



مطالعه تجربی اثر پارامترهای چاپ سه‌بعدی و عملیات آنیل کردن بر میزان جذب انرژی ویژه ساختارهای متخلخل با تخلخل‌های بهم‌پیوسته از جنس پلی لاکتیک اسید و چاپ سه‌بعدی شده به روش لایه نشانی ذوبی

بهنام آخوندی، امین صفی جهان‌شاهی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Jahanshahi@sirjantech.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ دی ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۷ اسفند ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

ساخت افزایشی

لایه نشانی ذوبی

جذب انرژی ویژه

پارامترهای چاپ سه‌بعدی

آنیل کردن

چکیده

فرایندهای ساخت افزایشی فناوری‌های پیشرفته‌ای هستند که تولید قطعات با هندسه‌های پیچیده را امکان‌پذیر می‌کنند. یکی از مهم‌ترین این فرایندها، فرایند لایه نشانی ذوبی است. یکی از کاربردهای فرایند لایه نشانی ذوبی در صنایع پزشکی ساخت داربست‌های استخوانی است. هدف از این پژوهش بررسی اثر پارامترهای فرایند لایه نشانی ذوبی و عملیات حرارتی آنیل کردن بر میزان جذب انرژی ویژه ساختارهای متخلخل با تخلخل‌های بهم‌پیوسته، جهت استفاده به‌عنوان داربست‌های استخوانی در مهندسی بافت است. نمونه‌ها از جنس پلی لاکتیک اسید چاپ سه‌بعدی می‌شوند. پارامترهای مورد بررسی عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه، درصد پر شدن، الگوی پر شدن، نمونه‌ها با سه الگوی شبکه‌ای، لرزشی و لانه‌نبوری و با درصدهای پر شدن ۴۰، ۷۰ و حداکثر چاپ می‌شوند. جهت ایجاد یک ساختار متخلخل با تخلخل‌های بهم‌پیوسته، هر لایه به میزان ۱۸ درجه حول محور قائم دوران می‌کند. علاوه بر بررسی اثر پارامترهای چاپ، اثر عملیات آنیل کردن نیز بر روی میزان جذب انرژی ویژه نمونه‌ها بررسی می‌گردد. نتایج حاصل‌شده نشان داد که عرض روزن‌رانی و عملیات حرارتی بیشترین تأثیر بر میزان جذب انرژی ویژه را داشته و عملیات آنیل کردن تا حداکثر ۳۵ درصد می‌تواند موجب افزایش میزان جذب انرژی ویژه در نمونه‌ها شود. حداکثر میزان جذب انرژی ویژه به مقدار ۳۶٫۲ کیلوژول بر گرم برای نمونه آنیل شده با پارامترهای چاپ: عرض روزن‌رانی ۰٫۸ میلی‌متر، ارتفاع لایه ۰٫۲ میلی‌متر، درصد پر شدن حداکثر، الگوی پر شدن شبکه‌ای است.

Experimental study of the effect of 3D printing parameters and annealing process on the specific energy absorption of porous structures with interconnected pores fabricated of polylactic acid and 3D printed by fused deposition modeling method

Behnam Akhondi, Amin Safi Jahanshahi*

Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Kerman, Iran

* Corresponding Author's Email: Jahanshahi@sirjantech.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 10 January 2025

Accepted: 7 March 2025

Keywords:

Additive Manufacturing
Fused Deposition Modeling
Specific Energy Absorption
3D Printing Parameters
Annealing

Abstract

Additive manufacturing processes are advanced technologies that enable the production of parts with complex geometries. One of the most important of these processes is the fused deposition modeling process. One of the applications of the fused deposition modeling process in the medical industry is the manufacture of bone scaffolds. This study investigates the effect of fused deposition process parameters and annealing heat treatment on the specific energy absorption of porous structures with interconnected porosities for use as bone scaffolds in tissue engineering. The samples are 3D printed from polylactic acid. The parameters studied are extrusion width, layer height, infill percentage, and infill pattern. The samples are printed with three patterns: grid, wiggle, and honeycomb, with filling percentages of 40, 70, and maximum. To create a porous structure with interconnected porosities, each layer rotates 18 degrees around the vertical axis. In addition to investigating the effect of printing parameters, the effect of annealing heat treatment on the specific energy absorption of the samples is also investigated. The results showed that the extrusion width and heat treatment have the greatest effect on the specific energy absorption, and annealing can increase the specific energy absorption in the samples by up to 35%. The maximum specific energy absorption is 36.2 KJ/g for the annealed sample with the printing parameters: extrusion width of 0.8 mm, layer height of 0.2 mm, maximum infill percentage, and grid infill pattern.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Akhondi B, Safi Jahanshahi A. Experimental study of the effect of 3D printing parameters and annealing process on the specific energy absorption of porous structures with interconnected pores fabricated of polylactic acid and 3D printed by fused deposition modeling method. 2025 Apr 21;12(2):18-29. doi: 10.22034/ijme.2025.499064.2041 [In Persian]

۱- مقدمه

فرایندهای ساخت افزایشی قادر به ساخت هندسه‌های پیچیده‌ای [۱، ۲] از جمله ساختارهای شبکه‌ای سلولی با حفظ اتصالات داخلی و انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به روش‌های ساخت سنتی هستند [۳، ۴]. اندازه ساختار عناصر سازنده به‌عنوان هندسه و اتصال ساختاری عناصر به‌عنوان توپولوژی عوامل تعیین‌کننده خواص مکانیکی در ساختارهای سلولی هستند [۵، ۶]. این ساختارها دارای چگالی نسبی کم، نسبت استحکام به وزن متعادل و ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند [۷]. از این ساختارها می‌توان در کاربردهایی مانند جذب انرژی [۶]، ذخیره انرژی [۸]، حامل کاتالیزور و مواد زیستی [۹] و غیره در مهندسی بافت استفاده کرد. الگوی پر شدن لانه‌زنبوری در ساختارهای سلولی دوبعدی نقش انکارناپذیری دارد که در کاربردهای مهندسی به دلیل ظرفیت پر کردن فضا، پایداری ساختاری و قابلیت جذب انرژی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹، ۱۰]. علاوه بر الگو لانه‌زنبوری، با الگوهای لرزشی و شبکه‌ای نیز می‌توان با تغییر زاویه چرخش در هر لایه به ساختار متخلخل با حفظ اتصال ساختاری رسید [۷]. علاوه بر استحکام فشاری، جذب انرژی نیز از خواص مؤثر در تولید ساختارهای متخلخل با رویکرد کاربرد در پروتوزها و داربست‌های استخوانی است [۱۱]. قابلیت جذب انرژی به عوامل زیادی بستگی دارد و همواره یکی از موضوع‌های مورد تحقیق است. در فرایندهای چاپ سه‌بعدی و به ویژه فرایند لایه نشانی ذوبی از عوامل مؤثر در جذب انرژی می‌توان به پارامترهای چاپ نظیر درصد پر شدن، عرض روزن‌رانی و الگوی پر شدن اشاره کرد [۱۲]. ظرفیت جذب انرژی را می‌توان با بالا بردن درصد پر شدن و افزایش ضخامت دیواره‌ها و لایه‌ها افزایش داد [۱۳]. ساختارهای سلولی با روش‌های ساخت افزایشی برای استفاده به‌عنوان داربست در مهندسی بافت، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱۴-۱۶]. در مهندسی بافت، تخلخل و اندازه منافذ از عوامل بسیار مهم در ساخت داربست‌ها هستند. همچنین، تکنیک‌های سنتی قادر به کنترل دقیق اندازه منافذ و تخلخل نیستند [۱۷]. در ساخت افزایشی، فناوری‌های طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر با هم ترکیب شده و ساختارهای سلولی با کنترل دقیق‌تر منافذ و حفره‌ها و همچنین میزان تخلخل‌ها به‌صورت سه‌بعدی چاپ می‌شوند [۴، ۱۸، ۱۹]. این ساختارها به‌صورت لایه به لایه ساخته شده و لایه‌ها برای تشکیل یک ساختار سه‌بعدی به یکدیگر متصل می‌شوند. بررسی خواص مکانیکی این ساختارها تحت بارگذاری متفاوت نظیر بارگذاری کششی، فشاری و خمشی مورد اهمیت است [۱۷]. پاسخ ماده به نیروهای خارجی در ساختارهای سلولی به اتصال لایه‌ها و برهم‌کنش آن‌ها با یکدیگر در طول اعمال نیرو بستگی دارد که این امر به شدت تحت اثر درصد پر شدن است و این عوامل بر میزان جذب انرژی اثرگذار هستند [۱۸]. بر اساس مطالعات حیوانی و ترکیب شیمیایی استخوان انسان، میزان جذب انرژی ویژه برای استخوان‌های سالم و متراکم مقادیری در حدود ۲۰ تا ۳۰ کیلوژول بر گرم دارد. این مقدار در شرایط پاتولوژیک مانند پوکی استخوان به شدت کاهش می‌یابد. داربست‌های مهندسی بافت استخوان باید تخلخل و اندازه منافذ مناسبی داشته باشند. تخلخل بالا (معمولاً ۶۰ تا ۸۰ درصد) و اندازه منافذ ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر نفوذ سلول‌ها، رگ‌زایی و انتقال مواد مغذی را تسهیل می‌کند [۲۰]. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با بررسی جذب انرژی انجام شده است.

احمد و همکاران [۱۸] خواص مکانیکی و جذب انرژی ساختارهای لانه‌زنبوری چاپ سه‌بعدی از جنس پلی لاکتیک اسید را ارزیابی کردند. نمونه‌ها با درصد پر شدن ۱۰ درصد و با الگوهای پر شدن لانه‌زنبوری ساده و لانه‌زنبوری ورونی چاپ شدند. نتایج حاصل نشان داد که ساختارهای لانه‌زنبوری ساده نسبت به ساختارهای لانه‌زنبوری ورونی دارای خواص مکانیکی و جذب انرژی بالاتر با مقادیر جذب انرژی از ۳۵۰ تا ۴۳۵ ژول هستند. سانکینی و همکاران [۴] انواع رویه‌های مینیمال تناوبی سه‌گانه^۱ را با استفاده از روش لایه نشانی ذوبی و از جنس پلی لاکتیک اسید چاپ سه‌بعدی کرده و نشان دادند در میان این ساختارها، ساختارهایی نظیر ژبروئید، الماسی و شوارتز را می‌توان برای تولید ساختارهای پیچیده برای کاربردهای مختلف مانند داربست‌های مهندسی بافت و جایگزینی برای فوم‌های پلیمری به کار برد. علاوه بر این، آن‌ها بیان کردند که ژبروئید دارای ویژگی منحصربه‌فردی مانند تقارن ساختاری است و نشان دادند ساختار ژبروئید تا کرنش ۱۱٫۶٪ قابلیت جذب انرژی بالاتری نسبت به سایر ساختارها دارد. پس از کرنش ۱۱٫۶ درصد، ساختار شوارتز جذب انرژی بالاتری از خود نشان می‌دهد. سیدیکیو و همکاران [۵] با الهام از طبیعت، ساختارهای متخلخل با الهام زیستی را طراحی کردند و نشان دادند سازه‌های متخلخل نقشی مهم در استحکام به ضربه یک سازه دارد. ژنگ و همکاران [۲۱] با چاپ سه‌بعدی ساختارهای لانه‌زنبوری تقویت‌شده با الیاف پیوسته ضمن بررسی رفتار این مواد مرکب در بارگذاری فشاری درون صفحه‌ای و خارج از صفحه‌ای، ویژگی‌های جذب انرژی آن‌ها را ارزیابی کردند. بار فشاری درون صفحه‌ای به اعمال بارهای فشاری موازی با صفحه ماده یا

^۱ Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)

سازه (به‌عنوان مثال در راستای طول و یا عرض یک لمینت) و بار فشاری خارج از صفحه به بارهای فشاری اعمال شده عمود بر صفحه ماده یا سازه (به‌عنوان مثال در سرتاسر ضخامت یک لمینت) اشاره دارد. نتایج حاصل‌شده نشان داد که فرایند شکست این مواد مرکب تحت بارگذاری درون صفحه‌ای در امتداد جهت بارگذاری همراه با تشکیل یک نوار موضعی است. همچنین آن‌ها بیان کردند که این مواد مرکب استحکام فشاری و جذب انرژی بالاتری نسبت به ساختارهای دیگر دارند. آندریو و همکاران [۳] جذب انرژی ساختارهای سلولی از جنس پلی اتر کتون خالص و پلی اتر کتون تقویت‌شده با الیاف کربن را تحت فشار شبه استاتیکی و بارگذاری ضربه‌ای بررسی کردند. نمونه‌ها با الگوهای شش‌ضلعی و کایرال با روش لایه نشانی ذوبی چاپ شدند. نشان حاصل‌شده نشان داد که ساختار تقویت‌شده با الیاف کربن واکنش پیرو مقاومتی مشخصی را تحت فشار درون صفحه‌ای و خارج از صفحه‌ای از خود نشان می‌دهد و حساسیت به آسیب در درجه‌های بالاتر، نشان‌دهنده نفوذ سریع به دلیل تماس‌های جدیدی است که به دلیل خم شدن‌های دیواره‌های سلولی در شبکه تحت فشار است. در نهایت آن‌ها بیان کردند که مواد مرکب چشم‌اندازی در زمینه شبکه‌های چندمنظوره سبک‌وزن و با کارایی بالا ارائه می‌دهند. تاون‌سند و همکاران [۶] اثر پارامترهای خم‌شدگی^۱ بر جذب انرژی خارج از صفحه‌ای ساختارهای لانه‌زنبوری با استفاده از روش‌های اجزا محدود و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که افزایش تعداد خم‌شدگی‌ها باعث کوتاه شدن عرض سطح تنش و تولید پروفیل‌های جذب شبه خطی می‌شود. در نهایت بیان کردند که ساختارهای لانه‌زنبوری با توجه به تطبیق‌پذیری رفتارهای جذب دارای پتانسیل عالی برای کاربردهایی با جذب انرژی بالا هستند.

در زمینه عملیات حرارتی، قاسم‌خانی و همکاران [۲۲] توانستند با انجام عملیات آنیل کردن بر روی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده از جنس پلی لاکتیک اسید، استحکام کششی و استحکام در برابر ضربه را به ترتیب ۲۰،۲ و ۲۷۵ درصد افزایش دهند. سئوک و همکاران [۲۳] اثر عملیات آنیل کردن، بر روی خواص مکانیکی ماده مرکب آکریلونیتریل بوتادین استایرن تقویت‌شده با فیبر کربن بازیافتی (۲۰ درصد وزنی) را بررسی کردند. پس از عملیات آنیل کردن، استحکام کششی و خمشی به ترتیب ۱۲،۶۴ و ۴۲،۳۳ درصد افزایش یافت. استوج کویچ و همکاران [۲۴] اثر زمان فرایند آنیل کردن، دمای فرایند آنیل کردن و ارتفاع لایه بر استحکام کششی سه ماده (پلی لاکتیک اسید، پلی‌اتیلن ترفتالات گلایکول و پلی‌اتیلن ترفتالات گلایکول تقویت‌شده با الیاف کربن) بررسی کردند. حداکثر استحکام کششی برای ماده پلی لاکتیک اسید زمانی حاصل می‌شود که زمان فرایند آنیل کردن، دمای فرایند آنیل کردن و ارتفاع لایه به ترتیب برابر با ۶۰ دقیقه، ۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۰،۱ میلی‌متر است. حداکثر استحکام کششی برای مواد اتیلن ترفتالات گلایکول و پلی‌اتیلن ترفتالات گلایکول تقویت‌شده با الیاف کربن زمانی حاصل می‌شود که زمان فرایند آنیل کردن، دمای فرایند آنیل کردن و ارتفاع لایه به ترتیب برابر با ۹۰ دقیقه، ۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۰،۱ میلی‌متر است. زنگنه و همکاران [۷] اثر عملیات آنیل کردن بر استحکام و مدول فشاری نمونه‌های متخلخل چاپ سه‌بعدی شده با روش لایه نشانی ذوبی را مورد ارزیابی قرار دادند. نمونه‌ها با الگوهای لرزشی، شبکه‌ای و لانه‌زنبوری و درصدهای پرشدگی ۴۰، ۷۰ و حداکثر چاپ شدند. آن‌ها پس از ارزیابی خواص مکانیکی فشاری، نمونه‌های مشابه را تحت عملیات حرارتی قرار دادند و مجدداً خواص مکانیکی فشاری آن‌ها ارزیابی کردند. نتایج حاصل‌شده نشان داد که بیشترین استحکام و مدول فشاری در نمونه‌ای با عرض روزن‌رانی ۰،۶ میلی‌متر، ارتفاع لایه ۰،۲۵ میلی‌متر، الگوی پر شدن لرزشی و حداکثر درصد پرشدگی حاصل شد. علاوه بر این، آن‌ها نشان دادند که عملیات آنیل کردن منجر به افزایش قابل‌توجهی در استحکام و مدول فشاری نمونه‌ها می‌شود.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که ساختارهای متخلخل دارای ظرفیت جذب انرژی بالاتری هستند و همچنین افزایش یا کاهش در خواص مکانیکی، بر ظرفیت جذب انرژی تأثیرگذار هستند [۴، ۶، ۷، ۲۱]. اما در بحث روش‌های پس پردازشگر مانند عملیات حرارتی جهت بالا بردن ظرفیت‌های جذب انرژی خلأ تحقیقاتی وجود دارد و برای استفاده از این ساختارها به‌عنوان داربست استخوانی نیازمند توسعه این روش است، زیرا مواد پلیمری مورد استفاده در فرایند لایه نشانی ذوبی دارای خواص مکانیکی پایین‌تری نسبت به استخوان هستند و از این رو عملیات پس پردازشگر مانند عملیات آنیل کردن می‌تواند در جهت بالا بردن خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده نقش مؤثری را ایفا کند. بنابراین نوآوری اصلی این پژوهش، بررسی اثر پارامترهای چاپ سه‌بعدی و عملیات آنیل کردن و بررسی میزان اثر هر یک از آن‌ها بر جذب انرژی ویژه نمونه‌های متخلخل با تخلخل‌های سه‌بعدی به‌هم‌پیوسته از جنس پلی لاکتیک اسید است.

¹ Folding

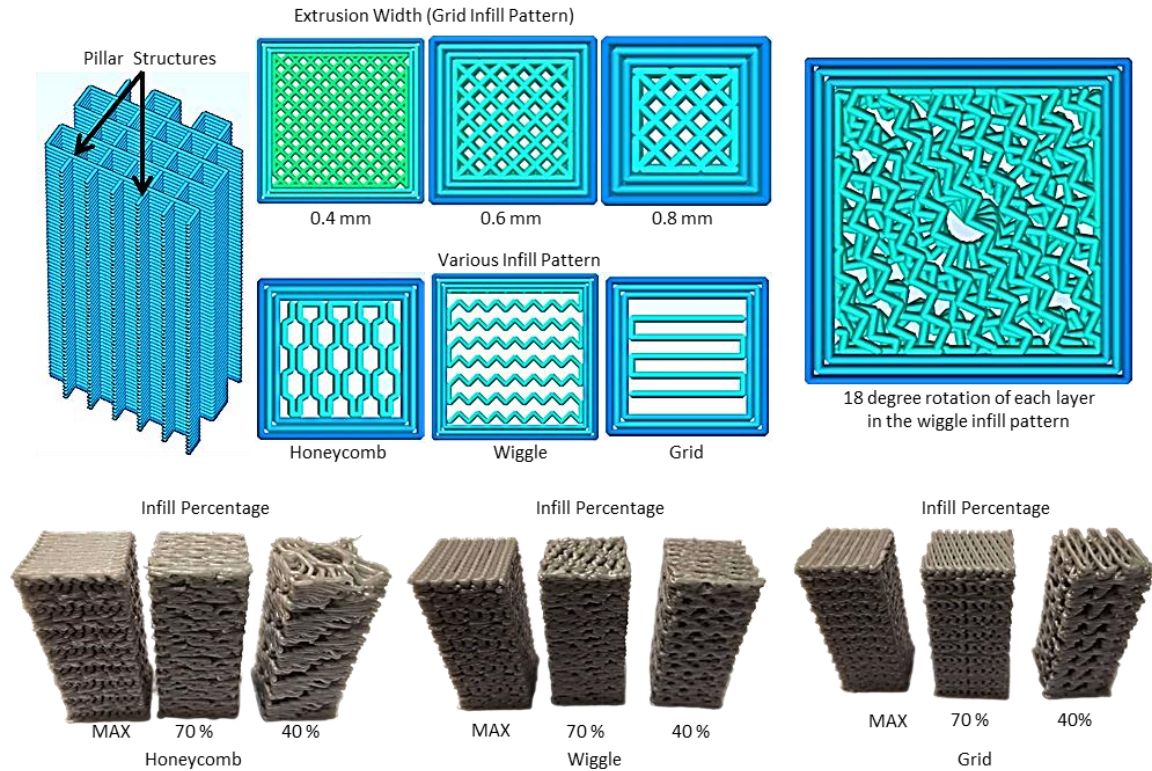
۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

به‌منظور بررسی خواص جذب انرژی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D790 (یک مکعب مستطیل با سطح مقطع ۱۲٫۷ در ۱۲٫۷ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵٫۴ میلی‌متر) چاپ سه‌بعدی شدند. برای چاپ قطعات از دستگاه چاپ سه‌بعدی (3D Printer Builder Premium, Small (Red) ex demo ساخت هلند) با قابلیت چاپ قطعه با ابعاد ۲۰ میلی‌متر در سه راستای طول، عرض و ارتفاع استفاده شد. فیلامنت با قطر ۱٫۷۵ میلی‌متر از جنس پلی لاکتیک اسید (بیلدر، هلند) برای چاپ نمونه‌ها استفاده گردید. دمای نازل برای افزایش حداکثری استحکام بین‌رشته‌ای و لایه‌ای برابر با ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و دمای بستر برای اتصال محکم‌تر نمونه به بستر، برابر با ۶۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد [۷]. قطر نازل مورد استفاده ۰٫۴ میلی‌متر است. آزمون‌های فشار با استفاده از دستگاه سننم ۱۵۰ انجام شدند. سرعت انجام آزمون بر اساس استاندارد برابر با ۱٫۵ میلی‌متر بر دقیقه است و مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی تقسیم بر وزن نمونه به‌عنوان جذب انرژی ویژه در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی اثر عملیات آنیل کردن بر خواص مکانیکی نمونه‌ها از یک آن (شیماز اف ۵۰) با محدوده دمایی ۵ الی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و با دقت ۲ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. برای عملیات آنیل کردن نمونه‌ها در آن نگهداری شده و سپس نمونه‌ها به آرامی در آن خاموش شده، سرد می‌شوند [۷]. زمان و دمای عملیات آنیل کردن، بر اساس نمودار حاصل‌شده از آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی تعیین می‌شود. این آزمون بر اساس استاندارد ASTM D3418 بر روی فیلامنت و توسط دستگاه (NETZSCH DSC 200F3 Maia, Germany) انجام می‌شود. دامنه دمایی از ۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ حرارت دادن ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه است [۷].

علاوه بر این، پارامترهای چاپ بر روی خواص مکانیکی اثر مستقیم دارند. از مهم‌ترین پارامترها می‌توان به درصد پر شدن، الگوی پر شدن، عرض روزن‌رانی و ارتفاع لایه‌ها اشاره کرد. درصد پر شدن از عوامل مهم و تأثیرگذار در جذب انرژی محسوب می‌شود و با تأثیرگذاری مستقیم در وزن قطعه مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در جذب انرژی ویژه به حساب می‌آید. در این پژوهش، سه درصد پر شدن ۴۰، ۷۰ و حداکثر و یا همان ۱۰۰ درصد برای نمونه‌ها در نظر گرفته می‌شود [۲۵، ۲۶]. برای الگوهای پر شدن مورد استفاده، درصد پر شدن ۱۰۰، امکان‌پذیر نیست و منظور از درصد پر شدن ۱۰۰، همان درصد پر شدن حداکثر است و بنابراین ساختارهای چاپ‌شده قطعاً متخلخل هستند. علاوه بر این ساختارها با قرارگیری در بدن وزن خود را به مرور از دست داده و اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد. استخوان انسان تخلخلی بین ۵۰ تا ۹۰ درصد دارد، بنابراین پرشدگی ۱۰۰ درصد با ساختار طبیعی همخوانی ندارد [۲۰]. الگوی پر شدن نیز یکی از اصلی‌ترین پارامترها در ایجاد ساختارهای متخلخل است. همان‌طور که در تحقیقات پیشین مشخص شده یکی از پرکاربردترین الگوهای مورد استفاده ساختار متخلخل ساختار لانه‌زنبوری است اما در این پژوهش سعی شده این الگو نیز توسعه داده شود. در این پژوهش از سه الگو لانه‌زنبوری، لرزشی و شبکه‌ای استفاده شده است. برای ایجاد یک ساختار متخلخل با منافذ به‌هم‌پیوسته با چاپ هر لایه، لایه بعدی به میزان ۱۸ درجه در جهت مثلثاتی دوران می‌کند. زاویه هر لایه نسبت به محور قائم موجب ایجاد یک ساختار متخلخل با منافذ به‌هم‌پیوسته می‌گردد [۲۶]. عرض روزن‌رانی نیز یکی از پارامترهای مهم چاپ است که با افزایش آن ضمن کاهش زمان چاپ به دلیل کاهش اتصال‌های بین‌رشته‌ای، خواص مکانیکی افزایش می‌یابد [۲۷]. سه عرض روزن‌رانی با مقادیر ۰٫۴، ۰٫۶ و ۰٫۸ میلی‌متر در این پژوهش در نظر گرفته شد [۲۶]. با کاهش ارتفاع لایه‌ها، زمان چاپ و میزان اتصال‌های بین لایه‌ای افزایش یافته ولی اندازه حفره‌های ایجادشده در قطعه کاهش می‌یابد [۷، ۲۸]. سه ارتفاع لایه با مقادیر ۰٫۲، ۰٫۲۵ و ۰٫۳ میلی‌متر به‌عنوان ارتفاع لایه در نظر گرفته می‌شوند [۷]. شکل ۱ نشان‌دهنده الگوها و درصد‌های پر شدن مورد استفاده در این پژوهش است. لازم به ذکر است که جهت نمایش بهتر الگوهای پر شدن و تخلخل‌های ایجادشده نمونه‌هایی بدون پوسته‌ی بیرونی، لایه‌های فوقانی و تحتانی چاپ و تصویر آن‌ها در شکل ۱ ارائه شده است ولی نمونه‌های مورد استفاده برای بررسی خواص جذب انرژی دارای ۳ پوسته بیرونی، ۲ لایه فوقانی و تحتانی هستند. از نرم‌افزار Simplify3D برای اسلایسینگ و استخراج جی‌کد استفاده شده است. جدول ۱ به‌طور کامل پارامترهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد. از نرم‌افزار مینی‌تب، برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. از آرایه متعامد تاگوچی ال ۹، به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها استفاده گردید.

طراحی آزمایش در جدول ۲ آمده است.

تمام پارامترهای ثابت نیز در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱ عرض روزن رانی ۰،۴، ۰،۶ و ۰،۸ میلی متر، الگوهای لرزشی لانه زنبوری و شبکه‌ای، چرخش ۱۸ درجه هر لایه در ساختار لرزشی، الگوی پر شدن به صورت سه بعدی برای هر سه الگوی پر شدن استفاده شده

جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی و سطوح آنها

مقدار			پارامتر
سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۰،۸	۰،۶	۰،۴	عرض روزن رانی (میلی متر)
۰،۳	۰،۲	۰،۱	ارتفاع لایه (میلی متر)
لانه زنبوری	شبکه‌ای	لرزشی	الگوی پر شدن
۱۰۰ یا حداکثر	۷۰	۴۰	درصد پر شدن

جدول ۲ طراحی آزمایش‌ها

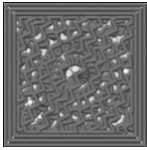



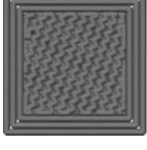




درصد پر شدن	الگوی پر شدن	ارتفاع لایه (میلی متر)	عرض روزن رانی (میلی متر)	شماره نمونه
۴۰	لرزشی	۰،۲	۰،۴	۱
۷۰	شبکه‌ای	۰،۲۵	۰،۴	۲
۱۰۰	لانه زنبوری	۰،۳	۰،۴	۳
۷۰	لانه زنبوری	۰،۲	۰،۶	۴
۱۰۰	لرزشی	۰،۲۵	۰،۶	۵
۴۰	شبکه‌ای	۰،۳	۰،۶	۶
۱۰۰	شبکه‌ای	۰،۲	۰،۸	۷
۴۰	لانه زنبوری	۰،۲۵	۰،۸	۸
۷۰	لرزشی	۰،۳	۰،۸	۹

جدول ۳ پارامترهای ثابت برای چاپ

مقدار	پارامتر
XYZ	جهت ساخت
۶۰	دمای بستر (درجه سانتی‌گراد)
۱,۷۵	قطر فیلامنت (میلی‌متر)
۰,۴	قطر سوراخ نازل (میلی‌متر)
۱	قطر قسمت بیرونی نازل (میلی‌متر)
۳	تعداد پوسته‌های بیرونی
روشن	وضعیت فن دمنده

برای نشان دادن متخلخل بودن ساختارها و نیز بیان حداقل، حداکثر و میانگین اندازه حفره‌ها از روش تحلیل تصاویر استفاده شد. بدین منظور، تصویر سطح مقطع نمونه به تصویری سیاه‌وسفید تبدیل شد. در این تصاویر نواحی سفیدرنگ بیانگر حفره‌ها و نواحی مشکی‌رنگ نشان‌دهنده ماده پلیمری است. سپس این تصویر وارد نرم‌افزار سالیدورکس شد. در نرم‌افزار سالیدورکس افزونه Autotrace فعال و سپس با ابزار Trace در Sketch picture از مجموعه دستورات sketch tools، نواحی سفید که بیانگر منافذ هستند تعیین و به اسکچ تبدیل شدند. سپس هر اسکچ تبدیل به یک سطح می‌شود. بعد از آن سطح مقطع تمامی سطوح تعیین می‌گردد. در نهایت سطح مقطع حداقل، حداکثر و میانگین تعیین، و قطر دایره معادل با آن، محاسبه گردید. جدول ۴ تصویر نمونه‌ها را به همراه اندازه حداقل، حداکثر و متوسط منافذ (قطر معادل دایره) نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌های جدول ۴ مشاهده می‌شود، طیف وسیعی از منافذ به هم پیوسته با اندازه حفره‌های معین برای هر ترکیبی از الگوهای پر شدن و درصد پر شدن قابل دستیابی است.

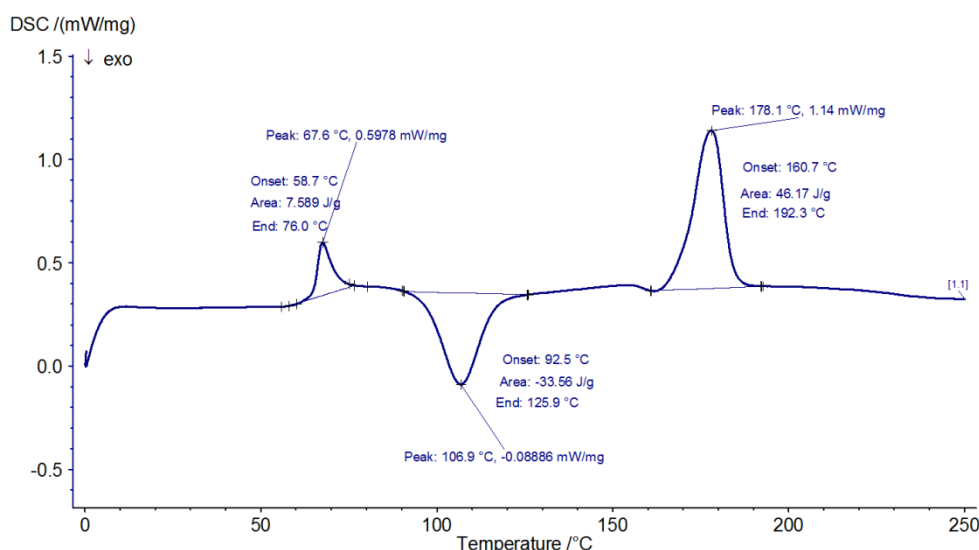
جدول ۴ تصویر نمونه‌ها بر اساس جدول ۲ و اندازه حداقل، حداکثر و متوسط منافذ [۲۶]

شماره نمونه	شکل نمونه	قطر دایره معادل	شماره نمونه	شکل نمونه	قطر دایره معادل
۱		حداقل (میکرومتر) ۱۰۰	۲		حداقل (میکرومتر) ۹۵
		حداکثر (میکرومتر) ۷۰۰			حداکثر (میکرومتر) ۳۰۰
		میانگین (میکرومتر) ۳۶۰			میانگین (میکرومتر) ۱۵۰
۳		حداقل (میکرومتر) ۹۵	۴		حداقل (میکرومتر) ۱۵۰
		حداکثر (میکرومتر) ۳۰۰			حداکثر (میکرومتر) ۱۰۲۰
		میانگین (میکرومتر) ۱۷۵			میانگین (میکرومتر) ۹۶
۵		حداقل (میکرومتر) ۹۵	۶		حداقل (میکرومتر) ۱۳۰
		حداکثر (میکرومتر) ۲۵۰			حداکثر (میکرومتر) ۹۲۰
		میانگین (میکرومتر) ۱۱۰			میانگین (میکرومتر) ۵۶۰
۷		حداقل (میکرومتر) ۱۲۰	۸		حداقل (میکرومتر) ۱۰۰
		حداکثر (میکرومتر) ۳۴۰			حداکثر (میکرومتر) ۳۷۶۰
		میانگین (میکرومتر) ۲۲۰			میانگین (میکرومتر) ۹۲۰
۹		حداقل (میکرومتر) ۱۳۰			حداقل (میکرومتر) ۱۳۰
		حداکثر (میکرومتر) ۲۹۰			حداکثر (میکرومتر) ۲۹۰
		میانگین (میکرومتر) ۱۹۶			میانگین (میکرومتر) ۱۹۶

مقدار جذب انرژی برابر با مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی است و مقدار جذب انرژی ویژه از تقسیم کردن مقدار جذب انرژی بر جرم نمونه به دست می‌آید.

۳- نتایج و بحث

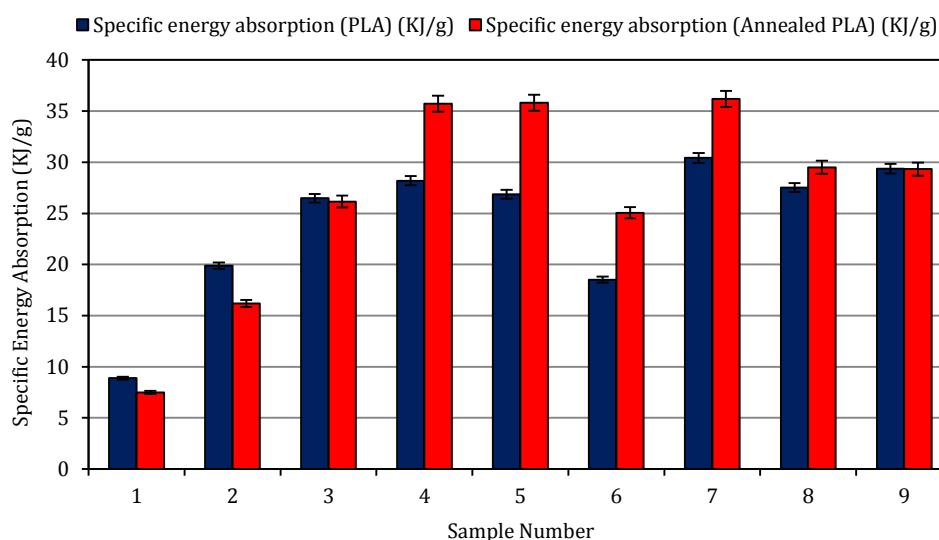
نمودار آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی برای فیلامنت مورد استفاده در شکل ۲ آمده است. همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است با توجه به نمودار، رفتار پلیمر نیمه کریستالی بوده و دمای انتقال شیشه‌ای به وضوح مشخص و در دمای ۶۷ درجه اتفاق می‌افتد. با افزایش دما چاله تبلور مجدد در محدوده دمایی ۹۲٫۵ تا ۱۲۵٫۹ درجه سانتی‌گراد و دمای بلورینگی ۱۰۶٫۹ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین این محدوده دمایی ۹۲٫۵ تا ۱۲۵٫۹ درجه سانتی‌گراد باید برای عملیات آنیل کردن مورد استفاده قرار گیرد. لذا در این پژوهش نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات آنیل کردن قرار گرفتند. با ادامه روند افزایش دما قله‌ی گرمای نهان ذوب در محدوده دمایی ۱۶۰٫۷ تا ۱۹۲٫۳ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود و دمای ذوب برابر با ۱۷۸ درجه است. همچنین تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تخریب پلیمر مشاهده نمی‌شود. با توجه به دمای ذوب، چاپ فیلامنت مورد استفاده از دمای ۱۷۸ درجه سانتی‌گراد تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد امکان‌پذیر است.



شکل ۲ نمودار آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی برای فیلامنت

پس از انجام عملیات حرارتی، آزمون فشار بر روی نمونه‌های عملیات حرارتی نشده و عملیات حرارتی انجام شده و نمودارهای نیرو-جابجایی استخراج می‌شوند. مقادیر جذب انرژی ویژه برای نمونه‌های چاپ شده و عملیات حرارتی شده در شکل ۳ آمده است. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است مقدار جذب انرژی ویژه برای نمونه‌های شماره ۲ تا ۹، مساوی و یا بالاتر از استخوان انسان است. با بررسی شکل ۳ مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار جذب انرژی ویژه به مقدار ۳۶٫۱۹ کیلوژول بر گرم مربوط به نمونه آنیل شده شماره ۷ است. الگوی پر شدن در این نمونه شبکه‌ای و درصد پر شدن حداکثر است. همچنین مقدار عرض روزن رانی ۰٫۸ میلی‌متر و ارتفاع لایه ۰٫۲ میلی‌متر است. در این نمونه عرض روزن رانی در حداکثر مقدار خود قرار دارد و لذا تعداد اتصالات بین‌رشته‌ای حداقل است. بر اساس نتایج حاصل شده و نتایج پژوهش‌های پیشین می‌توان گفت که حداکثر جذب انرژی در یک عرض روزن رانی بهینه (معمولاً ۰٫۵ تا ۰٫۷ میلی‌متر برای پلیمرها) رخ می‌دهد [۲۹]. عرض روزن رانی تا یک حد بهینه (در این پژوهش ۰٫۶ میلی‌متر) با جذب انرژی رابطه مستقیم دارد، اما فراتر از آن، به دلیل محدودیت‌های مکانیکی و هندسی، این رابطه معکوس می‌شود [۳۰]. با افزایش عرض روزن رانی تا حد بهینه، عرض ستون‌های تشکیل شده داخل ساختار افزایش یافته و این ستون‌های عریض‌تر، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان می‌دهند. همچنین این ستون‌ها زمانی که عرض بیشتری دارند در هنگام تغییر شکل سطح برخورد بیشتری با ستون‌های مجاور خود دارند و لذا میزان جذب انرژی ویژه افزایش می‌یابد (ساختارهای ستون‌ها در شکل ۱ نشان داده شده

است). برخلاف انتظار، افزایش عرض این ستون‌ها از مقدار بهینه ممکن است باعث کاهش چقرمگی ماده شود. مطالعات انجام شده روی ساختارهای متخلخل پلیمری نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با عرض متوسط (۰,۶ میلی‌متر) تعادل بهتری بین استحکام و انعطاف‌پذیری ایجاد می‌کنند، درحالی‌که نمونه‌های عریض‌تر (۰,۸ میلی‌متر) رفتار تردتر و شکست ناگهانی از خود نشان می‌دهند [۳۰]. در عرض‌های روزن‌رانی پایین‌تر از عرض روزن‌رانی بهینه، ستون‌ها فرصت بیشتری برای خمش و جذب انرژی از طریق تغییر شکل پلاستیک دارند ولی ستون‌ها در عرض‌های روزن‌رانی بالاتر از حد بهینه دچار شکست برشی سریع‌تر می‌شوند [۲۹].

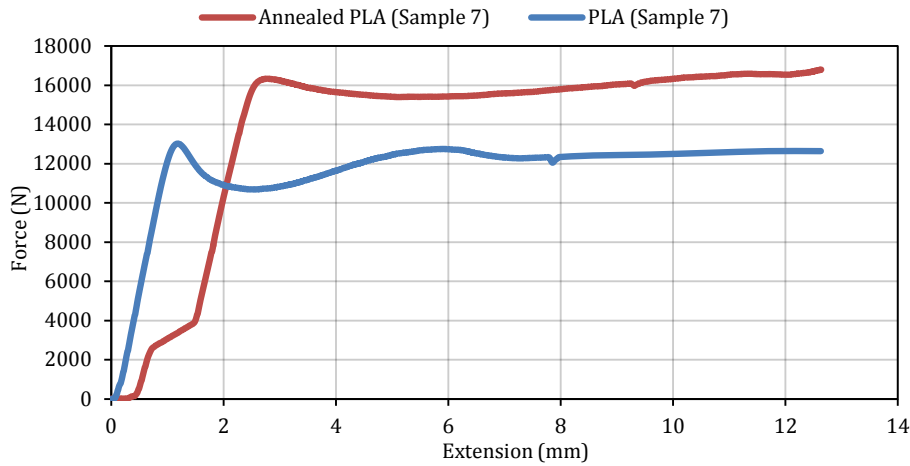


شکل ۳ مقدار جذب انرژی ویژه برای تمام نمونه در حالت عادی و حالت آنیل شده

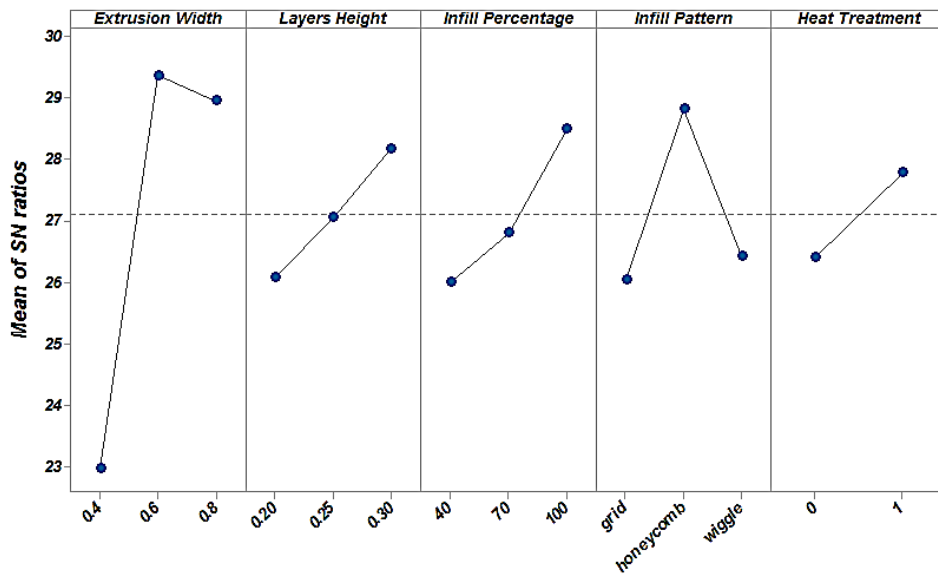
افزایش ارتفاع لایه در فرایند لایه نشانی ذوبی به‌طور کلی به بهبود جذب انرژی منجر می‌شود که از اصلی‌ترین موارد آن می‌توان به افزایش انبساط حرارتی، پیوند بین لایه‌ای بهتر، کاهش تعداد لایه‌ها و دینامیک مطلوب جریان مواد اشاره کرد [۳۱، ۳۲]. با این حال، در نظر گرفتن این نکته ضروری است که ممکن است یک ارتفاع لایه بهینه برای مواد و کاربردهای خاص وجود داشته باشد و اگر ارتفاع لایه از آن مقدار بیشتر شود، ممکن است خواص مکانیکی کاهش یابد [۳۱]. مقایسه نتایج حاصل از مطالعات مختلف بر پیچیدگی این روابط تأکید می‌کند و به همین دلیل است که نیاز به بهینه‌سازی دقیق پارامترها در فرایند لایه نشانی ذوبی برجسته است [۳۳]. مقدار درصد پر شدن در این نمونه حداکثر و یا ۱۰۰ درصد است. این امر نشان می‌دهد که درصد پر شدن حداکثر در کنار ارتفاع لایه متوسط موجب افزایش مقدار جذب انرژی شده است. در الگوهایی که درصد پر شدن حداکثر است قطعه دارای قسمت‌های ستونی شکل است که به هم بسیار نزدیک هستند. این قسمت‌های ستونی با اعمال فشاری دچار تغییر شکل شده و به هم برخورد می‌کنند. اثر متقابل این برخوردها بر روی هم عامل اصلی افزایش جذب انرژی ویژه است. پس از نمونه شماره ۷ نمونه شماره ۵ بیشترین مقدار جذب انرژی ویژه را دارد و همانند نمونه شماره ۷ درصد پر شدن آن حداکثر است که نشان از اهمیت درصد پر شدن در جذب انرژی است. نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای نمونه شماره ۷ در حالت عادی و بعد از عملیات حرارتی در شکل ۴ آمده است.

شکل ۵ تحلیل سیگنال به نویز را برای خروجی میزان جذب انرژی ویژه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است پارامتر عرض روزن‌رانی بیشترین اثر بر روی میزان جذب انرژی ویژه را دارد. علاوه بر این سایر پارامترها مورد بررسی یعنی درصد پر شدن، الگوی پر شدن، عملیات حرارتی و ارتفاع لایه دارای اثری تقریباً یکسان هستند.

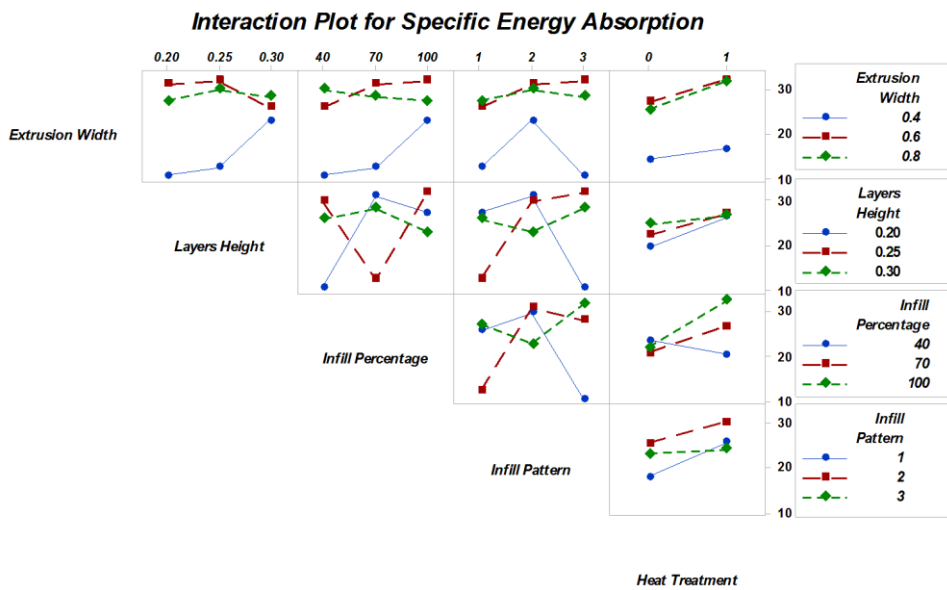
برای درک بهتر اثر متقابل پارامترها بر روی یکدیگر در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۶ مشخص است زمانی حداکثر عرض روزن‌رانی (۰,۸ میلی‌متر) بیشترین اثر بر میزان جذب انرژی را دارد که ارتفاع لایه نیز حداکثر (۰,۳ میلی‌متر) باشد. بر اساس نمودار آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی [۲۶، ۷]، انجام عملیات حرارتی سبب می‌شود که میزان درصد ساختار نیمه کریستالی در نمونه‌ها از ۷,۴۲ درصد به ۵۱ درصد افزایش یابد [۲۶] و لذا افزایش درصد نیمه کریستالی با اثرگذاری مستقیم بر روی میزان مدول و استحکام فشاری و افزایش آن‌ها، سبب افزایش میزان نرخ جذب انرژی در نمونه‌ها می‌گردد.



شکل ۴ نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای نمونه شماره ۷ در حالت عملیات حرارتی نشده و عملیات حرارتی شده

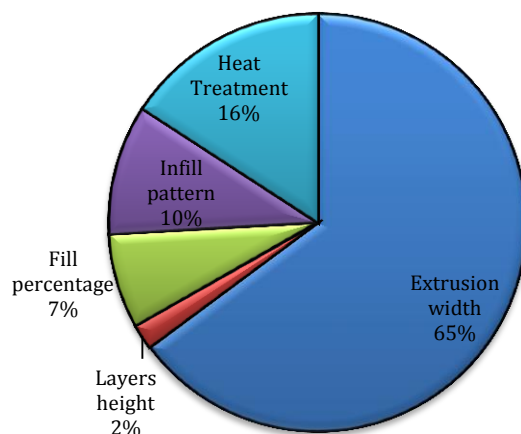


شکل ۵ تحلیل سیگنال به نویز



شکل ۶ اثر متقابل پارامترها بر روی میزان جذب انرژی ویژه (برای عملیات حرارتی ۰ به معنای عدم عملیات حرارتی و ۱ به معنای انجام عملیات حرارتی است. برای الگوی پر شدن ۱ برای الگوی شبکه‌ای، ۲ برای الگوی لانه‌زنبوری و ۳ برای الگوی لرزشی است.)

مقادیر حاصل شده برای مقادیر جذب انرژی ویژه در مقایسه با سایر پژوهش‌ها همخوانی دارد. به‌عنوان مثال الله و همکاران [۳۴] حداکثر میزان جذب انرژی ویژه برای نمونه‌ای از جنس پلی لاکتیک اسید با ۵۰ درصد پر شدن را ۲۶,۵۲ کیلوژول بر گرم گزارش کرده‌اند. حداکثر مقدار جذب انرژی ویژه در این پژوهش ۳۶,۵ درصد بیشتر از مقدار گزارش شده توسط الله و همکاران [۳۴] است، که دلیل اصلی آن درصد پر شدن بیشتر در این پژوهش است. تحلیل واریانس نشان می‌دهد که سهم عرض روزرانی، عملیات حرارتی، الگوی پر شدن، درصد پر شدن و ارتفاع لایه بر روی میزان جذب انرژی ویژه به ترتیب برابر با ۶۵، ۱۰، ۱۶، ۷ و ۲ درصد است (شکل ۷).



شکل ۷ بررسی اثر پارامترها بر روی مقدار جذب انرژی ویژه نمونه‌های عملیات حرارتی شده

همان‌طور که اشاره شد با افزایش عرض روزرانی تعداد اتصالات بین‌رشته‌ای کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث جذب بیشتر انرژی می‌شود. اثر عملیات حرارتی بر روی میزان جذب انرژی ویژه ۱۶ درصد است که این سهم از اثر قابل‌تأمل بوده و می‌توان نتیجه گرفت عملیات حرارتی تأثیر زیادی بر روی جذب انرژی دارد. عملیات حرارتی به‌صورت کلی باعث افزایش درصد کریستالی در نمونه‌ها می‌شود و این عامل بر روی پدیده جذب تأثیرگذار است. با توجه به رویکرد این پژوهش، انتخاب بهینه پارامترهای چاپ جهت بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی محدود است اما عملیات حرارتی یک عملیات پس پردازشگر بسیار مؤثر در بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی قطعات جهت استفاده در صنایع مختلف از جمله مهندسی بافت است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر چهار متغیر عرض روزرانی، درصد پر شدن، ارتفاع لایه‌ها و الگوی پر شدن بر روی خواص جذب انرژی ویژه نمونه‌های متخلخل از جنس پلی لاکتیک اسید چاپ‌شده به روش لایه نشانی ذوبی بررسی شد. سپس با انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها، اثر این عملیات آنیل کردن بر روی جذب انرژی ویژه نمونه‌ها نیز بررسی گردید. نتایج مهم حاصل شده از این پژوهش به شرح زیر است:

- با انتخاب الگو و درصد پر شدن مناسب می‌توان ساختارهای متخلخل سه‌بعدی به‌هم‌پیوسته ایجاد کرد
- حداکثر جذب انرژی ویژه برای نمونه چاپ‌شده با عرض روزرانی ۰,۸ میلی‌متر و ارتفاع لایه ۰,۲ میلی‌متر، الگوی پر شدن شبکه‌ای و درصد پر شدن حداکثر، برابر با ۳۰,۴۲ کیلوژول بر گرم حاصل گردید
- حداکثر جذب انرژی ویژه برای نمونه عملیات حرارتی شده با عرض روزرانی ۰,۸ میلی‌متر و ارتفاع ۰,۲ میلی‌متر، الگوی پر شدن شبکه‌ای و درصد پر شدن ۱۰۰ مقدار ۳۶,۱۹ کیلوژول بر گرم حاصل گردید
- نتایج تحلیل واریانس نشان داد که اثر سهم عرض روزرانی، عملیات حرارتی، الگوی پر شدن، درصد پر شدن و ارتفاع لایه بر روی میزان جذب انرژی ویژه به ترتیب برابر با ۶۵، ۱۰، ۱۶، ۷ و ۲ درصد است.
- مقادیر به دست آمده برای جذب انرژی ویژه مساوی و یا بالاتر از جذب انرژی ویژه استخوان هستند.
- مقایسه نتایج حاصل از مطالعات مختلف بر پیچیدگی این روابط تأکید می‌کند و به همین دلیل است که نیاز به بهینه‌سازی دقیق پارامترها در فرایند لایه نشانی ذوبی برجسته است

References

- [1] Akhoundi B, Khosravian E, Modanloo V. Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on fused filament fabrication technology. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jan 21;10(11):16-23. doi: [10.22034/ijme.2024.429126.188](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.429126.188) [In Persian]
- [2] Safi Jahanshahi A. Experimental investigation of the compressive strength of polylactic acid/continuous glass fiber composite material produced with an extrusion-based 3D printer using the simultaneous impregnation system of fibers and polymer. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Mar 20;11(1):51-60. doi: [10.22034/ijme.2024.442326.1929](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.442326.1929) [In Persian]
- [3] Andrew JJ, Alhashmi H, Schiffer A, Kumar S, Deshpande VS. Energy absorption and self-sensing performance of 3D printed CF/PEEK cellular composites. *Materials & Design*. 2021 Oct 1;208:109863. doi: [10.1016/j.matdes.2021.109863](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109863)
- [4] Sankineni R, Ravi Kumar Y. Evaluation of energy absorption capabilities and mechanical properties in FDM printed PLA TPMS structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022 Apr;236(7):3558-77. doi: [10.1177/09544062211039530](https://doi.org/10.1177/09544062211039530)
- [5] Siddique SH, Hazell PJ, Wang H, Escobedo JP, Ameri AA. Lessons from nature: 3D printed bio-inspired porous structures for impact energy absorption—A review. *Additive Manufacturing*. 2022 Oct 1;58:103051. doi: [10.1016/j.addma.2022.103051](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103051)
- [6] Townsend S, Adams R, Robinson M, Hanna B, Theobald P. 3D printed origami honeycombs with tailored out-of-plane energy absorption behavior. *Materials & Design*. 2020 Oct 1;195:108930. doi: [10.1016/j.matdes.2020.108930](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108930)
- [7] Zanganeh R, Safi Jahanshahi A, Akhoundi B. Experimental Investigation of the Effect of Annealing and Printing Parameters on the Compressive Strength and Modulus of 3D Printed Porous Structures with Interconnected Pores Made of Polylactic Acid by Fused Deposition Modeling Process. *Modares Mechanical Engineering*. 2024 Mar 10;24(4):251-8. [In Persian]
- [8] Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*. 2014 Jun 1;58:242-6. doi: [10.1016/j.matdes.2014.02.038](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038)
- [9] Mondalizadeh Z, Kavyani E. Feasibility Study of Launching Sports Start-ups: A Case Study in the Sports Shoe Industry. *Sports Business Journal*. 2023 May 1;3(2):115-33.
- [10] 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](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.470912.1993) [In Persian]
- [11] Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*. 2012 Mar 1;55(2):155-62. doi: [10.1016/j.bushor.2011.11.003](https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003)
- [12] Mostafa N, Syed HM, Igor S, Andrew G. A study of melt flow analysis of an ABS-Iron composite in fused deposition modelling process. *Tsinghua Science & Technology*. 2009 Jun 1;14:29-37. doi: [10.1016/S1007-0214\(09\)70063-X](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70063-X)
- [13] Qi H, Azer M, Singh P. Adaptive toolpath deposition method for laser net shape manufacturing and repair of turbine compressor airfoils. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010 Apr;48:121-31. doi: [10.1007/s00170-009-2265-7](https://doi.org/10.1007/s00170-009-2265-7)
- [14] Nabipour M, Behraves AH, Akhoundi B. Effect of printing parameters on Mechanical Strength of Polymer-Metal composites Printed via FDM 3D printer. *Modares Mechanical Engineering*. 2017 Mar 10;17(1):145-50. [In Persian]
- [15] Rankin TM, Giovinco NA, Cucher DJ, Watts G, Hurwitz B, Armstrong DG. Three-dimensional printing surgical instruments: are we there yet?. *Journal of Surgical Research*. 2014 Jun 15;189(2):193-7. doi: [10.1016/j.jss.2014.02.020](https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.02.020)
- [16] Rännar LE, Glad A, Gustafson CG. Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2007 Jun 5;13(3):128-35. doi: [10.1108/13552540710750870](https://doi.org/10.1108/13552540710750870)
- [17] Mendis D, Secchi D, Reeves P. A Legal and Empirical Study into the Intellectual Property Implications of 3D Printing. Executive Summary. Intellectual Property Office; 2015 Mar 19.
- [18] Ahmed AM, Mahdi E, Oosterhuis K, Dean A, Cabibihan JJ. Mechanical and energy absorption properties of 3D-printed honeycomb structures with Voronoi tessellations. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2023 Jun 7;9:1204893. doi: [10.3389/fmech.2023.1204893](https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1204893)
- [19] Mori KI, Maeno T, Nakagawa Y. Dieless forming of carbon fibre reinforced plastic parts using 3D printer. *Procedia engineering*. 2014 Jan 1;81:1595-600. doi: [10.1016/j.proeng.2014.10.196](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.196)
- [20] Imani SM, Rabiee SM, Moazami Goudarzi A, Dardel M. Investigation of the mechanical properties of the porous scaffolds used in bone tissue engineering by means of micromechanical modeling. *Modares Mechanical Engineering*. 2017 Nov 10;17(9):397-408. [In Persian]

- [21] Zeng C, Liu L, Bian W, Leng J, Liu Y. Compression behavior and energy absorption of 3D printed continuous fiber reinforced composite honeycomb structures with shape memory effects. *Additive Manufacturing*. 2021 Feb 1;38:101842. doi: 10.1016/j.addma.2021.101842
- [22] Ghasemkhani A, Pircheraghi G, Mehrabadi NR, Eshraghi A. Effects of heat treatment on the mechanical properties of 3D-printed polylactic acid: Study of competition between crystallization and interlayer bonding. *Materials Today Communications*. 2024 Jun 1;39:109266. doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.109266
- [23] Seok W, Jeon E, Kim Y. Effects of annealing for strength enhancement of FDM 3D-printed ABS reinforced with recycled carbon fiber. *Polymers*. 2023 Jul 21;15(14):3110. doi: 10.3390/polym15143110
- [24] Stojković JR, Turudija R, Vitković N, Górski F, Păcurar A, Pleșa A, Ianoși-Andreeva-Dimitrova A, Păcurar R. An experimental study on the impact of layer height and annealing parameters on the tensile strength and dimensional accuracy of FDM 3D printed parts. *Materials*. 2023 Jun 25;16(13):4574. doi: 10.3390/ma16134574
- [25] Akhouni B, Safi Jahanshahi A. An Experimental Study on the Influence of Printing Parameters on Inter-raster Bonding in a Single-Layer Polylactic Acid Fabricated via Fused Filament Fabrication. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025 Jan 30:1-0. doi: 10.1007/s11665-025-10715-7
- [26] Safi Jahanshahi A, Akhouni B. Introduction of 3D-printed porous structures with interconnected porosities via rotation of each layer around a normal axis: Investigating the effects of annealing and printing parameters on the compressive strength and modulus of the structures. *Engineering Research Express*. 2025 Jan 29;7(1):015541. doi: 10.1088/2631-8695/adb010
- [27] Akhouni B, Behravesh AH, Bagheri Saed A. An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites via fused deposition modeling process: in-melt simultaneous impregnation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2020 Jan;234(1-2):243-59. doi: 10.1177/0954405419843780
- [28] Akhouni B, Behravesh AH. Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D printed products. *Experimental Mechanics*. 2019 Jul 15;59:883-97. doi: 10.1007/s11340-018-00467-y
- [29] Parvaresh M, Ahmadi H, Liaghat G. Investigation on the energy absorption of elastomeric auxetic structures in quasi-static and impact loading. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2021;8(1):1431-1442. doi: 10.22068/jstc.2021.528762.1719 [In Persian]
- [30] 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]
- [31] Nugroho A, Ardiansyah R, Rusita LA, Larasati IL. Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D printing. In *Journal of Physics: Conference Series* 2018 Nov 1 (Vol. 1130, p. 012017). IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1130/1/012017
- [32] Wu W, Geng P, Li G, Zhao D, Zhang H, Zhao J. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*. 2015 Sep 1;8(9):5834-46. doi: 10.3390/ma8095271
- [33] Agrawal AP, Kumar V, Kumar J, Paramasivam P, Dhanasekaran S, Prasad L. An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication. *Heliyon*. 2023 Jun 1;9(6). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16531
- [34] Allah MA, Abdel-Aziem W, Abd El-baky MA. Collapse behavior and energy absorbing characteristics of 3D-printed tubes with different infill pattern structures: an experimental study. *Fibers Polym*. 2023 Jul;24(7):2609-22. doi: 10.1007/s12221-023-00207-7