

Investigating the Effect of Annealing Heat Treatment on the Crushing Properties of Parts Fabricated of Polylactic Acid and 3D Printed using the Fused Deposition Modeling Method

Behnam Akhoundi*¹ 

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: March 23, 2025
Revised: May 05, 2025
Accepted: June 18, 2025
ePublished: July 19, 2025

ABSTRACT

This technical note investigates the effect of annealing treatment on the crushing resistance of 3D-printed polylactic acid (PLA) tubes fabricated via fused deposition modeling (FDM) under quasi-static axial compressive loading. Given the critical industrial applications of such components in the medical and automotive sectors, enhancing crushing resistance remains a key challenge. While prior studies have primarily focused on optimizing printing parameters, this technical note systematically addresses the underexplored role of post-processing annealing. The energy absorption performance was evaluated using various indices, including peak force, average crushing force, total energy absorbed, and specific energy absorbed, before and after heat treatment. The annealing operation increased these performance indicators by 7.38%, 6.45%, 5.9%, and 5.9%, respectively.

Keywords: Additive Manufacturing, Crushing Properties, Fused Deposition Modeling, Annealing Heat Treatment, Energy Absorption.

How to cite this article

Akhoundi B, Investigating the effect of annealing heat treatment on the crushing properties of parts fabricated of polylactic acid and 3D printed using the fused deposition modeling method. *Modares Mechanical Engineering*; 2025;25(04):183-190.

*Corresponding author's email: B.Akhoundi@sirjantech.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-4283-1684



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



شاپا: ۲۴۷۶-۷۹۰۹؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۱۹۰-۱۸۳: ۲۵(۰۴): ۱۴۰۴.

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/MME.25.4.183
صفحه اصلی مجله: www.mme.modares.ac.ir



بررسی اثر عملیات حرارتی آنیل کردن بر روی خواص کراشینگ قطعات از جنس پلی لاکتیک اسید و چاپ سه بعدی شده به روش لایه نشانی ذوبی

بهنام آخوندی*

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان

چکیده

این یادداشت فنی تأثیر عملیات آنیل کردن بر مقاومت به کراشینگ لوله‌های پلی لاکتیک اسید، چاپ سه بعدی شده با روش لایه نشانی ذوبی را تحت بار فشاری شبه استاتیکی بررسی می‌کند. با توجه به کاربردهای حیاتی این قطعات در صنایع پزشکی و خودروسازی، بهبود مقاومت به کراشینگ به عنوان چالشی کلیدی مطرح است. درحالی‌که مطالعات پیشین عمدتاً بر بهینه‌سازی پارامترهای چاپ تمرکز داشتند، این تحقیق اثر آنیل کردن را به صورت نظام‌مند ارزیابی می‌کند. شاخص‌های عملکردی شامل نیروی پیک، نیروی متوسط کراشینگ، انرژی جذب شده کل و انرژی جذب شده ویژه پیش و پس از عملیات حرارتی اندازه‌گیری شدند. با انجام عملیات حرارتی آنیل، این شاخص‌های عملکردی به ترتیب به ترتیب ۷/۳۸، ۶/۴۵، ۵/۹ و ۵/۹ درصد افزایش یافتند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

کلیدواژه‌ها: ساخت افزایشی، خواص کراشینگ، لایه نشانی ذوبی، عملیات حرارتی آنیل کردن، جذب انرژی

نحوه ارجاع به این مقاله

آخوندی بهنام، بررسی اثر عملیات حرارتی آنیل کردن بر روی خواص کراشینگ قطعات از جنس پلی لاکتیک اسید و چاپ سه بعدی شده به روش لایه نشانی ذوبی، مهندسی مکانیک مدرس. ۱۹۰-۱۸۳: ۲۵(۰۴): ۱۴۰۴.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: B.Akhoundi@sirjantech.ac.ir

*شناسه اراکید نویسنده عهده دار مکاتبات: ۱۶۸۴-۴۲۸۳-۰۰۰۲-۰۰۰۰



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

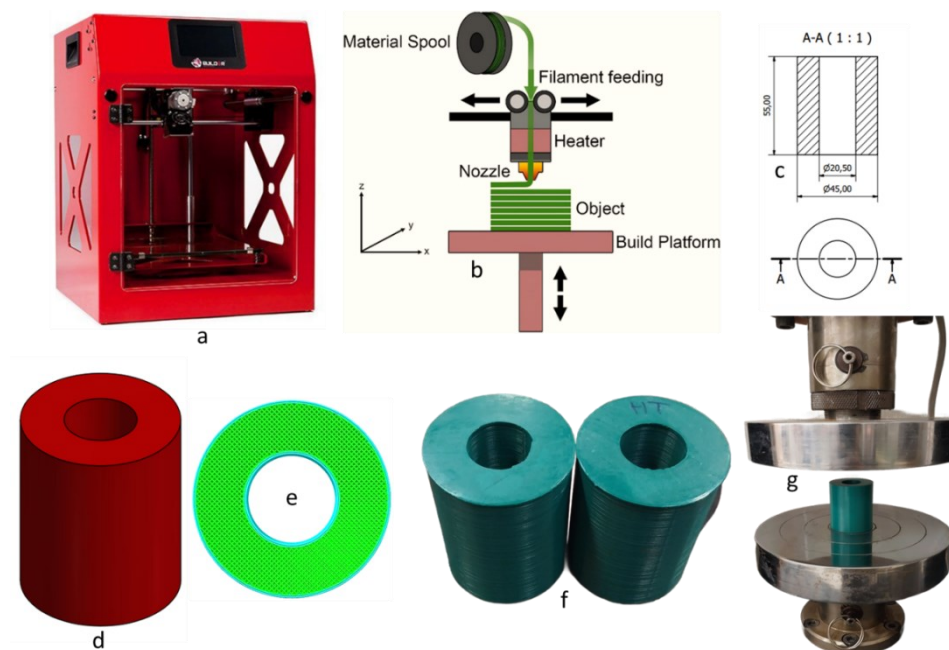
روش لایه نشانی ذوبی یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت افزایشی است که به دلیل هزینه پایین و انعطاف‌پذیری بالا در تولید قطعات پیچیده موردتوجه قرار گرفته است [1]. با این حال، خواص مکانیکی قطعات تولیدشده به این روش به دلیل وجود حفره‌ها، اتصال ضعیف بین‌رشته‌ای و بین لایه‌ای و ساختار ناهمگن قطعه چاپ‌شده، پایین است [2]. پلی لاکتیک اسید به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری و سهولت در چاپ، یکی از رایج‌ترین مواد مورد استفاده در این روش است. عملیات آنیل کردن به عنوان یک روش پس پردازشی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپ سه بعدی کمک کند [3]. لوله‌هایی چاپ سه بعدی از جنس پلی لاکتیک اسید، در صنایع هوافضا و خودروسازی به عنوان جاذب انرژی در سازه‌های سبک وزن [4,5] و در صنایع پزشکی برای ساخت ایمپلنت‌های زیست سازگار کاربرد دارند [6]. با این حال، مقاومت محدوده به کراشینگ این قطعات، کاربرد آن‌ها در بارگذاری‌های شبه استاتیکی و دینامیکی را با چالش مواجه کرده است [7]. کراشینگ به مقاومت یک ماده در برابر تغییر شکل و یا شکست، تحت بارهای فشاری اطلاق می‌شود. این خاصیت مکانیکی به ویژه در موادی که در معرض نیروهای فشاری قرار می‌گیرند، مانند سازه‌ها و قطعات صنعتی اهمیت زیادی دارد. مکانیسم کراشینگ شامل تغییر شکل الاستیک، تغییر شکل پلاستیک و شکست است [1]. در قطعات چاپ سه بعدی شده، به ویژه در روش لایه نشانی ذوبی، مقاومت به کراشینگ تحت تأثیر عواملی چون چسبندگی بین لایه‌ها و حفره‌های داخلی قطعه است [1]. برای بهبود مقاومت به کراشینگ در قطعات چاپ سه بعدی می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی پارامترهای چاپ و عملیات حرارتی آنیل کردن استفاده کرد.

الله و همکاران [1] اثر الگوی پُر شدن بر روی خواص جذب انرژی را برای لوله‌هایی چاپ سه بعدی شده از جنس پلی لاکتیک اسید و تحت بار فشاری محوری شبه استاتیکی بررسی کردند. پنج الگوی پُر شدن شامل دایره‌ای، مربعی، مثلثی، زیگزاگ و ضربدری با درصد پُر شدن ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. نتایج حاصل‌شده نشان داد که الگوی پُر شدن مربعی بیشترین مقادیر نیروی پیک، نیروی متوسط کراشینگ، انرژی جذب شده کل و انرژی ویژه جذب شده را به ترتیب با مقادیر ۲۴.۳۸ کیلو نیوتن، ۲۰.۵۸ کیلو نیوتن، ۶۷۳.۳۸ کیلوژول و ۲۶/۵۲ کیلوژول بر گرم دارد. هو و همکاران [8] میزان جذب انرژی لوله‌های چاپ‌شده سه بعدی شده تقویت‌شده با الیاف پیوسته کربن، تحت بارگذاری فشاری محوری شبه استاتیکی و تأثیر جهت‌گیری‌های مختلف الیاف و پارامترهای چاپ بر عملکرد فشاری را بررسی کردند. آن‌ها با تحلیل توزیع الیاف و الگوهای شکست نشان دادند که راهبرد چاپ لایه‌ای استوانه‌ای در مقایسه با روش لایه‌ای تخت، موجب افزایش قابل‌توجهی در استحکام فشاری (۴۴.۳ درصد) و جذب انرژی (۸۵.۲ درصد) شده است. ژو و همکاران [9] تأثیر نرخ بارگذاری و دما بر میزان جذب انرژی در لوله‌های اورینگامی پلیمری چاپ‌شده سه بعدی شده تحت بارگذاری شبه استاتیکی را بررسی کردند. آن‌ها اثر نرخ بارگذاری و دما بر میزان جذب انرژی را با آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی مورد مطالعه قرار دادند. ابراهیمی و همکاران [10] چهار

متاساختار ترکیبی نوین را با ترکیب واحدهای لانه‌زنبوری، بازگشتی و ستاره‌ای طراحی و سپس خواص مکانیکی آن‌ها را ارزیابی کردند. آن‌ها بیان کردند که ساختار بازگشتی- ستاره‌ای، به دلیل مکانیسم تغییر شکل منحصربه‌فرد خود، بالاترین استحکام فشاری و ظرفیت جذب انرژی را در مقایسه با سایر ساختارها ارائه می‌دهد. چن و همکاران [11] جذب انرژی لوله‌های بیونیک الهام گرفته از مقاطع عرضی و گره‌های بامبو، تحت نیروی محوری شبه استاتیکی را بررسی کردند. آن‌ها با تحلیل نتایج نشان دادند که روش طراحی بیونیک می‌تواند قابلیت جذب انرژی را بهبود بخشد. توانای و باردادی [12] جذب انرژی و مقاومت در برابر کراشینگ سازه‌های چند سلولی جدار نازک را بررسی کردند. نتایج حاصل‌شده نشان داد که لوله‌هایی با ساختار مربعی دیواره‌دیوار و شش‌ضلعی دیواره‌دیوار عملکرد بهتری نسبت به سایر ساختارها دارند. چن و همکاران [13] لوله‌های چند سلولی جدیدی را با سه ماده آلومینیوم سیلیسیوم، آلومینیوم، پلی اورتان ترموپلاستیک و پلی لاکتیک اسید به روش چاپ سه بعدی تولید کرد. نتایج نشان داد نمونه‌های آلومینیوم سیلیسیوم، آلومینیوم با جذب انرژی ۴۵ ژول بالاترین عملکرد را دارد. پلی اورتان ترموپلاستیک خاصیت ارتجاعی بهینه و قابلیت بازیابی مناسب برای فشردگی‌های مکرر را دارد و پلی لاکتیک اسید تحت فشار استاتیکی تغییر شکل تدریجی و تحت ضربه شکست شدید را نشان داد. آن‌ها بیان کردند که این یافته‌ها کاربرد امیدوارکننده‌ای در ایمنی خودرو و محافظت از سرنشینان دارد.

گودورو و سیرنیواسو [7] اثر پارامترهای چاپ و عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی کامپوزیت پلی لاکتیک اسید تقویت‌شده با ۱۵ درصد کربن را مورد ارزیابی قرار دادند. حداکثر استحکام کششی به مقدار ۷۰ مگاپاسکال در ضخامت لایه ۰/۲ میلی‌متر، جهت‌گیری ۹۰ درجه و دمای نازل ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد. پس از عملیات حرارتی، استحکام کششی نمونه‌ها به ۸۰ مگاپاسکال افزایش یافت. زنگنه و همکاران [14] اثر آنیل کردن بر تغییرات استحکام و مدول فشاری نمونه‌های متخلخل چاپ سه بعدی شده با روش لایه نشانی ذوبی را بررسی کردند. نتایج حاصل‌شده نشان داد که آنیل کردن منجر به افزایش ۲۴/۷۷ درصدی استحکام فشاری می‌شود. همچنین اثر آنیل کردن بر روی مدول فشاری ناچیز است.

مطالعات پیشین در زمینه بهبود خواص مکانیکی و کراشینگ قطعات چاپ سه بعدی از جنس پلی لاکتیک اسید عمدتاً بر دو محور بهینه‌سازی پارامترهای چاپ [1,8,10] و استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده [8,11] برای افزایش خواص مکانیکی از جمله خواص کراشینگ متمرکز بوده‌اند. اگرچه این پژوهش‌ها به بهبود نسبی عملکرد منجر شده‌اند، اما اثر عملیات پس پردازشی آنیل بر شاخص‌های کلیدی کراشینگ نظیر انرژی ویژه جذب‌شده و تاریخچه تغییر شکل تحت بار فشاری، به‌طور نظام‌مند بررسی نشده است [7,14]. بنابراین اهداف و نوآوری‌های اصلی این پژوهش با هدف پُر کردن این خلأهای پژوهشی شامل ارزیابی کمی اثر آنیل کردن بر شاخص‌های کراشینگ شامل نیروی پیک، نیروی متوسط کراشینگ، انرژی جذب شده کل و انرژی جذب شده ویژه و نیز تحلیل مورفولوژی بلورینگی نمونه‌ها پیش و پس از آنیل با استفاده از آزمون گرماسنجی تفاضلی استوار است.



شکل ۱ الف) تصویر دستگاه چاپگر سه بعدی مورد استفاده، **ب)** شماتیکی از فرآیند لایه نشانی ذوبی [15]، **ج)** ابعاد نمونه‌ها، **د)** مدل سه بعدی، **ه)** الگوی پر شدن مربعی و درصد پر شدن ۵۰ درصد، **و)** نمونه‌های چاپ شده و **ز)** تصویر نمونه در صفحه‌های آزمون فشار شبه استاتیک

Fig. 1. a) Image of the used 3D printer, **b)** Schematic of the Fused Deposition Modeling (FDM) process [15], **c)** Sample dimensions, **d)** 3D model, **e)** Square infill pattern and 50% infill density, **f)** Printed samples, **g)** Image of the sample in the quasi-static compression test fixture

جدول ۱ پارامترهای ثابت [1]

Table 1. Constant parameters [1]

Constant Parameters	Values
Nozzle Diameter (mm)	0.4
Layer Height (mm)	0.2
Filament Diameter (mm)	1.75
Extrusion Width (mm)	0.45
Nozzle Temperature (°C)	210
Bed Temperature (°C)	53
First Layer Height (mm)	0.2
Wall Thickness (mm)	1.2
Infill Percentage (%)	50
Top and Bottom Layer Number	2

۲-۲- روش عملیات حرارتی

در این پژوهش برای عملیات حرارتی نمونه‌ها از کوره‌ای با محدوده دمایی ۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و دقت ۲ درجه سانتی‌گراد (شیماز، ایران) استفاده شد. دمای نمونه‌ها در آن با نرخ ۵ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه به ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و بعد از قرارگیری به مدت ۱ ساعت در آن دما، آن خاموش شده و نمونه‌ها با رسیدن به دمای محیط در آن، آنیل می‌شوند. دما و زمان عملیات حرارتی بر اساس نمودار گرماسنجی تفاضلی و بر اساس پژوهش‌های پیشین تعیین شده است [3,16].

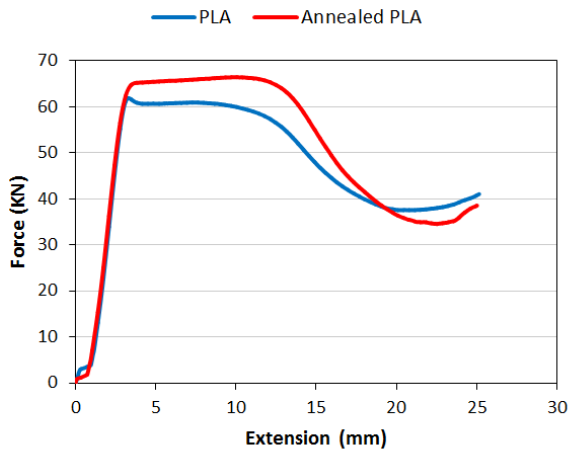
یافته‌های این پژوهش دو دستاورد عمده برای صنایع کلیدی دارد. در صنعت خودروسازی برای توسعه جاذب‌های انرژی سبک وزن با قابلیت تحمل بارهای دینامیکی و در صنعت پزشکی برای طراحی ایمپلنت‌های زیست سازگار با مقاومت به کراشینگ بالاتر برای کاربردهای ارتوپدی.

۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

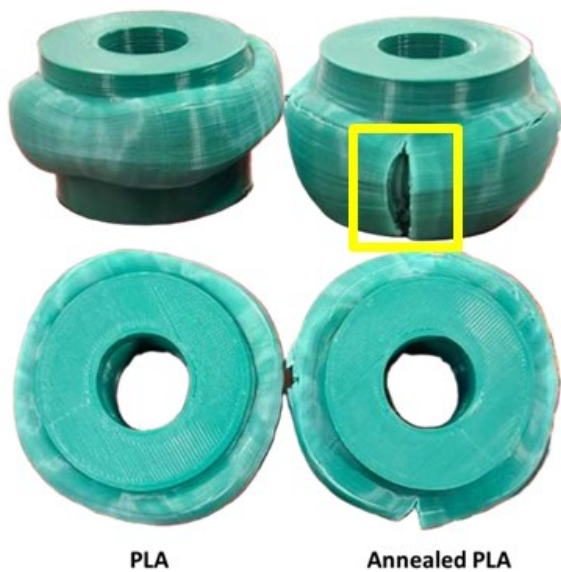
۲-۱- مواد و دستگاه‌ها

در این پژوهش از فیلامنت پلی لاکتیک اسید با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر (بیلدر، هلند) استفاده شد. چاپ سه بعدی با پارامترهای (دمای نازل ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، دمای بستر ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت چاپ ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه) انجام شد. این مقادیر بر اساس پژوهش الله و همکاران [1] انتخاب شده‌اند. برای چاپ قطعات از دستگاه چاپ سه بعدی بیلدر پرمیوم هلند استفاده شد. ابعاد دقیق سیلندرهای ساخته شده مطابق شکل ۱ است [1]. شکل نمونه و پارامترهای چاپ بر اساس پژوهش الله و همکاران [1] برای نمونه‌ای که حداکثر خواص کراشینگ را ارائه داده است، در نظر گرفته شده است با این تفاوت که در پژوهش الله و همکاران [1] میزان ارتفاع لایه برابر با ۰/۲۸ میلی‌متر است ولی در این پژوهش میزان ارتفاع لایه برابر با ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. زیرا میزان توصیه شده برای ارتفاع لایه‌ها برابر با نصف عرض روزرانی است و لذا برای قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر و عرض روزرانی ۰/۴۵ میلی‌متر، میزان ارتفاع لایه ۰/۲۸ مناسب نیست [2]. الگوی پر شدن مربعی است زیرا در پژوهش الله و همکاران [1] الگوهای مربعی بهترین عملکرد در خواص کراشینگ را داشته است. پارامترهای ثابت چین چاپ در جدول ۱ نشان داده شده است. وزن قطعه چاپ شده ۵۲/۴ گرم است.

۳-۲- آزمون فشار



a



b

شکل ۲ الف) نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات حرارتی، ب) تغییر شکل نمونه‌ها بعد از آزمون فشار

Fig. 2. a) Force-displacement diagram for samples before and after heat treatment, b) Deformation of samples after the compression test

۳-۲- نتایج جذب انرژی

مقادیر نیروی پیک و نیروی متوسط کراشینگ در

شکل ۳ الف، مقادیر انرژی جذب شده کل در

شکل ۳ ب و مقادیر انرژی ویژه جذب شده در

شکل ۳ ج برای نمونه‌های آنیل نشده و آنیل شده آمده است. برای

درک بهتر نتایج حاصل شده، نتایج حاصل از پژوهش با نتایج الله و

همکاران [۱] نیز مقایسه می‌گردد.

نیروی پیک: میزان انتقال انرژی از جذب‌کننده انرژی به یک سیستم

را نشان می‌دهد. برای نمونه آنیل نشده مقدار ۶۱/۹ کیلو نیوتن و برای

نمونه آنیل شده ۶۶/۴۶ کیلو نیوتن (۷/۳۸ درصد بیشتر) به دست آمده

است که مقدار پایین‌تر مطلوب‌تر است.

آزمون فشار با استفاده از دستگاه سنتام ۱۵۰ انجام می‌شود. سرعت آزمون فشار ۲ میلی‌متر بر دقیقه است و بعد از استخراج نیرو برحسب جابه‌جایی تجزیه و تحلیل عملکرد مقاومت در برابر فشار از طریق ارزیابی شاخص‌های مختلف از جمله نیروی پیک (F_{ip})، نیروی کراشینگ متوسط (F_m)، انرژی جذب شده کل (U) و انرژی ویژه جذب شده (SEA) قبل و بعد از عملیات حرارتی انجام می‌شود. حداکثر نیروی تحمل شده؛ نیروی پیک و میانگین نیروهای تحمل شده؛ نیروی کراشینگ متوسط در نظر گرفته می‌شود. انرژی جذب شده کل عبارت است از مساحت زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی و مقدار ویژه جذب انرژی از تقسیم انرژی جذب شده کل بر وزن نمونه حاصل می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون فشار

در این بخش نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی و تاریخچه تغییر شکل به‌دست‌آمده حاصل از آزمون فشار در لوله‌های پرینت سه‌بعدی شده قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی شده است. نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی در شکل ۲ الف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نیروی پیک و سطح زیر نمودار نیرو جابه‌جایی برای نمونه عملیات حرارتی شده بالاتر از نمونه عملیات حرارتی نشده است. دلیل اصلی این امر، افزایش درصد نیمه بلوره‌ای در نمونه عملیات حرارتی شده است که این امر سبب افزایش خواص مکانیکی می‌شود. علاوه بر این شکل نمونه‌ها در بعد از پایان آزمون در شکل ۲ ب آمده است. همان‌گونه که مشخص است عملیات آنیل کردن سبب شده که نمونه رفتاری ترد داشته باشد و جذب انرژی در این نمونه خود را به صورت شکست لایه‌ها در پوسته بیرونی نشان داده است. دلیل اصلی این امر این است که عملیات حرارتی آنیل کردن ضمن افزایش استحکام نمونه سبب کاهش کرنش شکست در نمونه‌هایی از جنس پلی لاکتیک اسید می‌شود [۳].

بر اساس نمودار نیرو-جابه‌جایی، نمونه‌ها پس از اندکی جابه‌جایی، به نیروی پیک می‌رسند. نیروی پیک برای نمونه عملیات حرارتی نشده در جابه‌جایی ۳/۶۵ میلی‌متر برابر با ۶۱/۹ کیلو نیوتن و برای نمونه عملیات حرارتی شده در جابه‌جایی ۴/۱۷ میلی‌متر برابر با ۶۶/۴۶ کیلو نیوتن است. پس از عبور از نیروی پیک، لوله‌ها وارد ناحیه پسا کراشینگ می‌شوند و بار حول نیروی متوسط کراشینگ نوسان می‌کند. سپس، لوله‌ها وارد منطقه چگالش شده و نیروی کراشینگ برای نمونه عملیات حرارتی نشده در جابه‌جایی ۲۳/۹۸ میلی‌متر برابر با ۳۹/۴ کیلو نیوتن و برای نمونه عملیات حرارتی شده در جابه‌جایی ۲۴/۹۴ میلی‌متر برابر با ۳۸/۴۳ کیلو نیوتن است. در مرحله چگالش، نیروی کراشینگ به‌سرعت افزایش می‌یابد، زیرا نمونه‌ها به‌طور کامل تخریب شده‌اند و دیگر توان تحمل بار اضافی را ندارند. در این لحظه، صفحات دستگاه آزمون فشار، نمونه را نگه‌داشته و در برابر نیرویی که به‌سرعت افزایش می‌یابد، مقاومت می‌کنند [۱].

نیروی متوسط کراشینگ: این پارامتر نیز میزان انتقال انرژی به سیستم را نشان می‌دهد که برای نمونه‌های آنیل نشده و آنیل شده به ترتیب مقادیر ۴۶/۶۷ و ۴۹/۶۸ کیلو نیوتن به دست آمده است. آنیل کردن موجب افزایش ۶/۴۵ درصدی در نیروی متوسط کراشینگ شده است.

انرژی جذب شده کل: همان‌طور که در

شکل ۳ ب نشان داده شده است مقدار انرژی جذب شده کل در نمونه آنیل نشده برابر با ۱۱۷۳ کیلوژول و در نمونه آنیل شده برابر با ۱۲۴۲ کیلوژول است که انجام عملیات حرارتی موجب افزایش ۵/۸ درصدی شده است.

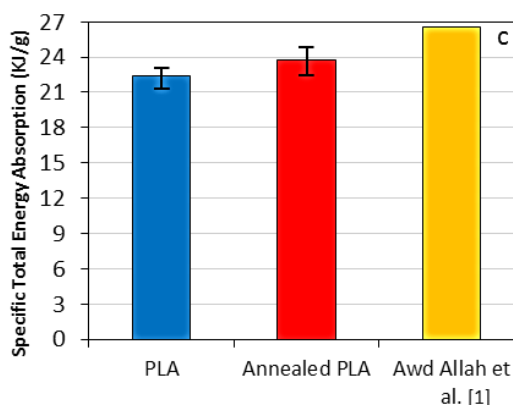
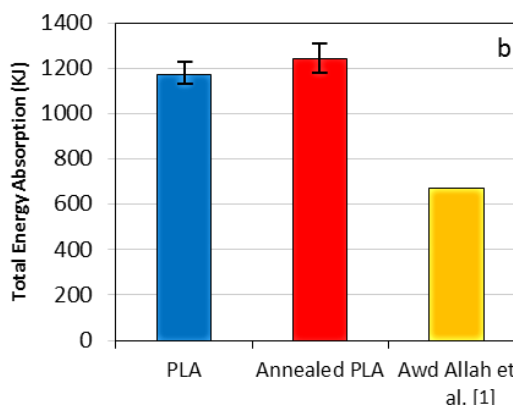
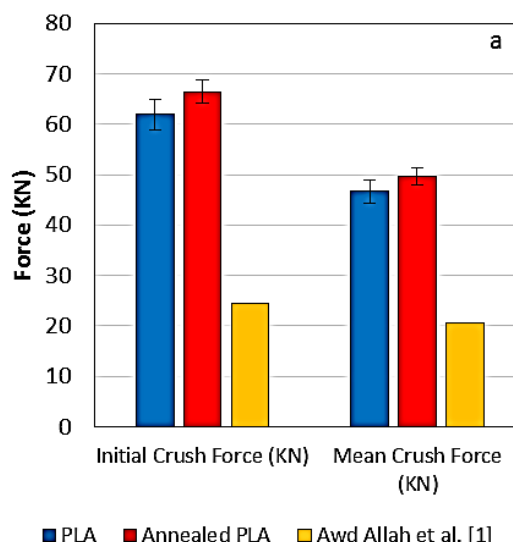
انرژی ویژه جذب شده: وزن نمونه، درصد و الگوی پر شدن پارامترهای تأثیرگذاری بر روی مقدار جذب انرژی ویژه هستند. از آنجایی که جرم نمونه‌ها ثابت است انجام عملیات آنیل کردن موجب افزایش ۵/۸ درصدی انرژی ویژه جذب شده نیز می‌گردد. مقدار جذب انرژی ویژه در نمونه آنیل نشده ۲۲/۳۹ کیلوژول بر گرم و در نمونه آنیل شده برابر با ۲۳/۷۱ کیلوژول بر گرم است.

۳-۳- نتایج گرماسنجی تفاضلی

عملیات آنیل کردن با مکانیسم‌هایی نظیر افزایش بلورینگی، کاهش تنش‌های داخلی، بهبود مقاومت در برابر خزش و بهینه‌سازی مورفولوژی بلورها سبب بهبود خواص مکانیکی پلی لاکتیک اسید می‌شود [17]. در شکل ۴ نتایج حاصل از تحلیل گرماسنجی تفاضلی برای نمونه‌های عملیات حرارتی نشده و عملیات حرارتی شده مقایسه شده است. همان‌گونه که در این نمودار مشهود است آنیل کردن موجب افزایش درصد بلورینگی از ۷/۴۲ درصد به ۵۷/۰۱ درصد می‌گردد. این پدیده ناشی از تأمین انرژی کافی برای زنجیره‌های پلیمری در فرآیند آنیل است که بازآرایی آن‌ها و تشکیل ساختارهای بلوری منظم‌تر را تسهیل می‌کند. افزایش بلورینگی به‌طور مستقیم بهبود خواص مکانیکی (مانند استحکام و سفتی) و پایداری حرارتی را در پی دارد، چرا که ساختارهای بلوری در مقایسه با مناطق آمورف، توانایی بالاتری در تحمل بار مکانیکی دارند [18]. با این حال، آنیل کردن می‌تواند به کاهش چقرمگی و شکل‌پذیری منجر شود زیرا ساختارهای بلوری سخت‌تر و شکننده‌تر از فاز آمورف هستند [19]. این تأثیر به وضوح در شکل ۲ نمایان است به طوری که نمونه عملیات حرارتی شده تحت آزمون فشاری شبه استاتیکی، دچار شکست در لایه‌های سطحی شده، در حالی که نمونه آنیل نشده تحت همان شرایط، هیچ‌گونه شکستی را نشان نمی‌دهد.

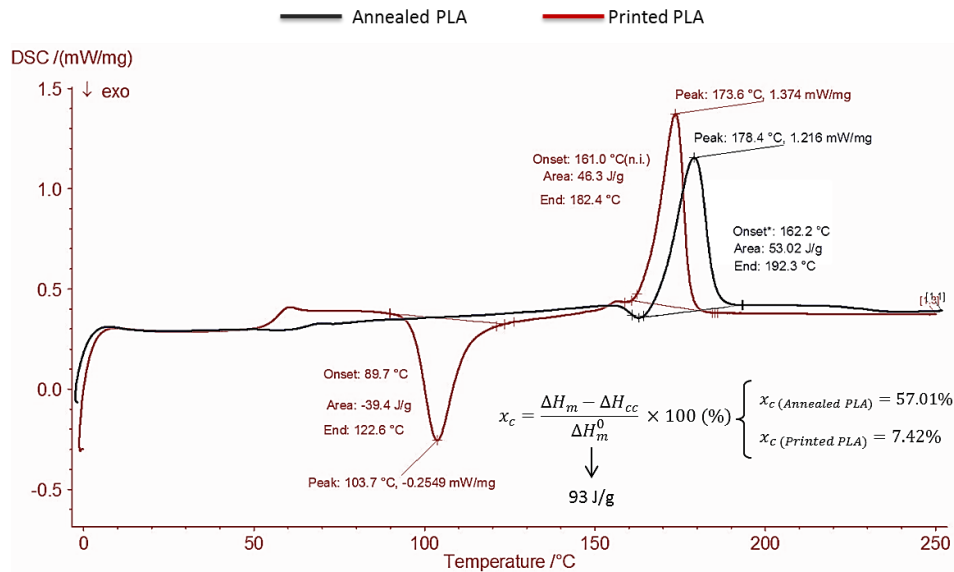
۴- نتیجه‌گیری

این یادداشت فنی به بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر خواص کراشینگ و تاریخچه تغییر شکل لوله‌های پلی لاکتیک اسید می‌پردازد. برای چاپ نمونه‌ها از ساختار الگوی پرکننده مربعی با درصد پر شدن ۵۰ درصد استفاده شد. سپس لوله‌ها تحت آزمون فشار محوری آزمایش شدند و نتایج زیر حاصل شد:



شکل ۳ الف) مقادیر نیروی پیک و نیروی متوسط برای نمونه‌های آنیل نشده و آنیل شده، **ب)** میزان انرژی جذب شده کل برای نمونه‌های آنیل نشده و آنیل شده، **ج)** میزان جذب انرژی ویژه برای نمونه‌های برای نمونه‌های آنیل نشده و آنیل شده

Fig. 3. a) Peak force and average crushing force values for unannealed and annealed samples, **b)** Total absorbed energy for unannealed and annealed samples, **c)** Specific absorbed energy for unannealed and annealed samples.



شکل ۴ نمودار گرماسنجی تفاضلی برای نمونه‌های آنیل شده و آنیل نشده به همراه محاسبه درصد بلورهای آن‌ها

Fig. 4. Differential Scanning Calorimetry (DSC) plot for unannealed and annealed samples along with the calculation of their crystallinity percentage

منابع

- [1] M. M. Awd Allah, W. Abdel-Aziem, and M. A. Abd El-baky, "Collapse behavior and energy absorbing characteristics of 3D-printed tubes with different infill pattern structures: an experimental study," *Fibers and Polymers*, vol. 24, pp. 2609-2622, 2023, [doi: https://doi.org/10.1007/s12221-023-00207-7](https://doi.org/10.1007/s12221-023-00207-7)
- [2] B. Akhouni, A. H. Behraves, and A. Bagheri Saed, "Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 38, pp. 99-116, 2019/02/01 2018, [doi: https://doi.org/10.110731684418807300/77](https://doi.org/10.110731684418807300/77)
- [3] A. Safi Jahanshahi and B. Akhouni, "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*, vol. 7, p. 015541, 2025/02/06 2025, [doi: https://dx.doi.org/10.1088/2631-8695/adb010](https://dx.doi.org/10.1088/2631-8695/adb010)
- [4] V. Acanfora, A. Sellitto, A. Russo, M. Zarrelli, and A. Riccio, "Experimental investigation on 3D printed lightweight sandwich structures for energy absorption aerospace applications," *Aerospace Science and Technology*, vol. 137, p. 108276, 2023/06/01/ 2023, [doi: https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108276](https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108276)
- [5] C. W. Isaac and F. and Duddeck, "Current trends in additively manufactured (3D printed) energy absorbing structures for crashworthiness application – a review," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 17, pp. 1058-1101, 2022/10/02 2022, [doi: https://doi.org/10.108017452759.2022.2074698/](https://doi.org/10.108017452759.2022.2074698/)
- [6] S. Y. Shilov, Y. A. Rozhkova, L. N. Markova, M. A. Tashkinov, I. V. Vindokurov, and V. V. Silberschmidt. (2022, Biocompatibility of 3D-Printed PLA, PEEK and PETG: Adhesion of Bone Marrow and Peritoneal

- آنیل کردن موجب افزایش درصد بلورینگی از ۷/۴۲ درصد به ۵۷/۰۱ درصد می‌گردد. افزایش بلورینگی به‌طور مستقیم بهبود خواص مکانیکی و پایداری حرارتی را در پی دارد. با این حال، آنیل کردن می‌تواند به کاهش چقرمگی و شکل‌پذیری منجر شود.
- آنیل کردن موجب افزایش خواص کراشینگ و جذب انرژی می‌شود.
- نیروی پیک، نیروی متوسط کراشینگ، انرژی جذب شده کل و مقدار انرژی ویژه جذب شده برای نمونه آنیل نشده به ترتیب برابر با ۶۱/۹ کیلو نیوتن، ۴۶/۶۷ کیلو نیوتن، ۱۱۷۳ کیلوژول و ۲۲/۳۹ کیلوژول بر گرم و برای نمونه آنیل شده به ترتیب برابر با ۶۶/۴۶ کیلو نیوتن، ۴۹/۶۹ کیلو نیوتن، ۱۲۴۲ کیلوژول و ۲۳/۷۱ کیلوژول بر گرم است.
- عملیات آنیل کردن سبب بهبود نیروی پیک، نیروی متوسط کراشینگ، انرژی جذب شده کل و مقدار جذب انرژی ویژه به میزان ۷/۳۸، ۶/۴۵، ۵/۹ و ۵/۹ درصد می‌گردد.
- بررسی جامع بررسی اثر پارامترهای چاپ، الگوهای پر شدن مختلف از جمله متاساختارها و همچنین بررسی شکل و هندسه سوراخ‌های جانبی بر روی خواص کراشینگ از اهداف تحقیقات آتی است.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

PLA/continuous glass fibers composites manufactured by simultaneous impregnation extrusion-based additive manufacturing," *Engineering Research Express*, vol. 7, p. 015403, 2025/01/06 2025, doi: <https://dx.doi.org/10.1088/2631-8695/ada228>

[17] F. Kartal and A. Kaptan, "Effects of annealing temperature and duration on mechanical properties of PLA plastics produced by 3D Printing," *European Mechanical Science*, vol. 7, pp. 152-159, September 2023, doi: <https://doi.org/10.26701/ems.1290961>

[18] Ç. Kahya, O. Tunçel, O. Çavuşoğlu, and K. Tüfekci, "Thermal annealing optimization for improved mechanical performance of PLA parts produced via 3D printing," *Polymer Testing*, vol. 144, p. 108735, 2025/03/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108735>

[19] H. Li, Y. Mu, Q. Wang, D. Cai, Y. Zhang, Y. Luo, et al., "Interlayer enhancement of 3D printed CF/PLA composites via localized microwave welding and annealing-induced crystallization," *Composites Part B: Engineering*, vol. 284, p. 111737, 2024/09/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111737>

Lavage Cells. *Polymers* 14(19), doi: <https://doi.org/10.3390/polym14193958>

[7] K. Guduru and G. Srinivasu, "Effect of post treatment on tensile properties of carbon reinforced PLA composite by 3D printing," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 5403-5407, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.128>

[8] Z. Hou, J. He, X. Tian, W. Zhu, C. Wang, P. Liu, et al., "Performance and failure modes of continuous fibre-reinforced energy absorption tubes by cylindrical layered 3D printing," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 19, p. e2367122, 2024/12/31 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2367122>

[9] X. Zuo, C. Guo, W. Chen, Y. Wang, J. Zhao, and H. Lv, "Influence of loading rate and temperature on the energy absorption of 3D-printed polymeric origami tubes under quasi-static loading," *Polymers*, vol. 14, p. 3859, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14183859>

[10] M. S. Ebrahimi, R. Hashemi, and E. Etemadi, "In-plane energy absorption characteristics and mechanical properties of 3D printed novel hybrid cellular structures," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 3616-3632, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.064>

[11] B. Chen, M. Zou, G. Liu, J. Song, and H. Wang, "Experimental study on energy absorption of bionic tubes inspired by bamboo structures under axial crushing," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 115, pp. 48-57, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.01.005>

[12] M. Tunay and A. Bardakci, "A study of crashworthiness performance in thin-walled multi-cell tubes 3D-printed from different polymers," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 141, p. e56287, 2024/12/20 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/app.56287>

[13] Y. Chen, X. Deng, and H. Huang, "Experimental study on crashworthiness of multicellular tubes printed with different materials based on origami folding," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 47, p. 54, 2025/01/04 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05373-0>

[14] R. Zanganeh, A. Safi Jahanshahi, and B. Akhouni, "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*, vol. 24, pp. 251-258, 2024, doi: <http://dx.doi.org/10.48311/MME.24.4.251>

[15] M. Rath, L. Bauer, A. Kuettner, S. Fischer, and T. Laumer, "Gradual error detection technique for non-destructive assessment of density and tensile strength in fused filament fabrication processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, pp. 4149-4163, 2024/04/01 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13280-w>

[16] A. Safi Jahanshahi, B. Akhouni, and L. Quagliato, "Investigation of compressive strength of 3D-printed