ماهنامه علمی پژوهشی
مهندسی ساخت و تولید ایران
www.smeir.org
10.22034/ijme.2025.520728.2075

طراحی و تحلیل ساختارهای مکانیکی بهینه‌شده با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی و چاپ سه‌بعدی

شهرام حسینی، امین فرخ آبادی*، رومینا نظری
گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: amin-farrokh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی
دریافت: ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۴
پذیرش: ۲۲ مرداد ۱۴۰۴

کلیدواژگان:
بهینه‌سازی توپولوژی
جاذب انرژی
چاپ سه‌بعدی
شبیه‌سازی عددی
آزمایش شبه استاتیکی

چکیده

در این پژوهش، رویکردی نوین مبتنی بر بهینه‌سازی توپولوژی برای طراحی و تحلیل ساختارهای مکانیکی سبک و با عملکرد بالا ارائه شده است. با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی، رفتار مکانیکی نمونه‌های طراحی‌شده مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا طرح اولیه در نرم‌افزار المان محدود آباکوس با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی ایجاد شد و با توجه به ساختار ایجاد شده، مدل شبکه‌ای برای بررسی به عنوان جاذب انرژی طراحی شد. مدل‌های طراحی شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفتند. برای اعتبارسنجی نتایج، نمونه‌های تجربی با استفاده از پرینتر سه‌بعدی ساخته شدند و به صورت تجربی تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفتند که همخوانی نتایج عددی و تجربی را تأیید کردند. دو چیدمان مختلف برای بررسی ساختار ارائه شده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ساختارهای بهینه‌شده از نظر جذب انرژی، استحکام و کاهش وزن، عملکرد مناسبی دارند و نمونه بهینه دوم از نظر مقدار جذب انرژی در مقایسه با نمونه اول به میزان ۳۱/۵ درصد دارای عملکرد بهتری است. این روش نه تنها امکان طراحی سازه‌هایی با کارایی بالاتر را فراهم می‌کند، بلکه کاربردهای گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، هوافضا و دیگر حوزه‌های مهندسی دارد.

Design and analysis of optimized mechanical structures using topology optimization and 3D printing

Shahram Hosseini, Amin Farrokhabadi*, Romina Nazari
Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* Corresponding Author's Email: amin-farrokh@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 2 May 2025
Accepted: 13 August 2025

Keywords:
Topology Optimization
Energy Absorber
3D Printing
Numerical Simulation
Quasi-Static Testing

Abstract

This study presents a novel approach based on topology optimization for the design and analysis of lightweight and high-performance mechanical structures. The mechanical behavior of the designed samples was investigated using numerical simulations and experimental tests. Initially, the preliminary design was generated using topology optimization using the Abaqus finite element software. Based on the resulting structure, a lattice model was designed to function as an energy absorber. The designed models were subjected to quasi-static loading in Abaqus finite element software. To validate the results, experimental samples were fabricated using 3D printing and tested under quasi-static loading conditions. The consistency between numerical and experimental results was confirmed. Two different configurations were studied to evaluate the proposed structure. The results demonstrated that the optimized structures exhibited satisfactory performance in terms of energy absorption, strength, and weight reduction, and the second optimal sample has a better performance in terms of energy absorption compared to the first sample by 31.5%. This approach not only enables the design of more efficient structures but also offers broad applications in industries such as automotive, aerospace, and other engineering fields.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hosseini Sh, Farrokhabadi A, Nazari R. Design and analysis of optimized mechanical structures using topology optimization and 3D printing. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jul 23;12(5):47-56. doi: 10.22034/ijme.2025.520728.2075 [In Persian]

۱– مقدمه

در صنایع مختلف، به‌ویژه در صنعت خودروسازی، وزن سازه‌ها نقش کلیدی در بهبود عملکرد، افزایش بهره‌وری سوخت و کاهش هزینه‌های عملیاتی ایفا می‌کند. کاهش وزن خودرو نه‌تنها موجب کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی آن می‌شود، بلکه تأثیر مستقیمی بر کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی دارد. این موضوع با توجه به روند رو به رشد استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی و سیاست‌های جهانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، اهمیت دوچندانی پیدا کرده است.

در میان ساختارهای فرا سازه‌ای، ساختارهای آگزتیک به دلیل ویژگی‌های مکانیکی منحصربه‌فرد خود، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. برخلاف مواد معمولی که هنگام کشیده شدن نازک‌تر می‌شوند، مواد آگزتیک در حین اعمال نیرو، به‌جای کاهش ضخامت، منبسط شده و رفتار مکانیکی خاصی از خود نشان می‌دهند. این خاصیت منحصربه‌فرد موجب افزایش مقاومت به ضربه، بهبود جذب انرژی، و تقویت پایداری ساختاری در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌شود. در نتیجه، این ساختارها می‌توانند در بخش‌های مختلف خودرو، از جمله اجزای بدنه، سامانه‌های جاذب انرژی در تصادفات، و حتی در کاهش ارتعاشات و نویز به کار گرفته شوند.

بداقی و همکاران [۱] به معرفی متا-ساندویچ‌های آگزتیک دو ماده‌ای با استفاده از فناوری چاپ چهاربعدی برای کاربردهای جذب انرژی برگشت‌پذیر پرداختند. این ساختارها بر اساس ویژگی‌های هایپرالاستیک پلیمرهای نرم و رفتارهای الاستو-پلاستیک پلیمرهای حافظه‌دار طراحی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که طراحی‌های آگزتیک دو ماده‌ای می‌توانند سفتی غیرخطی متغیری را برای کاربردهای جذب انرژی ایجاد کنند. ژانگ و همکاران [۲] به بررسی پیشرفت‌های اخیر در توسعه مواد و سازه‌های آگزتیک پرداخته و خواص مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی را تحلیل و خلاصه کرده است. همچنین، به مطالعات آزمایشگاهی محدود روی مواد و سازه‌های آگزتیک چاپ سه‌بعدی، در مقایسه با شبیه‌سازی‌های گسترده روش اجزای محدود، توجه ویژه‌ای شده است. گائو و همکاران [۳] به بررسی سازه‌های آگزتیک پرشده درون سازه‌های دیواره نازک برای بهبود جذب انرژی پرداختند. با الهام از سازه‌های فومی، یک ساختار آگزتیک دو پیکانی همراه با پیکربندی گرادیانی معرفی شده است تا عملکرد جذب انرژی بهینه شود. لینفورث و همکاران [۴] به بررسی ساختاری با سوراخ‌های بیضوی متناوب پرداختند که باعث ایجاد یک هندسه آگزتیک، موسوم به "بیضوی آگزتیک"، می‌شود. آزمایش‌های شبه استاتیکی و دینامیکی روی نمونه‌های کوچک‌مقیاس ساخته‌شده با برش لیزری انجام شده است. پارامترهای مختلف طراحی بررسی شده‌اند تا مکانیسم‌های جذب انرژی این سازه‌ها مشخص شوند. نجفی و همکاران [۵] به بررسی توانایی سازه‌های آگزتیک در جذب انرژی تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه با سرعت کم پرداختند. در این تحقیق، سه نوع هندسه آگزتیک شامل ری انترنت[1]، سرتیز[2] و کایرال آنتی تترا[3] با استفاده از روش ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی) ساخته شده‌اند. مکانیسم‌های شکست و جذب انرژی این ساختارها در هر دو نوع بارگذاری بررسی و مقایسه شده است. لو و همکاران [۶] یک ساختار لانه‌زنبوری آگزتیک ترکیبی به نام لانه‌زنبوری ستاره-دایره[4] برای بهبود ظرفیت جذب انرژی طراحی کردند. در این طراحی، دیوارهای دوبل شیب‌دار جایگزین دیوارهای افقی ساختار لانه‌زنبوری ستاره‌ای شده و یک حلقه دیواره نازک که با چهار گوشه مقعر آن در تماس است، اضافه شده است. رفتار لهیدگی دینامیکی درون صفحه‌ای این ساختار با استفاده از روش اجزای محدود بررسی شده است. بهارا و همکاران [۷] به توسعه‌ی سازه‌های آگزتیک سبک و با عملکرد بالا برای کاربردهای حفاظتی مانند جذب انرژی ناشی از انفجار و ضربه پرداختند. با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی، هندسه‌های جدیدی برای به حداکثر رساندن جذب انرژی طراحی شده‌اند. سه ساختار آگزتیک جدید به نام‌های ساختار ساعت شنی[5]، ساختار گلبرگ متقاطع مهاربندی شده[6] و ساختار گلبرگ متقاطع[7] معرفی شده و روابط طراحی آن‌ها با در نظر گرفتن امکان‌پذیری ساخت، استخراج شده است. برای بررسی خواص مکانیکی کلی و ظرفیت جذب انرژی تحت بارگذاری فشاری، نمونه‌هایی از این سازه‌ها در قالب داربست‌های مستطیلی طراحی شده‌اند. حسینی و همکاران [۸] به بررسی پاسخ غیرخطی فشاری یک سلول واحد سینوسی از جنس پلیمر حافظه‌دار پلی لاکتیک اسید پرداختند. در این تحقیق،

[1] Re-Entrant
[2] Arrowhead
[3] Anti-Tetra Chiral
[4] Star-Circle Honeycomb
[5] Hourglass Structure
[6] Braced Cross-Petal Structure
[7] Cross-Petal Structure

معماری‌های مختلفی با ضخامت‌های متنوع از طریق تحلیل اجزای محدود بهینه‌سازی شده‌اند و مقادیر انرژی جذب‌شده، انرژی تلف‌شده و نیروی بیشینه استخراج شده‌اند. داده‌های به‌دست‌آمده برای آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی با ساختاری مناسب استفاده شده است. سه الگوریتم شامل لوینبرگ-مارکوارت، تنظیم بیزی، و گرادیان مزدوج مقیاس شده برای آموزش این شبکه به کار گرفته شده‌اند. فرخ آبادی و همکاران [۹] به توسعه یک مدل نظری جدید بر اساس روش انرژی پرداختند که هدف آن پیش‌بینی خواص مکانیکی معادل یک ساختار تغییر شکل‌پذیر نوآورانه با ضریب پواسون صفر است. این ساختار از میله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف پیوسته تشکیل شده است. به دلیل استفاده از الیاف شیشه در ساختار پیشنهادی لانه‌زنبوری صلیبی، استحکام بالاتری نسبت به ساختارهای ساخته‌شده از مواد ایزوتروپیک خالص به دست آمده است.

بهینه‌سازی توپولوژی یکی از ابزارهای کاربردی در زمینه بهینه‌سازی هندسه ساختارهای مکانیکی بر اساس توابع هدف مختلف و قیدهای دلخواه است. از این ابزار می‌توان برای طراحی ساختارهای آگزتیک بهینه استفاده نمود. بوپاتی و همکاران [۱۰] بر بهبود قابلیت جذب ضربه در ساختار آگزتیک پیکانی تمرکز کردند. به منظور شناسایی نواحی ساختار که امکان کاهش ماده وجود دارد، بهینه‌سازی توپولوژی بر روی این ساختار انجام شده است. ساختار بهینه‌شده الهام‌بخش ایجاد سه نوع جدید از ساختار پیکانی شد. این طرح‌ها با استفاده از پلی لاکتیک اسید به روش پرینت سه‌بعدی ساخته شدند. گهر و همکاران [۱۱] سه ساختار آگزتیک جدید با اعمال اصلاحاتی بر ساختارهای موجود در مقالات علمی طراحی کردند. عملکرد مکانیکی درون صفحه‌ای این ساختارهای جدید تحت بارهای فشاری تک‌محوری با استفاده از مدل‌های تحلیل اجزای محدود که به صورت تجربی اعتبارسنجی شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. پارسا و یزدانی [۱۲] به بررسی سازه‌های مشبک هرمی پرداختند که به دلیل سبکی و جذب انرژی بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. این تحقیق روشی ساده و سریع برای اتصال با ایجاد دندانه روی لوله‌ها ارائه می‌دهد که استحکام را افزایش می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان داد که نسبت طول به قطر ۵ و زاویه ۵۵ درجه بیشترین جذب انرژی را دارند. قنادی و همکاران [۱۳] به بهینه‌سازی هندسی سازه مشبک آگزتیک منحنی شکل از جنس پلی لاکتیک اسید با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. هدف از این تحقیق، بهبود جذب انرژی، کاهش نیروی بیشینه، و افزایش مدول الاستیسیته با تنظیم پارامترهای هندسی (شعاع انحنا، زاویه و طول) است. پس از بهینه‌سازی، نمونه بهینه با چاپ سه‌بعدی ساخته و تحت آزمایش فشار شبه استاتیک قرار گرفته است. رضایت و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی تأثیر لایه الاستومر بر بهبود عملکرد مکانیکی این پانل‌ها تحت بارگذاری پانچ شبه استاتیک پرداخته‌اند. افزودن لایه الاستومر به‌عنوان رابط بین هسته و رویه کامپوزیتی، عملکرد مکانیکی پانل‌های ساندویچی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. این بهبود به‌ویژه در کاربردهای هوایی که نیازمند سبکی همراه با جذب انرژی بالا هستند، حائز اهمیت است. میرافضلی و حسن‌آبادی [۱۵] به بررسی رفتار مکانیکی و جذب انرژی ساختارهای متخلخل بر اساس سطح مینیمال شوارتز پی پرداخته‌اند. سه نمونه مکعبی شامل: نمونه توپر پلی لاکتیک اسید، نمونه متخلخل پلی لاکتیک اسید ۵۰ درصد چاپ سه‌بعدی به روش لایه نشانی ذوبی، نمونه متخلخل ۵۰٪ رزین ساخته شده با استریولیتوگرافی ماسک دار مورد بررسی قرار گرفتند و متوجه شده‌اند که ساختارهای متخلخل پلی لاکتیک اسید با تخلخل ۵۰٪ (بر پایه طراحی شوارتز-پی) به دلیل رفتار نرم و جذب انرژی کنترل‌شده، گزینه مناسبی برای کاربردهای نیازمند استهلاک انرژی هستند، درحالی‌که نمونه‌های رزینی برای این منظور نامناسب‌اند.

با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان مشاهده نمود که ساختارهای آگزتیک یکی از ساختارهای کارآمد در جاذب‌های انرژی هستند و می‌توانند با افزایش نسبت استحکام به وزن، راندمان جذب انرژی را افزایش دهند. همچنین بهینه‌سازی توپولوژی می‌تواند به عنوان ابزار مؤثر و کارآمدی برای طراحی بهینه ساختارهای آگزتیک استفاده شود. از همین رو، در این تحقیق با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی، یک ساختار جدید به عنوان جاذب انرژی طراحی و ساخته شده است. ابتدا ساختار بهینه شده در نرم‌افزار المان محدود تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار می‌گیرد. برای بررسی صحت نتایج به دست آمده، نمونه تجربی با استفاده از پرینتر سه‌بعدی ساخته شده و با استفاده از دستگاه آزمون فشار، تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفته است.

۱-۱- طراحی سلول واحد

در این تحقیق برای طراحی سلول واحد از بهینه‌سازی توپولوژی استفاده شده است. بهینه‌سازی توپولوژی یکی از روش‌های پیشرفته در طراحی سازه‌ها و سامانه‌های مکانیکی است که هدف آن توزیع بهینه ماده در یک فضای طراحی مشخص برای دستیابی به بهترین

عملکرد ممکن است. این روش به خصوص در طراحی سبک‌وزن سازه‌ها، هوافضا، خودرو و چاپ سه‌بعدی کاربرد فراوان دارد. در بهینه‌سازی توپولوژی، یک فضای طراحی اولیه (معمولاً شامل تمام مواد ممکن) تحت قیود مکانیکی، هندسی و عملکردی، بهینه‌سازی می‌شود تا ماده فقط در مناطقی باقی بماند که برای استحکام و عملکرد مطلوب ضروری است. هدف معمولاً کمینه کردن وزن سازه یا بیشینه کردن سفتی آن (حداقل تغییر شکل) است، درحالی‌که قیود مکانیکی مثل تنش یا جابه‌جایی در محدوده مجاز باقی بمانند.

تابع هدف به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۱۶].

$$Minimize:\ C = \int_V E(x)\epsilon(x):\epsilon(x)dV \qquad (۱)$$

که در آن C انرژی کرنشی کل (معیار سفتی)، E(x) مدول الاستیسیته ماده در نقطه x، ϵ(x) کرنش در نقطه x و V حجم فضای طراحی است.

در بهینه‌سازی توپولوژی، علاوه بر تابع هدف، قید طراحی نیز تعریف می‌شود. در این تحقیق قید محدودیت حجم ماده به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود [۱۶].

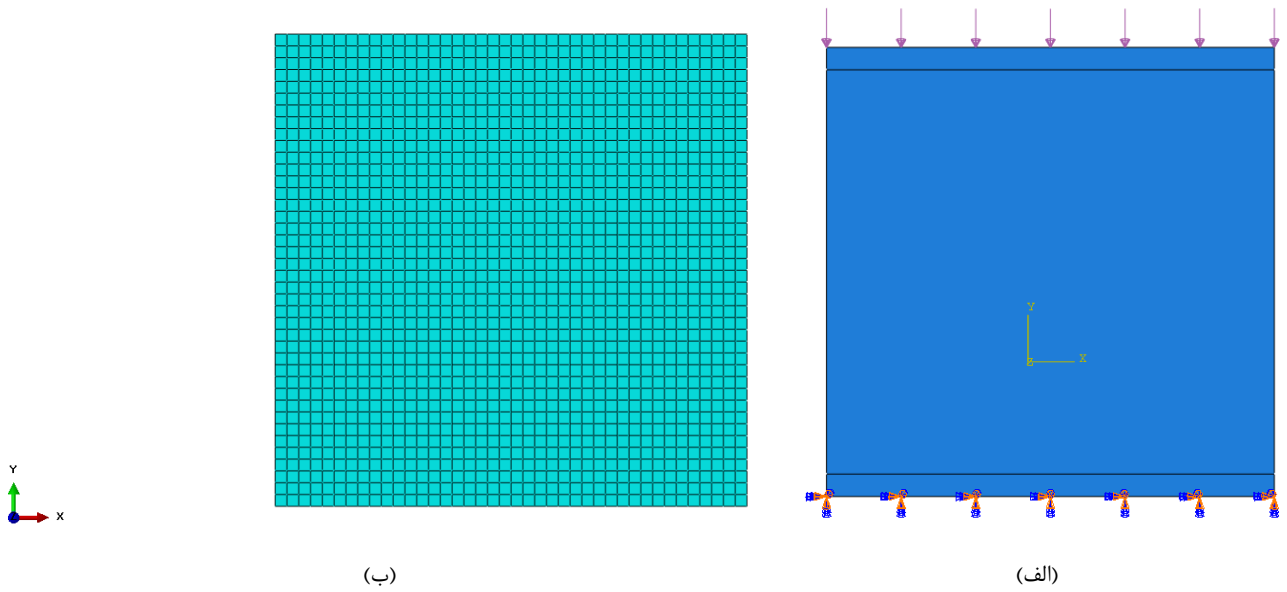
$$\int_V \rho(x)dV \leq Vmax \qquad (۲)$$

که ρ(x) تابع چگالی ماده و Vmax حجم مجاز ماده است.

در این تحقیق حجم مجاز ماده برابر با ۲۵ درصد حجم اولیه در نظر گرفته شده است.

۲– بهینه‌سازی توپولوژی در نرم‌افزار المان محدود

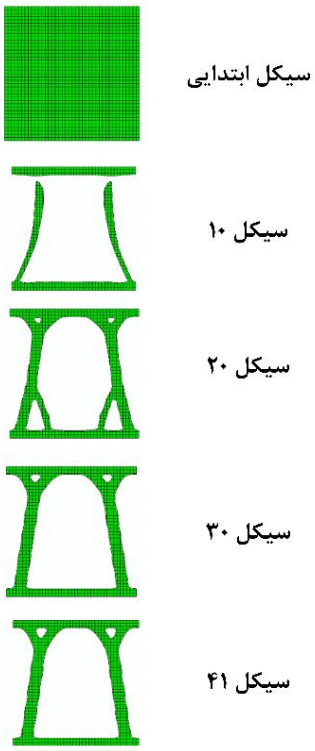
در گام اول یک هندسه اولیه تعریف می‌شود. برای این منظور یک مربع با ابعاد ۲۰×۲۰ میلی‌متر به صورت کرنش صفحه‌ای تعریف شده است. برای ثابت ماندن لبه‌های بالایی و پایینی، با استفاده از پارتیشن‌بندی، نواحی مورد نظر ایجاد می‌شوند. شرایط مرزی در لبه پایینی به صورت گیردار (همه درجات آزادی بسته) در نظر گرفته شده و بار گسترده فشاری بر روی لبه بالایی اعمال شده است (شکل ۱-الف). در گام دوم، شبکه‌بندی بر روی هندسه انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود، برای این منظور از المان CPE4R (المان چهارگرهی کرنش صفحه‌ای) استفاده شده است که به صورت یکنواخت و منظم ورق مربعی شکل را شبکه‌بندی نموده است.



(ب) (الف)

شکل ۱ الف) تعریف شرایط مرزی و بارگذاری بر روی هندسه اولیه و ب) شبکه‌بندی هندسه

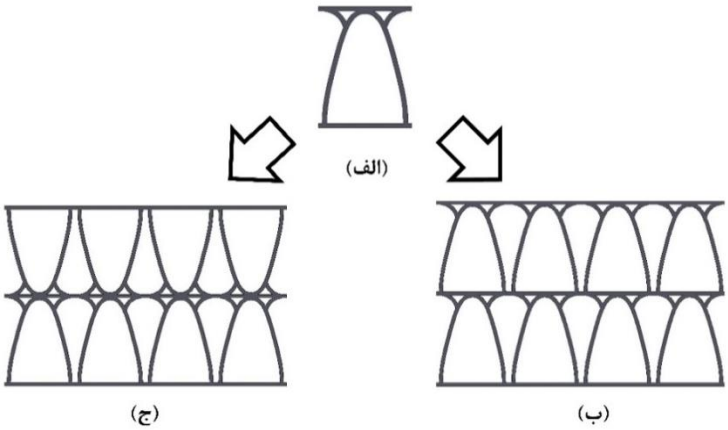
پس از اعمال بهینه‌سازی توپولوژی بر روی هندسه، پاسخ بهینه به صورت شکل ۲ حاصل شده است.



شکل ۲ سیکل‌های بهینه‌سازی توپولوژی برای دست یافتن به ساختار بهینه

۲-۱- طراحی مدل در نرم‌افزار طراحی

با توجه به مدل ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی، طرح ایجاد شده در نرم‌افزار سالیدورکس طراحی شده است که در شکل ۳ با توجه به مطالب فوق شماتیک اولیه آن نشان داده شده است. جهت بررسی کارایی سلول طراحی شده، یک ساختار ۲×۴ به صورت شکل ۳-ب و شکل ۳-ج در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ مدل طراحی شده با توجه به نتایج بهینه‌سازی توپولوژی. الف) سلول واحد، ب) چیدمان M1 و ج) چیدمان M2

۳- ساخت نمونه

در این تحقیق ساخت نمونه‌های تجربی با استفاده از پرینتر سه‌بعدی انجام شده است. برای این منظور، تنظیمات مربوط به پرینتر سه‌بعدی در نرم‌افزار کورا[1] انجام شده که در جدول ۱ آمده است.

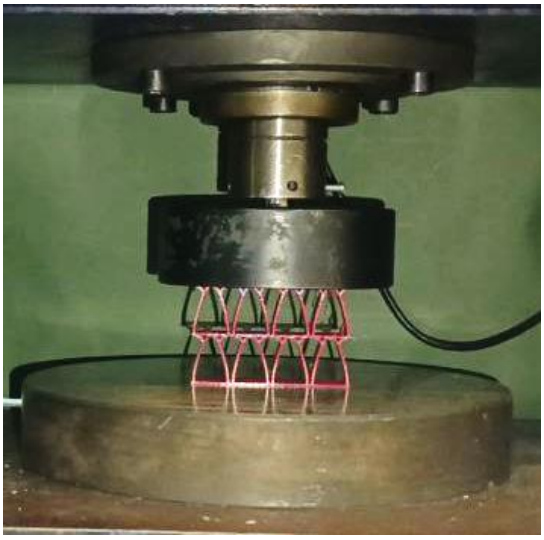
[1] Cura

جدول ۱ پارامترهای پرینتر سه‌بعدی

پارامتر	مقدار
دمای نازل	۲۱۰ درجه سانتی‌گراد
دمای صفحه پرینتر	۷۰ درجه سانتی‌گراد
سرعت حرکت نازل	۴۰ میلی‌متر بر ثانیه
قطر نازل	۰/۴ میلی‌متر
ضخامت هر لایه	۰/۲ میلی‌متر

۴–آزمایش شبه استاتیک

جهت بررسی رفتار ساختار طراحی شده به عنوان جاذب انرژی، آزمایش فشار شبه استاتیکی بر روی آن انجام شده است. این آزمایش با استفاده از دستگاه آزمون فشار و با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است (شکل ۴).



شکل ۴ آزمون فشار شبه استاتیکی با استفاده از دستگاه آزمون فشار

۵– استخراج خواص مکانیکی

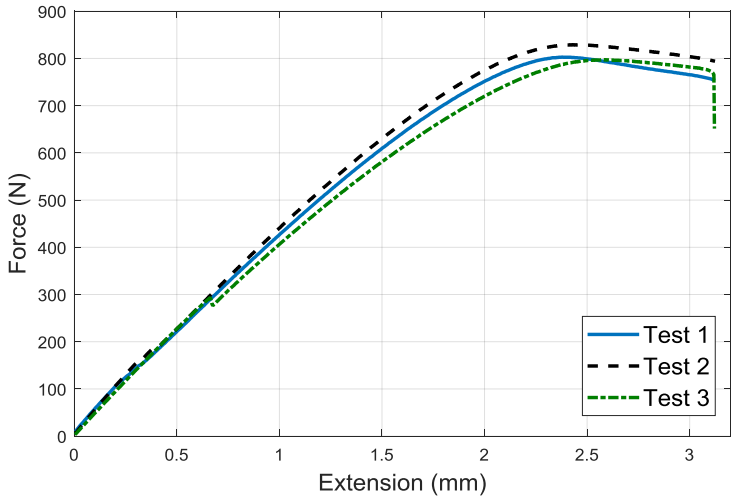
برای شبیه‌سازی مدل‌ها در نرم‌افزار المان محدود، خواص مکانیکی پلی لاکتیک اسید به کار رفته در آن‌ها لازم است. به همین خاطر از آزمون کشش با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه بر اساس استاندارد ASTM-D638 استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمون کشش در بخش نتایج ارائه شده‌اند.

۶– نتایج و بحث

در شکل ۵ نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های استاندارد نشان داده شده است. با استفاده از این نمودار خواص مکانیکی پلی لاکتیک اسید حاصل می‌شود که در جدول ۲ نشان داده شده است.

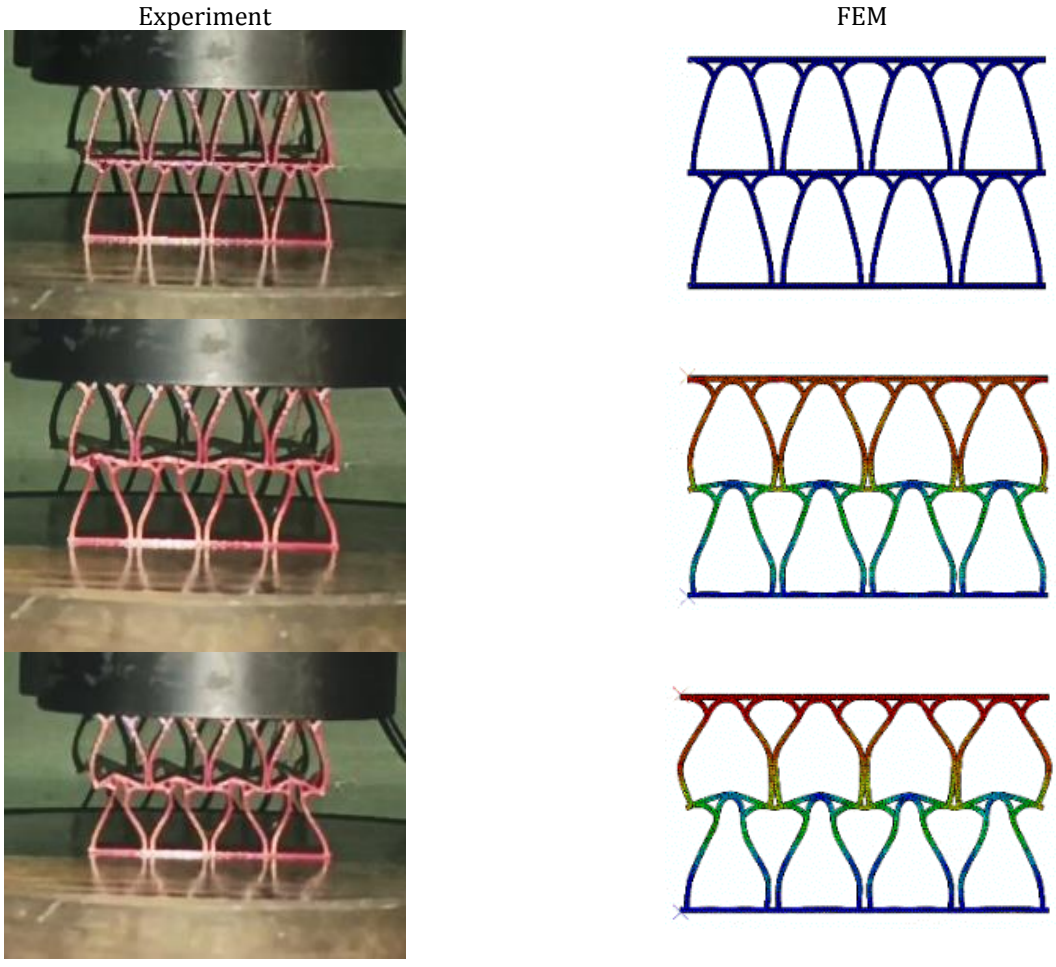
جدول ۲ خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش

پارامتر	مقدار
E	2.181 GPa
σ_y	38 MPa
ε_y	0.06
ρ	1240 kg/m^3

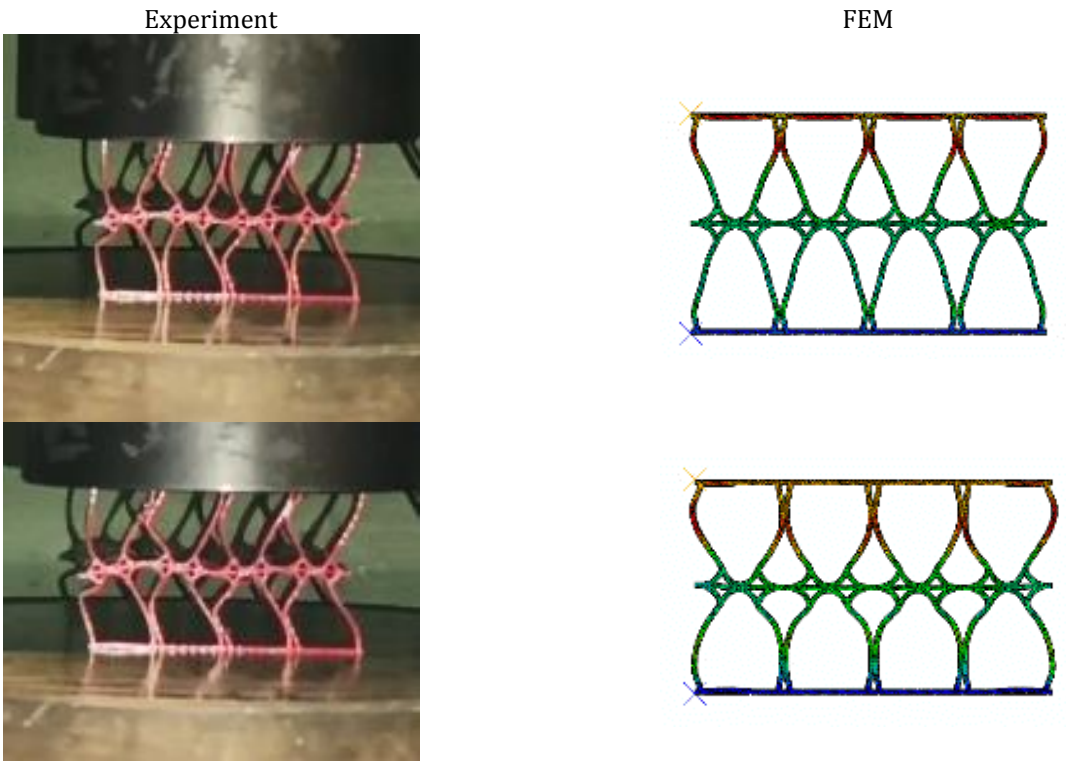


شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون کشش نمونه‌های استاندارد

در شکل‌های ۶ و ۷ تصاویر مربوط به تغییر شکل نمونه‌های M1 و M2 حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییر شکل‌ها در هر دو آزمایش تجربی با نتایج شبیه‌سازی عددی مشابه بوده که نشان دهنده صحت شبیه‌سازی عددی است.



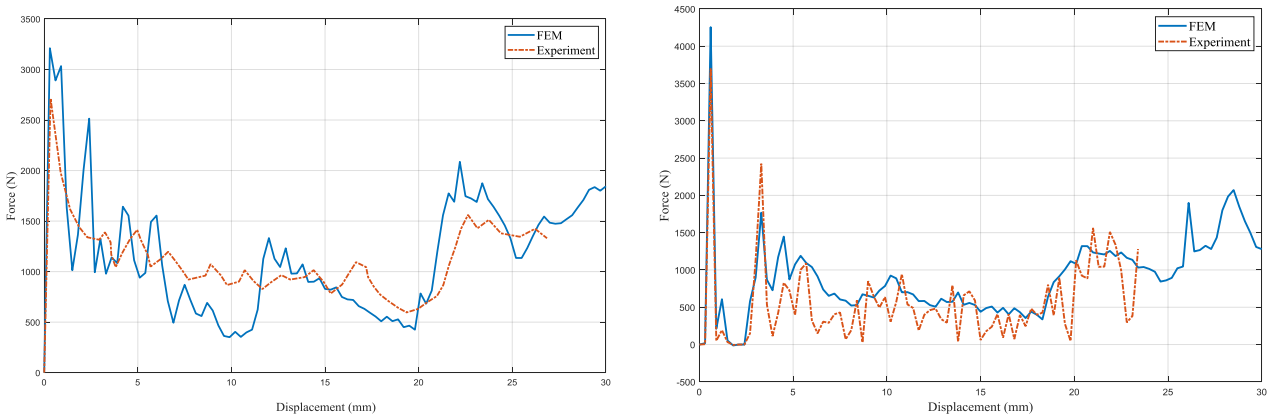
شکل ۶ تغییر شکل نمونه M1 به صورت الف) عددی و ب) تجربی



(ب) (الف)

شکل ۷ تغییر شکل نمونه M2 به صورت الف) عددی و ب) تجربی

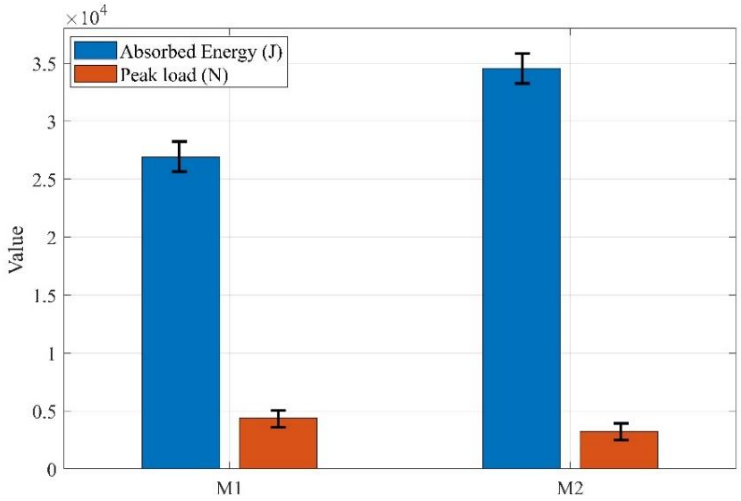
در شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی برای آزمون شبه استاتیک مدل‌های M1 و M2 با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش‌های عددی و تجربی اختلاف کمی داشته و رفتار مشابهی را نشان می‌دهند. با استفاده از این نمودار می‌توان مقادیر مختلف مربوط به پارامترهای جذب انرژی را استخراج نمود.



(ب) (الف)

شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار شبه استاتیکی برای الف) نمونه M1 و ب) نمونه M2

در شکل ۹ مقادیر انرژی جذب شده و نیروی بیشینه برای مدل‌های M1 و M2 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انرژی جذب شده برای نمونه M2 بیشتر بوده که کارایی بهتر آن را نشان می‌دهد. همچنین نیروی بیشینه برای این نمونه، کمتر از نمونه M1 است که نشان دهنده بهینه‌تر بودن نمونه M2 است.



شکل ۹ مقایسه مقادیر انرژی جذب شده و نیروی بیشینه برای نمونه‌های M1 و M2

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی توپولوژی در طراحی ساختارهای مکانیکی به‌عنوان یک روش مؤثر برای کاهش وزن، بهبود عملکرد مکانیکی و افزایش بازدهی انرژی بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی نشان داد که ساختارهای بهینه‌شده قادر به ارائه عملکرد مناسبی هستند. تحلیل‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های طراحی‌شده حاکی از آن بود که استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی می‌تواند در کاهش وزن و افزایش استحکام سازه‌ها نقش بسزایی ایفا کند. علاوه بر این، آزمایش‌های شبه استاتیکی نشان داد که ساختارهای پیشنهادی با تحمل نیروی بالا و رفتار بهینه به عنوان جاذب انرژی، از پتانسیل بالایی برای کاربرد در صنایع خودروسازی و هوافضا برخوردارند. تطابق نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی نشان‌دهنده صحت و اعتبار روش‌های مورد استفاده در این تحقیق است. مقایسه ساختارهای شبکه‌ای M1 و M2 نشان داد که ساختار M2 به مقدار ۲۲ درصد دارای جذب انرژی بیشتر و به مقدار ۲۵ درصد دارای نیروی بیشینه کمتری در مقایسه با ساختار M1 است که نشان دهنده بازدهی بیشتر نمونه M2 در مقایسه با نمونه M1 است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی عددی و چاپ سه‌بعدی، فرصت‌های جدیدی را برای طراحی و توسعه ساختارهای مکانیکی بهینه‌شده فراهم می‌کند.

تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۳۲۲۲۴» انجام شده است.

References

[1] Bodaghi M, Serjouei A, Zolfagharian A, Fotouhi M, Rahman H, Durand D. Reversible energy absorbing meta-sandwiches by FDM 4D printing. International Journal of Mechanical Sciences. 2020 May 1;173:105451. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105451

[2] Zhang J, Lu G, You Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review. Composites Part B: Engineering. 2020 Nov 15;201:108340. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108340

[3] Gao Q, Liao WH. Energy absorption of thin walled tube filled with gradient auxetic structures-theory and simulation. International Journal of Mechanical Sciences. 2021 Jul 1;201:106475. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106475

[4] Linforth S, Ngo T, Tran P, Ruan D, Odish R. Investigation of the auxetic oval structure for energy absorption through quasi-static and dynamic experiments. International journal of impact engineering. 2021 Jan 1;147:103741. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103741

[5] Najafi M, Ahmadi H, Liaghat G. Experimental investigation on energy absorption of auxetic structures. Materials today: proceedings. 2021 Jan 1;34:350-5. doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.075

[6] Lu H, Wang X, Chen T. In-plane dynamics crushing of a combined auxetic honeycomb with negative Poisson's ratio and enhanced energy absorption. Thin-Walled Structures. 2021 Mar 1;160:107366. doi: 10.1016/j.tws.2020.107366
[7] Bohara RP, Linforth S, Nguyen T, Ghazlan A, Ngo T. Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimisation. International Journal of Mechanical Sciences. 2021 Dec 1;211:106793. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106793
[8] Hosseini S, Farrokhabadi A, Chronopoulos D. Experimental and numerical analysis of shape memory sinusoidal lattice structure: Optimization through fusing an artificial neural network to a genetic algorithm. Composite Structures. 2023 Nov 1;323:117454. doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117454
[9] Farrokhabadi A, Ashrafian MM, Gharehbaghi H, Nazari R. Evaluation of the equivalent mechanical properties in a novel composite cruciform honeycomb using analytical and numerical methods. Composite Structures. 2021 Nov 1;275:114410. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114410
[10] Boopathi B, Ponniah G, Burela RG. Realizing the impact and compressive strengths of an arrowhead auxetic structure inspired by topology optimization. International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics. 2020 Dec;12(3):211-7. doi: 10.1007/s12572-021-00286-w
[11] Gohar S, Hussain G, Ilyas M, Ali A. Performance of 3D printed topologically optimized novel auxetic structures under compressive loading: experimental and FE analyses. Journal of materials research and technology. 2021 Nov 1;15:394-408. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.07.149
[12] Parsa A, Yazdani M. Presentation of a new construction methodology and experimental study of the energy absorption of pyramid core sandwich panels. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Sep 23;8(7):10-9. [In Persian]
[13] Ghannadi N, Farrokhabadi A, Hosseini S. Energy Absorption Analysis in an Auxetic Lattice Structure Using Artificial Neural Network Machine Learning and Genetic Algorithm. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Oct 22;11(8):20-31. doi: 10.22034/ijme.2024.470912.1993 [In Persian]
[14] Rezayat HR, Toozandehjani H, Zakeri A. Experimental study of energy absorption of sandwich panel with composite/elastomer skin. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Dec 22;10(10):26-42. doi: 10.22034/IJME.2023.418015.1840 [In Persian]
[15] Mirafzali SM, Hasanabadi A. Investigating the energy absorption quality of the porous Schwarz P structure made by 3D printing method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Jan 21;9(11):13-20. doi: 10.22034/IJME.2023.383269.1744 [In Persian]
[16] Bendsoe MP, Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. 2nd ed. Berlin: Springer; 2003.