

Optimization of Processing Parameters in 3D-Printing of Poly(lactic acid) by Fused Deposition Modeling Method

Maryam Ezoji¹, Mohammad Razavi-Nouri², and Amir Masoud Rezadoust^{2*}

1. Research and Development Unit of Alborz Composites Engineering Company,
Postal Code: 1313963594, Tehran, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 18 September 2016, accepted: 25 February 2017

ABSTRACT

Nowadays, making use of additive manufacturing (AM) processes such as fused deposition modeling (FDM), in different areas, such as car manufacturing, biomedical and aerospace industries is gaining popularity worldwide because of their capacities in producing functional parts with complex geometries. Therefore, it is very important to identify the significance of FDM processing parameters which would have an impact on the quality of articles produced by the processing system. In this work, poly(lactic acid) was used to study the effects of processing parameters such as layer thickness, raster angle and printing plane on the tensile properties and surface roughness of the printed specimens. The results showed that the tensile strength of a specimen increased by reducing its layer thickness. However, the elastic modulus values increased with decreasing the layer thickness to some extent. Moreover, when the layer thickness was kept constant at 0.05 mm and 3D-printing was carried out in XYZ plane, the maximum modulus and tensile strength were obtained for the raster angle of 0°. Microscopic studies showed that in low layer thickness, the polymeric layers diffused properly into each other and no voids were formed between the layers. However, with a thickness above its critical value, a few voids were formed between the layers which played as a stress concentrator and decreased the tensile strength of the specimens. The results also showed that the surface roughness increased with increasing the layer thickness.

Keywords:

3D-print,
FDM processing parameters,
layer thickness,
raster angle,
printing plane

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: a.rezadoust@ippi.ac.ir

Please cite this article using:

Ezoji M., Razavi-Nouri M., and Rezadoust A.M., Optimization of Processing Parameters in 3D-Printing of Poly(lactic acid) by Fused Deposition Modeling Method, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **30**, 115-126, 2017.

بهینه‌سازی پارامترهای فرآورش در چاپ سه‌بعدی پلی‌لاکتیک اسید به روش لایه‌گذاری هم‌جوش

مریم ازوجی^۱، محمد رضوی نوری^۲، امیرمسعود رضادوست^{۳*}

۱- تهران، واحد تحقیق و توسعه شرکت مهندسی کامپوزیت البرز، کد پستی ۱۳۱۳۹۶۳۵۹۴

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۴۹۷۵-۱۱۲

دریافت: ۱۳۹۵/۶/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۷

چکیده

امروزه فناوری‌های نوین ساخت به روش برهم‌افزا مانند لایه‌گذاری هم‌جوش در حوزه‌های مختلف صنعت نظیر مدل‌سازی، ماشین‌سازی، هوافضا و نیز علوم پزشکی به نحو چشمگیری در حال گسترش است. علت این گسترش را می‌توان قابلیت این روش در ساخت قطعه‌های کاربردی با هندسه‌های پیچیده در مدت زمان کوتاه‌تر و با هزینه کمتر نسبت به روش‌های متداول دانست. از این رو، شناخت متغیرهای مؤثر بر فرایند لایه‌گذاری هم‌جوش با توجه به اثر انکارناپذیر آن‌ها بر کیفیت قطعات پلیمری ساخته شده، حائز اهمیت است. در این مقاله، اثر متغیرهای فرآورش مانند ضخامت لایه‌ها، زاویه رشته‌نشانی و صفحه چاپ بر خواص کششی و زبری نمونه‌های ساخته شده از پلی‌لاکتیک اسید به روش لایه‌گذاری هم‌جوش، ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن است که در شرایط انتخاب شده برای چاپ، با کاهش ضخامت لایه‌ها، استحکام و تا حدی مدول کششی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار استحکام و مدول کششی برای نمونه‌هایی به دست می‌آید که زاویه رشته‌نشانی آن‌ها صفر درجه بوده و در صفحه XYZ به ضخامت لایه ۰/۰۵ mm چاپ شده باشند. مطالعات میکروسکوپی نشان داد، در ضخامت‌های کم، لایه‌های پلیمری به هم جوش خورده و مرز بین‌لایه‌ای از بین می‌رود. اما، در ضخامت‌های زیاد، فضاهای خالی زیادی میان لایه‌ها به وجود می‌آید که باعث تمرکز تنش شده و در نهایت سبب کاهش استحکام قطعه چاپ شده می‌شوند. همچنین، نتایج زبری‌سنجی از سطح نمونه‌ها نشان داد، با افزایش ضخامت لایه‌ها، زبری سطح نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

چاپ سه‌بعدی،
پارامترهای فرآورش FDM،
ضخامت لایه،
زاویه رشته‌نشانی،
صفحه چاپ

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

a.rezadoust@ippi.ac.ir

مقدمه

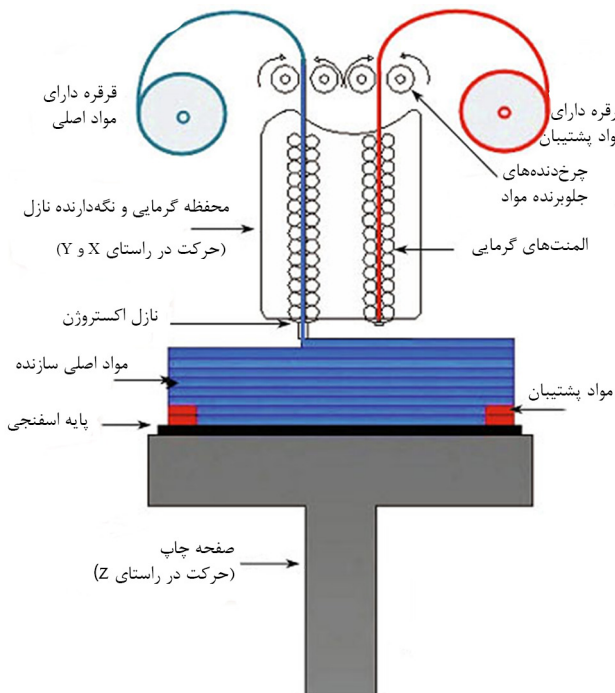
جابه‌جاکننده یک یا دو نازل بسیار ظریف است. یکی از نازل‌ها برای ذوب مواد اصلی و دیگری برای ذوب مواد پشتیبان (support) مدل استفاده می‌شود [۶].

بیشترین موادی که در دستگاه‌های FDM استفاده می‌شوند، پلی‌آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن (ABS) و پلی‌لاکتیک اسید (PLA) هستند. آلیاژ ABS با پلی‌کربنات‌ها (PC)، پلی‌کربنات، پلی‌پروپیلن، پلی‌استیرن، پلی‌وینیل الکل، فنیل سولفون‌ها، پلی‌کاپرولاکتان‌ها، پلی‌متیل متاکریلات و حتی آمیزه‌های پر شده از پودر فلزات و سرامیک‌ها نیز در ساخت قطعات FDM به کار می‌روند [۴،۷]. اگرچه FDM فناوری کارآمد به‌شمار می‌رود، اما در مقیاس بزرگ‌تر به‌عنوان روشی برای تولید قطعه نهایی، کمتر کاربردی محسوب می‌شود. علت این موضوع را می‌توان ناسازگاری مواد استفاده شده در ساخت قطعه‌ها با این فناوری قلمداد کرد. در راستای حل این مشکل دو راه توسعه مواد مصرفی و کنترل متغیرهایی که کیفیت و خواص فیزیکی-مکانیکی قطعه تولید شده به این روش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، پیش‌روست [۱]. این متغیرها را می‌توان به پنج گروه هندسی، محیطی، مواد، دستگاه و فرایند دسته‌بندی کرد که در جدول ۱ آمده است [۲،۸].

به دلیل وجود عوامل متعدد مؤثر بر فرایند، شناسایی اثرگذارترین آن‌ها در تولید محصول امری ضروری به‌نظر می‌رسد. از این‌رو، در ادامه به نتایج پژوهش‌های انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. Ahn و همکاران [۹] اثر متغیرهای طراحی و فرایند را بر استحکام

در دنیای رقابتی اقتصاد امروز، زمان عرضه محصولی جدید از طراحی تا تولید، شاخص مهمی برای سازمان تولیدکننده به‌شمار می‌آید. از فناوری‌های نسبتاً جدیدی که در این راستا توسعه یافته است، روش‌های موسوم نمونه‌سازی اولیه سریع (rapid prototyping, RP) است [۱]. در این روش‌ها، به کمک نرم‌افزارها، ابتدا مدل سه‌بعدی قطعه به لایه‌هایی با ضخامت معین تقسیم شده و سپس به روش‌های مختلف هر لایه مجزا ایجاد می‌شود. آنگاه با افزودن لایه‌های متعدد روی یکدیگر، قطعه نهایی تولید می‌شود. این شیوه ساخت که اساس کار تمام روش‌های RP است، سبب شده تا نام کلی روش‌های ساخت برهم‌افزا (additive manufacturing, AM) نیز به آن‌ها اطلاق شود [۲]. مهم‌ترین فرایندهای RP که در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند، عبارت از نمونه‌سازی با لیتوگرافی سه‌بعدی (stereo lithography)، مدل‌سازی به روش لایه‌گذاری هم‌جوش (fused deposition modeling, FDM)، مدل‌سازی چندافشانه‌ای (polyjet modeling)، ساخت اشیای چندلایه (laminated object manufacturing)، تف‌جوشی گزینشی لیزری (selective laser sintering)، نمونه‌سازی اولیه انجمادی سریع (rapid freeze prototyping)، نمونه‌سازی پخت زمینه جامد (solid ground curing)، شکل‌دهی شبکه مهندسی شده لیزری (laser engineered net shaping) و نمونه‌سازی افشانه گرمایی (thermojet) است [۳،۴]. تفاوت این روش‌ها در شیوه ایجاد لایه‌های تشکیل‌دهنده قطعه و نوع موادی است که استفاده می‌شوند [۲]. اما، در بیشتر آن‌ها از مواد پلیمری در شکل‌های مختلف به‌عنوان ماده مصرفی استفاده می‌شود.

از میان روش‌های گفته شده، FDM به دلیل سهولت کاربرد، استفاده از مواد پلیمری، سادگی فرایند و نیز قیمت ارزان‌تر در مقایسه با تجهیزات مورد نیاز در سایر روش‌ها، به‌طور گسترده مورد توجه پژوهشگران و فعالان صنعت قرار گرفته است [۴،۵]. این روش توسط شرکت Stratasys در سال ۱۹۹۰ معرفی شد [۲]. در این فرایند ماده اولیه که به شکل رشته پلیمری است، هنگام عبور از نازل دستگاه گرم می‌شود تا قابلیت جریان‌پذیری پیدا کند و به‌طور پیوسته از آن خارج شود. سپس، این رشته مذاب روی صفحه چاپ، در محل‌ها و مسیرهای معین برای ساخت طرح مدنظر نشانده می‌شود. شکل ۱ نحوه عملکرد سامانه FDM را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود، نازل خروجی فقط در دو راستای افقی x و y حرکت کرده و حرکت عمودی به‌وسیله صفحه‌چاپ تأمین می‌شود. به‌طوری که پس از نشانیدن هر لایه، صفحه ساخت به اندازه ضخامت یک لایه پایین‌تر آمده تا لایه بعدی نشانده شود. سخت‌افزار این سامانه یک روبات با سازوکار کنترل عددی (computer numerical control) بوده که



شکل ۱- نحوه عملکرد سامانه FDM [۲].

جدول ۱- متغیرهای فرایند FDM [۲۸].

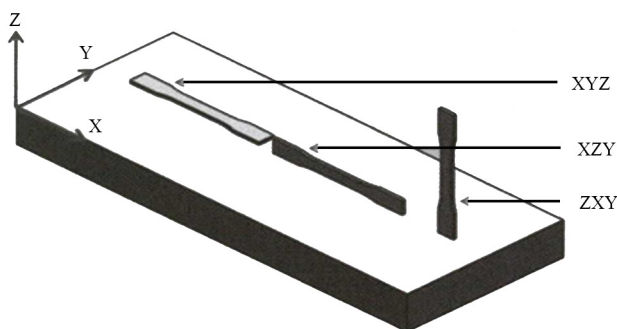
متغیر هندسی	متغیرهای محیطی	ویژگی مواد	متغیر دستگاه	متغیر فرایندی
طول رشته‌گذاری در لایه ساختار مواد پشتیبان	دما رطوبت	مشخصه‌های مواد گرانروی سفتی انعطاف‌پذیری رسانندگی گرمایی	قطر نازل سرعت تغذیه رشته سرعت جریان قطر رشته	ضخامت لایه عرض رشته در لایه سرعت چاپ دمای اکستروژن دمای صفحه چاپ الگوی رشته‌گذاری در لایه

$0^\circ/45^\circ$ کمترین مقدار بوده است.

در پژوهشی که Bertoldi و همکاران [۱۱] انجام دادند، اثر جهت‌گیری نمونه‌ها را بر ماتریس سفتی و ضریب انبساط گرمایی قطعه‌های ناهمسانگرد مطالعه کردند. هنگام آزمون کشش، نمونه‌هایی که به شکل عمودی در صفحه ZXY ساخته شده بودند، شکست تدریجی از خود نشان دادند (شکل ۲). اما، نمونه‌های چاپ شده در صفحه‌های XYZ و XZY چقرمگی بیشتری داشتند. با این تفاوت که مدول کشسانی و استحکام کششی نمونه‌هایی که در صفحه XYZ قرار داشتند، از دو صفحه دیگر دارای مقادیر بیشتری بودند. کمترین مقادیر استحکام کششی و مدول کشسانی نیز برای نمونه‌های ساخته شده در صفحه ZXY به دست آمد. دلیل این موضوع، افزایش تعداد لایه‌ها در ساخت نمونه و در نتیجه افزایش مکان جوش لایه‌ها در این حالت است. از آنجا که مرز مشترک دو لایه از نقاط ضعف به‌شمار می‌آید، پس منطقی به نظر می‌رسد، نمونه‌های ساخته شده در صفحه ZXY خواص مکانیکی ضعیف‌تری داشته باشند. Hossain و همکاران [۷] در پژوهش جامع‌تری اثر نحوه قرارگیری نمونه در صفحه چاپ و نیز زاویه رشته‌نشانی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، بیشترین استحکام کششی برای نمونه‌هایی به دست می‌آید که به شکل XZY ساخته می‌شوند. آن‌ها اظهار داشتند، در این حالت رشته‌هایی که در راستای کشش قرار می‌گیرند، بیشترین تعداد را به

کششی و فشاری قطعات تولید شده با ABS به روش FDM بررسی کردند. آن‌ها دریافته‌اند، از بین متغیرهای مطالعه شده، فاصله هم‌نشینی (air gap) و زاویه رشته‌ها (raster orientation) بیشترین اثر را بر خواص مکانیکی دارند و عرض رشته‌ها و رنگ چندرشته‌ای اثر چندانی بر خواص گفته شده ندارد. آن‌ها، علت این پدیده را تغییر تعداد لایه‌های هم‌نشین شده کنار یکدیگر با تغییر فاصله هم‌نشینی بین رشته‌ها دانستند. در واقع، با افزایش فاصله هم‌نشینی رشته‌ها و کاهش رشته‌ها در هر لایه از قابلیت باربرداری نمونه کاسته می‌شود و در نهایت استحکام کششی کاهش پیدا می‌کند. این گروه بیان کردند، به کمک مقادیر بهینه به دست آمده در این بررسی، استحکام کششی و فشاری قطعه‌های تهیه شده به این روش به ترتیب در محدوده 65% تا 72% و 80% تا 90% قطعات مشابه ساخته شده به روش قالب‌گیری تزریقی قرار می‌گیرند. Ang و همکاران [۱۰] نیز اثر متغیرهایی چون فاصله هم‌نشینی، عرض رشته‌ها، الگوی رشته‌نشانی و قرارگیری قطعه در صفحه چاپ را مطالعه کردند. این پژوهشگران اظهار داشتند، در میان متغیرهای بررسی شده فاصله هم‌نشینی و عرض رشته‌ها بیشترین اثر را بر خواص مکانیکی دارد.

Es-Said و همکاران [۸] نمونه‌هایی با زاویه‌های رشته‌نشانی مختلف ساختند و اثر زاویه را بر خواص کششی و خمشی قطعه‌های تولید شده از ABS بررسی کردند. آن‌ها دریافته‌اند، بیشترین استحکام کششی متعلق به رشته‌نشانی با زاویه $0^\circ/90^\circ$ بوده و پس از آن به ترتیب، رشته‌نشانی با زاویه $0^\circ/45^\circ$ و $-45^\circ/+45^\circ$ قرار می‌گیرند. همچنین این پژوهشگران بیان کردند، استفاده از زاویه 0° در روش FDM همان نقشی را به عهده دارد که الیاف بلند تقویت‌کننده معمولاً در راستای نیروی اعمال شده درون کامپوزیت‌ها ایفا می‌کنند. بنابراین، در هر دو حالت مقدار بیشینه استحکام کششی به دست می‌آید. آن‌ها نتیجه مشابهی را برای استحکام خمشی در رشته‌نشانی با زاویه 0° به دست آوردند. اما استحکام خمشی برای نمونه‌های تهیه شده با زاویه رشته‌نشانی $-45^\circ/+45^\circ$ در حد متوسط بوده و برای زاویه



شکل ۲- نحوه قرارگرفتن در صفحه چاپ [۷].

موضوع مطالعه و دلایل آن بررسی شود. در ضمن، در این پژوهش برای دستیابی به اهداف تعیین شده از میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)، گرماسنج پویشی تفاضلی (DSC)، دستگاه کشش و زبری‌سنج استفاده شده است.

تجربی

مواد و دستگاه‌ها

در این پژوهش، رشته‌های PLA به‌کار رفته برای ساخت قطعه‌ها، از شرکت مان پلیمر ایران با نام تجاری Filamaan PLA تهیه شد. گرماسنج پویشی تفاضلی (DSC) Netzsch 200 F3 Maia ساخت آلمان، دستگاه کشش Universal ساخت شرکت ستام ایران و دستگاه زبری‌سنج اتصالی مدل SJ-210 ساخت شرکت Mitutoyo ژاپن به‌کار گرفته شد.

روش‌ها

نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد ایزو به روش FDM در چهار ضخامت لایه متفاوت (۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ mm) تحت زاویه $45^{\circ}/-45^{\circ}$ و در صفحه چاپ XYZ با استفاده از دستگاه Sizan 2 ساخت شرکت ایرانی سیزان پردازش کویر و با تنظیمات بیان شده در **جدول ۲** ساخته شدند. سپس، ضخامت نمونه‌هایی که بیشترین استحکام کششی را داشتند، به‌عنوان ضخامت بهینه در نظر گرفته شد. پس از آن، در ضخامت بهینه نمونه‌هایی با زاویه‌های رشته‌نشانی مختلف $30^{\circ}/60^{\circ}$ ، $45^{\circ}/-45^{\circ}$ و $90^{\circ}/0^{\circ}$ تهیه شده و مورد آزمون کشش قرار گرفتند. از نتایج این بخش زاویه رشته‌نشانی بهینه تعیین شد. در مرحله بعد نمونه‌هایی با ضخامت لایه و زاویه رشته‌نشانی بهینه در سه صفحه چاپ متفاوت (XYZ، ZXY و XZY)

جدول ۲- شرایط چاپ.

مقدار	متغیر
۰/۴	قطر نازل (mm)
۱/۷۵	قطر رشته (mm)
۳	تعداد رشته‌های محیطی
۰/۰۶	میزان هم‌پوشانی رشته‌ها (mm)
۱۰۰	ضریب پرشدگی (%)
شبه	نوع پرشدگی
۴۰	سرعت چاپ (mm/s)

خود اختصاص می‌دهند. بدین ترتیب، نمونه‌هایی که در صفحه ZXY چاپ شده‌اند، کمترین مقدار استحکام کششی را دارند. رشته‌نشانی با زاویه $90^{\circ}/0^{\circ}$ در صفحه XYZ بیشترین استحکام کششی را حاصل کرده و در صفحه‌های XZY و ZXY به ترتیب با زاویه رشته‌نشانی $45^{\circ}/+45^{\circ}$ و $30^{\circ}/+60^{\circ}$ از بیشترین استحکام برخوردارند.

متغیرهایی که در ساخت قطعه‌ها به روش FDM مطرح هستند، نه تنها بر خواص مکانیکی قطعه، بلکه بر خواص سطحی، دقت ابعادی و زمان ساخت قطعه نیز اثرگذارند. از این‌رو، اثر این متغیرها بر کیفیت سطح، دقت و زمان ساخت از موضوعات دیگری به‌شمار می‌آیند که مورد مطالعه پژوهشگران در سال‌های اخیر است. Nancharaiah و همکاران [۱۲] گزارش کردند، با کاهش ضخامت لایه‌ها و نیز فاصله هم‌نشینی رشته‌ها، زبری سطح قطعه نهایی را می‌توان بهبود بخشید. این گروه علت بهبود زبری سطح قطعه‌ها را به کاهش مقدار خلل و فرج ناشی از کاهش ضخامت لایه‌ها و فاصله هم‌نشینی رشته‌ها نسبت دادند. Anitha و همکاران [۱۳] نیز در بررسی سطح قطعات تهیه شده از ABS و ساخته شده به روش FDM بیان کردند، ضخامت لایه‌ها نسبت به دو متغیر دیگر مورد مطالعه آن‌ها (سرعت و عرض رشته‌ها) بیشترین اثر را بر زبری سطح قطعه دارد. Sood و همکاران [۱۴] اثر پنج متغیر فرایندی شامل نحوه قرارگیری نمونه در صفحه چاپ، عرض رشته‌ها، ضخامت لایه‌ها، فاصله هم‌نشینی رشته‌ها و زاویه رشته‌نشانی را بر دقت ابعادی قطعه نهایی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، جمع‌شدگی ابعادی در تمام جهات اتفاق می‌افتد و برای کاهش اختلاف ابعادی قطعه چاپ شده و طراحی، مقادیر مشخصی از هر یک از متغیرها را گزارش دادند. این پژوهشگران بیان کردند، دستیابی به مقدار بهینه برای تمام این متغیرها امکان‌پذیر نیست، زیرا معیار کیفیت متفاوت است. در مطالعه‌ای که توسط Nancharaiah و همکاران [۱۵] انجام گرفت، مشخص شد، متغیرهایی نظیر ضخامت لایه‌ها و فاصله هم‌نشینی رشته‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای روی زمان ساخت قطعه مؤثر هستند. مقدار این اثرگذاری برای ضخامت لایه‌ها $66/57\%$ و برای فاصله هم‌نشینی رشته‌ها $30/77\%$ به‌دست آمد. مطالعه آن‌ها نشان داد، انتخاب ضخامت لایه $0/33$ mm، فاصله هم‌نشینی $0/2$ mm و زاویه رشته‌نشانی 30° مقادیری بهینه برای کاهش زمان ساخت قطعه است. نکته‌ای که نبود آن در نتایج ارائه شده احساس می‌شود آن است که تاکنون ضخامت لایه بهینه تعیین نشده تا براساس آن اثر زاویه رشته‌نشانی و صفحه چاپ بر خواص مکانیکی قطعه‌های تهیه شده به روش FDM مطالعه شود. از این‌رو، در مقاله حاضر سعی شده با استفاده از پلی‌لاکتیک اسید (PLA) به‌عنوان پلیمر مصرفی، این

۶۰°C و دمای ذوب ماده در قله در ۱۵۰/۸°C به دست آمد. دیده می‌شود، تبلور در مرحله سردکردن اتفاق نمی‌افتد، اما در مرحله گرمادهی و در محدوده دمایی ۱۰۰°C تا ۱۲۵°C تبلور سرد رخ می‌دهد. منحنی ذوب این پلیمر نیز در محدوده دمایی ۱۳۰°C تا ۱۶۵°C اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج مزبور، دمای نازل چاپگر باید حداقل نزدیک ۱۶۵°C انتخاب شود تا اغلب بلورهای موجود در رشته پلیمری ذوب شده باشند. برای اطمینان بیشتر از ذوب تمام بلورها و داشتن گرانبوی قابل قبول، دمای نازل برای این ماده ۲۰۰°C انتخاب شد که حدود ۳۵°C بیشتر از دمای ذوب PLA است. در ضمن در این دما، ماده مزبور از تخریب در زمان فرایند مصون است.

خواص کششی

اثر ضخامت لایه‌ها

در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب مقادیر استحکام و مدول کششی نمونه‌های ساخته شده با ضخامت لایه‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لایه‌ها، استحکام و مدول کششی نمونه‌ها اندکی کاهش می‌یابد. در این مطالعه سعی شد، درصد پرشدگی نمونه‌ها در شرایط بررسی، ثابت و برابر ۱۰۰٪ باشد. درصد پرشدگی ثابت سبب می‌شود، با تغییر ضخامت لایه، مقدار مواد مصرفی تغییری نکند. اما، از آنجا که ابعاد نمونه‌ها یکسان است، به زمان ساخت نمونه‌سازی لایه‌ها افزوده می‌شود. **جدول ۴**، وزن مواد مصرفی، زمان ساخت نمونه و تعداد لایه‌ها را برای ضخامت لایه‌های مطالعه شده، نشان می‌دهد. با کاهش ضخامت لایه‌ها هنگام لایه‌نشانی، به دلیل کم‌بودن ضخامت لایه جدید، نازل به

ساخته شدند و با آزمون کشش، صفحه‌ای که نمونه‌ها در آن بیشترین استحکام کششی را داشتند، به‌عنوان صفحه چاپ بهینه تعیین شد. در نهایت، مقدار زبری سطح قطعه‌ها نیز بررسی شد. راهنمای کدگذاری نمونه‌های ساخته شده، در **جدول ۳** آمده است. با توجه به این جدول، به‌طور مثال، نمونه L1A2P3 دارای ضخامت لایه ۰/۰۵ mm و زاویه رشته‌نشانی ۴۵°/۴۵- در صفحه ساخت ZXY چاپ شده است. در ضمن عدد بیان شده پس از خط تیره شماره نمونه است و معنی خاصی ندارد. رفتار گرمایی و بلورینگی پلیمر به‌کار رفته به‌کمک آزمون DSC بررسی شد. برای این کار، نمونه پلیمری به وزن ۵±۰/۱ mg درون دستگاه DSC قرار گرفت و از دمای محیط تا ۱۸۰°C با سرعت ۱۰°C/min گرماده شد. سپس، با همین سرعت تا دمای محیط سرد شد. پس از آن، بار دیگر نمونه با شرایط پیش گفته تا دمای ۱۸۰°C گرماده شد. برای بررسی خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی، مدول یانگ و مقدار ازدیاد طول تا شکست نیز از آزمون کشش استفاده شد. اندازه نمونه‌ها مطابق استاندارد ISO 527-5A طراحی شده و تمام نمونه‌ها با سرعت ۵ mm/min کشیده شدند. از نمودار تغییرات تنش برحسب کرنش نمونه‌ها، مقادیر مربوط به کشش به‌دست آمدند. گفتنی است، در هر حالت چهار نمونه در آزمون کشش قرار گرفته و مقادیر میانگین و انحراف معیار نیز محاسبه شدند. آزمون زبری‌سنجی با دستگاه زبری‌سنج اتصالی انجام شد. دستگاه در حالت استاندارد DIN قرار داشت و هنگام انجام آزمون کاونده دستگاه که قطر نوک آن ۲ μm بود، در طول ۴ mm از سطح نمونه برای تعیین مقدار زبری به کاوش می‌پرداخت.

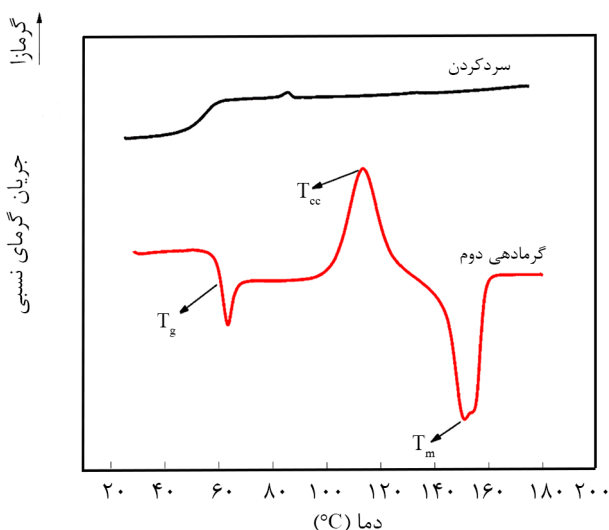
نتایج و بحث

آزمون گرمایی

شکل ۳ دمانگاشت‌های گرمادهی دوم و سردکردن نمونه PLA را نشان می‌دهد. به‌کمک دمانگاشت DSC دمای انتقال شیشه‌ای حدود

جدول ۳- کدگذاری نمونه‌ها با توجه به متغیرهای بررسی شده.

ضریب متغیر				متغیر
۴	۳	۲	۱	
۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	ضخامت (L)
-	-۳۰°/۶۰°	-۴۵°/+۴۵°	۰°/۹۰°	زاویه رشته‌نشانی (A)
-	ZXY	XZY	XYZ	صفحه ساخت (P)



شکل ۳- دمانگاشت DSC رشته‌های استفاده شده برای فرایند FDM.

جدول ۴- مشخصات نمونه‌سازی در شرایط بررسی.

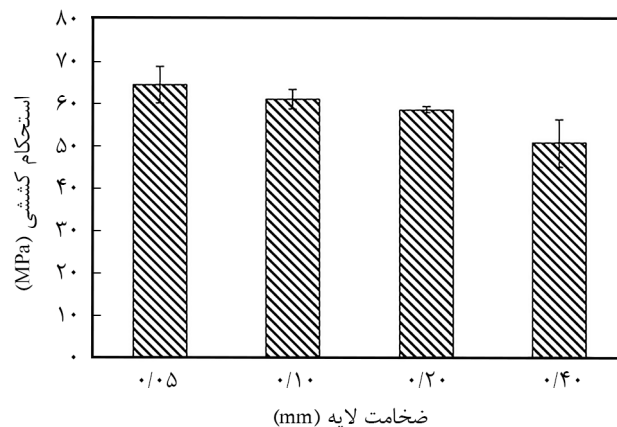
ضخامت (mm)				متغیر
۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	
۱/۶۵	۱/۶۵	۱/۶۵	۱/۶۵	وزن مواد مصرفی (g)
۶	۹	۱۷	۳۱	زمان نمونه‌سازی (min)
۵	۹	۱۷	۳۳	تعداد لایه‌ها

ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. دیده می‌شود، با زیاد شدن ضخامت، تعداد و اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد که اثر زیادی بر کاهش استحکام کششی نمونه دارد. این مسئله به‌ویژه در نمونه با ضخامت ۰/۴ mm وضوح بیشتری دارد [۷]. از سوی دیگر، این اثر زیاد حفره‌ها در کاهش مدول را می‌توان ناشی از اتصال قوی‌تر لایه‌ها در ضخامت‌های کمتر و یکپارچگی اتصال رشته‌ها در هر لایه دانست. در حالی که در ضخامت‌های بیشتر، رشته‌ها به علت درهم‌رفتگی کمتر و در نتیجه اتصال ضعیف‌تر، مستقل عمل می‌کنند و با وجود حفره‌های بیشتر، بستر برای کاهش استحکام قطعه فراهم می‌شود.

اثر زاویه رشته‌نشانی

در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب اثر زاویه‌رشته‌نشانی بر استحکام و مدول کششی قطعه‌ها نشان داده شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد، نمونه‌هایی که زاویه رشته‌نشانی در آن‌ها $90^{\circ}/0^{\circ}$ است، دارای بیشترین و نمونه‌هایی که با زاویه رشته‌نشانی $45^{\circ}/-45^{\circ}$ ساخته شده‌اند، دارای کمترین استحکام کششی هستند. کم‌بودن استحکام کششی نمونه‌های ساخته شده با زاویه رشته‌نشانی $45^{\circ}/-45^{\circ}$ را می‌توان ناشی از دو پدیده دانست. اول آنکه رشته‌ها با محور نیرو، زاویه می‌سازند و نیروی کمتری را تحمل می‌کنند [۵]. دوم آنکه در حالت زاویه‌دار عرض رشته‌ها در راستای محور قطعه بیشتر است و در نتیجه تعداد رشته‌های لازم برای پرکردن عرض نمونه کمتر می‌شود. در حالت رشته‌نشانی با زاویه $60^{\circ}/-30^{\circ}$ ، فضای خالی بین رشته‌ها در محل اتصال به رشته‌های محیطی، 80% مقدار فضای خالی مربوط به نمونه‌های با زاویه رشته‌نشانی $45^{\circ}/-45^{\circ}$ است (شکل ۹) که این موضوع، بیشتر بودن استحکام این نمونه‌ها را نسبت به نمونه‌های $45^{\circ}/-45^{\circ}$ توجیه می‌کند.

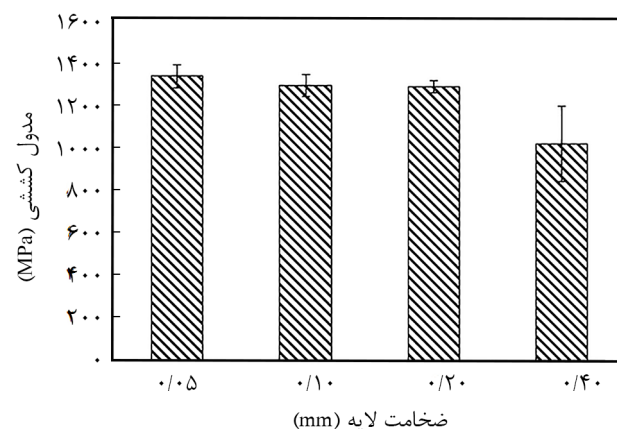
از سوی دیگر، شکل ۸ نشان می‌دهد، تغییر زاویه رشته‌نشانی، مدول کششی نمونه‌ها را نیز دست‌خوش تغییراتی می‌کند. آرایش‌یافتگی رشته‌ها به شکل زاویه‌دار نسبت به راستای کشش در زاویه رشته‌نشانی $45^{\circ}/-45^{\circ}$ و $60^{\circ}/-30^{\circ}$ سبب ایجاد روند کاهشی در مدول می‌شود. زیرا، رشته‌ها کسر کوچکی از نیروی



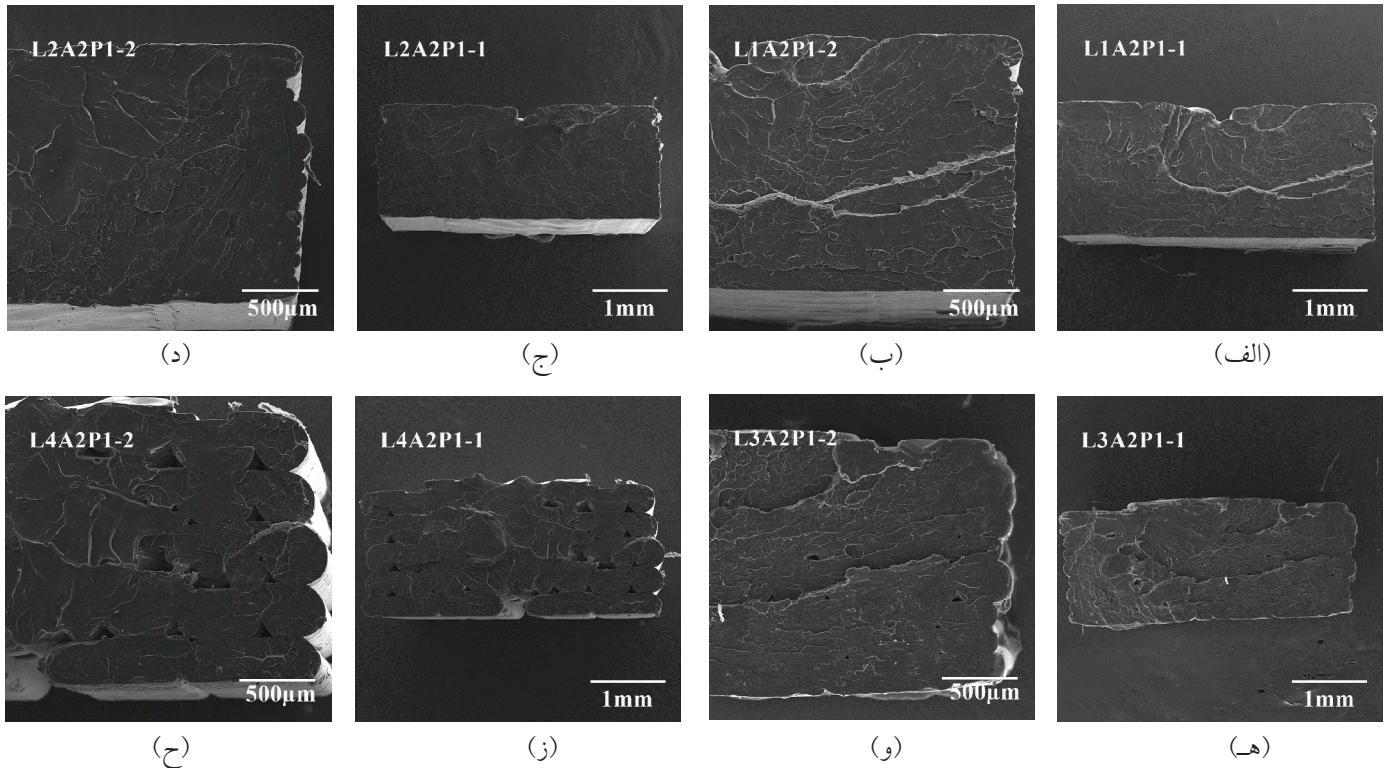
شکل ۴- استحکام کششی نمونه‌های ساخته شده با ضخامت لایه‌های مختلف و در زاویه رشته‌نشانی $45^{\circ}/-45^{\circ}$.

لایه‌های از پیش‌نشاندن شده، نزدیک‌تر است و گرمای نازل آن لایه‌ها را در حالت نزدیک به مذاب نگه می‌دارد. در نتیجه در حالتی که ضخامت لایه کاهش می‌یابد، با نشاندن لایه جدید روی لایه پیشین مقدار درهم‌رفتگی لایه‌ها بیشتر می‌شود. از این رو، اتصال لایه‌ها به یکدیگر افزایش یافته و با بیشتر شدن انسجام و یکپارچگی نمونه، استحکام زیاد می‌شود.

روند تغییرات مدول نیز حاکی از آن است که مدول برای سه ضخامت لایه ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ mm با شیب کمی کاهش یافته، ولی این کاهش برای ضخامت لایه ۰/۴ mm محسوس‌تر است. علت این پدیده را می‌توان در اندازه و پراکندگی حفره‌ها در تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از سطح مقطع نمونه‌ها جست‌وجو کرد. شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه‌های ساخته شده در صفحه XYZ، در زاویه رشته‌نشانی $45^{\circ}/-45^{\circ}$ و با



شکل ۵- مدول کششی نمونه‌های ساخته شده با ضخامت لایه‌های مختلف و در زاویه رشته‌نشانی $45^{\circ}/-45^{\circ}$.



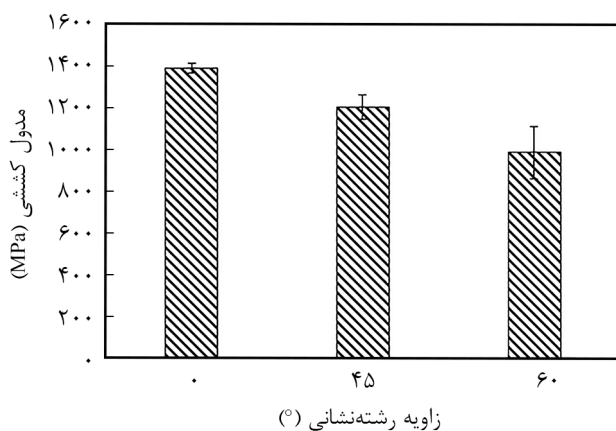
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی در دو بزرگ‌نمایی مختلف از سطح شکست نمونه‌های ساخته شده با ضخامت لایه مختلف و زاویه رشته‌نشانی 45° در صفحه XYZ: (الف) و (ب) 0.05 mm، (ج) و (د) 0.1 mm، (ه) و (و) 0.2 mm و (ز) و (ح) 0.4 mm.

دید، از نظر وجود نقص فضای خالی در مرکز قطعه، تمایز قابل ملاحظه‌ای در حالت‌های مختلف وجود ندارد. در ضمن، فضاهای خالی مربوط به نواحی اتصال به رشته‌های محیطی که در بخش قبل مطرح شد، نیز می‌تواند در سطح شکست مشاهده نشود.

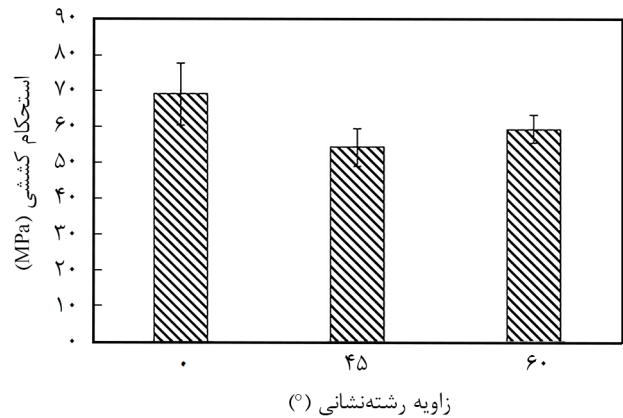
اثر نحوه قرارگیری نمونه در صفحه چاپ

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب اثر نحوه قرارگیری نمونه در

وارد شده را متحمل می‌شوند (نیروی معادل $F \cos \theta$ به‌وسیله هر رشته تحمل می‌شود) و مدول هم به‌طور مستقیم با تنش (نیرو) متناسب است. شایان ذکر است، مدول در ناحیه کشسان، (پیش از کرنش ۲٪)، محاسبه می‌شود. بنابراین، فضاهای خالی که در بحث استحکام نقش‌آفرین هستند، در این ناحیه مؤثر واقع نمی‌شوند. تصاویر میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌های با زاویه‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل می‌توان



شکل ۸- اثر زاویه رشته‌نشانی بر مدول کششی نمونه‌ها با ضخامت 0.05 mm در صفحه XYZ.

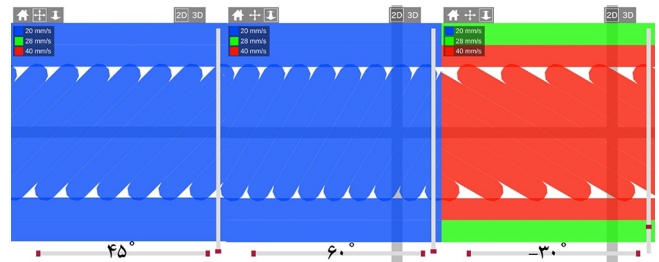


شکل ۷- اثر زاویه رشته‌نشانی بر استحکام کششی نمونه‌ها با ضخامت 0.05 mm در صفحه XYZ.

تشکیل این حفره‌ها ناشی از منطق رشته‌نشانی نرم‌افزار نصب شده در دستگاه است، به طوری که دستگاه FDM فواصل کمتر از قطر نازل را پر نمی‌کند. به عنوان مثال، برای نمونه‌هایی که در صفحه XYZ ساخته شده‌اند، حدوداً ۷٪ از هر لایه پر نشده و خالی باقی می‌ماند. در ضمن، نمونه‌های ساخته شده در صفحه ZXY نیز به دلیل وجود کمترین تعداد رشته‌های نشانده شده در راستای محور کشش، کمترین استحکام و مدول کششی را دارند.

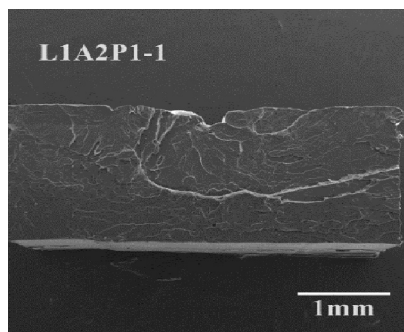
بررسی زبری سطح نمونه‌ها

نتایج مربوط به آزمون زبری‌سنجی نیز در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ آمده است. پیش از بررسی نتایج این آزمون لازم است تا متغیرهای مرسوم زبری در حالت دوبعدی معرفی شوند. R_a متداول‌ترین متغیر زبری در حالت دوبعدی است و متوسط خط میانه نیز نامیده می‌شود. این کمیت معیاری برای کنترل کیفیت سطح است و به شکل میانگین قدر مطلق انحراف‌های ناهمواری‌ها از خط میانه در یک طول نمونه‌برداری، تعریف و اندازه‌گیری می‌شود. در واقع، R_a میانگین تمام ارتفاع‌های قله‌ها و دره‌ها در یک طول نمونه‌برداری است و از معادله (۱) محاسبه می‌شود. $\eta(x)$ ارتفاع نقاط از خط میانه، M تعداد نقاط با ارتفاع مثبت (قله) و N تعداد نقاط با ارتفاع منفی (دره) را نشان می‌دهد.

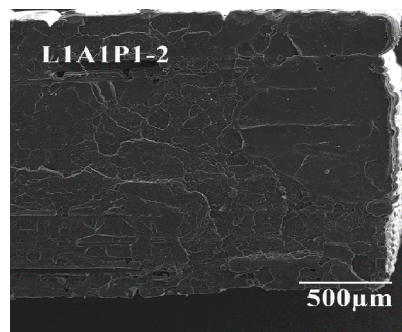


شکل ۹- فضاهای خالی در چاپ نمونه‌ها با زاویه رشته‌نشانی $-۳۰^{\circ}/+۶۰^{\circ}$ و $-۴۵^{\circ}/+۴۵^{\circ}$.

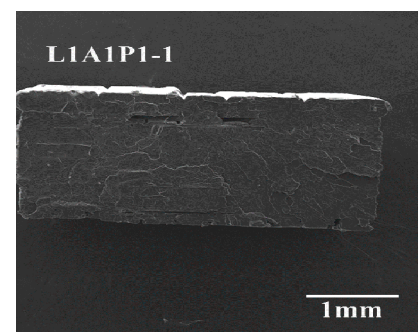
صفحه چاپ بر استحکام و مدول کششی قطعه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استحکام و مدول کششی برای نمونه‌هایی که در صفحه XYZ ساخته شده‌اند، بیشتر از نمونه‌هایی است که در صفحه‌های XYZ و ZXY ساخته می‌شوند. اگرچه با توجه به نحوه رشته‌نشانی به هنگام چاپ می‌توان بیان کرد، تعداد رشته‌هایی که در راستای کشش نشانده می‌شوند، در نمونه‌هایی که در صفحه XYZ ساخته شده‌اند، بیشتر از دو صفحه دیگر است. اما، وجود حفره‌های موجود در این نمونه‌ها به گونه‌ای است که استحکام و مدول کششی آن‌ها را نسبت به نمونه‌های ساخته شده در صفحه XYZ به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد (شکل ۱۳).



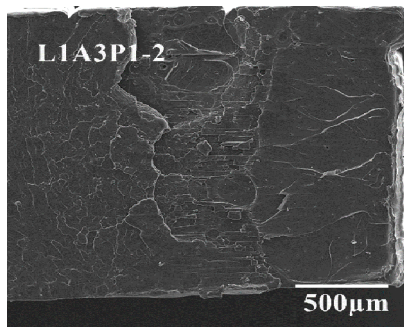
(ج)



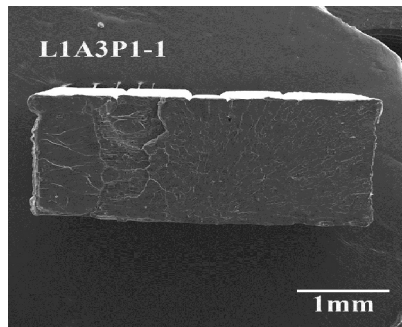
(ب)



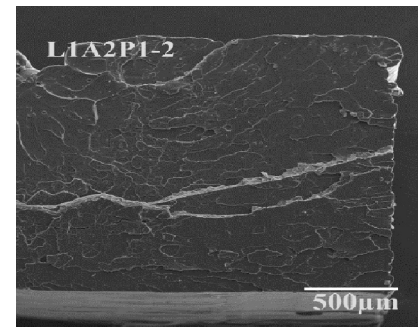
(الف)



(و)

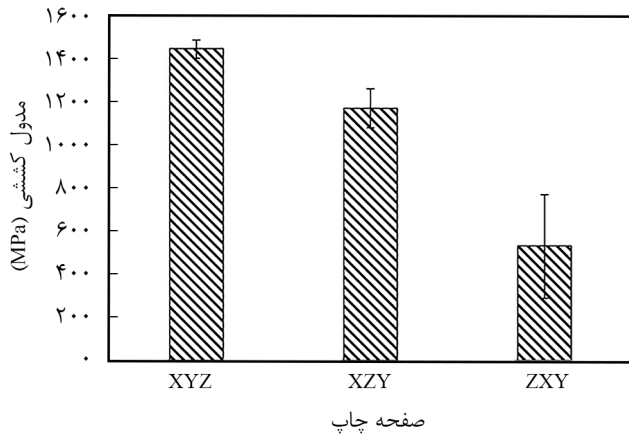


(ه)

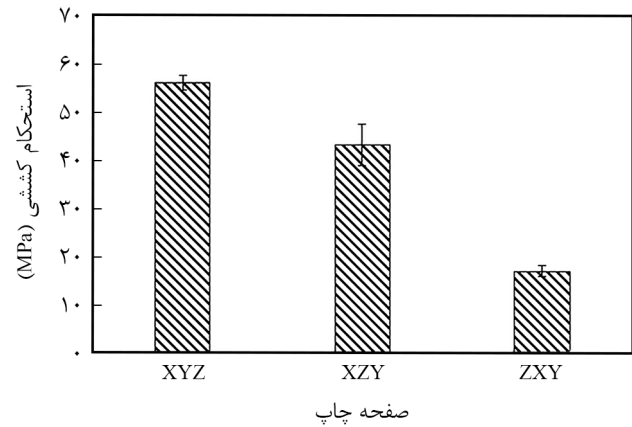


(د)

شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی با دو بزرگ‌نمایی مختلف از سطح شکست نمونه‌های ساخته شده در صفحه XYZ به ضخامت لایه ۰/۰۵ mm و زاویه‌های رشته‌نشانی متفاوت: (الف) و (ب) $۰^{\circ}/۹۰^{\circ}$ ، (ج) و (د) $-۴۵^{\circ}/+۴۵^{\circ}$ و (ه) و (و) $-۳۰^{\circ}/+۶۰^{\circ}$.



شکل ۱۲- اثر صفحه چاپ بر مدول کششی نمونه‌های ساخته شده با ضخامت لایه ۰/۰۵ mm و زاویه ۰°/۹۰°.



شکل ۱۱- اثر صفحه چاپ بر استحکام کششی نمونه‌های با ضخامت لایه ۰/۰۵ mm و زاویه ۰°/۹۰°.

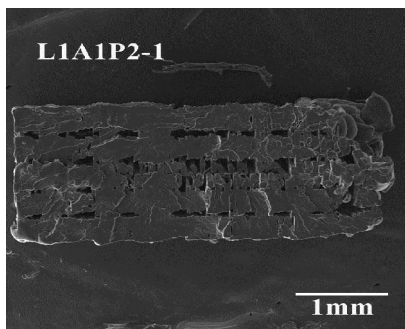
ارتفاع نقاط از سطح مرجع و n تعداد این نقاط را بیان می‌کند:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (2)$$

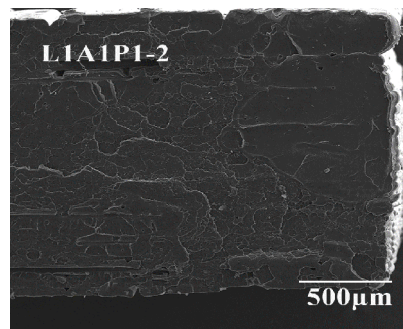
R_z فاصله عمودی بین بلندترین قله (Y_{max}) و عمیق‌ترین دره (Y_{min}) در یک طول نمونه برداری از نیم‌رخ عرضی است و از معادله (۳)

$$R_a = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |\eta(x_i, y_j)| \quad (1)$$

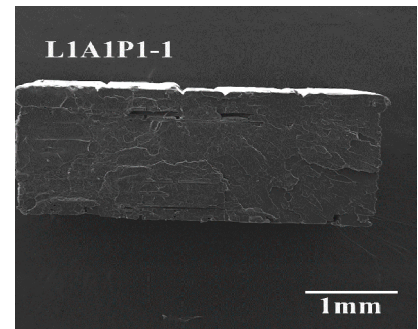
R_q ریشه میانگین مربعات انحراف سطح (Root mean square deviation of the surface, RSM) در حالت دوبعدی است که به صورت ریشه میانگین مربعات انحراف نامطلوب سطح از یک سطح مرجع تعریف می‌شود و از معادله (۲) به دست می‌آید. در این معادله، y_i



(ج)



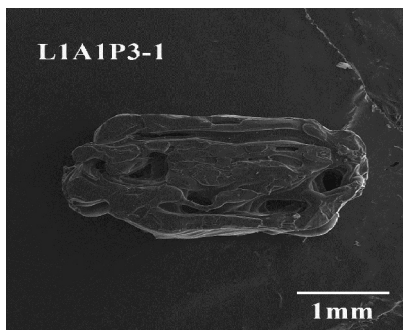
(ب)



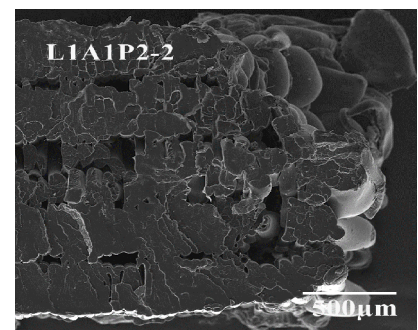
(الف)



(و)

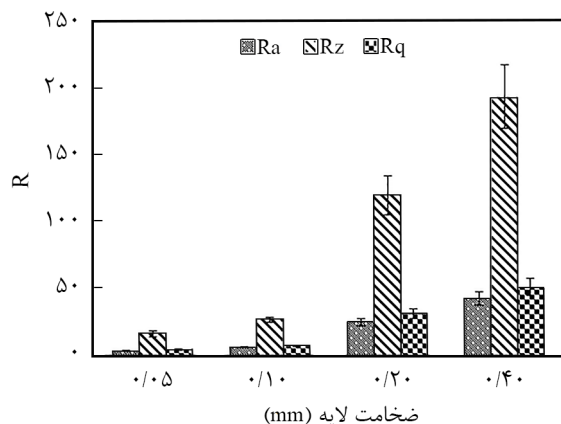


(ه)



(د)

شکل ۱۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی در دو بزرگ‌نمایی مختلف از سطح شکست نمونه‌های ساخته شده به ضخامت لایه ۰/۰۵ mm و زاویه رشته‌نشانی ۰° در صفحات متفاوت: (الف) و (ب) XYZ، (ج) و (د) XZY و (ه) و (و) ZXY.



شکل ۱۵- شاخص‌های زبری نمونه‌های ساخته شده در زاویه‌های رشته‌نشانی مختلف و ضخامت 0.05 mm.

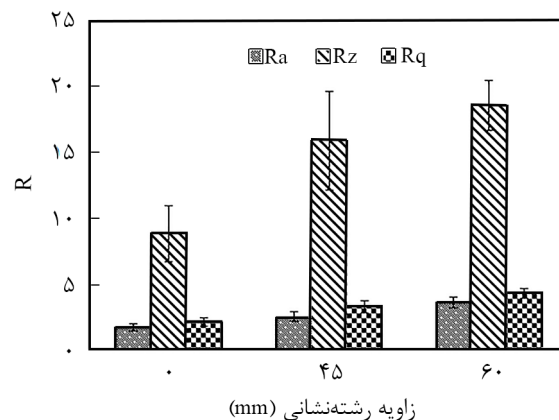
نازل در یک ارتفاع مشخص، مواد خروجی از نازل، به دلیل حجم بیشتر مواد و کمبود فضا، به سمت نواحی مجاور فشرده می‌شوند و در ارتفاع شکل می‌گیرند. این شکل‌گیری مواد در ارتفاع، خود را به شکل زبری بیشتر نشان می‌دهد [۱۲].

نتیجه‌گیری

در این کار، برای تعیین ضخامت لایه بهینه و نیز بررسی اثر زاویه رشته‌نشانی و صفحه چاپ قطعه‌های ساخته شده به روش FDM، نمونه‌هایی از جنس PLA براساس استاندارد ISO تهیه شدند. نمونه‌ها برای بررسی خواص مکانیکی و سطحی به ترتیب مورد آزمون کشش و زبری‌سنجی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که در شرایط چاپ انتخاب شده، با کاهش ضخامت لایه‌ها از 0.4 mm به 0.05 mm، استحکام و مدول کششی افزایش و زبری سطح نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در ضمن، نمونه‌هایی که با ضخامت لایه 0.05 mm و زاویه رشته‌نشانی 0° در صفحه XYZ ساخته شدند، دارای بیشترین استحکام و مدول کششی بودند. افزایش زاویه رشته‌نشانی از صافی سطح نمونه‌ها می‌کاهد و نحوه قرارگیری قطعه در صفحه چاپ نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی نمونه‌ها مؤثر است.

مراجع

- Panda S.K., Padhee S., Sood A.K., and Mahapatra S.S., Optimization of Fused Deposition Modelling (FDM) Process



شکل ۱۴- شاخص‌های زبری نمونه‌های ساخته شده در ضخامت‌های مختلف و زاویه رشته‌نشانی 45°/45°-.

محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$R_z = Y_{max} - Y_{min} \quad (3)$$

شکل ۱۴ تغییرات شاخص‌های اندازه‌گیری شده برای تعیین زبری سطح نمونه‌هایی را نشان می‌دهد که با ضخامت‌های مختلف و در زاویه رشته‌نشانی 45°/45°- در صفحه XYZ ساخته شده‌اند. همان‌طور که از نتایج پیداست، با افزایش ضخامت لایه‌گذاری، فاصله قله-دره در نمونه بیشترین تغییر را داشته که علت آن لایه‌نشانی رشته‌های خارج شده از نازل به شکل تقریباً دست‌نخورده و گرد است که بیشترین نایکنواختی را ایجاد می‌کند. در ضمن نتایج نشان می‌دهد، Rz نسبت به شاخص‌های دیگر، معیار بهتری برای بررسی زبری نمونه‌هاست. زیرا، تغییرات محسوس‌تری نسبت به دو شاخص دیگر نشان می‌دهد.

شکل ۱۵ تغییرات شاخص‌های اندازه‌گیری شده را برای تعیین زبری سطح نمونه‌هایی نشان می‌دهد که با زاویه‌های رشته‌نشانی مختلف در ضخامت لایه 0.05 mm و در صفحه XYZ ساخته شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش زاویه رشته‌نشانی، زبری سطح بیشتر شده است. این موضوع را می‌توان تا حدی به هم‌پوشانی بیشتر رشته‌ها در حالت زاویه‌دار مرتبط دانست. زیرا در نواحی هم‌پوشانی با حرکت

- Parameters Using Bacterial Foraging Technique, *Intell. Inf. Manag*, **1**, 89-97, 2009.

2. Mohamed O.A., Masood S.H., and Bhowmik J.L., Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters: A Review of Current Research and Future Prospects, *Adv. Manufact.*, **3**, 42-53, 2015.
3. Zamani J. and Partovipoor H., *Rapid Prototyping Method in Mechanical Engineering*, Khaje Nasir University, Tehran, 1-50, 2009.
4. Hwang S., Reyes E.I., Moon K., Rumpf R.C., and Kim N.S., Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process, *J. Electron. Mater.*, **44**, 771-777, 2015.
5. Wu W., Geng P., Li G., Zhao D., Zhang H., and 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*, **8**, 5834-5846, 2015.
6. Christiyani K.G.J., Chandrasekhar U., and Wenkatesvarlu K., A Study on the Influence of Process Parameters on the Mechanical Properties of 3D Printed ABS Composite, *Mater. Sci. Eng.*, **114**, 1-8, 2016.
7. Hossain M.S., Espalin D., Ramos J., Perez M., and Wicker R., Improved Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling-Manufactured Parts Through Build Parameter Modifications, *J. Manuf. Sci. Eng.*, **136**, 1-12, 2014.
8. Najafloo B., Razavi-Nouri M., and Rezadoust A.M., A Review on Fused Deposition Modeling Method, *Polymerization*, **6**, 74-85, 2016.
9. Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., and Wright P.K., Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS, *Rapid Prototyping J.*, **8**, 248-257, 2002.
10. Ang K.C., Leong K.F., Chua C.K., and Chandrasekaran M., Investigation of the Mechanical Properties and Porosity Relationships in Fused Deposition Modelling-Fabricated Porous Structures, *Rapid Prototyping J.*, **12**, 100-105, 2006.
11. Bertoldi M., Yardimci M.A., Pistor C.M., Güçeri S.I., and Sala G., Mechanical Characterization of Parts Processed via Fused Deposition, *Proceedings of the 1998 Solid Freeform Fabrication Symposium*, The University of Texas at Austin, Austin, Texas 10-12, August, 557-565, 1998.
12. Nancharaiah T., Raju D.R., and Raju V.R., An Experimental Investigation on Surface Quality and Dimensional Accuracy of FDM Components, *Int. J. Emerg. Technol.*, **1**, 106-111, 2010.
13. Anitha R., Arunachalam S., and Radhakrishnan P., Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling, *J. Mater. Process. Tech.*, **118**, 385-388, 2001.
14. Sood A.K., Ohdar R., and Mahapatra S., Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modelling Processed Part Using Grey Taguchi Method, *Mater. Design*, **30**, 4243-4252, 2009.
15. Nancharaiah T., Optimization of Process Parameters in FDM Process Using Design of Experiments, *Int. J. Emerg. Technol.*, **2**, 100-102, 2011.
16. Sadegh-Hassani S., Afzali J., and Khosravi M., *Atomic Force Microscopy*, Gisum, Tehran, 396-400, 2014.