



بررسی نحوه جذب انرژی ساختار متخلخل شوارز پی ساخته شده به روش پرینت سه بعدی

سیدمحمدباقر میرافزالی^۱، علی حسن آبادی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* hasanabadi@birjand.ac.ir، ۹۷۱۷۵/۶۱۵

چکیده

اطلاعات مقاله

ساختارهای متخلخل به علت عملکرد چندگانه‌ای که دارند مورد توجه پژوهشگران از زمینه‌های مختلف می‌باشند. در این پژوهش نحوه جذب انرژی ساختارهای متخلخل طراحی شده بر اساس سطح مینیمال شوارز پی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور سه نمونه مکعبی طراحی و مورد تست فشار قرار می‌گیرد. دو نمونه از جنس پلی‌لاکتیک اسید که یکی از آن‌ها کاملاً توپر و دومی با پنجاه درصد تخلخل می‌باشد به کمک روش لایه‌نشانی ذوبی پرینت می‌شود. نمونه سوم از جنس رزین یو وی و با پنجاه درصد تخلخل، به کمک روش استریولیتوگرافی ماسک‌دار ساخته می‌شود. در ادامه هر سه نمونه تحت تست فشار قرار گرفته و نمودارهای نیرو-جابجایی و همچنین انرژی-جابجایی استخراج می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که رفتار نمونه رزینی کاملاً به‌صورت ترد می‌باشد و قابلیت تغییر شکل و جذب انرژی ندارد. در مقابل نمونه متخلخل از جنس پلی‌لاکتیک اسید تا کرنش ۷۰٪ تحت تغییر شکل قرار گرفته است. همچنین مقایسه دو نمونه توپر و متخلخل از جنس پلی‌لاکتیک اسید نشان می‌دهد که مقدار انرژی جذب شده در نمونه متخلخل حدود یک سوم، اما نحوه جذب انرژی در آن به‌صورت نرم و هموار می‌باشد.

مقاله پژوهشی
دریافت: ۷ بهمن ۱۴۰۱
داوری اولیه: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۲
پذیرش: ۲۴ خرداد ۱۴۰۲
کلیدواژگان:
ساختار شوارز پی
ساختار متخلخل
جذب انرژی
تست فشار
پرینت سه بعدی

Investigating the energy absorption quality of the porous Schwarz P structure made by 3D printing method

Seyyed Mohammad Bagher Mirafzali, Ali Hasanabadi*

Mechanical Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran

* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, hasanabadi@birjand.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 27 January 2023
First Decision: 5 May 2023
Accepted: 14 June 2023

Keywords:

Schwarz P Structure
Porous Structure
Energy Absorption
Pressure Test
3D Printing

Abstract

Porous structures are of interest to researchers from different fields due to their multiple functions. In this research, the quality of energy absorption of porous structures designed based on Schwarz P minimal surface is investigated. For this purpose, three cubic samples are designed and tested using pressure test. Two samples of polylactic acid, one of which is completely solid and the second with 50% porosity are printed using the fused deposition modeling method. The third sample is made of UV resin with 50% porosity, using the masked stereolithography apparatus. In the following, all three samples are subjected to a pressure test, and force-displacement and energy-displacement diagrams are extracted. The obtained results show that the behavior of the resin sample is completely brittle and does not have ductility and the ability to absorb energy. In contrast, the PLA sample has undergone deformation up to 70% strain. Also, the comparison of two solid and porous polylactic acid samples shows that the amount of energy absorbed in the porous sample is about one-third, but the absorption quality is soft and smooth.

۱- مقدمه

مختلف قرار گرفته است. بیسواس و همکاران [۱] در پژوهشی رفتار تغییر شکل و شکست مواد متخلخل تحت بارگذاری دینامیکی و استاتیکی را به‌صورت عددی بررسی کردند. اژدری و همکاران [۲] رفتار تخریب دینامیکی و میزان جذب انرژی سازه لانه زنبوری را بررسی و با استفاده از روش اجزاء محدود، مودهای مختلف تغییر شکل و میزان جذب انرژی را در این سازه‌ها تحلیل نمودند. ران و همکاران [۳] تخریب درون صفحه سازه‌های لانه زنبوری را مطالعه نمودند. آن‌ها اثر ضخامت دیواره سلول و

ساختارهای متخلخل با توجه به اینکه بخش‌هایی از سازه، از ماده اصلی خالی شده است می‌توانند گزینه مناسبی برای مواردی نظیر عایق‌های صوتی، دمپرها و جاذب‌های انرژی باشند. با توجه به قابلیت‌های این ساختارها از جمله نسبت جرم به حجم پایین‌تر نسبت به ساختارهای توپر و همچنین وجود قابلیت دست‌کاری هندسی و نحوه توزیع مواد، بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی آن‌ها مورد توجه پژوهشگران از حوزه‌های

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S.M.B. Mirafzali, A. Hasanabadi, Investigating the energy absorption quality of the porous Schwarz P structure made by 3D printing method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 13- 20, 2023 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2023.383269.1744>

الاستیک و کرنش تسلیم دارد. کولینی و همکاران [۱۰] در پژوهشی به طراحی و بهینه‌سازی ساختار متخلخل TPMS پرداختند. آن‌ها تأثیر نازک یا ضخیم بودن دیواره ساختار سلول واحد را بر خواص و عملکرد مکانیکی از جمله چگالی مؤثر، سفتی فشاری و جذب انرژی بررسی کردند. رضانی و همکاران [۱۱] ساخت چرخ‌دنده با ساختار متخلخل و ایجاد آن با استفاده از فناوری SLM^۵ را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی، کاهش لرزش و کاهش وزن چرخ‌دنده را گزارش دادند. حسن‌آبادی [۱۲] به طراحی و بهینه‌سازی ساختار به نحوی که بتواند به‌طور هم‌زمان چندین ویژگی را دارا باشد، پرداخت. او روش جدیدی برای مدل‌سازی رویه شوارز پی با استفاده از پینه چندضلعی ارائه کرد. وی با بررسی ضریب هدایت حرارتی مؤثر و نتایج حاصله نشان داد که می‌توان یک ساختار را به دو فازی که کاملاً دارای تقارن می‌باشند، تقسیم کرد. حسینی واجاری و همکاران [۱۳] به بررسی رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی الهام گرفته از ساختار پیله کرم ابریشم و ساخت آن به روش پردازش نوری دیجیتال^۶ پرداختند. همچنین آن‌ها در پژوهشی دیگر [۱۴] به بررسی رفتار مکانیکی ساختار اینفینیتی الهام گرفته شده از پیله کرم ابریشم و مقایسه آن با ساختار میله‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که رفتار ساختار اینفینیتی نسبت به ساختارهای میله‌ای در جهات مختلف ناهمسانگرد می‌باشد و ساختار اینفینیتی برای کاربردهای جذب انرژی مناسب‌تر می‌باشد. ژانگ و همکاران [۱۵] مشخصات میدان جریان در سازه‌های متخلخل TPMS را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، ارتباط بین پارامترهای سازه‌های TPMS و نفوذپذیری را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که نوع سازه TPMS، میزان تخلخل آن و مقیاس سلول واحد، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نفوذپذیری سازه متخلخل هستند. خیمنز و همکاران [۱۶] انواع روش‌های ساخت داربست‌های متخلخل و مزایا و معایب هر کدام را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها روش‌های طراحی موجود، انواع مدل‌سازی ریاضی، مواد، روش‌های ساخت و روش‌های ارزیابی سازه‌های داربستی را مورد بررسی قرار دادند. خیمنز و همکاران در پژوهشی دیگر [۱۷] روشی پارامتریک برای طراحی سازه‌های داربستی بافت استخوان با استفاده از TPMS ارائه نمودند.

سرعت بار ضربه‌ای را بر مود تغییر شکل، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی المان محدود آباکوس، بررسی و فرمولی برای محاسبه تنش در سرعت‌های بالا ارائه نمودند. فرامرزیان حقیقی و همکاران [۴] ساختارهای متخلخل ساخته شده به روش FDM^۱ از جنس PLA^۲ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها رفتار مکانیکی این سازه‌ها را تحت آزمون فشار برای ساختارهای متخلخل کلونین بررسی کردند و دریافتند که افزایش درصد تخلخل، منجر به کاهش استحکام و افزایش اندازه سلول‌ها در یک تخلخل ثابت، منجر به افزایش مدول یانگ سازه می‌شود. همچنین با کاهش درصد تخلخل، مقدار کرنش تا مرحله شکست در یک تنش نسبتاً ثابت، افزایش داشته است.

کاراگورگیو و همکاران [۵] تأثیر خواص ظاهری ساختار از جمله ابعاد و اندازه حفره‌ها و مقدار نسبت تخلخل را بر استحکام ساختار مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که هرچه اندازه حفره‌ها بزرگ‌تر باشد، مقاومت مکانیکی سازه‌ها کاهش می‌یابد. بلنکویر و همکاران [۶] هشت ساختار از مجموعه سطوح مینیمال تکرارشونده^۳ را به‌منظور استفاده در بافت‌های بدن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها توانستند رابطه‌ای بین مقدار ضریب نفوذپذیری^۴ و مساحت ویژه پیدا کنند. همچنین این پژوهش نشان داد که مقدار ضریب نفوذپذیری به ابعاد و اندازه نمونه آزمایش و نوع سیال تحت آزمایش بستگی نداشته و فقط به نسبت تخلخل، اندازه حفره‌ها، جهت و ارتباط داخلی حفره‌ها وابسته است. شین و همکاران [۷] رابطه بین میزان تخلخل و رفتار کلی ساختار در سازه‌های داربستی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از نرم‌افزار المان محدود برای بارگذاری شبه استاتیک بر روی انواع ساختارهای TPMS استفاده نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که رویه شوارتز P بهترین پایداری و همچنین نفوذپذیری سیال را از خود نشان می‌دهند. سامر و همکاران [۸] با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی المان محدود به بررسی عددی تخریب در مقاطع جدار نازک با ضخامت‌های متفاوت، پرداختند. آن‌ها در هر سازه، بار بیشینه و جذب انرژی ویژه را مورد بررسی قرار دادند. رگیو و همکاران [۹] در پژوهشی به بررسی تأثیر پارامترهای ساختار متخلخل استوانه‌ای، نسبت ارتفاع به قطر و درصد تخلخل بر خواص مکانیکی فشاری تولید شده به روش پرینت سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نسبت ارتفاع به قطر تأثیر قابل توجهی بر مدول

¹ FDM: Fused Deposition Modeling

² PLA: Polylactic Acid

³ TPMS: Triply Periodic Minimal Surface

⁴ Permeability

⁵ SLM: Elective Laser Melting

⁶ DLP: Digital Light Processing

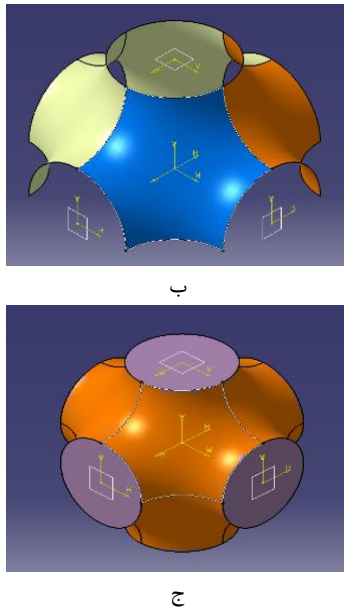


Fig. 1 Creation the Schwarz P unit cell structure with 50% porosity using a), b) and c) steps

شکل ۱ ایجاد سلول واحد ساختار شوارز P با تخلخل ۵۰ درصد با استفاده از مراحل الف، ب و ج

با تکرار سلول واحد به تعداد دلخواه و در سه راستا می توان ساختار متخلخل مورد نظر را ایجاد کرد. اندازه کلی ساختار متخلخل $50 \times 50 \times 50$ میلی متر در نظر گرفته شده است [۲۰] که بر اساس آن تعداد کلی سلول های به کاررفته در ساختار، ۱۲۵ عدد می باشد (شکل ۲).

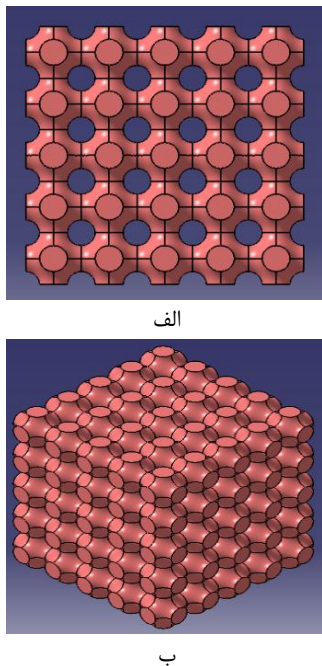


Fig. 2 Repeating the unit cell to form a structure of up to 5 cm long a) 2D representation, b) 3D representation

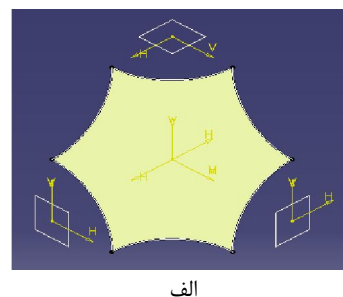
شکل ۲ تکرار سلول واحد و ایجاد ساختار به طول ضلع ۵ سانتی متر الف) نمایش دوبعدی ب) نمایش سه بعدی

با توجه به تحقیقات انجام شده، معلوم شد ساختارهای متخلخل مبتنی بر سطوح مینیمال جایگاه ویژه ای در مباحث مهندسی از طراحی سازه های داربستی برای بافت های بدن تا جاذب های انرژی پیدا کرده اند. در پژوهش حاضر رفتار جذب انرژی شبه استاتیکی سازه متخلخل ایجاد شده با استفاده از سلول واحد شوارز پی مورد بررسی قرار می گیرد. به این منظور ابتدا ساختار مورد نیاز با کسر حجمی پنجاه درصد با استفاده از روش پینه چندضلعی، طراحی شده و سپس در دو جنس پلی لاکتیک اسید و رزین به کمک پرینت سه بعدی ساخته شده و مورد تست تجربی و مقایسه قرار می گیرند.

۲- مدل سازی ساختار شوارز پی

امروزه روش های زیادی برای طراحی سطوح مینیمال و رویه های شوارز پیشنهاد شده که معمولاً این روش ها بر پایه هندسه و معادلات ریاضی هستند که باعث دشوار شدن در طراحی این چنین رویه هایی می شوند. برای بعضی از انواع سطوح مینیمال به خصوص نوع P می توان از پینه چندضلعی بهره گرفت [۱۸]. در این تحقیق با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۱۲] رویه و ساختار متخلخل مبتنی بر شوارز P طراحی می شود. مزیت استفاده از ساختار شوارز P به عنوان ساختار متخلخل نسبت به ساختارهای متخلخل مینیمال دیگر این است که شوارز P ساختاری منظم تر و مدل سازی راحت تری دارد. روش مورد استفاده به نحوی است که کنترل بر روی پارامترهای ساختار متخلخل از قبیل درصد تخلخل و ابعاد کلی ساختار کاملاً وجود دارد [۱۹].

برای مدل سازی سطح ابتدا پینه ای مطابق با شکل ۱ الف) ترسیم می شود به نحوی که اندازه شش شعاع با یکدیگر برابر و اندازه ی هر کدام برابر با $2/5$ میلی متر می باشد. با آینه ای کردن پینه اولیه، سطح مورد نیاز برای سلول واحد مطابق با شکل ۱ ب) ایجاد شده و با توپر کردن سطح، سلول اولیه مطابق با شکل ۱ ج) با تخلخل پنجاه درصد ایجاد می شود.



۳- پرینت سه بعدی ساختارها

به منظور مقایسه تأثیر تخلخل، دو ساختار؛ یکی با پنجاه درصد تخلخل و دومی به صورت مکعب کاملاً توپر، پرینت می شود. همچنین به منظور بررسی تأثیر جنس، ساختار سوم به صورت متخلخل و از جنس رزین پرینت می شود. استفاده از پرینترهای سه بعدی یکی از روش های سریع و کم هزینه ساخت قطعات پیچیده در صنایع مختلف می باشد. تولید قطعات به کمک پرینترهای سه بعدی عمدتاً به صورت لایه چینی مواد بر روی یکدیگر است. در دو نمونه اول روش استفاده برای پرینت سه بعدی روش FDM یا لایه نشانی هم جوش است [۲۱]. جنس استفاده شده برای ساخت دو نمونه مورد نظر از جنس پلی لاکتیک اسید (PLA) می باشد. پارامترهای مورد استفاده در دستگاه پرینت سه بعدی به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شده است به نحوی که مطابق با شکل ۳، در طی پرینت نیازی به استفاده از ساپورت نخواهد بود.

جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در دستگاه پرینت سه بعدی

درصد پرشوندگی	قطر نازل	سرعت حرکت نازل	زاویه لایه گذاری	ضخامت لایه گذاری
۱۰۰٪	۰/۵ میلی متر	۲۰ میلی متر بر ثانیه	۴۵ درجه	۰/۲ میلی متر

برای برقراری ارتباط بین نرم افزار طراحی و پرینتر مورد نظر و دریافت جی کد مربوطه، از نرم افزار Simplify 3D استفاده می شود. دستگاه پرینت سه بعدی که با آن مدل ها ایجاد شده است، مطابق با شکل ۳ از نوع رومیزی مدل FDM با برند ALPHAMAKER ساخت شرکت وفاتوس بوده است. دو نمونه ساختار، یکی با ۵۰٪ تخلخل و دیگری با درصد تخلخل صفر (توپر) مطابق با شکل ۴ (الف) پرینت شده است.

خواص جنس PLA مورد استفاده در پرینت نمونه ها مطابق با جدول ۲ می باشد [۲۲، ۲۳].

جدول ۲ خواص PLA مورد استفاده برای پرینت [۲۲، ۲۳]

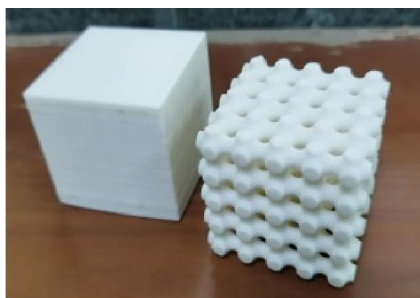
مدول یانگ	تنش کششی	چگالی	ضریب پواسون
۳۶۰۰ MPa	۷۰ MPa	۱/۲۵ g/cm ³	۰/۳۸

قابل ذکر است که با توجه به جرم نمونه ها، مقدار چگالی آن ها برابر با ۱/۲۲ گرم بر سانتی متر مکعب به دست می آید که با آنچه در منابع دیگر برای چگالی PLA ذکر شده است (جدول ۲) کمتر از ۳ درصد اختلاف دارد.

نمونه سوم، ساختار متخلخل با درصد تخلخل ۵۰٪ از جنس رزین یووی^۱ انتخاب شده است که با روش MSLA^۲ پرینت می شود. روش MSLA تغییر یافته روش SLA می باشد به نحوی که نسبت به روش SLA از یک منبع نور بزرگ تر استفاده می کند و نور ماورا بنفش تابانده شده توسط یک LCD^۳، به طور انتخابی پو شانده می شود تا نهایتاً طرح مورد نظر مطابق با شکل ۴ (ب) ایجاد شود [۲۵]. دستگاه استفاده شده برای پرینت ساختار متخلخل، ساخت شرکت آنیکویویک مدل Photon Mono 4K می باشد. تنظیمات اصلی برای پرینت به روش MSLA زمان تابش می باشد که در اینجا زمان تابش ۲/۲ ثانیه تنظیم شده است. جزئیات هندسی نمونه رزینی، مطابق با شکل ۴ (ب) از هر نظر کاملاً مشابه با نمونه PLA متخلخل می باشد و خواص رزین مورد استفاده در جدول ۳ ذکر شده است.

جدول ۳ خواص رزین مورد استفاده برای پرینت [۲۴]

مدول یانگ	تنش کششی	چگالی	ضریب پواسون
۲۶۹۰ MPa	۶۸-۵۸ MPa	۱/۲۱ g/cm ³	۰/۳۹



الف

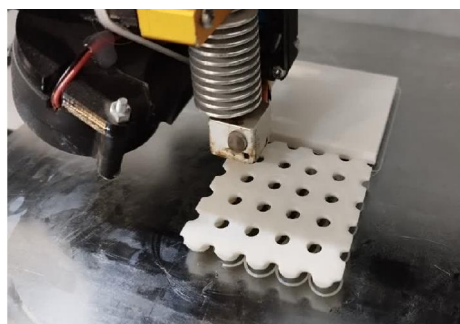


Fig. 3 Printing the porous sample without using a support

شکل ۳ دستگاه در حال پرینت نمونه متخلخل بدون استفاده از ساپورت

¹ UV Resin

² MSLA: Masked Stereolithography Apparatus

³ LCD: Liquid Crystal Display

در شکل ۶ الف) و ب) نیز نمونه توپر از جنس PLA در لحظه کرنش ۴۰٪ و ۷۰٪ نشان داده شده است.



الف



ب

Fig. 6 a) Totally solid sample at 40% strain b) Totally solid sample at 70% strain

شکل ۶ الف) نمونه کاملاً توپر در کرنش ۴۰٪ ب) نمونه کاملاً توپر در کرنش ۷۰٪

در ادامه، نمونه رزینی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. رفتار این نمونه بر خلاف PLA کاملاً به صورت ترد و شیشه‌ای مانند می‌باشد به نحوی که با اعمال کرنش به نمونه، قطعاتی از ساختار به صورت ذرات ریز، جدا شده و به اطراف پرتاب می‌شود و با افزایش کرنش این اتفاق تکرار شده و قطعات بیشتری جدا می‌شود به نحوی که مطابق با شکل ۷، سمت راست نمونه به صورت کامل متلاشی شده است.

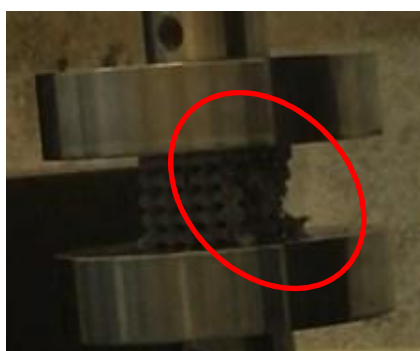
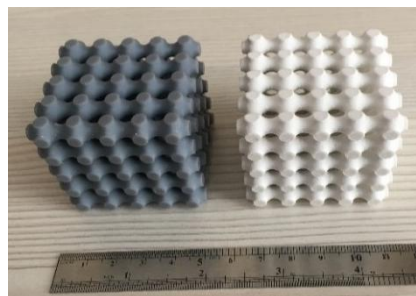


Fig. 7 Destruction of the major part of the UV Resin sample at strain of 24%

شکل ۷ متلاشی شدن بخش عمده‌ای از نمونه رزینی در کرنش ۲۴٪

به دلیل رفتار ترد قطعه رزینی که باعث افزایش ناگهانی نیرو و متلاشی شدن کل نمونه می‌گردد، اعمال کرنش در جابجایی ۱۲ میلی‌متر و کرنش ۲۴٪ متوقف می‌شود. شکل ۸، نمونه



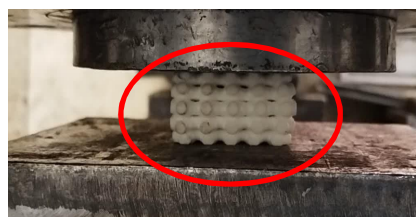
ب

Fig. 4 a) Porous and solid polylactic acid samples b) Porous polylactic acid sample and the resin sample printed by MSLA method

شکل ۴ الف) نمونه پلی‌لاکتیک اسید متخلخل و توپر ب) نمونه پلی‌لاکتیک اسید متخلخل و نمونه رزینی پرینت شده به روش MSLA

۴- نتایج و بحث

برای به دست آوردن مقدار جذب انرژی و مقایسه ساختارها با یکدیگر نمونه‌ها در راستای جهت پرینت شده، تحت تست فشار با سرعت کم قرار می‌گیرند. برای انجام تست فشار از دستگاه ZWICK 50T ساخت کشور آلمان استفاده شده است. تست مورد نظر با توجه به استاندارد ASTM D695 انجام گرفته است. مقدار سرعت پیشروی برای این تست ۵ میلی‌متر بر دقیقه و مقدار کرنش نهایی ۷۰٪ تنظیم می‌شود [۲۰] که بدان معنی است که نمونه بایستی به مقدار ۳۵ میلی‌متر فشرده شود. در شکل ۵ الف) و ب) نمونه متخلخل از جنس PLA در لحظه کرنش ۴۰٪ و ۷۰٪ نشان داده شده است. توجه به نحوه رفتار نمونه در لحظه کرنش ۴۰٪ در شکل ۵ الف) نشان می‌دهد که کل ساختار، به صورت یکنواخت در حال جمع شدن می‌باشد. نحوه رفتار ماده به نحوی است که تا انتهای مسیر له شدن، رفتار آن کاملاً شکل‌پذیر می‌باشد.



الف



ب

Fig. 5 a) Porous sample at 40% strain b) Porous sample at 70% strain

شکل ۵ الف) نمونه متخلخل در کرنش ۴۰٪ ب) نمونه متخلخل در کرنش ۷۰٪

می‌شود. مقدار نیرو در این نقطه برابر با ۳۱۴۵۱ نیوتون می‌باشد که نیروی متحمل شده توسط نمونه توپر تقریباً $\frac{6}{3}$ برابر این نیرو می‌باشد.

نکته دیگر این که نمونه توپر نقطه تسلیم نسبتاً واضح و تیزی دارد در حالی که نمونه متخلخل به صورت نرم وارد ناحیه غیرخطی منحنی تنش و کرنش می‌شود. در بخشی که هر دو نمودار در نیروی تقریباً ثابت، جلو می‌روند نیروی متحمل شده توسط نمونه توپر تقریباً سه برابر مقدار نظیر در نمونه متخلخل است. با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی، مقدار انرژی جذب شده توسط ساختار تا آن مقدار جابه‌جایی، به دست می‌آید (شکل ۱۰).

تا مقدار کرنش ۷۰٪ مقدار انرژی جذب شده توسط ساختار توپر حدود ۷۰۰۰ ژول است در حالی که این مقدار برای نمونه متخلخل حدود ۲۰۰۰ ژول می‌باشد.

نکته قابل توجه این است که اگرچه مقدار کل انرژی جذب شده در ساختار متخلخل کاهش دارد اما باید در نظر داشت که در مواردی نظیر تصادفات که نیاز به جذب ملایم و بدون صدمه انرژی ضربه می‌باشد، این مورد می‌تواند به عنوان یک نقطه قوت تلقی شود.

رزینی پس از برداشتن نیرو را نشان می‌دهد. مشخص است که به هنگام تست فشار، قطعاتی از آن به صورت ترد جدا شده است.

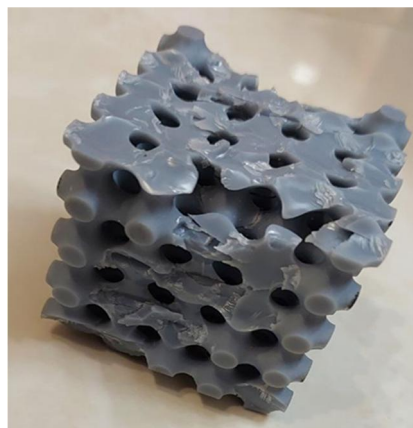


Fig. 8 Resin sample after pressure test

شکل ۸ نمونه رزینی پس از تست فشار

در شکل ۹ نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های PLA ترسیم شده است. مقدار نیروی بیشینه که پس از آن، نمونه کاملاً توپر وارد ناحیه پلاستیک می‌شود برابر با ۱۹۷/۳۹۳ کیلو نیوتون می‌باشد که با تقسیم بر سطح مقطع نمونه که ۲۵ سانتی‌متر مربع است مقدار تنش تسلیم برابر با ۷۸/۹۶ مگاپاسکال به دست می‌آید که تطابق نسبتاً خوبی با مقدار تنش تسلیم گزارش شده برای PLA در پژوهش‌های دیگر دارد (جدول ۲).

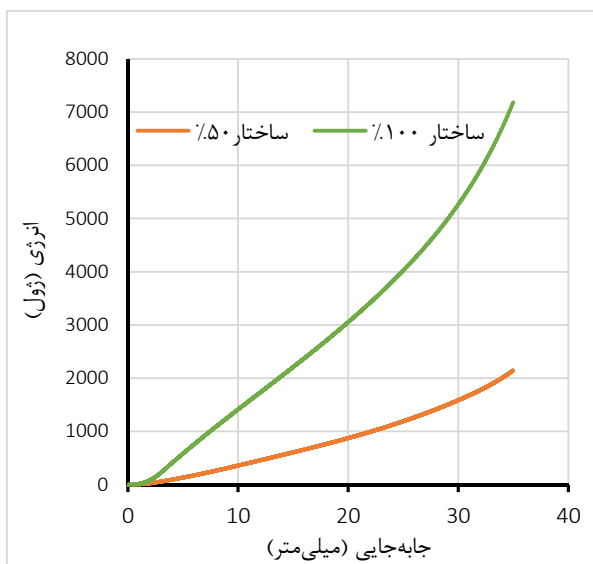


Fig. 10 Energy-displacement diagram for 100% solid and 50% porous sample

شکل ۱۰ نمودار انرژی-جابه‌جایی برای نمونه ۱۰۰٪ توپر و ۵۰٪ متخلخل

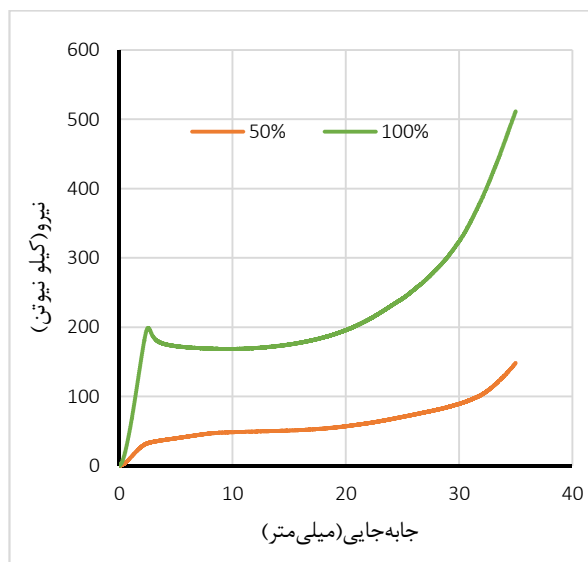


Fig. 9 Force-displacement diagram for 100% solid and 50% porous sample

شکل ۹ نمودار نیرو-جابه‌جایی برای نمونه ۱۰۰٪ توپر و ۵۰٪ متخلخل

در مرحله بعد نمودار نیرو-جابه‌جایی (شکل ۱۱) و همچنین نمودار انرژی جذب شده-جابه‌جایی (شکل ۱۲) برای ساختار رزینی ترسیم شده است. با توجه به رفتار ترد نمونه رزینی، نمونه مربوطه قابلیت تغییر شکل چندانی ندارد. بیشینه نیروی قابل

نمونه متخلخل در جابه‌جایی تقریباً مشابهی با نمونه توپر، وارد ناحیه تسلیم و قسمت غیرخطی نمودار تنش کرنش

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار جذب انرژی سازه متخلخل طراحی شده بر اساس سطح مینیمال شوارز P و ساخته شده به دو روش FDM و MSLA، در تست فشار مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نمونه‌های متخلخل با تخلخل ۵۰٪ از جنس PLA و رزین یو وی، مشخص شد ساختار رزینی رفتار ترد و نمونه PLA رفتاری کاملاً شکل پذیر دارد که مناسب برای جذب ضربه می‌باشد. علاوه بر آن در مقایسه نمونه‌های PLA توپر و متخلخل مشاهده شد که نمونه توپر تنش تسلیم کاملاً واضحی دارد در حالی که نمونه متخلخل به صورت نرم وارد ناحیه غیرخطی منحنی تنش-کرنش می‌شود. همچنین مقدار انرژی کل جذب شده تا کرنش ۷۰٪ برای نمونه متخلخل حدود یک سوم نمونه توپر می‌باشد اما نحوه جذب انرژی نمونه متخلخل به صورت نرم و تدریجی می‌باشد که برای کاربردهایی نظیر تصادفات که نیاز به جذب آهسته تر انرژی می‌باشد، مناسب تر خواهد بود.

۶- مراجع

- [1] N. Biswas, J. L. Ding, Numerical study of the deformation and fracture behavior of porous Ti6Al4V alloy under static and dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 82, pp. 89-102, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.08.011>
- [2] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, A. Vaziri, Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 3-4, pp. 506-516, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.10.018>
- [3] D. Ruan, G. Lu, T. Yu, In-plane dynamic crushing of honeycombs - A finite element study, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 161-182, 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00056-8)
- [4] A. Faramarziyan Haghghi, A. Haerian Ardakani, M. Kafaee Razavi, A. Moloodi, Simulation of Mechanical Behavior and Construction of Regular PLA Scaffolds, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 1953-1958, 2019. (in Persian)
- [5] V. Karageorgiou, D. Kaplan, Porosity of 3D Biomaterial Scaffolds and Osteogenesis, *Biomaterials*, Vol. 26, No. 27, pp. 5474-5491, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.02.002>
- [6] S. Blanquer, M. Werner, M. Hannula, S. Sharifi, G. Lajoinie, D. Eglin, J. Hyttinen, A. Poot, D. Grijpma, Surface curvature in triply-periodic minimal surface architectures as a distinct design parameter in preparing advanced tissue engineering scaffolds, *Biofabrication*, Vol. 9, No. 2, p. 025001, 2017.
<https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa6553>

تحمیل، حدود ۳۰ کیلو نیوتون می‌باشد در حالی که در همان کرنش نمونه PLA نیروی ۴۸ کیلو نیوتون را تحمل می‌کند. مقدار انرژی جذب شده تا کرنش ۲۴٪ برای نمونه رزینی، ۳۱۰ ژول و مقدار نظیر آن برای نمونه PLA، ۴۴۰ ژول می‌باشد که با توجه به رفتار ترد نمونه رزینی قابل انتظار است.

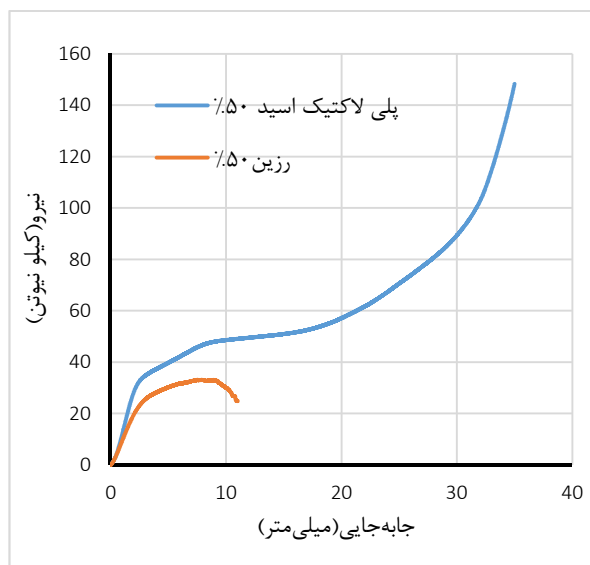


Fig. 11 Force-displacement diagram for porous PLA and UV Resin sample

شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های متخلخل پلی لاکتیک اسید و رزین

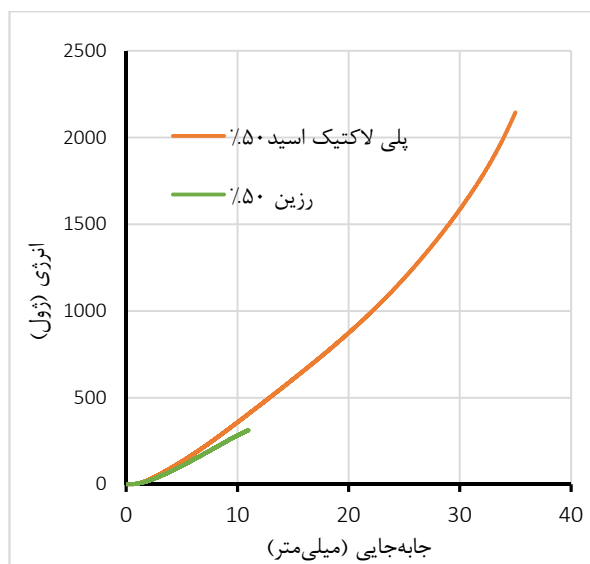


Fig. 12 Energy-displacement diagram for porous PLA and UV Resin sample

شکل ۱۲ نمودار انرژی-جابجایی برای نمونه‌های متخلخل پلی لاکتیک اسید و رزین

- [16] M. Flores-Jimenez, R. Fuentes-Aguilar, A. García-González, Review on Porous Scaffolds Generation Process: A Tissue Engineering Approach, *ACS Applied Bio Materials*, Vol.6, No. 1, pp. 1-23, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00740>
- [17] M. Flores-Jimenez and R. Fuentes-Aguilar, Bone Tissue Scaffolds Designed With A Porosity Gradient Based On Triply Periodic Minimal Surfaces Using A Parametric Approach, *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2021.
- [18] P. Charrot, J. Gregory, A pentagonal surface patch for computer aided geometric design, *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 1, No. 1, pp. 87-94, 1984. [https://doi.org/10.1016/0167-8396\(84\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0167-8396(84)90006-2)
- [19] S. M. B. Mirafzali and A. Hasanabadi, Geometric Modeling of Functionally Graded Material Structures Using Multisided Patch, *The 10th International Conference on Materials and Metallurgical Engineering*, Online Tehran, November 16-17, 2021.
- [20] S. Yu, J. Sun, J. Bai, Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing, *Materials & Design*, Vol. 182, p. 108021, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108021>
- [21] N. Shahrubudin, T. C. Lee, R. Ramlan, An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, *Procedia Manufacturing*, Vol. 35, pp. 1286-1296, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- [22] H. Kamel, O. Harraz, Developing an Optimized Low-Cost Transtibial Energy Storage and Release Prosthetic Foot Using Three-Dimensional Printing, *ASME J of Medical Diagnostics*, Vol. 3, No. 2, p. 021103, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4046319>
- [23] H. Balakrishnan, A. Hassan, M. Imran, M. U. Wahit, Toughening of Poly(lactic Acid) Nanocomposites: A Short Review, *Polymer-plastics Technology and Engineering*, Vol. 51, No. 2, pp. 175-192, 2012. <https://doi.org/10.1080/03602559.2011.618329>
- [24] F. Vieira, A. Scari, P. Junior, J. Ribeiro, C. Magalhães, Analysis of Stresses in a Tapered Roller Bearing Using Three-Dimensional Photoelasticity and Stereolithography, *Materials*, Vol. 12, No. 20, p. 3427, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12203427>
- [25] I. Ahmed, K. Sullivan, A. Priye, Multi-Resin Masked Stereolithography (MSLA) 3D Printing for Rapid and Inexpensive Prototyping of Microfluidic Chips with Integrated Functional Components, *Biosensors*, Vol. 12, No. 8, p. 652, 2022. <https://doi.org/10.3390/bios12080652>
- [7] J. Shin, S. Kim, D. Jeong, H. G. Lee, D. Lee, J. Y. Lim, J. Kim, Finite Element Analysis of Schwarz P Surface Pore Geometries for Tissue-Engineered Scaffolds, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, p. 694194, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/694194>
- [8] S. Abdulqadir, A. Abdullah, Enhancement of Energy Absorption for Crashworthiness Application: Octagonal-Shape Longitudinal Members, *International Journal of Advanced Engineering and Nano Technology*, Vol. 2, No. 2, 2015.
- [9] J. Contreras Raggio, C. Arancibia, C. Giovanetti, H.L. Ploeg, A. Aiyangar, J. Vivanco, Height-to-Diameter Ratio and Porosity Strongly Influence Bulk Compressive Mechanical Properties of 3D-Printed Polymer Scaffolds, *Polymers*, Vol. 14, No. 22, p. 5017, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14225017>
- [10] L. Collini, C. Ursini, A. Kumar, Design and optimization of 3D fast printed cellular structures, *Material Design & Processing Communications*, Vol. 3, No. 4, p. e227, 2021. <https://doi.org/10.1002/mdp2.227>
- [11] R. Ramadani, S. Pal, M. Kegl, J. Predan, D. Igor, S. Pehan, A. Belšak, Topology optimization and additive manufacturing in producing lightweight and low vibration gear body, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 113, pp. 3389–3399, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06841-w>
- [12] A. Hasanabadi, Microstructure design of heterogeneous material using multisided patch, *Iranian manufacturing production engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 32-40, 2021. (in Persian)
- [13] M. Hosseini Vajari, M. Behzadnasab, An experimental investigation on mechanical properties of 3D-printed bio-inspired sandwich panels based on silk cocoon geometry, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 19-26, 2021. (in Persian)
- [14] M. Hosseini vajari, H. Moradi Nasab, M. Behzadnasab, M. Nikkhal Shahmirzadi, M. Soltani, Investigating the mechanical behavior of the infinity structure inspired by the silkworm cocoon and comparing it with the rod structure for use in architectural cellular structures, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 9, No. 6, pp. 11-23, 2022. (in Persian)
- [15] Z.y. Zhang, H. Zhang, J. Zhang, S.k. Qin, M.d. Duan, Study on flow field characteristics of TPMS porous materials, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 45, p. 188, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04113-0>