

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

ارزیابی خواص حرارتی و ساختاری قطعات پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش لایه نشانی مذاب

محسن خلیلیان^۱، سعید گلایی^۲، محمد خدائی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران.

* m.khodaei@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۸	کاشتنی‌های پلی لاکتیک اسید به واسطه خواص زیست تخریب‌پذیری و مکانیکی مطلوب، گزینه مناسبی برای مهندسی بافت استخوان می‌باشند. در این مطالعه، پس از مطالعه خواص ساختاری و حرارتی پلیمر پلی لاکتیک اسید توسط آزمون‌های طیف‌سنجی تبدیل فوری مادون قرمز، آنالیز گرماسنجی افتراقی، آنالیز توزین حرارتی و آزمون پراش پرتوی ایکس، محدوده دمای مناسب پرینت سه بعدی به روش لایه نشانی مذاب تعیین شده و کاشتنی صلب پلی لاکتیک اسید (PLA) به روش لایه نشانی مذاب (FDM) در سه دمای مختلف ۲۰۰، ۲۱۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به شکل نمونه استاندارد آزمون کشش، ساخته شدند. نتایج آنالیز حرارتی و فازیابی توسط پراش پرتوی ایکس نشان داد که دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) این پلیمر ۶۴ °C و دمای ذوب آن ۱۷۰ °C بوده و ساختاری شبه بلوری دارد. نتایج توزین و آزمون کشش نشان داد که در این محدوده دمایی، با افزایش دمای پرینت، نمونه‌ها سنگین‌تر و از استحکام بالاتری برخوردار و تنش شکست قطعات بالاتر می‌باشد. همچنین برای بررسی بیشتر تأثیر دمای لایه نشانی مذاب، از سطح نمونه‌ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM گرفته شد، تصاویر میکروسکوپی نشان می‌دهد با افزایش دمای پرینت، پخش شدن ناهمگن مذاب و سطح نمونه خشن‌تر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، دمای ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد دمای بهینه برای پرینت پلی لاکتیک اسید (PLA) می‌باشد.
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۲	
کلید واژگان:	
مهندسی بافت استخوان	
تکنیک لایه نشانی مذاب	
کاشتنی پلی لاکتیک اسید	
دمای پرینت	

Characterization of Thermal and Structural Properties of Poly Lactic Acid Parts Fabricated By Fused Depositing Modeling

Mohsen Khalilian¹, Sa'id Golabi², Mohammad Khodaei^{3*}

1- PhD Student, Mechanical Engineering Department, Kashan University, Kashan, Iran.

2- Professor, Mechanical Engineering Department, Kashan University, Kashan, Iran.

3- Materials Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran.

* m.khodaei@iut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

10.30495/apme.2021.1892982.1979

Keywords:

Bone Tissue Engineering
Fused Deposition Modeling
Poly Lactic Acid Implant
Printing Temperature

Abstract

Poly Lactic Acid implants are a good candidate for bone tissue engineering due to their favorable biodegradability and mechanical properties. In this study, after studying the structural and thermal properties of polymer by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), differential calorimetry analysis (DSC), thermal gravimetry analysis (TG) and X-ray diffraction (XRD) tests, to determine the appropriate temperature range of 3D printing, rigid polylactic acid (PLA) implants were prepared by Fused Deposition Modeling FDM at three different temperatures of 200, 210 and 220 °C as standard tensile test specimens. The results of the tensile test showed that in this range, as the print temperature increased, the samples had higher strength and higher fracture stress. Also to further investigate the effect of the FDM temperature, scanning electron microscopy (SEM) images were taken from the surface of the printed samples. Microscopic images show that as the print temperature increases, the melt spray and diffusion are more severe and the sample surface is rough. The results show that 210 °C is the optimum temperature for PLA printing.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mohsen Khalilian, Sa'id Golabi, Mohammad Khodaei, Characterization of Thermal and Structural Properties of Poly Lactic Acid Parts Fabricated By Fused Depositing Modeling, New Process in Material Engineering, 2021, 15(4), 77-85.

۱- مقدمه

کاشتنی‌ها، ایزاری برای کمک به ترمیم استخوان صدمه دیده می‌باشند. پلیمرهای با کاربرد پزشکی به دو دسته اصلی زیست‌تخریب‌پذیر و دائمی تقسیم می‌شوند. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر پس از مدتی از کاشت در محیط بدن، تجزیه می‌شوند. محصولات تجزیه، می‌تواند توسط متابولیسم بدن انسان جذب و استفاده و یا دفع گردند. یکی از مهم‌ترین پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر در مهندسی پزشکی، پلی لاکتیک اسید (Poly Lactic Acid) می‌باشد که با زمان تخریب حدود ۴ ماه در محیط بدن، دارای کاربرد فراوان در زمینه پزشکی می‌باشد [۱]. این پلیمر ترموپلاست زیست‌تخریب‌پذیر، به روش‌های ذوبی مانند تکنیک لایه نشانی مذاب به راحتی قابل فراوری است [۱]. در این روش‌ها، ابتدا مدل سه بعدی کامپیوتری قطعه رسم شده و پس از تفکیک لایه به لایه، هر لایه برای ساخت و یا پرینت به ماشین مورد نظر ارسال می‌گردد. هر چند که تا کنون بیش از ۳۰ تکنیک مختلف نمونه‌سازی سریع توسعه داده شده است، اما آن‌ها دارای مبنای کار مشابه می‌باشند. تکنیک لایه نشانی مذاب (Fused Deposition Modeling) روشی ساده، کارآمد و کم‌هزینه برای ساخت داربست‌های متخلخل و کاشتی‌های صلب می‌باشد [۱ و ۲]. در این روش، فیلامنت پلیمر ترموپلاست (مانند پلی وینیل الکل، پلی لاکتیک اسید و ...) در هد پرینتر حرارت دیده و ذوب می‌شود و هد پرینتر با اخذ فرمان از کنترلر، در محل‌های مورد نظر مذاب پلیمر را لایه نشانی می‌کند [۳ و ۴].

پلیمر پلی لاکتیک اسید با استحکام خمشی حدود ۹۷MPa، چگالی ۱/۲۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نقطه ذوب حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد گزینه مناسبی برای کاشتنی استخوانی محسوب می‌گردد [۲]. استحکام کششی آن حدود ۵۹ MPa، مدول الاستیک آن ۳/۵ GPa و افزایش طول حدود ۷٪ می‌باشد [۵] و از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار نمی‌باشد [۶].

گراس و همکاران [۷] تأثیر پارامترهای ضخامت لایه، چگالی پر کردن نمونه (fill density)، قطر و سرعت نازل را بر رفتار خستگی پلیمر پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش لایه نشانی مذاب بررسی کردند. نتایج تحقیقات ایشان حاکی از این است که چگالی پر کردن نمونه، مؤثرترین پارامتر بر رفتار خستگی پلیمر پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش لایه نشانی مذاب است. ریم پونگ پیزارن و همکاران با افزودن مقادیر مختلف منیزیم آلومینات فسفر به پلی لاکتیک اسید، علاوه بر ایجاد خواص فتولومینوسنس، خواص مکانیکی پلیمر پرینت سه بعدی شده را بهبود بخشیدند [۸].

آکیندیو و همکاران نیز برای بهبود خواص پلی لاکتیک اسید، به آن مقادیر مختلف هیدروکسی آپاتیت به روش اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی اضافه کردند [۹]. این فرایند در دمای بالا انجام شده و انجام صحیح آن مستلزم شناخت دقیق خواص مکانیکی و حرارتی پلی لاکتیک اسید است. طبق نتایج ایشان، دمای شیشه‌ای شدن پلیمر ۶۲/۲ درجه سانتی‌گراد و دمای تبلور آن ۱۱۱ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. در این تحقیق؛ حداکثر دمای اکسترودر ۱۷۵ درجه و حداکثر دمای سیستم تزریق ۱۹۰ درجه انتخاب گردیده است.

در این تحقیق کاشتنی از جنس پلیمر پلی لاکتیک اسید به روش لایه نشانی مذاب در سه دمای مختلف ساخته شده و خواص حرارتی، ساختاری و مکانیکی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است و پارامترهای بهینه تولید معرفی گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساخت کاشتنی صلب پلی لاکتیک اسید به روش لایه نشانی مذاب

به منظور بررسی خواص مکانیکی باید نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D638 به صورت نمونه آزمون کشش پرینت گردد. برای این منظور ابتدا مدل سه بعدی نمونه‌ها با ابعاد به دست آمده از استاندارد ASTM D638 (طول ۶۳/۵ و عرض ۹/۵۳ میلی‌متر)، توسط نرم‌افزار Solidworks 2018، ترسیم و فایل

۲-۲-۳- آنالیز توزین حرارتی (TGA) و مشتق توزین حرارتی (DTG)

آنالیز توزین حرارتی توسط دستگاه توزین حرارتی TGA (Thermal Gravimetry Analysis) مدل (TGA: Perkin Elmer, Pyris 1, USA) از دمای محیط تا دمای 600°C با نرخ گرمایش $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ در محیط آرگون انجام شده و تغییرات وزن نمونه با دقت 0.0001 میلی گرم اندازه گیری شد. منحنی تغییرات وزن و منحنی مشتق تغییرات وزن نسبت به تغییرات دما رسم و رفتار تخریب حرارتی پلیمر مطالعه گردید.

۲-۲-۴- آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD)

به منظور بررسی فازها و بلورینگی فیلامنت اولیه از آنالیز پراش پرتوی ایکس (XRD: X-ray Diffraction) مدل (XRD: Philips, X'pert-MPD, Netherland) با کاتد مس $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda=1.5405\text{ \AA}$)، در اختلاف پتانسیل 40 kv استفاده شد. اسکن در محدوده $2\theta=20-80^{\circ}$ با نرخ $2\theta=1^{\circ}/\text{min}$ انجام شد.

۲-۲-۵- بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

جهت بررسی مورفولوژی سطحی کاشتنی‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM: Scanning Electron Microscopy) مدل (SEM: Philips-XL30, Netherland) استفاده شد. با توجه به اینکه پلیمر مورد استفاده هادی الکتریسیته نمی‌باشد، ابتدا سطح آن‌ها توسط پوشش دهی کندوپاش (اسپاترینگ)، پوشش طلا داده شد تا سطح ذرات هادی الکتریسیته شوند و از تجمع بار الکتریکی در سطح آن‌ها حین تصویربرداری جلوگیری شود. تصاویر توسط آشکارساز الکترون‌های ثانویه تهیه گردید.

آن با فرمت stl ذخیره [۳] و برای دستگاه پرینتر سه بعدی لایه نشانی مذاب (FDM) ارسال گردید. فیلامنت پلیمر پلی لاکتیک اسید به قطر $1/75$ میلی متر به دستگاه لایه نشانی مذاب (FDM: Blackbot plus) وارد شده و با حرارت هد پرینتر (با روزنه نازل 0.4 میلی متری) با سه دمای 210 ، 200 و 220 درجه سانتی گراد پرینت گردید و در محل‌های مورد نظر لایه نشانی شده است. سرعت حرکت نازل بر 30 میلی متر بر دقیقه و ضخامت لایه‌ها 0.4 میلی متر انتخاب شد. پس از پرینت قطعات و حذف زوائد احتمالی، نمونه‌های برای ارزیابی‌های بعدی نگهداری شدند.

۲-۲-۲- ارزیابی مواد اولیه

۲-۲-۱- آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

برای مطالعه پیوندهای شیمیایی و ساختار ملکولی، پلیمر اولیه و اطمینان از خلوص آن، از آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR: Fourier-transform infrared) مدل (FTIR: Perkin-Elmer Spectrum 100, USA) به روش (Attenuated total reflectance)ATR انجام شد. طیف مادون قرمز در محدوده طول موج $4000-500\text{ cm}^{-1}$ با دقت 10 cm^{-1} اسکن و ذخیره شد.

۲-۲-۲- آنالیز گرماسنجی افتراقی (DSC)

آزمون گرماسنجی افتراقی (DSC: Differential Scanning Calorimetry) در محدوده دمای محیط تا 200°C با نرخ گرمایش $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ توسط دستگاه آنالیز گرماسنجی افتراقی مدل (TA: Q600, USA) بر روی فیلامنت اولیه انجام شد. اتمسفر محیط انجام آزمایش آرگون انتخاب گردید.

۶-۲-۲- ارزیابی خواص مکانیکی کاشتنی‌های پرینت شده

۰/۵ طبق استاندارد ASTM D638 انجام گردید. نمونه‌ها سه بار مورد ارزیابی مکانیکی قرار گرفته و میانگین نتایج اعلام شد. شکل ۱ نمونه‌های پرینت شده در سه دما را نشان می‌دهد.

آزمون کشش در دمای محیط توسط دستگاه آزمون فشار مدل (Santam STM-150, Iran) و با سرعت کرنش mm/min



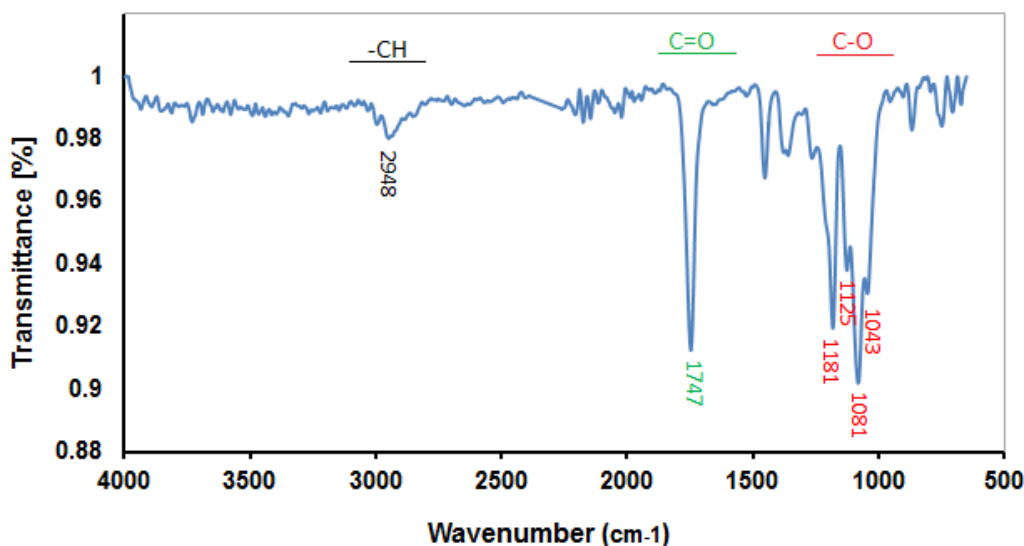
شکل (۱): نمونه‌های پرینت شده در سه دمای مختلف.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

cm^{-1} ، ۱۰۴۳، ۱۰۸۱ و ۱۱۲۵، ۱۱۸۱ مربوط به کشش پیوند C-O می‌باشند. با توجه به شکل ملکولی پلیمر (شکل ۳)، این طیف تأییدکننده حضور پیوندهای C=O و C-O-C پلی لاکتیک اسید هستند، در تطابق خوبی با سایر منابع هستند [۱۰].

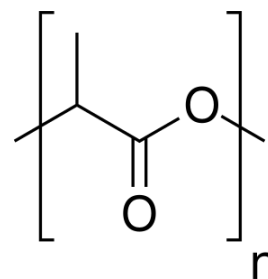
طیف عبوری مادون قرمز نمونه پلی لاکتیک اسید اولیه در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. در این طیف، پیک موجود در cm^{-1} ۲۹۴۸ مربوط به کشش پیوند -CH و پیک موجود در cm^{-1} ۱۷۴۷ مربوط به کشش پیوند C=O و پیک‌های موجود در



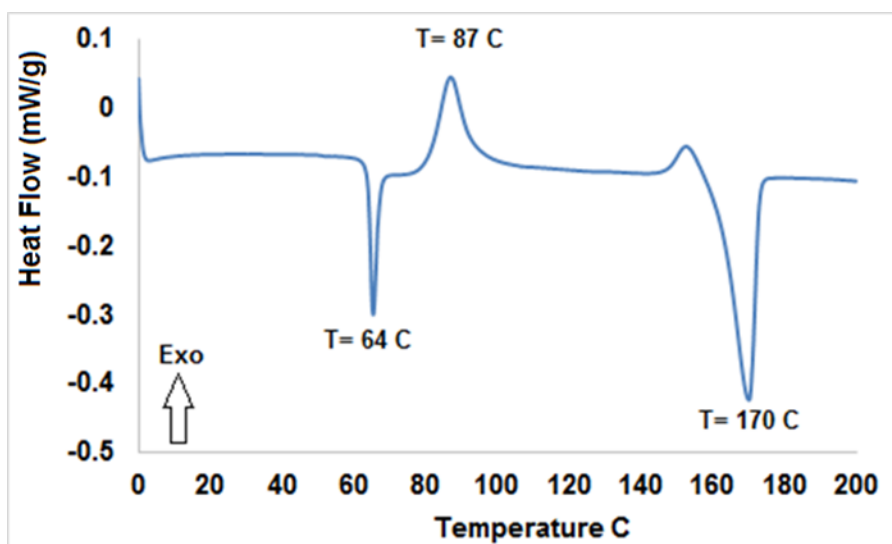
شکل (۲): طیف عبوری مادون قرمز نمونه پلی لاکتیک اسید اولیه

۲-۳- آزمون گرماسنجی افتراقی

نتایج آزمون حرارتی DSC فیلامنت اولیه در شکل ۴ ارائه شده است. طبق نتایج این آزمون، دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) این پلیمر 64°C (که نزدیک به مقادیر سایر پژوهش‌ها می‌باشد [۱۱]) و دمای ذوب آن 170°C به صورت دو قله گرماگیر (تقعر رو به بالا) در نمودار مشاهده شده‌اند. در این نمودار یک قله گرمازا (تقعر رو به پایین) نیز در دمای 87°C وجود دارد که نشان‌دهنده تبلور (کریستالیزاسیون) بخش‌های آمورف پلیمر است. حضور این پیک تأییدی بر آمورف بودن بخش عمده ساختار پلیمر است که حین حرارت‌دهی، توانسته‌اند، متبلور شوند و از نظم اتمی بالاتری برخوردار گردند.



شکل (۳): ساختار ملکولی پلی لاکتیک اسید (حضور باندهای C=O و C-O-C در ساختار).



شکل (۴): نمودار آنالیز گرماسنجی افتراقی فیلامنت اولیه پلی لاکتیک اسید.

گردد. مشاهده می‌گردد که بخش عمده‌ی پلیمر ساختار آمورف داشته و از نظم در چیدمان اتمی کمی برخوردار بوده است.

$$X\% = \frac{\Delta H}{\Delta H_m} \times 100 \quad (1)$$

۳-۳- آنالیز توزین حرارتی (TGA)

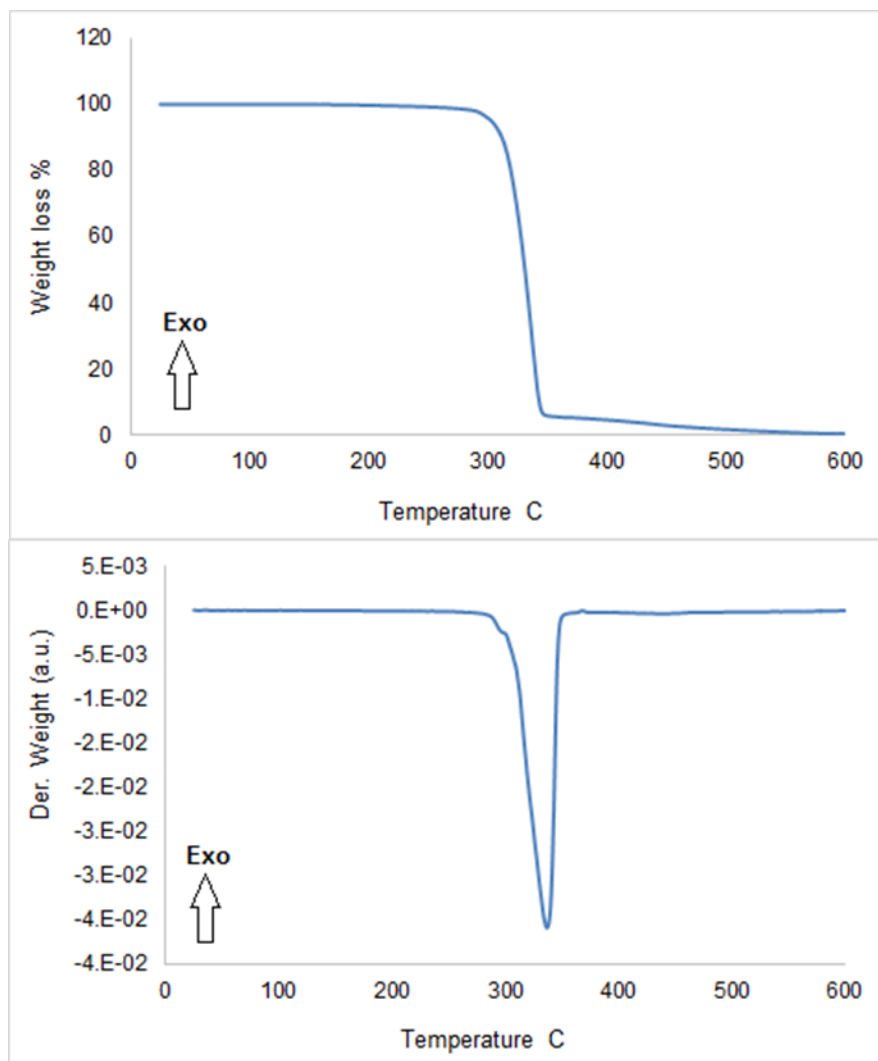
شکل ۵ منحنی‌های آنالیز توزین حرارتی فیلامنت اولیه پلی لاکتیک اسید را از دمای محیط تا 600°C نشان می‌دهد. طبق

با استفاده از رابطه ۱ می‌توان درصد بلورینگی فیلامنت اولیه پلی لاکتیک اسید مورد استفاده را به دست آورد. در این رابطه، X درصد بلورینگی، ΔH آنتالپی نمونه پلیمر که از منحنی گرمایش به دست می‌آید و ΔH_m آنتالپی نمونه پلیمر مشابه با بلورینگی ۱۰۰ درصد است.

با توجه به اینکه آنتالپی نمونه پلی لاکتیک اسید با ۱۰۰٪ تبلور برابر $\Delta H_m = 93.7 \text{ J/g}$ است [۱۱] و آنتالپی نمونه پلیمر $\Delta H = 22.98 \text{ J/g}$ هستند، لذا توسط رابطه ۱ میزان بلورینگی فیلامنت اولیه پلی لاکتیک اسید مورد استفاده ۲۴ درصد محاسبه می‌-

آغاز و تا دمای 362°C خاتمه یافته است که مشابه نتایج تحقیق خورسند قاینی و همکاران است [۱۲]. در منحنی TGA محور افقی دما و محور عمودی درصد کاهش وزن است و در نمودار مشتق آن (به نام DTG) محور افقی دما و محور عمودی مشتق تغییرات دما است (dm/dT) که با حساسیت بیشتری ابتدا و انتهای استحاله‌ها را نشان می‌دهد.

این منحنی، پلیمر مورد استفاده تا حدود دمای 270°C رفتار تجزیه حرارتی و کاهش وزن نداشته است. لذا دمای پرینت به روش لایه نشانی مذاب بهتر است در دماهای کمتر از این دما انجام گردد. بیشترین مقدار تجزیه حرارتی پلیمر در دمای 348°C رخ داده و سبب کاهش وزن حدود ۹۱ درصدی پلیمر شده است. فرایند تجزیه حرارتی این پلیمر از دمای 270°C

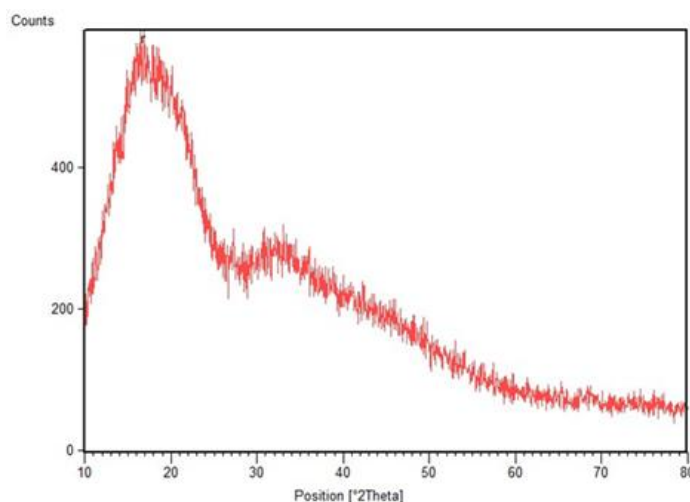


شکل (۵): نمودار تغییرات وزن (نمودار بالا) برحسب دما و مشتق آن (نمودار پایین) آزمون توزین حرارتی TGA فیلامنت پلی لاکتیک اسید اولیه.

۳-۴- آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD)

فازها و بلورینگی فیلامنت اولیه پلی لاکتیک اسید تهیه شده توسط آزمون پراش پرتوی ایکس مطالعه گردیده و نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی پراش پرتوی ایکس پلیمر به صورت یک پیک پهن در

محدوده ۱۰ تا ۲۵ درجه است که بیانگر آمورف بودن ساختار پلیمر است [۱۳]. هیچ پیک تیز و بلندی مبنی بر وجود فاز بلوری در این الگو دیده نمی‌شود که مؤید پیک ۸۷ درجه شکل ۴ و در تناقض با محاسبات رابطه ۱ است.



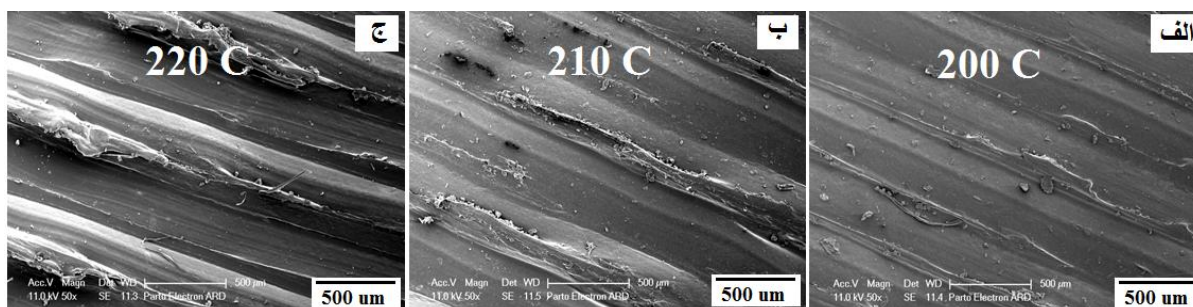
شکل (۶): الگوی پراش پرتوی ایکس فیلامنت اولیه تهیه شده

۳-۵- مشاهده ریزساختار توسط میکروسکوپ

الکترونی روبشی SEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قطعات پرینت شده در دماهای مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. مشاهده در جهت

عمود بر صفحه XY (صفحه پرینت سه بعدی) نشان می‌دهد که هرچه دمای پرینت بیشتر باشد، پاشش ماده به اطراف بیشتر شده و سطح زبرتر می‌شود.



شکل (۷): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در صفحه XY از نمونه پرینت شده در دمای: (الف) ۲۰۰، (ب) ۲۱۰ و (ج) ۲۲۰ درجه سانتی گراد.

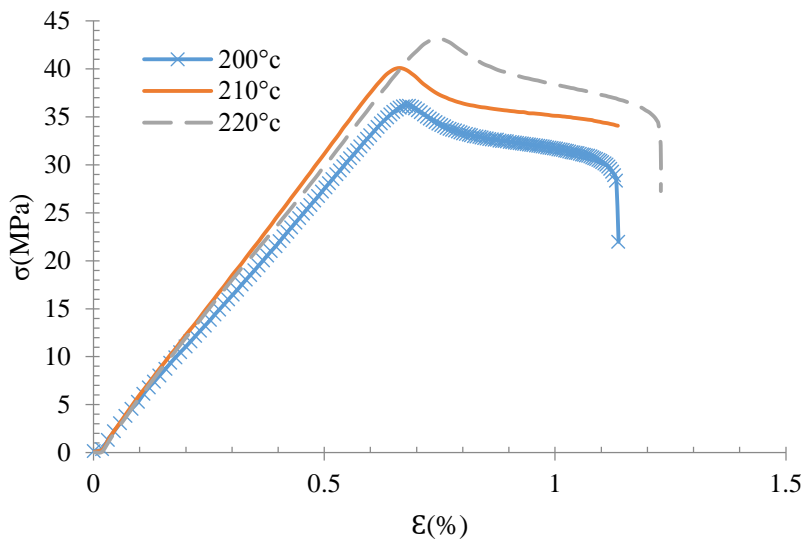
دمای کم فرایند لایه نشانی می‌تواند سبب اتصال ناقص لایه‌ها و خواص مکانیکی ناکافی گردد و البته دمای بیش از حد فرایند نیز می‌تواند سبب پاشش ماده، سطح زبرتر و همچنین

تغییر در ساختار و خواص پلیمر شده و به صورت تغییرات فازی نمایان گردد.

۳-۶- خواص مکانیکی

شکل نمونه‌ها (کشیدگی و تغییر شکل ناچیز و سطح شکست تخت) بعد از آزمون کشش حاکی از آن است که قطعات ازدیاد طول کمی داشته و رفتار نسبتاً ترد از خود نشان داده‌اند. نتایج حاصل از آزمون کشش که در شکل ۸ ارائه شده است، نشان می‌دهد که هرچه دمای پرینت بیشتر باشد چسبندگی لایه‌ها بیشتر و استحکام تسلیم $36/16 \text{ MPa}$ و در دمای 210 درجه استحکام تسلیم $40/10 \text{ MPa}$ و در دمای 220 درجه استحکام

تسلیم $43/14 \text{ MPa}$ می‌باشد. درحالی‌که نتایج تحقیق عالم و همکاران [۱۴] نشان می‌دهد که استحکام کششی داربست پرینت شده PLA بسته به جهت پرینت $28-57 \text{ MPa}$ اندازه‌گیری شده است. نتایج تحقیق حاضر نیز در این محدوده می‌باشد. البته آنیزوتروپی خواص مکانیکی قطعات PLA تولید شده به روش FDM [۱۵] نیز باید در ارزیابی خواص مکانیکی در نظر گرفته شود.



شکل (۸): نمودار تنش-کرنش مهندسی از نمونه پرینت شده در دماهای 200 ، 210 و 220 درجه سانتی‌گراد.

وزن نمونه‌ها در دمای پرینت 200 درجه سانتی‌گراد برابر $0/832$ گرم و وزن نمونه‌ها در دمای پرینت 210 درجه سانتی‌گراد برابر $0/839$ گرم و وزن نمونه‌ها در دمای پرینت 220 درجه سانتی‌گراد برابر $0/853$ گرم می‌باشد. این نشان می‌دهد که با افزایش دمای پرینت، وزن نمونه افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نمونه پلی لاکتیک اسید (PLA) مورد آنالیز حرارتی قرار گرفته و محدوده دمای پرینت سه بعدی با

تکنیک لایه نشانی مذاب (FDM) طبق نتایج آنالیز حرارتی انتخاب شد. سپس در سه دمای 200 ، 210 و 220 درجه سانتی‌گراد نمونه‌های آزمون کشش ساخته شد. از نتایج آزمون کشش (منحنی تنش-کرنش) مشخص گردید که با افزایش دمای پرینت نمونه پلی لاکتیک اسید، استحکام تسلیم بالاتری حاصل خواهد شد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که با افزایش دمای پرینت، پاشش ماده به اطراف بیشتر شده و سطح زبرتری حاصل می‌شود؛ بنابراین دمای بهینه پرینت پلی لاکتیک اسید 210 درجه سانتی‌گراد انتخاب گردید، زیرا علاوه بر استحکام قابل قبول، مواد پرینت

printing application", *Materials Letters*, vol. 237, pp. 270–273, 2019.

[9] J. O. Akindoyo, M. D.H. Beg, S. Ghazali, H. P. Heim & M. Feldmann, "Impact modified PLA-hydroxyapatite composites-Thermo-mechanical properties", *Composites Part A*, vol 107, pp. 326–333, 2018.

[10] D. Wu, A. Spanou, A. Diez-Escudero & C. Persson, "3D-printed PLA/HA composite structures as synthetic trabecular bone: A feasibility study using Fused Deposition Modelling", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103608>.

[11] R. A. Wach, P. Wolszczak & A. Adamus-Wlodarczyk, "Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing", *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 1, pp. 1800169, 2018.

[۱۲] م. خورسندقائینی، ع. صادقی اول شهر، س. نوحاسته، ا. م. مولوی و ح. امینی مشهدی، "بررسی خصوصیات حرارتی کامپوزیت پلی لاکتیک اسید با ذرات شیشه زیست فعال 45S5 و هیدروکسی آپاتیت (HA) به منظور استفاده در پیچ‌های تداخلی قابل‌جذب"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۱، شماره ۴، ۵۵–۶۵، ۱۳۹۶.

[13] S. Mohammadian-Gezaz, I. Ghasemi & A. R. Oromiehie, "Crystallization Behavior of PA6 in ABS/PA6 Blends Prepared by In Situ Polymerization and Compatibilization Method", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, vol. 22, pp. 469-482, 2010.

[14] F. Alam, V. Raj Shukla, K. M. Varadarajan & S. Kumar, "Microarchitected polylactic acid (PLA) nanocomposite scaffolds for biomedical applications", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103576>.

[۱۵] م. خدائی و ر امینی نجف‌آبادی، "آنیزوتروپی خواص مکانیکی داربست‌های پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش لایه نشانی مذاب برای مهندسی بافت استخوان"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، آماده انتشار.

شده پاشش کمی داشته و کیفیت سطحی مطلوبی ایجاد می‌گردد.

۵- مراجع

[1] C. E. Corcione, F. Gervaso, F. Scalera, S. K. Padmanabhan, M. Madaghiele, F. Montagna, A. Sannino, A. Licciulli & A. Maffezzoli, "Highly loaded hydroxyapatite microsphere/ PLA porous scaffolds obtained by fused deposition modeling", *Ceramics International*, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.297>.

[2] W. Lin, H. Shen, G. Xu, L. Zhang, J. Fu & X. Deng, "Single-layer temperature-adjusting transition method to improve the bond strength of 3D-printed PCL/PLA parts", *Composites Part A*, vol. 115, pp. 22-30, 2018.

[3] K. Kun, "Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology", *Procedia Engineering*, vol. 149, pp. 203–211, 2016.

[4] M. Rinaldi, T. Ghidini, F. Cecchini, A. Brandao & F. Nanni, "Additive layer manufacturing of poly (ether ether ketone) via FDM", *Composites Part B*, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.03.029.

[5] F. Shady, et al. "Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review", *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 367–92, 2016.

[6] M. Murariu & P. Dubois, "PLA composites: From production to properties", *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 17-46, 2016.

[7] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez & J. Lluma-Fuentes, "Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens", *Materials & Design*, 2017, doi:10.1016/j.matdes.2017.11.072.

[8] T. Rimpongpisarn, W. Wattanathana, K. Sukthavorn, N. Nootsuwan, Y. Hanlumyung, C. Veranitisagul & A. Laobuthee, "Novel luminescent PLA/MgAl₂O₄: Sm³⁺ composite filaments for 3D