های واقعی تعیین گردید که رفتاری صلب‌تر را نسبت به مفروضات مدل مرجع نشان می‌دهد. با وجود این تفاوت در مقادیر مطلق، تطابق کیفیِ روند منحنی‌ها، صحّت رویکرد مدل‌سازی و توانایی آن در پیش‌بینی پدیده‌های فیزیکی حاکم بر ساختار را تأیید می‌کند.



شکل۱۱ مقایسه نمودار تنش و کرنش مقاله مرجع و ساختار شبیه سازی شده

۳ محاسبه جذب انرژی

وظیفه اصلی جاذب‌های انرژی کاهش انتقال نیروهای مخرب به اجزای سازه‌ای یا تجهیزات حساس است. به طور کلی، پاسخ تنش–کرنش چنین موادی را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم کرد: ناحیه الاستیک خطی، ناحیه پایداری تنش یا بخش تقریباً ثابت نیرو و منطقه متراکم شدن. کل انرژی جذب شده در طول فرآیند خرد کردن یا فشرده سازی با ادغام ناحیه زیر منحنی نیرو–جابجایی تا شروع فشردگی کرنش، همانطور که در رابطه (۴) بیان شده است، اندازه گیری می شود.

$$EA = \int_{.}^{l_D} F(x)dx = \int_{.}^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon \qquad (4)$$

که در آن، EAنشان دهنده انرژی جذب شده است، $f(x)$، xو dxبه ترتیب نیروی فشاری، جابجایی و طول فشردگی اعمال می شوند. نمادهای $\sigma(\varepsilon)$ و ε نشان دهنده تنش و کرنش فشاری هستند و $d\varepsilon$ نشان دهنده کرنشی است که در آن ناحیه متراکم شروع می شود. در مواد فلزی، پس از مرحله الاستیک اولیه، یک منطقه فلات معمولاً ظاهر می شود که در آن لهیدگی پیشرونده تحت یک بار تقریباً ثابت رخ می دهد. پس از آن، ناحیه تراکم ایجاد می شود، جایی که فشرده سازی مداوم منجر به افزایش سریع تنش به دلیل فشردگی مواد می شود. شناسایی شروع تراکم در مواد غیرفلزی، مانند پلیمرها یا شبکه‌های سلولی، چالش برانگیز است، زیرا منحنی‌های نیرو–جابجایی اغلب قله‌های متعددی را در ناحیه فلات نشان می‌دهند، که ممکن است کاملاً مسطح نباشند. در نتیجه، معیارهای مختلفی برای تخمین εd پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر، روش بهره وری انرژی برای تعیین شروع فشردگی، با راندمان جذب انرژی که با رابطه (۵) تعریف شده است، استفاده شد[28].

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_{\varepsilon_.}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \qquad (5)$$

در این فرمول، η(ε)بازده جذب انرژی، σ(ε) نشان دهنده تنش آنی، و ε کرنش فشاری است. پس از محاسبه راندمان جذب انرژی، منحنی رسم می شود. کرنش مربوط به حداکثر بازده جذب انرژی به عنوان کرنش چگالی، εd در نظر گرفته می شود. انرژی جذب شده در واحد جرم، که به عنوان جذب انرژی خاص SEA_mنشان داده می شود، معمولاً برای ارزیابی و مقایسه عملکرد جذب انرژی مواد مختلف و پیکربندی های ساختاری استفاده می شود.

$$SEA_m = \frac{EA}{m} \qquad (6)$$

میانگین نیروی خرد کننده (MCF) به عنوان کل انرژی جذب شده EA تقسیم بر جابجایی خردکننده مربوطه (d) تعریف می شود. این پارامتر به عنوان یک معیار مهم برای ارزیابی توزیع بار در طول فرآیند تغییر شکل عمل می کند و راهنمایی ارزشمندی را برای بهینه سازی و طراحی سازه های جذب انرژی ارائه می دهد.

$$MCF = \frac{EA}{d} \qquad (7)$$

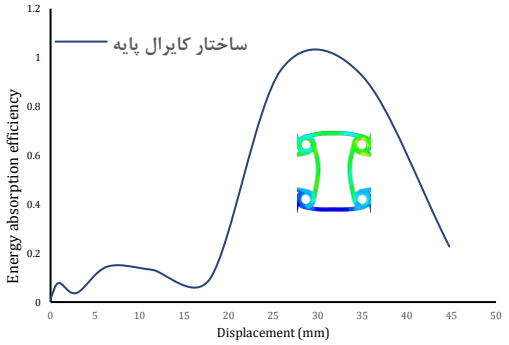
راندمان نیروی خرد کننده (CFE) به عنوان نسبت نیروی خرد کننده متوسط (MCF) به نیروی خرد کننده پیک تعریف می شود و می توان آن را بر اساس رابطه (۸) محاسبه کرد. برای یک جاذب انرژی ایده آل، حداکثر مقدار CFE 1 است. این پارامتر اندازه گیری مستقیمی از اثربخشی جاذب در اتلاف یکنواخت نیروها و به حداقل رساندن نوسانات نیرو در طول فرآیند تغییر شکل ارائه می دهد.

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \times 100 \qquad (8)$$

در معادله بالا، PCF نیروی خرد کننده اوج نشان می دهد، بالاترین نیروی تجربه شده قبل از شروع خرد شدن در نیرو–جابجایی است جذب انرژی ویژه SEA که معیاری حیاتی در ارزیابی عملکرد مواد و سازه‌ها تحت بارگذاری دینامیک و ضربه است، به طور ذاتی با

جرم ماده یا سازه رابطه مستقیم دارد؛ به این معنا که با افزایش جرم، قابلیت کلی جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد، مشابه تشبیه یک جرم سنگین‌تر در شبیه‌سازی که توانایی بیشتری برای اتلاف انرژی دارد. با این حال، در حوزه طراحی‌های پیشرفته و نوآورانه، هدف اصلی دستیابی به حداکثر SEA با حداقل افزایش جرم است، که این امر نیازمند درک عمیق مکانیزم‌های جذب انرژی در مقیاس‌های مختلف (از اتمی تا ماکروسکوپی) و بهینه‌سازی ساختاری مواد است. معیار کلیدی برای ارزیابی و مقایسه این ساختارهای نوآورانه، سنجش همزمان درصد تغییرات در جرم و جذب انرژی است؛ به طوری که ساختاری به عنوان "بهینه" در نظر گرفته می‌شود که با کمترین افزایش نسبی جرم، بیشترین درصد افزایش جذب انرژی ویژه را از خود نشان دهد[29].

نمودار راندمان جذب انرژی ساختار کایرال پایه نشان می‌دهد که این شاخص در مراحل ابتدایی بارگذاری، به‌دلیل غالب بودن تغییرشکل الاستیک و محدود بودن حجم ناحیه درگیر، در مقادیر پایین قرار دارد. با افزایش جابجایی و فعال‌شدن تدریجی مکانیزم خمش لیگامان‌ها، چرخش گره‌ها و لهیدگی سلول‌ها، راندمان به‌سرعت افزایش یافته و در جابجایی حدود 30میلی‌متر به بیشینه‌ای نزدیک به ۱/۰۳۱ می‌رسد. این نقطه بیانگر مؤثرترین وضعیت ساختار در تبدیل کار خارجی اعمال‌شده به انرژی تغییرشکل است. پس از این مقدار جابجایی، راندمان کاهش می‌یابد که به افزایش تماس‌های داخلی، تغییر آرایش هندسی سلول‌ها و آغاز تراکم تدریجی ساختار مربوط است. بنابراین، محدوده جابجایی حدود 25تا 35میلی‌متر را می‌توان بازه عملکرد بهینه ساختار کایرال پایه مطابق شکل ۱۲ از نظر جذب انرژی دانست.



شکل ۱۲ راندمان جذب انرژی در مقابل منحنی جابجایی برای نمونه های شبیه سازی

نتایج استخراج شده از جدول ۴ شاخص‌های عملکردی، بیانگر توازن میان صلبیت هندسی و ظرفیت استهلاک انرژی در ساختار کایرال پایه است. مقدار SEAنشان‌دهنده توانمندی مطلوب این هندسه در جذب انرژی به ازای واحد حجم (یا جرم) است که از مکانیزم بازآرایی سلولی و تغییرشکل پلاستیک گسترده لیگامان‌ها نشأت می‌گیرد. با این حال، بالا بودن شاخص PCFدر مقایسه با MCF، حاکی از وجود یک قله نیروی اولیه شدید پیش از ورود به مرحله لهیدگی پایدار است. این اختلاف میان نیروی اوج و نیروی میانگین، نشان‌دهنده ماهیت نوسانی پاسخ فشاری و تمرکز سختی در لحظه چرخش گره‌هاست. بنابراین، اگرچه ساختار پایه از پتانسیل بالایی برای جذب انرژی برخوردار است، اما کاهش فاصله میان این دو شاخص (بهبود یکنواختی لهیدگی) به عنوان هدف اصلی در بهینه‌سازی و اصلاح هندسی این ساختار مد نظر قرار می‌گیرد.

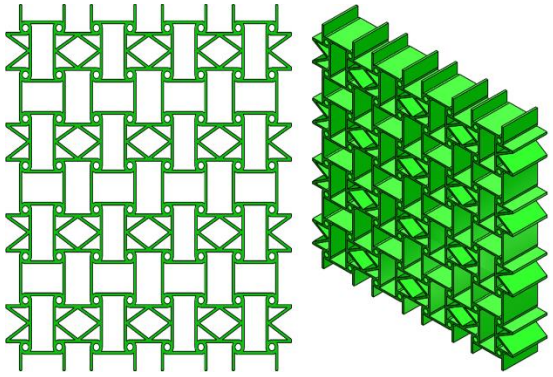
جدول۴ مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده

	جرم	SEA_{η}(KJ /kg)	MCF	PCF
ساختار کایرال	۵۰/۳۸	۲۲	۰/۳۱	۴۵۶۲۵/۱

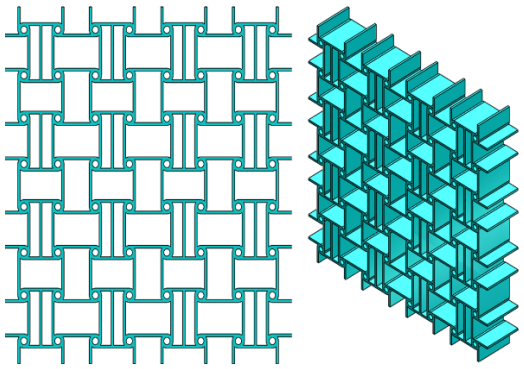
۴ نوآوری هندسی

به‌منظور بهبود پاسخ مکانیکی ساختار کایرال پایه، هندسه‌های نوآورانه‌ای مطابق شکل ۱۳ با اعمال تقویت‌های موضعی و اصلاح مسیر انتقال بار در نواحی حساس سلول واحد طراحی شدند. مبنای این اصلاحات، کاهش تمرکز تنش در محل اتصال اعضای مایل به

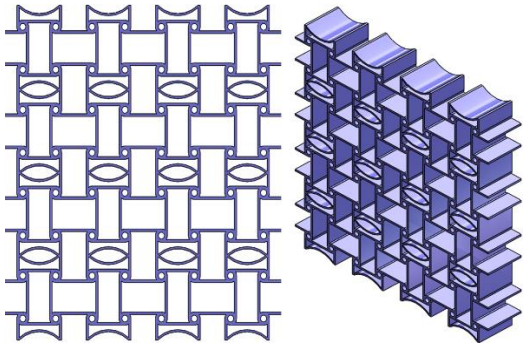
اجزای قائم و افقی، افزایش مشارکت اجزای سازه در فرایند تغییرشکل، و ایجاد مکانیزم لهیدگی تدریجی‌تر تحت بار فشاری است. در ساختارهای پیشنهادی، افزودن اعضای تقویتی با آرایش‌های چهارگوش، مرکزی، کمانی، دایره‌ای و ضربدری، مسیرهای جایگزین و توزیع‌شده‌ای برای انتقال نیرو فراهم می‌کند. در ساختار کایرال پایه، انتقال بار عمدتاً از طریق تعداد محدودی از لیگامان‌ها و گره‌های اتصال انجام می‌شود؛ بنابراین، امکان تمرکز تنش و ایجاد قله نیروی اولیه در مراحل آغازین بارگذاری وجود دارد. هندسه‌های اصلاح‌شده با افزایش پیوستگی بین اجزای سلول و توزیع نیرو در چند عضو هم‌زمان، از تمرکز موضعی تنش جلوگیری می‌کنند. به‌ویژه، اعضای قطری و مثلثی به دلیل پایداری هندسی مناسب، می‌توانند سختی موضعی ناحیه اتصال را افزایش داده و کمانش یا چرخش ناگهانی اعضا را کنترل کنند. همچنین، استفاده از اجزای منحنی و دایره‌ای سبب می‌شود تغییر جهت انتقال نیرو به‌صورت نرم‌تر انجام شود. این ویژگی می‌تواند از تشکیل نقاط بحرانی تنش در گوشه‌ها و اتصالات تیز بکاهد و تغییرشکل را در سطح وسیع‌تری از ساختار گسترش دهد. در مقابل، تقویت‌های مرکزی و چهارگوش با ایجاد مسیرهای باربری مستقیم‌تر، ظرفیت تحمل بار و مقاومت ساختار در برابر فروپاشی موضعی را افزایش می‌دهند.



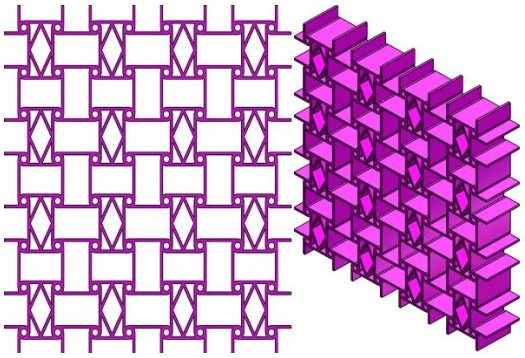
ساختار کایرال چهارگوش



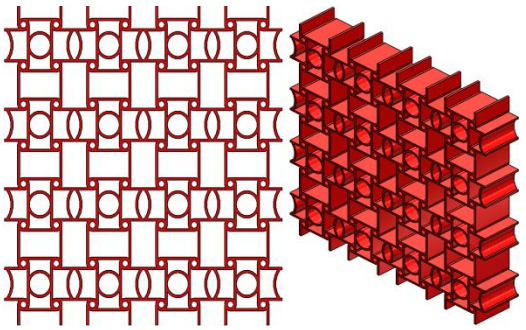
ساختار کایرال تقویت مرکزی



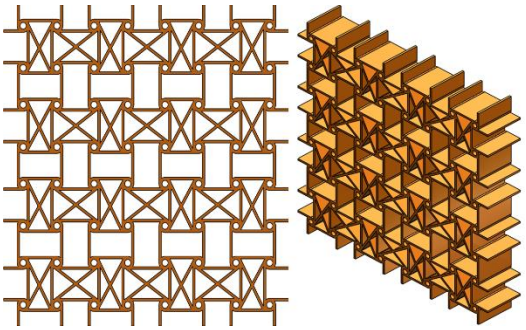
ساختار کایرال کمانی



ساختار کایرال لوزی



ساختار کایرال دایره ای



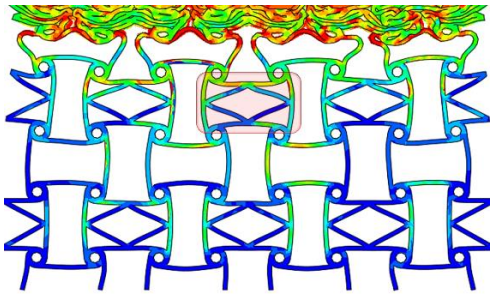
ساختار کایرال ضربدری

شکل ۱۳ هندسه‌های نوآورانه مبتنی بر ساختار کایرال پایه: نمایش سلول واحد، آرایش دوبعدی سلول‌ها و مدل سه‌بعدی ساختارهای اصلاح‌شده با تقویت‌های چهارگوش، مرکزی، کمانی، دایره‌ای و ضربدری.

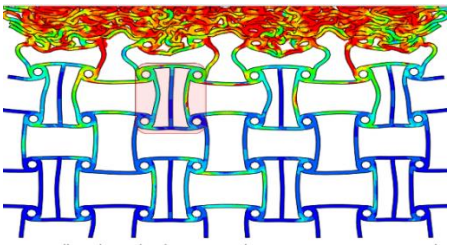
در ادامه این پژوهش، شبیه‌سازی عددی ساختارهای کایرال نوآوری شده که هندسه آن‌ها در معرفی شده است، بررسی شد. فرآیند شبیه سازی این ساختارها بر همان چارچوب مدل سازی به‌کاررفته برای ساختار کایرال پایه استوار است تا امکان مقایسه دقیق نتایج فراهم شود. به همین منظور، تمامی پارامترهای کلیدی شامل شرایط مرزی، نوع بارگذاری و روش تحلیل در هر دو مدل یکسان مطابق مقاله مرجع [21] در نظر گرفته شد. تفاوت اصلی تنها در افزایش پیچیدگی و ابعاد هندسی ساختارهای نوآوری شده است که موجب افزایش تعداد المان‌ها شده است. با این حال، مراحل اصلی شبیه سازی شامل ایجاد مدل هندسی، تعریف خواص مواد، اعمال شرایط مرزی و اجرای تحلیل عددی بر پایه یک چارچوب مشترک انجام شد. همچنین شبیه سازی در مدل‌های پایه و نوآوری‌شده را نشان می‌دهد و امکان ارزیابی دقیق اثر تغییرات هندسی را فراهم می‌کند.

۴-۱ نتایج شبیه سازی

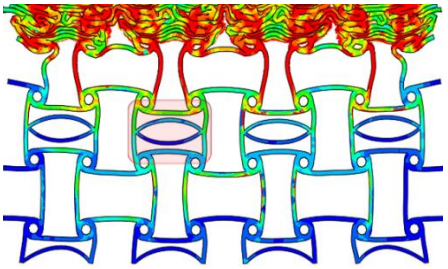
مطابق شبیه‌سازی عددی، توزیع تنش فون‌میسس در ساختارهای کایرال مطابق شکل ۱۴ به‌شدت تحت تأثیر هندسه تقویت‌کننده‌ها قرار دارد. در تمامی مدل‌ها، بارگذاری فشاری موجب شروع تغییر شکل و تمرکز تنش اولیه در ردیف‌های بالایی (مجاورت صفحه بارگذار) شده و سپس تنش به لایه‌های پایین‌تر منتقل می‌شود. با این حال، مکانیزم توزیع این میدان تنش در هر ساختار متفاوت است؛ در ساختار تقویت مرکزی، اعضای قائم میانی با ایجاد مسیر باربری مستقیم، مشارکت بخش مرکزی سلول در تحمل بار را افزایش داده و مانع کمانش زودهنگام اعضای جانبی می شوند، هرچند تمرکز تنش در محل اتصال این تقویت‌کننده‌ها به لیگامان‌های افقی افزایش می یابد. ساختار کمانی با بهره‌گیری از اعضای منحنی، از تمرکز شدید تنش در زوایای تیز جلوگیری کرده و به دلیل توزیع پیوسته‌تر نیرو در طول اعضا، رفتار لهیدگی نرم‌تر و شکل‌پذیرتری ارائه می‌دهد. در ساختار لوزی، اعضای مورب با ایجاد مسیرهای باربری جانبی و تحمل بخشی از نیروهای محوری و خمشی، پایداری هندسی سلول را بهبود بخشیده و از تغییر شکل موضعی شدید جلوگیری می‌کنند. ساختار دایره‌ای نیز با حذف گوشه‌های تیز از طریق المان‌های حلقوی، تمرکز تنش را به‌طور محسوسی کاهش داده و با توزیع یکنواخت بار در امتداد انحناها، زمینه را برای یک پاسخ لهیدگی پایدار فراهم می‌سازد. در مقابل، ساختار ضربدری به کمک شبکه خرپایی متقاطع خود، ظرفیت بالایی در انتقال بار در راستای ارتفاع و جلوگیری از فروپاشی موضعی نشان می‌دهد؛ اگرچه تقاطع اعضا می‌تواند به تمرکز موضعی تنش در گره‌ها بینجامد. در نهایت، ساختار چهارگوش با ترکیب اعضای مستقیم و مورب، تعادل مناسبی میان سختی سازه‌ای و پایداری شبکه برقرار می‌کند، هرچند احتمال تمرکز تنش در اتصالات آن همچنان وجود دارد.



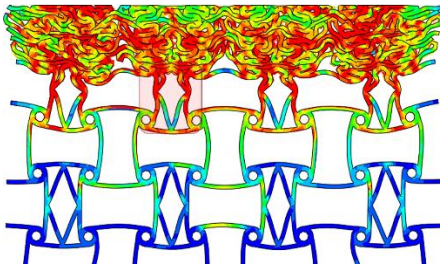
ساختار کایرال چهارگوش



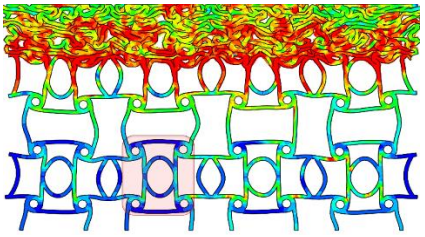
ساختار کایرال تقویت مرکزی



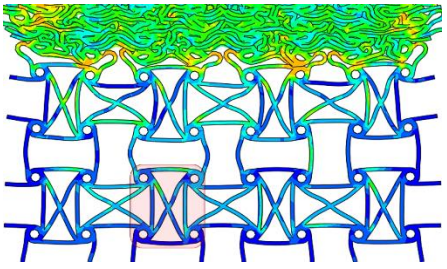
ساختار کایرال کمانی



ساختار کایرال لوزی



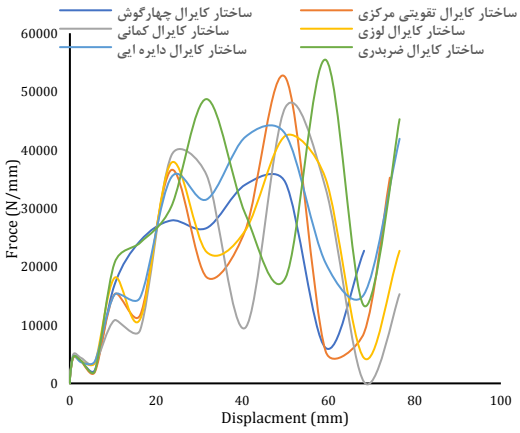
ساختار کایرال دایره‌ای



ساختار کایرال ضربدری

شکل ۱۴ مقایسه توزیع تنش فون‌میسس در ساختارهای کایرال اصلاح‌شده تحت بارگذاری فشاری؛ نمایش نحوه عملکرد تقویت‌کننده‌های داخلی (مرکزی، کمانی، لوزی، دایره‌ای، ضربدری و چهارگوش)

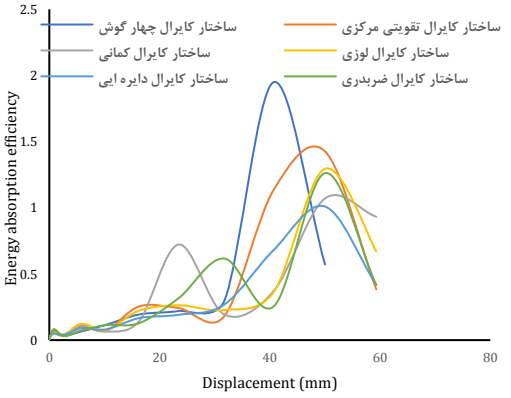
نمودارهای نیرو-جابجایی و راندمان جذب انرژی، پاسخ ساختاری نمونه‌های کایرال را تحت بارگذاری فشاری به تصویر می‌کشند. در نمودار نیرو-جابجایی، تمامی ساختارها رفتار نوسانی مشخصی را نشان می‌دهند که ناشی از مکانیسم لهیدگی پیش‌رونده ، کمانش لیگامان‌ها و تماس‌های داخلی در حین بارگذاری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قله‌های نیرو در ساختارهای تقویت مرکزی و ضربدری در سطوح بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها قرار دارند که بیانگر سختی اولیه بیشتر و مقاومت بالاتر در برابر تغییرشکل است. در مقابل، ساختارهای کمانی و دایره‌ای با شیب ملایم‌تری به قله‌های نیرو می‌رسند که این موضوع نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر تنش و تأخیر در بروز ناپایداری سازه‌ای است. با رسیدن به جابجایی‌های بیش از ۶۰ میلی‌متر، تمامی نمودارها روند صعودی شدیدی را مطابق شکل ۱۵ نشان می‌دهند که معرف ورود به فاز تراکم و انسداد کامل فضای خالی سلول‌هاست.



شکل۱۵ نمودار نیرو-جابه جایی ساختارهای نوآورانه کایرال

تحلیل نمودار راندمان جذب انرژی، تفاوت عملکردی ساختارها را به‌وضوح نشان می‌دهد. ساختار کایرال چهارگوش (منحنی سرمه‌ای) رفتار متمایزی دارد و در جابجایی حدود ۴۰ میلی‌متر به بیشینه راندمان دست می‌یابد که نشان‌دهنده قابلیت جذب انرژی بهینه در این بازه است. سایر ساختارها پیک راندمان خود را در

جابجایی‌های بالاتری (بین ۴۵ تا ۵۵ میلی‌متر) تجربه می‌کنند. این جابجایی در نقاط اوج انرژی، بیانگر آن است که اصلاح هندسی چهارگوش توانسته است مطابق شکل۱۶ ساختار را در بازه فشاری زودتری به پایداریِ انرژی برساند، در حالی که ساختارهای دیگر برای رسیدن به عملکرد بهینه به پیشروی بیشتری نیاز دارند.



شکل ۱۶ راندمان جذب انرژی در مقابل منحنی جابجایی برای نمونه های شبیه سازی شده ساختارهای نوآورانه کایرال

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول ۵، اصلاح هندسه ساختار کایرال تأثیر مستقیمی بر سه شاخص اصلی عملکرد جذب انرژی، یعنی جذب انرژی ویژه نرمال‌شده (SEA)، نیروی اوج لهیدگی (PCF) و میانگین نیروی لهیدگی (MCF) داشته است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که هر یک از آرایش‌های هندسی، تعادل متفاوتی میان ظرفیت جذب انرژی، یکنواختی پاسخ مکانیکی و سطح نیروی اولیه ایجاد کرده‌اند. در این میان، ساختار دایره‌ای با ثبت بیشترین مقدار ($SEA = ۴۴/۲ KJ/kg$) و همچنین بالاترین مقدار (MCF=۰/۷۵)، بهترین عملکرد کلی را از خود نشان داده است. این نتیجه بیانگر آن است که هندسه دایره‌ای توانسته است علاوه بر افزایش ظرفیت جذب انرژی، فرآیند انتقال و استهلاک انرژی را نیز به‌صورت یکنواخت‌تری انجام دهد. دلیل این رفتار را می‌توان در پیوستگی هندسی بیشتر، کاهش نواحی تمرکز تنش و توزیع نرم‌تر بار در طول اعضای سازه جست‌وجو کرد؛ ویژگی‌ای که باعث می‌شود سازه در حین فشرده‌سازی، به‌جای تجربه نوسانات شدید نیرو، وارد یک فرآیند لهیدگی پایدارتر شود. در مقابل، ساختار چهارگوش اگرچه از نظر جذب انرژی ویژه در سطحی پایین‌تر از مدل دایره‌ای قرار می‌گیرد، اما با ثبت کمترین نیروی اوج لهیدگی (PCF =۳۴۴۱۱/۹) عملکردی بسیار مطلوب از دیدگاه ایمنی اولیه ارائه می‌دهد. پایین بودن نیروی اوج به این معناست که این ساختار در لحظه آغاز بارگذاری، بار ضربه را به‌صورت ملایم‌تری منتقل می‌کند و در نتیجه می‌تواند برای کاربردهایی که محدود کردن نیروی اولیه اهمیت بالایی دارد، گزینه مناسب‌تری باشد. به بیان دیگر، ساختار چهارگوش هرچند بیشینه ظرفیت جذب انرژی را ارائه نمی‌دهد، اما از منظر کنترل ضربه اولیه و کاهش بار ناگهانی وارد بر سیستم، برتری محسوسی دارد. ساختار تقویت مرکزی نیز با مقدار (SEA =۴۲) یکی از بهترین عملکردها را از نظر جذب انرژی نشان می‌دهد، اما هم‌زمان بیشترین نیروی اوج لهیدگی (PCF =۵۲۴۲۳/۱) را نیز به خود اختصاص داده است. این رفتار نشان می‌دهد که تقویت موضعی در مرکز، اگرچه سبب افزایش سختی و تقویت مسیرهای مستقیم انتقال بار شده، اما همین ویژگی منجر به افزایش شدید مقاومت اولیه و در نتیجه بالا رفتن نیروی اوج شده است. بنابراین، این ساختار را می‌توان گزینه‌ای مناسب برای شرایطی دانست که بیشینه جذب انرژی اهمیت دارد، اما در کاربردهایی که کاهش نیروی اولیه در اولویت است، انتخاب ایده‌آلی محسوب نمی‌شود. ساختار ضربدری نیز عملکردی نسبتاً متعادل از خود نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که مقدار (SEA=۳۹/۷) و سطح متوسط (PCF=۴۸۷۱۲/۱) بیانگر آن است که این آرایش توانسته است با ایجاد مسیرهای باربری متعدد، پایداری هندسی مناسبی فراهم کند. از سوی دیگر، ساختار کمانی با (SEA=۳۷/۶) و (MCF=۰/۴۵) و نیز ساختار لوزی با (SEA=۳۷/۲) و (MCF =۰/۴۸) در رده‌های پایین‌تر قرار می‌گیرند. در این دو مدل، به‌نظر می‌رسد هندسه انتخاب‌شده نتوانسته است توزیع تنش و انتقال بار را به اندازه کافی بهینه کند، در نتیجه هم ظرفیت جذب

انرژی محدودتر شده و هم یکنواختی پاسخ مکانیکی کاهش یافته است.

جدول ۵ مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده ساختارهای نوآورانه کایرال

نوآورانه	جرم	SEA_m(KJ /kg)	MCF	PCF
ساختار ریترنت چهارگوش	۶۳/۲	۴۰/۵	۰/۵۱	۳۴۴۱۱/۹
ساختار ریترنت تقویتی مرکزی	۵۶/۴	۴۲	۰/۴۷	۵۲۴۲۳/۱
ساختار ریترنت کمانی	۵۹/۲	۳۸/۶	۰/۴۵	۴۷۳۱۱/۳
ساختار ریترنت لوزی	۶۲/۳	۳۸/۲	۰/۴۸	۴۲۴۲۹/۶
ساختار ریترنت دایره ایی	۶۵	۴۴/۲	۰/۵۷	۴۲۷۰۴/۹
ساختار ریترنت ضربدری	۷۰	۳۹/۷	۰/۵۵	۴۸۷۱۲/۱

۵ نتیجه‌گیری

بر اساس مدل‌سازی‌های المان محدود سه‌بعدی و تحلیل مقایسه‌ای ساختارهای کایرال اصلاح‌شده تحت بارگذاری فشاری، مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش به‌شرح زیر است:

۱. دستاورد محوری و طرح بهینه:

بهینه‌سازی هندسی منجر به افزایش قابل ملاحظه در ظرفیت جذب انرژی ساختار کایرال شد، به‌طوری‌که تمامی طرح‌های اصلاح‌شده کارایی بالاتری نسبت به ساختار پایه نشان دادند. در میان طرح‌های ارائه‌شده، ساختار ریترنت دایره‌ای به دلیل دستیابی به بالاترین میزان جذب انرژی ویژه نرمال‌شده (SEA) و بالاترین کارایی نیروی لهیدگی (MCF)، به‌عنوان طرح بهینه معرفی می‌شود. این عملکرد برتر ناشی از سازوکار منحنی‌وار این هندسه است که منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش، به تعویق افتادن ناپایداری‌های موضعی و فعال‌سازی مؤثر اعضا در جذب انرژی می‌شود.

۲. یافته‌های مرتبط با کنترل نیرو:

علی‌رغم عملکرد ضعیف‌تر در جذب انرژی ویژه، ساختار ریترنت چهارگوش کمترین نیروی اوج لهیدگی (PCF) را در میان تمامی نمونه‌ها ثبت کرد. این دستاورد نشان‌دهنده یک مبادله عملکردی حیاتی در طراحی سازه‌های جاذب انرژی است؛ طرح دایره‌ای بیشترین ظرفیت جذب انرژی را دارد، درحالی‌که طرح چهارگوش بهترین عملکرد را در مدیریت بار ضربه‌ای اولیه و کاهش شوک مکانیکی ارائه می‌دهد.

۳. محدودیت‌های اساسی پژوهش:

نتایج عددی این مطالعه، که رفتار ماده را بر پایه فرض همسانگردی و شرایط شبه‌استاتیک مدل کرده است، دارای سه محدودیت اصلی است:

- **اثرات ناهمسانگردی:** مدل‌سازی رفتار مواد چاپ سه‌بعدی (مانند PLA+) نیازمند در نظر گرفتن ناهمسانگردی ذاتی ناشی از لایه‌گذاری است که در پژوهش‌های آینده باید با استفاده از مدل‌های ماده پیشرفته‌تر جبران شود.
- **اثر نرخ کرنش:** عدم لحاظ اثرات نرخ کرنش ناشی از بارگذاری دینامیک می‌تواند منجر به خطای در تخمین مقاومت در شرایط عملیاتی با سرعت بالا شود.
- **عیوب ساخت:** فرضیات هندسه ایده‌آل، از عیوب ساخت، تخلخل‌های درونی و نقص‌های سطحی ناشی از فرایند تولید صرف نظر کرده است که در نمونه‌های فیزیکی واقعی، به‌طور مستقیم بر عملکرد نهایی تأثیرگذار خواهند بود.

۴. چشم‌انداز آینده:

- بررسی جامع‌تر تأثیر پارامترهای هندسی، از جمله تغییر ضخامت ماده، ابعاد گره‌ها و طول لیگامان‌ها ، بر معیارهای عملکردی همچون شاخص جذب انرژی ویژه SEA و نسبت پواسون PCF در دستور کار تحقیقات آتی قرار دارد. این مطالعات امکان

بهینه‌سازی دقیق‌تر طراحی ساختارها را فراهم خواهند آورد .

- همچنین، بسط مدل تحلیلی و عددی ارائه‌شده برای پوشش طیف وسیع‌تری از پارامترهای طراحی، به‌ویژه در حوزه ساختارهای سه بعدی با پیچیدگی‌های هندسی بیشتر، می‌تواند نتایج کاربردی‌تری را به همراه داشته باشد.
- یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده پتانسیل بالای ساختارهای بازگشتی/آگزتیک در کاربردهای مهندسی است. با این حال، دستیابی به عملکردهای بهینه و سفارشی‌سازی‌شده، نیازمند بهره‌گیری از رویکردهای طراحی پیشرفته‌تر است. در این راستا، طراحی و تحلیل ساختارهای هیبریدی که ترکیبی هوشمندانه از عناصر هندسی مختلف (مانند ادغام واحدهای سلولی دایره‌ای و چهارگوش) باشند، به‌عنوان یکی از مسیرهای امیدوارکننده برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب‌تر) مانند بهبود نسبت SEA و PCF) پیشنهاد می‌گردد. بررسی این ساختارهای هیبریدی در قالب تحقیقات آتی، امکان دستیابی به نسل جدیدی از مواد هوشمند با قابلیت‌های مهندسی منحصربه‌فرد را فراهم خواهد آورد

۶ تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش با ارائه دیدگاه‌های علمی، راهنمایی‌های تخصصی و همکاری‌های ارزشمند یاری‌رسان بوده‌اند، صمیمانه اعلام می‌دارند. همچنین از همراهی و حمایت تمامی همکاران و پژوهشگرانی که در پیشبرد این تحقیق نقش مؤثری داشته‌اند، قدردانی می‌شود.

منابع

[1] Evans KE, Alderson KL. Auxetic materials: the positive side of being negative. Eng Sci Educ J 2000;9:148–54.
[2] Mir M, Ali MN, Sami J, Ansari U. Review of mechanics and applications of auxetic structures. Adv Mater Sci Eng 2014:753496. https://doi.org/10.1155/2014/753496. 2014/11/13 2014.
[3] Alderson KL, Fitzgerald A, Evans KE. The strain dependent indentation resilience of auxetic microporous polyethylene. J Mater Sci 2000;35(16):4039–47. https://doi.org/10.1023/A:1004830103411. 2000/08/01.
[4] Choi JB, Lakes RS. Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis. Int J Fract 1996;80(1):73–83. https://doi.org/10.1007/BF00036481. 1996/03/01.
[5] Wang Z, Zulifqar A, Hu H. 7 - auxetic composites in aerospace engineering. In: Rana S, Fangueiro R, editors. Advanced composite materials for aerospace engineering. Woodhead Publishing; 2016. p. 213–40.
[6] Hou W, Yang X, Zhang W, Xia Y. Design of energy-dissipating structure with functionally graded auxetic cellular material. Int J Crashworthiness 2018;23(4): 366–76. https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1328764. 2018/07/04.
[7] Sanami M, Ravirala N, Alderson K, Alderson A. Auxetic materials for sports applications. Procedia Eng 2014;72:453–8. https://doi.org/10.1016/j. proeng.2014.06.079. 2014/01/01/.
[8] Mironov V, Boland T, Trusk T, Forgacs G, Markwald RR. Organ printing: computer- aided jet-based 3D tissue engineering. Trends Biotechnol 2003;21(4):157–61. https://doi.org/10.1016/S0167-7799(03)00033-7. 2003/04/01/.
[9] Lakes R. Foam structures with a negative Poisson's ratio. Science 1987;235(4792): 1038–40. https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038.
[10] Liu Q, Ma J, He Z, Hu Z, Hui D. Energy absorption of bio-inspired multi-cell CFRP and aluminum square tubes. Compos B Eng 2017;121:134–44. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.034. /07/15/2017.
[11] Jiang H, Ren Y, Jin Q, Zhu G, Hu Y, Cheng F. Crashworthiness of novel concentric auxetic reentrant honeycomb with negative Poisson's ratio biologically inspired by coconut palm. Thin-Walled Struct 2020;154:106911. https://doi.org/10.1016/j. tws.2020.106911. 09/01.

metamaterials. Adv Eng Mater 2025;27(7):2402571. https://doi.org/10.1002/adem.202402571.

[۲۲] Hajighasemi MR, Safarabadi M, Sheidaei A, Baghani M, Baniassadi M. Design and manufacture of a smart macro-structure with changeable effective stiffness. *International Journal of Applied Mechanics*. 2020;12(1):2050001. https://doi.org/10.1142/S1758825120500015

[۲۳] M. Murariu and P. Dubois, "PLA composites: From production to properties," *Elsevier*, 2016.

[2٤] M. Seetoh et al., "Extremely stiff and lightweight auxetic metamaterial designs enabled by asymmetric strut cross-sections," *Materials*, vol. 15, no. 18, p. 6428, 2022.

[2٥] Ashfaq B, Hussain G, Khan MB, Alkahtani M, Wei H. A novel design of mono and bi-cells based hybrid auxetic structures and assessment of their compressive properties. J Mater Res Technol. 2024;29:12075-89. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.075

[2٦] M. Najafi, H. Ahmadi, and G. Liaghat, "Experimental and numerical investigation of energy absorption in auxetic structures under quasi-static loading," *Modares Mechanical Engineering*, vol. –, 2020.

[2٧] Wang H, Lu Z, Yang Z, Li X. A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance. Compos Struct 2019;208:758–70. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.024. 2019/01/15/.

[2٨] N. A. Bhatti and M. A. Wahab, "Finite element analysis of fretting fatigue under out of phase loading conditions," *Tribology International*, vol. 109, pp. 552–562, 2017.

[2٩] C. W. Isaac and C. Ezekwem, "A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability," *Composite Structures*, vol. 257, p. 11308, 2021.

[1٢] Huang H, Xu S. Crashworthiness analysis and bionic design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. Thin-Walled Struct 2019;144:106333. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106333. 11/01.

[1٣] Zhang X-c, Liu N-n, An C-c, Wu H-x, Li N, Hao K-m. Dynamic crushing behaviors and enhanced energy absorption of bio-inspired hierarchical honeycombs with different topologies. Defence Technol 2023/04/01/2023;22:99–111. https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.11.013.

[١٤] Zou M, Xu S, Wei C, Wang H, Liu Z. A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo. Thin-Walled Struct 2016;101: 222–30. https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.023. 2016/04/01/.

[١٥] Wang F. Systematic design of 3D auxetic lattice materials with programmable Poisson's ratio for finite strains. J Mech Phys Solid 2018;114. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.01.013. 02/01.

[١٦] Yang H, Wang B, Ma L. Designing hierarchical metamaterials by topology analysiswith tailored Poisson's ratio and Young's modulus. Compos Struct 2019;214: 359–78. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.076. 2019/04/15/.

[١٧] Zheng Y, Wang Y, Lu X, Liao Z, Qu J. Evolutionary topology optimization for mechanical metamaterials with auxetic property. Int J Mech Sci 2020;179:105638. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105638. 04/01.

[١٨] Nguyen C, Zhuang X, Chamoin L, Zhao X, Nguyen-Xuan H, Rabczuk T. Three- dimensional topology optimization of auxetic metamaterial using isogeometric analysis and model order reduction. Comput Methods Appl Mech Eng 2020;371: 113306. https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113306. 2020/11/01/.

[19] Naghizadeh A, Safarabadi M, Farahani M. Experimental and numerical investigation of high-performance 3D-printed hybrid near-zero Poisson's ratio structures. Smart Mater Struct 2026;35:055032. https://doi.org/10.1088/1361-665X/ae68aa.

[٢٠] Karami S, Haghighi-Yazdi M, Safarabadi M. Low-velocity impact behavior of 3D-printed sandwich panels with integrated composite face sheets. Adv Eng Mater 2025;27:2401923. https://doi.org/10.1002/adem.202401923.

[٢١] Ghoddousi S, Samieiyani Z, Safarabadi M. Compressive behavior of 3D-printed stiffened bioinspired tubular