



پرینت سه بعدی سریع، جذب انرژی بیشتر: بررسی اثر سرعت های بالای چاپ بر عملکرد کامپوزیت های چوب- پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش ساخت رشته ذوبی رزگار حسن زاده^{۱*}، شاپور ابراهیمی^۲، فاطمه یوسفی^۱

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ خرداد ۱۴۰۵

پذیرش: ۳۰ مرداد ۱۴۰۵

کلیدواژگان:

کامپوزیت چوب-پلاستیک

ساخت رشته ذوبی

سرعت چاپ

جذب انرژی

پرینت سه بعدی

کامپوزیت های چوب- پلی لاکتیک اسید از جمله مواد نوظهور مورد استفاده در فناوری ساخت رشته ذوبی هستند که به دلیل ویژگی های زیست محیطی مطلوب و قابلیت ساخت مناسب، توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده اند. با وجود مطالعات متعدد در این حوزه، اغلب پژوهش های پیشین در محدوده سرعت های چاپ پایین انجام شده اند و اطلاعات محدودی درباره رفتار این مواد در سرعت های چاپ بالا وجود دارد. هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر سرعت چاپ بر عملکرد جذب انرژی کامپوزیت های چوب- پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش ساخت رشته ذوبی است. به این منظور، نمونه ها در دو سرعت چاپ ۵۰ و ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه تولید شدند و تحت آزمون فشار شبه استاتیکی قرار گرفتند. سپس شاخص های جذب انرژی شامل جذب انرژی کل، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی محاسبه و مقایسه شدند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت چاپ از ۵۰ به ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه موجب کاهش ۱۰/۵ درصدی زمان تولید شد. علاوه بر این، جذب انرژی کل، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی حدود ۲۱ درصد افزایش یافتند. همچنین شاخص های نرمال شده نسبت به زمان تولید بهبود بیشتری را نشان دادند، به طوری که جذب انرژی نرمال شده، جذب انرژی ویژه نرمال شده و بازده نیروی خردشدگی حدود ۳۴ درصد افزایش یافتند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که استفاده از سرعت های چاپ بالا نه تنها موجب حفظ مکانیسم مطلوب جذب انرژی می شود، بلکه به طور همزمان عملکرد جذب انرژی و بهره وری تولید را نیز بهبود می بخشد. نوآوری اصلی این تحقیق، ارائه نخستین ارزیابی تجربی از اثر سرعت چاپ ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه بر رفتار جذب انرژی کامپوزیت های چوب- پلی لاکتیک اسید است.

Faster 3D printing, higher energy absorption: investigating the effect of high Printing speeds on fused filament fabricated wood-PLA composites

Rezgar Hasanzadeh^{1*}, Shapour Ebrahimi², Fatemeh Yousefi¹

1- Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

Article Information

Abstract

Original Research Paper

Received: 12 June 2026

Accepted: 21 August 2026

Keywords:

Wood-Plastic Composite
Fused Filament Fabrication
Printing Speed
Energy Absorption
3D Printing

Wood-poly lactic acid composites have emerged as promising materials for fused filament fabrication due to their environmental benefits, printability, and satisfactory mechanical performance. Although extensive research has been conducted on these materials, previous studies have primarily focused on relatively low printing speeds, and the behavior of wood-PLA composites under high-speed printing conditions remains largely unexplored. Therefore, this study investigates the effect of printing speed on the energy absorption performance of wood-PLA composites manufactured by fused filament fabrication. Cylindrical specimens were fabricated at printing speeds of 50 and 250 mm/s and subsequently subjected to quasi-static compression testing. Energy absorption characteristics, including energy absorption (EA), specific energy absorption (SEA), and crushing force efficiency (CFE), were calculated and compared. The results revealed that increasing the printing speed from 50 to 250 mm/s reduced the printing time by 10.5%. More importantly, EA, SEA, and CFE increased by 21%. When production efficiency was considered through time-normalized indicators, even greater improvements were observed. Normalized energy absorption, normalized specific energy absorption, and normalized crushing force efficiency increased by 34%, respectively. Force-displacement responses demonstrated that both printing conditions exhibited a desirable stretching-dominated deformation mechanism with a stable plateau region, while the higher printing speed provided superior energy absorption capability and process efficiency. The novelty of this work lies in providing the first experimental assessment of the influence of a high printing speed of 250 mm/s on the energy absorption behavior of wood-PLA composites, offering valuable insights for the development of high-productivity additive manufacturing applications.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Hasanzadeh R, Ebrahimi Sh, Yousefi F. Faster 3D printing, higher energy absorption: investigating the effect of high Printing speeds on fused filament fabricated wood-PLA composites. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2026 Feb 20;12(12):50-62. doi: 10.22034/ijme.2026.586338.2195 [In Persian]

۱- مقدمه

با توسعه فناوری های ساخت افزایشی در سال های اخیر [۱]، پرینت سه بعدی به یکی از مهم ترین روش های ساخت قطعات مهندسی با هندسه های پیچیده، مصرف بهینه مواد و انعطاف پذیری بالا تبدیل شده است [۲]. در میان روش های مختلف پرینت سه بعدی، فناوری ساخت رشته ذوبی به دلیل سادگی فرایند، هزینه نسبتاً پایین تجهیزات و امکان استفاده از طیف گسترده ای از مواد پلیمری و کامپوزیتی، کاربرد گسترده ای در حوزه های صنعتی، مهندسی و تحقیقاتی پیدا کرده است [۳، ۴]. عملکرد نهایی قطعات تولید شده به روش ساخت رشته ذوبی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله دمای نازل [۵]، ارتفاع لایه [۶]، الگوی پرشدگی [۷] و سرعت پرینت [۸] قرار دارد که هر یک می توانند بر کیفیت ساخت، خواص مکانیکی و رفتار عملکردی قطعات اثرگذار باشند [۹].

در سال های اخیر، استفاده از کامپوزیت های چوب-پلاستیک در فناوری ساخت رشته ذوبی توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۱۰]. این مواد با بهره گیری از ذرات یا الیاف چوب در کنار ماتریس های پلیمری، ضمن کاهش مصرف مواد پلیمری، امکان تولید قطعاتی با ویژگی های زیست محیطی مطلوب تر را فراهم می کنند. در میان انواع مختلف این مواد، کامپوزیت های چوب-پلی لاکتیک اسید به دلیل زیست تخریب پذیری نسبی، قابلیت چاپ مناسب و خواص مکانیکی قابل قبول، از محبوبیت ویژه ای برخوردار هستند. با وجود پیشرفت های صورت گرفته در این حوزه، بررسی تأثیر پارامترهای فرایند، به ویژه سرعت پرینت، همچنان یکی از موضوعات مهم پژوهشی محسوب می شود. از این رو، مطالعات متعددی به ارزیابی رفتار و عملکرد کامپوزیت های چوب-پلی لاکتیک اسید تولید شده با روش ساخت رشته ذوبی پرداخته اند که در ادامه مرور می شوند.

مطالعات متعددی در زمینه تولید و ارزیابی کامپوزیت های چوب-پلی لاکتیک اسید به روش ساخت رشته ذوبی انجام شده است، اما بررسی دقیق شرایط فرایند نشان می دهد که اغلب پژوهش ها در محدوده سرعت های پرینت نسبتاً پایین متمرکز بوده اند. یانگ و همکاران [۱۱] نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید را با سرعت پرینت ۳۰ میلی متر بر ثانیه تولید و ویژگی های آن ها را مورد ارزیابی قرار دادند. لی گوئن و همکاران [۱۲] نیز به مطالعه این نوع کامپوزیت ها پرداختند، اما مقدار دقیق سرعت پرینت در تحقیق آن ها گزارش نشده است. یانگ و یه [۱۳] اثر پارامترهای فرایند را بر نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید تولید شده در محدوده سرعت های پرینت ۳۰ تا ۷۰ میلی متر بر ثانیه بررسی کردند. در مطالعه ژو و همکاران [۱۴] نمونه های کامپوزیتی چوب-پلی لاکتیک اسید با سرعت پرینت ۳۵ میلی متر بر ثانیه ساخته شدند و خواص آن ها مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین کوان-اورکویزو [۱۵] و تائو و همکاران [۱۶] نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید را با سرعت پرینت ۳۰ میلی متر بر ثانیه تولید و ارزیابی کردند. کین و همکاران [۱۷] نیز در پژوهش خود از سرعت پرینت ۲۲/۵ میلی متر بر ثانیه برای ساخت نمونه های کامپوزیتی چوب-پلی لاکتیک اسید استفاده نمودند.

مرور مطالعات پیشین نشان می دهد که سرعت های پرینت مورد استفاده در تحقیقات مربوط به کامپوزیت های چوب-پلی لاکتیک اسید عمدتاً کمتر از ۱۰۰ میلی متر بر ثانیه بوده و بخش عمده پژوهش ها در محدوده ۲۰ تا ۷۰ میلی متر بر ثانیه انجام شده اند. در نتیجه، اطلاعات علمی محدودی درباره رفتار این مواد در شرایط پرینت با سرعت های بالا وجود دارد و تأثیر چنین سرعت هایی بر عملکرد مکانیکی و قابلیت جذب انرژی این کامپوزیت ها هنوز به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است.

یکی از مهم ترین چالش های موجود در توسعه کاربردهای صنعتی فناوری ساخت رشته ذوبی، افزایش بهره وری و کاهش زمان ساخت قطعات بدون افت قابل توجه در عملکرد آن ها است. در این راستا، افزایش سرعت پرینت به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای کاهش زمان تولید مطرح می شود، تغییر سرعت پرینت می تواند بر فرایند ذوب و اتصال بین لایه ها، کیفیت ساختار داخلی قطعه، میزان تخلخل و در نهایت بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی قطعات تولید شده اثرگذار باشد. این موضوع در مورد کامپوزیت های چوب-پلاستیک اهمیت بیشتری پیدا می کند، زیرا حضور ذرات چوب می تواند بر رفتار جریان مذاب، چسبندگی بین لایه ای و پاسخ مکانیکی نهایی قطعه تأثیر بگذارد. با وجود اهمیت این مسئله، بررسی های انجام شده نشان می دهد که پژوهش های پیشین عمدتاً بر سرعت های پرینت پایین متمرکز بوده اند و اطلاعات کافی درباره عملکرد این مواد در سرعت های بسیار بالاتر در دسترس نیست.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر سرعت پرینت بر رفتار جذب انرژی کامپوزیت های چوب-پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش ساخت رشته ذوبی انجام شده است. در این تحقیق، دو سرعت پرینت ۵۰ و ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه به ترتیب به عنوان نماینده سرعت های متداول و سرعت های بالا انتخاب شدند و نمونه های استاندارد برای آزمون فشار شبه استاتیکی تولید گردیدند. سپس شاخص های مهم جذب انرژی شامل جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی محاسبه و مقایسه شدند. نوآوری اصلی این

پژوهش در بررسی عملکرد کامپوزیت های چوب-پلی لاکتیک اسید در سرعت پرینت بالای ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه و تحلیل اثر این شرایط فرایندی بر قابلیت جذب انرژی آنها است؛ موضوعی که تاکنون در مطالعات منتشر شده گزارش نشده و می تواند دیدگاه جدیدی برای توسعه کاربردهای مهندسی و صنعتی این مواد فراهم آورد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

در این پژوهش از رشته چاپی پلی لاکتیک اسید تقویت شده با ذرات چوب ساخت شرکت سانلو به عنوان ماده اولیه استفاده شد. این ماده حاوی ۱۵ درصد وزنی ذرات چوب بوده و برای کاربردهای ساخت افزایشی مبتنی بر فناوری ساخت رشته ذوبی توسعه یافته است. چگالی این ماده برابر با ۱/۱۷ گرم بر سانتی متر مکعب و شاخص جریان مذاب آن برابر با ۳/۸ گرم بر ۱۰ دقیقه گزارش شده است. بر اساس مشخصات ارائه شده توسط شرکت سازنده، محدوده دمای مناسب برای چاپ این ماده بین ۲۰۰ تا ۲۳۰ درجه سانتی گراد، دمای بستر چاپ بین ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد و سرعت چاپ حداکثر ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه پیشنهاد شده است.

۲-۲- طراحی و تولید نمونه ها

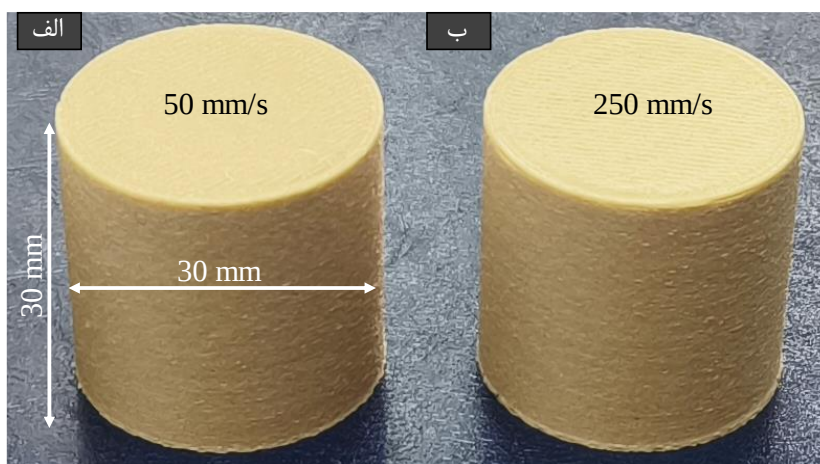
نمونه های مورد استفاده در این تحقیق مطابق استاندارد ASTM D695 [۱۸] با عنوان روش استاندارد آزمون خواص فشاری پلاستیک ها طراحی شدند. برای این منظور از نرم افزار سالیدورکس استفاده شد و نمونه ها به صورت استوانه هایی با قطر ۳۰ میلی متر و ارتفاع ۳۰ میلی متر طراحی گردیدند. پس از تکمیل طراحی، فایل های سه بعدی برای آماده سازی فرایند چاپ به نرم افزار برش زن اولتی میکر کیورا منتقل شدند. تولید نمونه ها با استفاده از چاپگر سه بعدی ساخت رشته ذوبی اندر ۳ وی ۳ پلاس ساخت شرکت کریالیتی انجام شد. با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی اثر سرعت چاپ بر رفتار جذب انرژی نمونه ها بود، سایر پارامترهای فرایند به صورت ثابت در نظر گرفته شدند تا تأثیر عوامل مداخله گر به حداقل برسد. قطر نازل مورد استفاده ۰/۴ میلی متر انتخاب شد و متناسب با آن ارتفاع لایه برابر با ۰/۳ میلی متر در نظر گرفته شد. همچنین برای ایجاد ساختارهای سبک وزن و فراهم نمودن شرایط مناسب برای بررسی رفتار جذب انرژی، درصد پرشدگی داخلی برابر با ۲۰ درصد انتخاب گردید.

بر اساس توصیه شرکت سازنده رشته چاپی، دمای نازل برابر با ۲۲۵ درجه سانتی گراد و دمای بستر چاپ برابر با ۶۰ درجه سانتی گراد تنظیم شد. سرعت فن خنک کننده نیز بر روی ۱۰۰ درصد قرار گرفت. علاوه بر این، تعداد لایه های بالایی و پایینی نمونه ها و همچنین تعداد دیواره ها برابر با دو لایه در نظر گرفته شد. برای ساختار داخلی قطعات از الگوی پرشدگی خطی استفاده شد و مسیرهای چاپ در زوایای صفر و ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر تنظیم گردیدند تا ساختاری منظم و قابل تکرار در تمامی نمونه ها ایجاد شود.

شایان ذکر است که هر یک از پارامترهای فرایندی یاد شده می توانند بر خواص فیزیکی، مکانیکی و عملکرد جذب انرژی قطعات چاپ شده تأثیرگذار باشند. با این حال، از آنجاکه هدف پژوهش حاضر بررسی اثر این پارامترها نبوده است، تمامی آنها ثابت نگه داشته شدند. بررسی اثر عوامل فرایندی نظیر ارتفاع لایه، درصد پرشدگی، الگوی پرشدگی، دمای نازل و جهت گیری چاپ در سرعت های بالای چاپ می تواند موضوع تحقیقات آینده باشد.

در این پژوهش، سرعت چاپ ۵۰ میلی متر بر ثانیه به عنوان نماینده سرعت های متداول و پایین و سرعت چاپ ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه به عنوان نماینده سرعت های بالای چاپ انتخاب شد. انتخاب سرعت ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه بر اساس حداکثر مقدار پیشنهادی توسط شرکت سازنده رشته چاپی انجام گرفت. از سوی دیگر، سرعت های بالاتر از این مقدار به دلیل محدودیت های توصیه شده توسط تولیدکننده مورد استفاده قرار نرفتند. با این وجود، بررسی رفتار کامپوزیت های چوب-پلی لاکتیک اسید در سرعت های فراتر از ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه می تواند به عنوان یکی از موضوعات مهم پژوهش های آتی مورد توجه قرار گیرد.

پس از آماده سازی تنظیمات چاپ، برای هر یک از شرایط مورد بررسی حداقل سه نمونه تولید شد تا امکان ارزیابی تکرارپذیری نتایج فراهم شود. شکل ۱ تعدادی از نمونه های تولید شده را به همراه ابعاد هندسی آنها در دو سرعت چاپ مختلف نشان می دهد.



شکل ۱ نمونه های استوانه ای تولید شده از کامپوزیت چوب- پلی لاکتیک اسید و ابعاد هندسی آن ها؛ الف) نمونه چاپ شده با سرعت ۵۰ میلی متر بر ثانیه و ب) نمونه چاپ شده با سرعت ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه

۲-۳- آزمون فشار و ارزیابی شاخص های جذب انرژی

به منظور بررسی عملکرد نمونه های تولید شده با سرعت های چاپ مختلف از دیدگاه قابلیت جذب انرژی، آزمون فشار تک محوره بر روی تمامی نمونه ها انجام شد. این آزمون با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال سانتام مدل اس تی ام-۲۰ مجهز به حسگر نیرو با ظرفیت ۲۰ کیلو نیوتن انجام گرفت. تمامی آزمایش ها تحت شرایط یکسان و با سرعت حرکت فک متحرک برابر با ۵ میلی متر بر دقیقه انجام شدند تا امکان مقایسه مستقیم رفتار نمونه های تولید شده در سرعت های چاپ مختلف فراهم شود. پیش از انجام آزمون، نمونه های استوانه ای بر روی صفحه پایینی دستگاه قرار گرفتند و به گونه ای تراز شدند که بار فشاری به صورت یکنواخت در راستای محور طولی نمونه اعمال شود. در طول آزمون، نیروی فشاری و جابجایی متناظر به صورت پیوسته توسط نرم افزار دستگاه ثبت گردید و منحنی نیرو-جابجایی برای هر نمونه استخراج شد. آزمون تا رسیدن به تغییر شکل قابل توجه و فشرده شدن ساختار داخلی نمونه ها ادامه یافت تا اطلاعات لازم برای ارزیابی رفتار جذب انرژی آن ها فراهم شود.

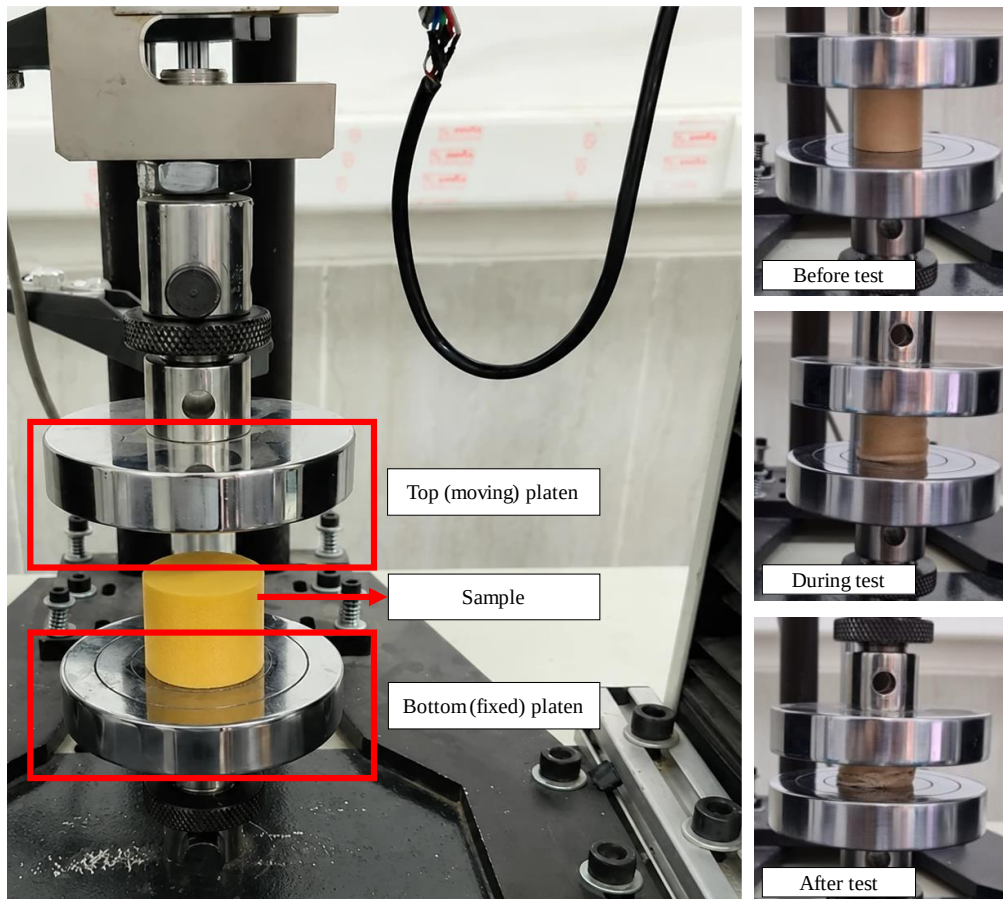
از آنجاکه یکی از شاخص های مورد استفاده در این تحقیق جذب انرژی ویژه است، اندازه گیری دقیق جرم نمونه ها نیز ضروری بود. به همین منظور، جرم تمامی نمونه ها پیش از انجام آزمون با استفاده از ترازوی دیجیتال سارتوریوس مدل تی ای ۳۱۳ اس اندازه گیری و ثبت شد. داده های جرم به همراه نتایج آزمون فشار برای محاسبه شاخص های مختلف جذب انرژی مورد استفاده قرار گرفتند. در پژوهش حاضر، عملکرد نمونه های تولید شده با سرعت های چاپ ۵۰ و ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه بر اساس سه شاخص اصلی شامل جذب انرژی کل، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص ها از روی داده های نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار محاسبه شده و مبنای مقایسه رفتار مکانیکی و قابلیت جذب انرژی نمونه ها در شرایط مختلف چاپ قرار گرفتند. شکل ۲ دستگاه آزمون فشار و نمونه های مورد بررسی را قبل از آزمون، در حین بارگذاری و پس از اتمام آزمون نشان می دهد.

۲-۴- محاسبه شاخص های جذب انرژی

به منظور ارزیابی عملکرد نمونه های تولید شده با سرعت های چاپ مختلف، سه شاخص اصلی شامل جذب انرژی کل، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی از داده های نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار محاسبه شدند. جذب انرژی کل، میزان انرژی جذب شده توسط نمونه در طول فرایند تغییر شکل فشاری را نشان می دهد و از مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی به دست می آید. این پارامتر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد [۱۹]:

$$EA = \int_0^{\delta} F(x) \cdot dx \quad (1)$$

که در آن EA جذب انرژی کل، F نیروی فشاری و δ جابجایی نهایی نمونه است. مقدار بیشتر جذب انرژی کل بیانگر توانایی بالاتر نمونه در جذب انرژی مکانیکی اعمال شده است [۲۰].



شکل ۲ دستگاه آزمون فشار مورد استفاده در تحقیق و نمونه‌های کامپوزیت چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید در مراحل مختلف آزمایش: پیش از اعمال بار، در حین بارگذاری فشاری و پس از اتمام آزمون و فشرده شدن ساختار نمونه

از آنجاکه مقایسه عملکرد سازه‌ها تنها بر اساس جذب انرژی کل ممکن است تحت تأثیر جرم نمونه قرار گیرد، از شاخص جذب انرژی ویژه نیز استفاده شد. این شاخص میزان انرژی جذب‌شده به ازای واحد جرم نمونه را بیان می‌کند و از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۱]:

$$SEA = \frac{\int_0^{\delta} F(x).dx}{m} \quad (2)$$

که در آن SEA جذب انرژی ویژه و m جرم نمونه است. مقادیر بالاتر این شاخص نشان‌دهنده کارایی بیشتر ساختار در جذب انرژی نسبت به وزن آن هستند [۲۲].

برای ارزیابی یکنواختی فرایند جذب انرژی و میزان پایداری بار در طول فشرده‌سازی، بازده نیروی خردشدگی نیز محاسبه شد. این پارامتر از نسبت نیروی میانگین خردشدگی به بیشینه نیروی اولیه به دست می‌آید [۲۳]:

$$CFE = \frac{F_{mean}}{F_{peak}} \quad (3)$$

که در آن CFE بازده نیروی خردشدگی، F_{mean} نیروی میانگین خردشدگی و F_{peak} بیشینه نیروی ثبت شده در مرحله آغازین خردشدگی است.

در این پژوهش، ابتدا منحنی‌های نیرو-جابجایی از آزمون فشار استخراج شدند. سپس با استفاده از رابطه (۱) مقدار جذب انرژی کل محاسبه شد. پس از اندازه‌گیری جرم نمونه‌ها، جذب انرژی ویژه بر اساس رابطه (۲) تعیین گردید. همچنین با استفاده از رابطه (۳)، بازده نیروی خردشدگی برای تمامی نمونه‌ها محاسبه شد. درنهایت، مقادیر به‌دست‌آمده برای نمونه‌های تولیدشده در سرعت‌های چاپ ۵۰ و ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه با یکدیگر مقایسه شدند تا اثر سرعت چاپ بر رفتار جذب انرژی کامپوزیت‌های چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید مورد ارزیابی قرار گیرد.

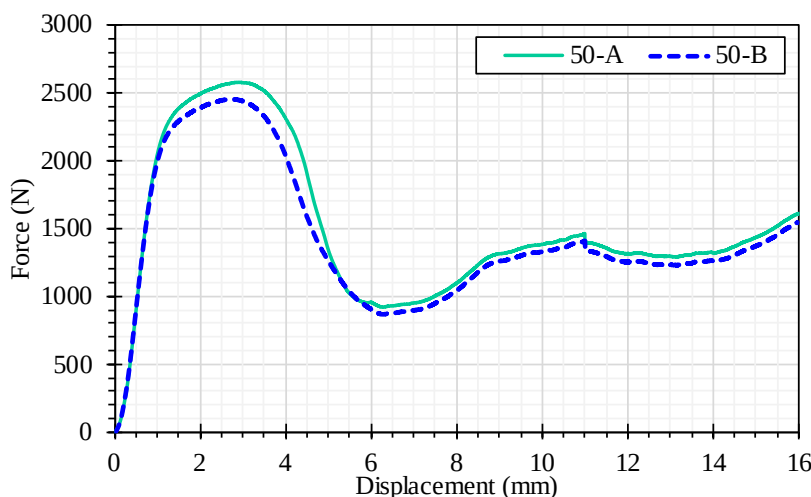
۳- نتایج و بحث

جدول ۱ زمان مورد نیاز برای تولید نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید را در سرعت های چاپ مختلف نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، در سرعت چاپ ۵۰ میلی متر بر ثانیه، زمان تولید هر نمونه برابر با ۲۱ دقیقه بوده است، در حالی که با افزایش سرعت چاپ به ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه، زمان تولید به ۱۹ دقیقه کاهش یافته است. این نتایج نشان می دهد که افزایش سرعت چاپ موجب کاهش زمان ساخت نمونه ها شده و در نتیجه می تواند بهره وری فرایند تولید را افزایش دهد. هر چند میزان کاهش زمان چاپ در تحقیق حاضر نسبتاً محدود بوده است، اما همین کاهش نیز می تواند در تولید تعداد زیاد قطعات یا کاربردهای صنعتی به صرفه جویی قابل توجهی در زمان منجر شود. نتایج پژوهش حاضر با یافته های یانگ و یه [۱۳] مطابقت دارد. این پژوهشگران گزارش کردند که افزایش سرعت چاپ از ۳۰ به ۷۰ میلی متر بر ثانیه موجب کاهش چشمگیر زمان تولید نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید از ۶۱ دقیقه به ۳۶ دقیقه شد که نشان دهنده تأثیر مستقیم سرعت چاپ بر کاهش زمان ساخت قطعات است.

جدول ۱ زمان مورد نیاز برای تولید نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید در سرعت های چاپ مختلف

سرعت پرینت (میلی متر بر ثانیه)	زمان پرینت (دقیقه)
50	21
250	19

شکل ۳ منحنی نیرو-جابجایی و همچنین روند تغییر شکل نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید تولید شده با سرعت چاپ ۵۰ میلی متر بر ثانیه را در آزمون فشار شبه استاتیکی نشان می دهد. مطابق مطالعات پیشین، رفتار سازه های جاذب انرژی تحت بارگذاری فشاری معمولاً شامل سه ناحیه اصلی الاستیک، سکویی (Plateau) و تراکم نهایی (Densification) است [۲۴]. در ناحیه الاستیک، تغییر شکل ها عمدتاً برگشت پذیر بوده و هنوز فروپاشی ساختاری قابل توجهی رخ نداده است. با افزایش بار، سازه به نقطه تسلیم یا نخستین نیروی بیشینه رسیده و سپس وارد مرحله فروپاشی تدریجی می شود [۲۵].



شکل ۳ منحنی نیرو-جابجایی و توالی تغییر شکل نمونه کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید تولید شده با سرعت چاپ ۵۰ میلی متر بر ثانیه تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیکی

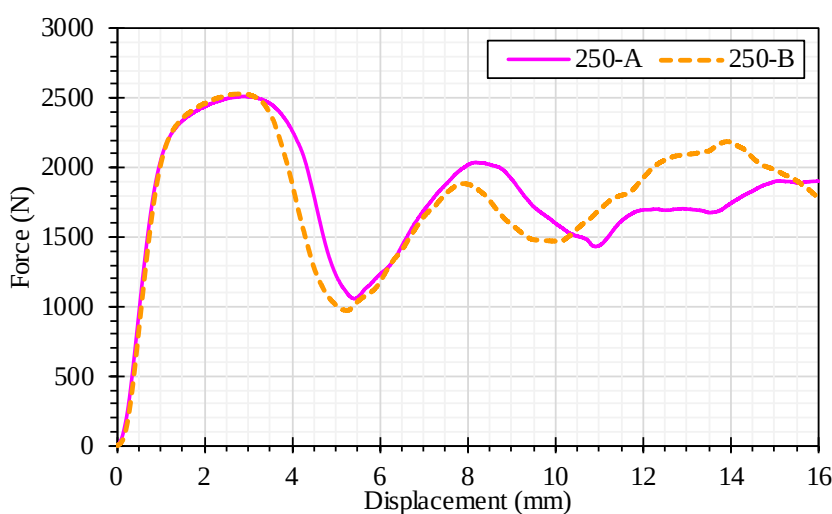
نتایج شکل ۳ نشان می دهد که نمونه های تولید شده در سرعت چاپ ۵۰ میلی متر بر ثانیه دارای یک ناحیه الاستیک نسبتاً کوتاه و یک ناحیه سکویی گسترده هستند. ناحیه تراکم نهایی عمدتاً بیانگر فشرده شدن کامل ماده و جذب انرژی مرتبط با ماده متراکم شده است و اطلاعات محدودی درباره عملکرد واقعی سازه جاذب انرژی ارائه می کند، بنابراین در این تحقیق این ناحیه از تحلیل ها حذف شد. بر این اساس، ارزیابی رفتار جذب انرژی تا جابجایی ۱۶ میلی متر انجام گرفت که بیش از نیمی از ارتفاع اولیه نمونه (۳۰ میلی متر) را شامل می شود.

بررسی منحنی نیرو-جابجایی نشان می‌دهد که تنها بخش کوچکی از انرژی در ناحیه الاستیک جذب می‌شود، درحالی‌که سهم عمده جذب انرژی مربوط به ناحیه سکویی است. این رفتار یکی از ویژگی‌های مطلوب سازه‌های جاذب انرژی محسوب می‌شود، زیرا امکان جذب مقادیر قابل توجهی از انرژی را تحت بار نسبتاً پایدار فراهم می‌کند [۲۶، ۲۷]. همچنین دامنه نوسانات نیرو در ناحیه سکویی محدود بوده و تغییرات نیرو به‌صورت نسبتاً یکنواخت رخ می‌دهد. بر اساس گزارش‌های موجود در ادبیات پژوهش، وجود یک ناحیه سکویی طولانی همراه با حداقل نوسانات نیرو یا تنش، از مهم‌ترین مشخصه‌های یک جاذب انرژی کارآمد به شمار می‌رود [۲۸].

یکی از ویژگی‌های قابل توجه منحنی، افت ناگهانی نیرو پس از حدود ۲ میلی‌متر جابجایی است. این افت بیانگر فروپاشی اولیه ساختار و آغاز تغییر شکل دائمی در لایه‌های چاپ‌شده است. در واقع، پس از رسیدن نمونه به نخستین نیروی بیشینه، لایه‌های اولیه شروع به کمانش و فروپاشی موضعی کرده و در نتیجه نیروی موردنیاز برای ادامه تغییر شکل کاهش می‌یابد. چنین رفتاری با الگوی تغییر شکل کشش محور مطابقت دارد [۲۴]. در این نوع سازوکار، پس از نقطه تسلیم، منحنی نیرو-جابجایی با یک افت مشخص همراه می‌شود و سپس یک ناحیه سکویی نسبتاً طولانی ایجاد می‌گردد. مطالعات نشان داده‌اند که سازه‌های دارای مکانیسم تغییر شکل کشش محور معمولاً نسبت سفتی به وزن بالاتر و عملکرد مطلوب‌تری در جذب انرژی نسبت به سازه‌های با تغییر شکل خمش محور دارند [۲۴].

علاوه بر این، پس از حدود ۶ میلی‌متر جابجایی، روند منحنی مجدداً صعودی می‌شود. این افزایش تدریجی نیرو را می‌توان به تماس تدریجی لایه‌های فروپاشیده شده با صفحات بارگذاری دستگاه آزمون نسبت داد. با ادامه فرایند فشرده‌سازی، فضای خالی موجود در ساختار کاهش یافته و بخش‌های تغییر شکل یافته نمونه با صفحه ثابت یا متحرک دستگاه تماس بیشتری پیدا می‌کنند. در نتیجه مقاومت فشاری نمونه افزایش یافته و منحنی نیرو-جابجایی روندی صعودی از خود نشان می‌دهد. این رفتار بیانگر مشارکت تدریجی لایه‌های فروپاشیده در تحمل بار و افزایش ظرفیت جذب انرژی در مراحل انتهایی ناحیه سکویی است.

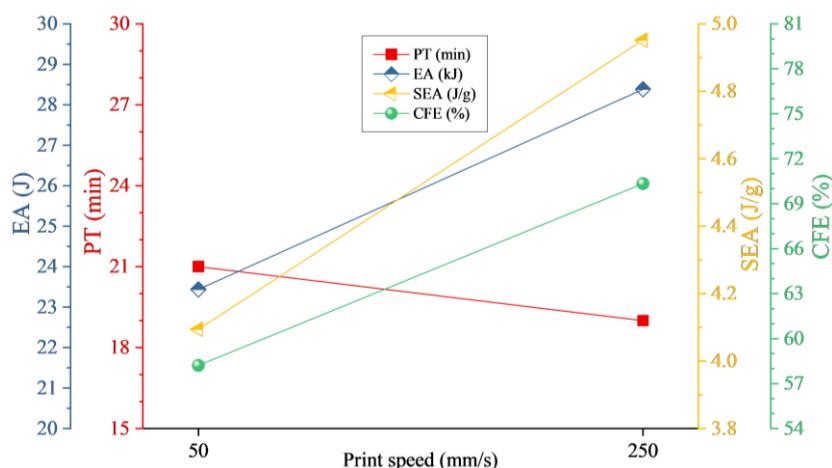
شکل ۴ منحنی نیرو-جابجایی و روند تغییر شکل نمونه‌های کامپوزیت چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید تولیدشده با سرعت چاپ ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه را تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج مشخص است، رفتار این نمونه‌ها شباهت زیادی به نمونه‌های تولیدشده با سرعت چاپ ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه دارد و همان الگوی متداول جذب انرژی شامل یک ناحیه الاستیک اولیه کوتاه و یک ناحیه سکویی نسبتاً طولانی مشاهده می‌شود. در مراحل ابتدایی بارگذاری، نیرو تقریباً به‌صورت خطی با افزایش جابجایی افزایش یافته که نشان‌دهنده رفتار الاستیک سازه پیش از آغاز فروپاشی است. پس از رسیدن به نخستین نیروی بیشینه، منحنی با افت محسوسی همراه می‌شود که بیانگر فروپاشی اولیه ساختار و آغاز تغییر شکل دائمی در لایه‌های چاپ‌شده است. این رفتار حاکی از آن است که مکانیسم غالب تغییر شکل در این نمونه‌ها نیز از نوع کشش محور بوده و بخش عمده انرژی از طریق فروپاشی تدریجی ساختار جذب می‌شود.



شکل ۴ منحنی نیرو-جابجایی و توالی تغییر شکل نمونه کامپوزیت چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید تولیدشده با سرعت چاپ ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی

همچنین مشاهده می شود که بخش عمده مساحت زیر منحنی، که بیانگر انرژی جذب شده است، در ناحیه سکویی متمرکز شده و سهم ناحیه الاستیک در جذب انرژی نسبتاً محدود است. این ویژگی یکی از مشخصه های مطلوب سازه های جاذب انرژی محسوب می شود، زیرا امکان استهلاک انرژی تحت بار نسبتاً پایدار را فراهم می کند. علاوه بر این، نوسانات نیرو در طول ناحیه سکویی محدود بوده و روند تغییرات نیرو نسبتاً یکنواخت است که نشان دهنده پایداری فرایند فروپاشی و کارایی مناسب ساختار در جذب انرژی است. مشابه نمونه های تولید شده با سرعت چاپ ۵۰ میلی متر بر ثانیه، پس از چند میلی متر جابجایی روند منحنی به تدریج صعودی می شود که این موضوع را می توان به تماس تدریجی لایه های فرو ریخته با صفحات بارگذاری دستگاه و کاهش فضای خالی داخلی ساختار نسبت داد. در مجموع، نتایج شکل ۴ نشان می دهد که افزایش سرعت چاپ تا ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه موجب تغییر اساسی در مکانیسم جذب انرژی و الگوی کلی تغییر شکل نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید نشده است.

شکل ۵ تأثیر سرعت چاپ بر زمان تولید و همچنین شاخص های اصلی جذب انرژی شامل جذب انرژی کل، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی را برای نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش ساخت رشته ذوبی نشان می دهد. این شکل امکان ارزیابی هم زمان عملکرد تولیدی و عملکرد مکانیکی نمونه ها را فراهم می سازد و دیدگاه جامعی درباره اثر افزایش سرعت چاپ بر کارایی فرایند و قابلیت جذب انرژی قطعات ارائه می دهد.



شکل ۵ اثر سرعت چاپ بر عملکرد تولیدی و شاخص های جذب انرژی شامل زمان تولید، جذب انرژی کل، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی نمونه های کامپوزیت چوب-پلی لاکتیک اسید

جدول ۲ میانگین، انحراف معیار و نتایج آزمون آماری مربوط به سه شاخص عملکردی شامل جذب انرژی کل، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی را برای نمونه های تولید شده در سرعت های پرینت ۵۰ و ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه ارائه می دهد. به منظور ارزیابی میزان پراکندگی داده ها و بررسی دقت نتایج حاصل از آزمون های تجربی، انحراف معیار مقادیر اندازه گیری شده مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که از داده های جدول مشخص است، مقادیر انحراف معیار برای هر سه شاخص در هر دو سرعت پرینت پایین بوده و پراکندگی محدودی در نتایج مشاهده می شود. این مقادیر پایین انحراف معیار نشان دهنده تکرارپذیری مناسب آزمون ها و دقت بالای نتایج به دست آمده است. همچنین، به منظور بررسی معناداری آماری اختلاف بین نتایج حاصل از نمونه های تولید شده در دو سرعت پرینت، آزمون 2-sample t-test انجام شد و سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج، مقدار p برای جذب انرژی کل برابر با ۰/۰۰۵، برای جذب انرژی ویژه برابر با ۰/۰۰۷ و برای بازده نیروی خردشدگی برابر با ۰/۰۰۰ به دست آمد. از آنجاکه تمامی مقادیر p به طور قابل توجهی کمتر از سطح معناداری ۰/۰۵ هستند، اختلاف مشاهده شده بین نمونه های تولید شده در سرعت های ۵۰ و ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه از نظر آماری کاملاً معنادار است.

مطابق نتایج به دست آمده، در سرعت چاپ ۵۰ میلی متر بر ثانیه، زمان تولید نمونه برابر با ۲۱ دقیقه، جذب انرژی کل برابر با ۲۳/۴۵ ژول، جذب انرژی ویژه برابر با ۴/۹۴ ژول بر گرم و بازده نیروی خردشدگی برابر با ۵۸/۲۱ درصد بوده است. در مقابل، برای نمونه های تولید شده با سرعت چاپ ۲۵۰ میلی متر بر ثانیه، زمان تولید به ۱۹ دقیقه کاهش یافته، در حالی که جذب انرژی کل به ۲۸/۳۸ ژول، جذب انرژی ویژه به ۴/۹۵۲ ژول بر گرم و بازده نیروی خردشدگی به ۷۰/۳۴ درصد افزایش یافته است.

جدول ۲ میانگین، انحراف معیار و نتایج آزمون آماری شاخص‌های جذب انرژی نمونه‌های تولیدشده در سرعت‌های مختلف پربنت

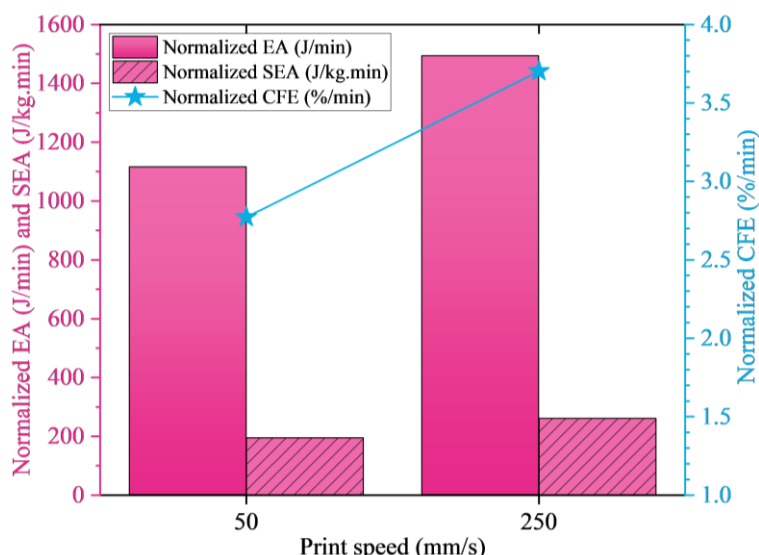
مقدار p	میانگین $\pm$ انحراف معیار	سرعت پربنت (میلی‌متر بر ثانیه)	خروجی
0.005	23.45 $\pm$ 0.63	50	جذب انرژی کل (ژول)
	28.38 $\pm$ 0.01	250	
0.007	4.094 $\pm$ 0.12	50	جذب انرژی ویژه (ژول بر گرم)
	4.952 $\pm$ 0.00	250	
0.000	58.21 $\pm$ 0.12	50	بازده نیروی خردشدگی (درصد)
	70.34 $\pm$ 0.25	250	

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت چاپ از ۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه نه تنها موجب کاهش زمان تولید شده، بلکه عملکرد جذب انرژی نمونه‌ها را نیز بهبود بخشیده است. به‌طور مشخص، زمان تولید نمونه‌ها در سرعت چاپ بالاتر حدود ۱۰/۵ درصد کاهش یافته است. این موضوع از دیدگاه صنعتی اهمیت قابل‌توجهی دارد، زیرا کاهش زمان ساخت می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری خطوط تولید، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش ظرفیت تولید شود. با این حال، مهم‌ترین یافته شکل ۵ آن است که این کاهش زمان ساخت با افت عملکرد مکانیکی همراه نبوده و حتی به بهبود شاخص‌های جذب انرژی منجر شده است.

نتایج نشان می‌دهد که جذب انرژی کل در سرعت چاپ ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه نسبت به سرعت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه حدود ۲۱/۰۹ درصد افزایش یافته است. این افزایش بیانگر آن است که نمونه‌های تولیدشده در سرعت چاپ بالاتر قادرند مقدار بیشتری از انرژی اعمال‌شده را در طول فرایند فشرده‌سازی جذب و مستهلک کنند. از سوی دیگر، جذب انرژی ویژه نیز حدود ۲۰/۵۹ درصد افزایش یافته است. از آنجاکه این شاخص میزان انرژی جذب‌شده به ازای واحد جرم را بیان می‌کند، افزایش آن نشان‌دهنده بهبود کارایی سازه از نظر نسبت عملکرد به وزن است. این ویژگی در کاربردهای مهندسی نظیر سازه‌های محافظ، قطعات جذب‌کننده ضربه و سامانه‌های ایمنی که وزن پایین و قابلیت جذب انرژی بالا به‌طور هم‌زمان موردنیاز است، اهمیت ویژه‌ای دارد.

علاوه بر این، بازده نیروی خردشدگی نیز با افزایش سرعت چاپ حدود ۲۰/۴۸ درصد افزایش یافته و از ۵۸/۲۱ درصد به ۷۰/۳۴ درصد رسیده است. افزایش این شاخص نشان می‌دهد که فرایند فروپاشی نمونه در سرعت چاپ بالاتر یکنواخت‌تر بوده و اختلاف میان نیروی بیشینه اولیه و نیروی متوسط مرحله جذب انرژی کاهش یافته است. در نتیجه، نمونه‌های تولیدشده با سرعت چاپ ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه رفتار پایدارتر و مطلوب‌تری در طول فرایند جذب انرژی از خود نشان داده‌اند. در مجموع، نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش سرعت چاپ تا ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه نه تنها موجب کاهش زمان تولید می‌شود، بلکه بهبود قابل توجهی در تمامی شاخص‌های مرتبط با عملکرد جذب انرژی ایجاد می‌کند و بنابراین می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش هم‌زمان بهره‌وری تولید و عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید مورد توجه قرار گیرد. یکی از توضیحات احتمالی برای بهبود عملکرد جذب انرژی در سرعت چاپ بالاتر می‌تواند به شرایط حرارتی و نحوه اتصال بین لایه‌های متوالی مربوط باشد. در سرعت چاپ بالاتر، لایه جدید در فاصله زمانی کوتاه‌تری پس از لایه قبلی روی آن قرار می‌گیرد و بنابراین ممکن است لایه زیرین پیش از رسوب لایه جدید فرصت کمتری برای سرد شدن داشته باشد. در نتیجه، باقی‌ماندن دمای بالاتر در فصل مشترک لایه‌ها می‌تواند، به‌طور بالقوه، موجب بهبود اتصال بین‌لایه‌ای و در پی آن افزایش ظرفیت تحمل بار و جذب انرژی ساختار شود. با این حال، این مکانیسم در پژوهش حاضر به‌صورت مستقیم مورد بررسی میکروسکوپی قرار نگرفته و اثبات آن نیازمند تحقیقات آتی است.

شکل ۶ شاخص‌های جذب انرژی نرمال‌شده برحسب زمان تولید را برای نمونه‌های کامپوزیت چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید تولیدشده در سرعت‌های چاپ مختلف نشان می‌دهد. برخلاف نتایج شکل ۵ که صرفاً عملکرد مکانیکی نمونه‌ها را مورد مقایسه قرار می‌داد، در این شکل تأثیر هم‌زمان عملکرد جذب انرژی و زمان موردنیاز برای تولید نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. در واقع، شاخص‌های نرمال‌شده ارائه‌شده در شکل ۶ بیانگر میزان کارایی فرایند از دیدگاه جذب انرژی به ازای واحد زمان تولید هستند و بنابراین معیار مناسبی برای ارزیابی بهره‌وری عملی فرایند ساخت افزایشی محسوب می‌شوند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، برای سرعت چاپ ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، جذب انرژی نرمال‌شده برابر با ۱۱۱۶ ژول بر دقیقه، جذب انرژی ویژه نرمال‌شده برابر با ۱۹۵/۰ ژول بر گرم دقیقه و بازده نیروی خردشدگی نرمال‌شده برابر با ۲/۷۷۲ درصد بر دقیقه بوده است. در مقابل، برای سرعت چاپ ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، جذب انرژی نرمال‌شده به ۱۴۹۴ ژول بر دقیقه، جذب انرژی ویژه نرمال‌شده به ۲۶۰/۶ ژول بر گرم دقیقه و بازده نیروی خردشدگی نرمال‌شده به ۳/۷۰۲ درصد بر دقیقه افزایش یافته است.



شکل ۶ ارزیابی کارایی فرایند بر اساس شاخص‌های جذب انرژی نرمال‌شده نسبت به زمان تولید برای نمونه‌های کامپوزیت چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید تولیدشده در سرعت‌های چاپ مختلف

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت چاپ از ۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه تأثیر بسیار مثبتی بر تمامی شاخص‌های نرمال‌شده داشته است. جذب انرژی نرمال‌شده حدود ۳۳/۴۸ درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد نمونه‌های تولیدشده در سرعت چاپ بالاتر نه تنها انرژی بیشتری جذب می‌کنند، بلکه این انرژی در زمان کوتاه‌تری از فرایند تولید حاصل می‌شود. از دیدگاه صنعتی، این شاخص اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا نشان‌دهنده میزان انرژی جذب‌شده به ازای زمان صرف شده برای ساخت قطعه است. بنابراین، افزایش این شاخص به معنای ارتقای هم‌زمان عملکرد مکانیکی و بهره‌وری تولید خواهد بود.

همچنین جذب انرژی ویژه نرمال‌شده حدود ۳۳/۶۸ درصد افزایش یافته است. این نتیجه بیانگر آن است که نمونه‌های تولیدشده در سرعت چاپ بالاتر از نظر نسبت جذب انرژی به جرم و همچنین از منظر زمان تولید عملکرد بسیار بهتری دارند. در بسیاری از کاربردهای مهندسی نظیر سازه‌های محافظ، تجهیزات ایمنی و اجزای جذب‌کننده ضربه، دستیابی هم‌زمان به وزن پایین، جذب انرژی بالا و زمان ساخت کوتاه از اهمیت زیادی برخوردار است. از این‌رو، افزایش قابل‌توجه این شاخص می‌تواند مزیت مهمی برای استفاده از سرعت‌های چاپ بالا در تولید قطعات کامپوزیتی محسوب شود.

علاوه بر این، بازده نیروی خردشدگی نرمال‌شده نیز حدود ۳۳/۵۶ درصد افزایش است. این موضوع نشان می‌دهد که نه تنها پایداری فرایند جذب انرژی در سرعت چاپ بالاتر بهبود یافته است، بلکه این بهبود در زمان کوتاه‌تری از فرایند تولید حاصل شده است. به عبارت دیگر، افزایش سرعت چاپ موجب شده است که نمونه‌ها در کنار تولید سریع‌تر، رفتار مطلوب‌تر و یکنواخت‌تری در طول فرایند فشرده‌سازی از خود نشان دهند. نکته قابل‌توجه آن است که میزان بهبود هر سه شاخص نرمال‌شده از میزان بهبود شاخص‌های متناظر در شکل ۵ بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که هنگامی که عامل زمان تولید نیز در ارزیابی عملکرد وارد می‌شود، مزیت استفاده از سرعت چاپ ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه نسبت به سرعت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه آشکارتر می‌شود. در مجموع، نتایج شکل ۶ به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از سرعت چاپ بالا نه تنها موجب بهبود عملکرد جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیت چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید می‌شود، بلکه از دیدگاه بهره‌وری تولید نیز مزیت قابل‌توجهی ایجاد می‌کند و می‌تواند راهکاری مؤثر برای توسعه کاربردهای صنعتی این مواد باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر سرعت چاپ بر عملکرد جذب انرژی کامپوزیت‌های چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید تولیدشده به روش ساخت رشته ذوبی موردبررسی قرار گرفت. به این منظور، نمونه‌ها در دو سرعت چاپ ۵۰ و ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه تولید و تحت آزمون فشار شبه‌استاتیکی قرار گرفتند. سپس شاخص‌های مختلف جذب انرژی شامل جذب انرژی کل، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی محاسبه و تحلیل شدند. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- افزایش سرعت چاپ از ۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه موجب کاهش زمان تولید نمونه‌ها از ۲۱ دقیقه به ۱۹ دقیقه شد که معادل ۱۰/۵ درصد کاهش در زمان ساخت است. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از سرعت‌های چاپ بالا می‌تواند بهره‌وری فرایند تولید را افزایش دهد.
 - بررسی منحنی‌های نیرو-جابجایی نشان داد که نمونه‌های تولیدشده در هر دو سرعت چاپ دارای یک ناحیه الاستیک کوتاه و یک ناحیه سکویی گسترده هستند. همچنین مکانیسم غالب تغییر شکل در هر دو حالت از نوع کشش محور بوده و بخش عمده انرژی در ناحیه سکویی جذب شده است که از ویژگی‌های مطلوب سازه‌های جاذب انرژی محسوب می‌شود.
 - افزایش سرعت چاپ تأثیر مثبتی بر تمامی شاخص‌های جذب انرژی داشت. جذب انرژی کل از ۲۳/۴۵ به ۲۸/۳۸ ژول افزایش یافت که بیانگر بهبود ۲۱/۰۹ درصدی است. همچنین جذب انرژی ویژه و بازده نیروی خردشدگی به ترتیب ۲۰/۹۵ و ۲۰/۴۸ درصد افزایش یافتند. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش سرعت چاپ تا ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه نه تنها موجب افت عملکرد مکانیکی نشده، بلکه توانایی جذب انرژی نمونه‌ها را نیز بهبود بخشیده است.
 - ارزیابی شاخص‌های نرمال‌شده نسبت به زمان تولید نشان داد که مزیت استفاده از سرعت چاپ بالا حتی بیشتر از آن چیزی است که از مقایسه مستقیم شاخص‌های مکانیکی مشاهده می‌شود. جذب انرژی نرمال‌شده، جذب انرژی ویژه نرمال‌شده و بازده نیروی خردشدگی نرمال‌شده حدود ۳۴ درصد افزایش یافتند که بیانگر بهبود هم‌زمان عملکرد جذب انرژی و بهره‌وری تولید است.
 - نتایج این پژوهش نشان داد که سرعت چاپ ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب برای تولید کامپوزیت‌های چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید مورد استفاده قرار گیرد، زیرا ضمن کاهش زمان تولید، عملکرد جذب انرژی مطلوب‌تری نیز فراهم می‌کند.
- در نهایت، نوآوری اصلی این پژوهش در بررسی تجربی اثر سرعت چاپ بالا بر رفتار جذب انرژی کامپوزیت‌های چوب-پلی‌لاکتیک‌اسید است؛ موضوعی که تاکنون در مطالعات منتشرشده مورد توجه قرار نگرفته است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از سرعت‌های چاپ بالا می‌تواند مسیر مناسبی برای توسعه کاربردهای صنعتی فناوری ساخت رشته ذوبی و افزایش هم‌زمان کارایی تولید و عملکرد مکانیکی قطعات کامپوزیتی فراهم آورد. همچنین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده اثر سرعت‌های چاپ بالاتر از ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه و نیز اثر سایر پارامترهای فرایندی بر رفتار جذب انرژی این مواد مورد بررسی قرار گیرد.

References

- [1] Singh S, Singh G, Prakash C, Ramakrishna S. Current status and future directions of fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Jul 1;55:288-306. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.049
- [2] Dey A, Roan Eagle IN, Yodo N. A review on filament materials for fused filament fabrication. *Journal of manufacturing and materials processing*. 2021 Jun 29;5(3):69. doi: 10.3390/jmmp5030069
- [3] Yadav A, Rohru P, Babbar A, Kumar R, Ranjan N, Chohan JS, Kumar R, Gupta M. Fused filament fabrication: A state-of-the-art review of the technology, materials, properties and defects. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023 Dec;17(6):2867-89. doi: 10.1007/s12008-022-01026-5
- [4] Hasanzadeh R, Jolaiy S, Mojaver M, Azdast T, Park CB. Auxetic 3D printed metastructure stents for enhanced mechanical and structural performance and biocompatibility in coronary artery treatments. *Acta Biomaterialia*. 2025 Aug 1;202:641-59. doi: 10.1016/j.actbio.2025.06.043
- [5] Wang Y, Müller WD, Rumjahn A, Schmidt F, Schwitalla AD. Mechanical properties of fused filament fabricated PEEK for biomedical applications depending on additive manufacturing parameters. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2021 Mar 1;115:104250. doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.104250
- [6] Bardiya S, Jerald J, Satheeshkumar V. The impact of process parameters on the tensile strength, flexural strength and the manufacturing time of fused filament fabricated (FFF) parts. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;39:1362-6. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.691
- [7] Chicos LA, Pop MA, Zaharia SM, Lancea C, Buican GR, Pascariu IS, Stamate VM. Fused filament fabrication of short glass fiber-reinforced polylactic acid composites: infill density influence on mechanical and thermal properties. *Polymers*. 2022 Nov 17;14(22):4988. doi: 10.3390/polym14224988
- [8] Akhoundi B, Hajami F. Extruded polymer instability study of the polylactic acid in fused filament fabrication process: printing speed effects on tensile strength. *Polymer Engineering & Science*. 2022 Dec;62(12):4145-55. doi: 10.1002/pen.26174

- [9] Navidpour R, Azdast T, Hasanzadeh R, Moradian M, Mihankhah P. Acoustic characterization of functionally graded porous structures parts fabricated via fused filament fabrication. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Sep 22;11(7):27-34. doi: [10.22034/ijme.2024.464240.1975](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.464240.1975) [In Persian]
- [10] Hosseini SA, Shokrollahi H, Mousavi SA, Sabouri H. Experimental investigation of bending behavior of sandwich structures with auxetic core made of biodegradable materials. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Jun 22;12(4):63-75. doi: [10.22034/ijme.2025.511051.2055](https://doi.org/10.22034/ijme.2025.511051.2055) [In Persian]
- [11] Yang TC. Effect of extrusion temperature on the physico-mechanical properties of unidirectional wood fiber-reinforced polylactic acid composite (WFRPC) components using fused deposition modeling. *Polymers*. 2018 Sep 2;10(9):976. doi: [10.3390/polym10090976](https://doi.org/10.3390/polym10090976)
- [12] Le Guen MJ, Hill S, Smith D, Theobald B, Gaugler E, Barakat A, Mayer-Laigle C. Influence of rice husk and wood biomass properties on the manufacture of filaments for fused deposition modeling. *Frontiers in Chemistry*. 2019 Oct 31;7:735. doi: [10.3389/fchem.2019.00735](https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00735)
- [13] Yang TC, Yeh CH. Morphology and mechanical properties of 3D printed wood fiber/polylactic acid composite parts using fused deposition modeling (FDM): the effects of printing speed. *Polymers*. 2020 Jun 11;12(6):1334. doi: [10.3390/polym12061334](https://doi.org/10.3390/polym12061334)
- [14] Xu W, Li M, Xu Y, Entezari A, Fang J. Mechanical Characterization of Fused Deposition Modeling-Printed Wood-Polylactic Acid Composites Under Water Conditioning. *Polymer Composites*. 2026 Mar 20;47(6):5205-21. doi: [10.1002/pc.70484](https://doi.org/10.1002/pc.70484)
- [15] Cuan-Urquiza E, Álvarez-Trejo A, Robles Gil A, Tejada-Ortigoza V, Camposeco-Negrete C, Uribe-Lam E, Treviño-Quintanilla CD. Effective stiffness of fused deposition modeling infill lattice patterns made of PLA-wood material. *Polymers*. 2022 Jan 15;14(2):337. doi: [10.3390/polym14020337](https://doi.org/10.3390/polym14020337)
- [16] Tao Y, Pan L, Liu D, Li P. A case study: Mechanical modeling optimization of cellular structure fabricated using wood flour-filled polylactic acid composites with fused deposition modeling. *Composite Structures*. 2019 May 15;216:360-5. doi: [10.1016/j.compstruct.2019.03.010](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.010)
- [17] Kain S, Ecker JV, Haider A, Musso M, Petutschnigg A. Effects of the infill pattern on mechanical properties of fused layer modeling (FLM) 3D printed wood/polylactic acid (PLA) composites. *European journal of wood and wood products*. 2020 Jan;78(1):65-74. doi: [10.1007/s00107-019-01473-0](https://doi.org/10.1007/s00107-019-01473-0)
- [18] ASTM International. ASTM D695-26: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2026.
- [19] Jiang Z, Zhao J, Chen W, Lv H. Experimental and numerical crashworthiness investigation of 3D printing carbon fiber reinforced nylon origami tubes. *Polymer Composites*. 2024 Mar 10;45(4):3296-314. doi: [10.1002/pc.27991](https://doi.org/10.1002/pc.27991)
- [20] Downing D, Maconachie T, Khorasani M, Noronha J, Easton M, Dash J, Lu G, Ruan D, Brandt M, Leary M. Enhancing the energy absorption of AlSi10Mg thin-walled tubes with internal lattice structure through laser powder bed fusion. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025 Oct;10(10):8557-76. doi: [10.1007/s40964-025-01137-x](https://doi.org/10.1007/s40964-025-01137-x)
- [21] Baroutaji A, Arjunan A, Stanford M, Robinson J, Olabi AG. Deformation and energy absorption of additively manufactured functionally graded thickness thin-walled circular tubes under lateral crushing. *Engineering Structures*. 2021 Jan 1;226:111324. doi: [10.1016/j.engstruct.2020.111324](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111324)
- [22] Jiang Z, Zhao J, Xing S, Sun X, Qu M, Lv H. Crashworthiness design and multi-objective optimization of 3D-printed carbon fiber-reinforced nylon nested tubes. *Polymer Composites*. 2024 Aug 20;45(12):11289-311. doi: [10.1002/pc.28566](https://doi.org/10.1002/pc.28566)
- [23] Tunay M, Bardakci A. A study of crashworthiness performance in thin-walled multi-cell tubes 3D-printed from different polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2024 Dec 20;141(48):e56287. doi: [10.1002/app.56287](https://doi.org/10.1002/app.56287)
- [24] Neff C, Hopkinson N, Crane NB. Experimental and analytical investigation of mechanical behavior of laser-sintered diamond-lattice structures. *Additive manufacturing*. 2018 Aug 1;22:807-16. doi: [10.1016/j.addma.2018.07.005](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.005)
- [25] Maskery I, Aboulkhair NT, Aremu AO, Tuck CJ, Ashcroft IA, Wildman RD, Hague RJ. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2016 Jul 18;670:264-74. doi: [10.1016/j.msea.2016.06.013](https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.013)
- [26] sadat Mirhakimi A, Dubey D, Elbestawi MA. Laser powder bed fusion of bio-inspired metamaterials for energy absorption applications: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024 Jul 1;31:2126-55. doi: [10.1016/j.jmrt.2024.06.234](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.234)
- [27] Habib FN, Iovenitti P, Masood SH, Nikzad M. Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology. *Materials & Design*. 2018 Oct 5;155:86-98. doi: [10.1016/j.matdes.2018.05.059](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.059)

- [28] Wang P, Yang F, Lu G, Bian Y, Zhang S, Zheng B, Fan H. Anisotropic compression behaviors of bio-inspired modified body-centered cubic lattices validated by additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*. 2022 Apr 1;234:109724. doi: [10.1016/j.compositesb.2022.109724](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109724)