ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

10.22034/IJME.2024.437063.1921

بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر زبری سطح قطعات ساخته شده پلیمری توسط مدل‌سازی رسوبی ذوب شده (FDM) با هدف پولیش لیزری

سید مرتضی موسوی[۱]، سید مرتضی موسوی[۲]، محمدرضا موحدی[۳*]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: movahhed@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۷ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۸ اسفند ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

ساخت افزایشی

پرداخت لیزری

زبری سطح

مدل‌سازی رسوبی ذوب شده

چکیده

فرایند مدل‌سازی رسوبی ذوب شده، یک تکنیک ساخت پیشرفته است که قطعات را به روش لایه به لایه می‌سازد. قطعات چاپ شده با این فرآیند به دلیل ساخت لایه‌ای، دارای کیفیت سطح پایین و دقت ابعادی ضعیف هستند. زبری سطح بالا، کاربرد این قطعات را در بسیاری از زمینه‌های کاربردی مانند هوافضا و پزشکی که نیازمند دقت و کیفیت سطح بالا هستند، محدود می‌سازد. پولیش لیزری یک فرآیند نوظهور صنعتی است که می‌تواند کیفیت سطح را بهبود بخشد. انتخاب صحیح پارامترهای لیزر بر هزینه و زمان پرداخت سطح قطعات ساخت افزایشی بسیار مؤثر است. در پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای چاپگر سه‌بعدی و زاویه سطح نمونه‌های تولید شده بر زبری سطح قطعات، به‌صورت مجزا مورد مطالعه قرار گرفته است. میزان تأثیر هر یک از پارامترهای چاپ با ترسیم یک نقشه حرارتی تبیین و ضخامت لایه به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر زبری سطح معرفی گردیده است. همچنین روند تغییرات زبری بر اساس زاویه سطح قطعات چاپ شده در قالب یک نمودار مورد ارزیابی قرار گرفته شده و سپس روند نمایی از ارتباط پارامترهای چاپ و شکل هندسی قطعات چاپ شده با پارامترهای انتخابی لیزر به منظور دستیابی به بهترین کیفیت سطح ارائه گردیده است.

Investigating the influencing parameters on the surface roughness of polymer parts made by Fused Deposition Modeling with respect to laser polishing

Seyed Morteza Mousavi[1], Seyed Morteza Mousavi[2], Mohammad Reza Movahhedy[3*]

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: movahhed@sharif.edu

Article Information

Original Research Paper

Received: 27 January 2024

Accepted: 27 February 2024

Keywords:

Additive Manufacturing

Laser Polishing

Surface Roughness

FDM

Abstract

The fused deposition modeling process is an advanced manufacturing technique that builds parts layer_by_layer. Due to the layered construction, printed parts with this process have low surface quality and poor dimensional accuracy. high surface roughness limits the use of these parts in many fields of application such as aerospace and medicine, which require high precision and quality. Laser polishing is an emerging industrial process that can improve surface quality. correct selection of laser parameters greatly reduces the cost and time of surface treatment of additive manufacturing parts. In this research, the effect of 3D printer parameters and surface angle of the produced samples on the surface roughness of the parts was studied separately. The effect of each printing parameters is explained by drawing a thermal map and layering thickness is introduced as the most important parameter affecting the surface roughness. Also, the process of roughness changes is evaluated based on the angle of the printed surface in the form of a diagram. Then, the relationship between printing parameters and the geometric shape of printed parts with selected laser parameters was presented to achieve the best surface quality.

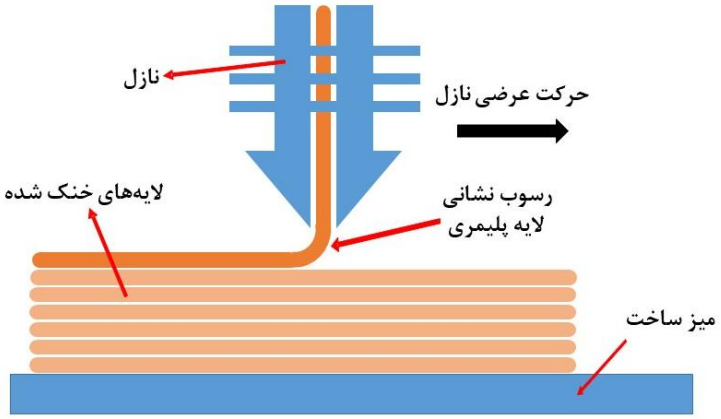
Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mousavi S M, Mousavi S M, Movahhedy M R. Investigating the influencing parameters on the surface roughness of polymer parts made by Fused Deposition Modeling with respect to laser polishing. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 November 22;10(9):42-50. doi: 10.22034/IJME.2024.437063.1921 [In Persian]

۱– مقدمه

به‌منظور پاسخگویی به نیازهای متنوع مصرف‌کنندگان و فعالیت در یک بازار رقابتی، به روش‌های ساخت و تولیدی نیاز است که توسط آن‌ها بتوان قطعات شخصی‌سازی شده متنوع و باکیفیت بالا را در کوتاه‌ترین زمان و با حداقل هزینه ممکن، تولید کرد. فناوری ساخت افزایشی[1] یکی از فرآیندهای تولید قطعات است که با سرعت زیادی درحال‌توسعه بوده و بسیاری از نیازهای صنعتگران به‌ویژه در تولید قطعات شخصی‌سازی شده را مرتفع نموده است. در میان فرآیندهای ساخت افزایشی، فرآیند مدل‌سازی رسوبی ذوب شده[2] یا FDM یکی از شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ساخت افزایشی است که بر مبنای اکستروژن رشته‌های پلیمری با استفاده از حرارت است. مطابق شکل۱، فرآیند مدل‌سازی رسوبی ذوب‌شده شامل رسوب نشانی لایه‌هایی از رشته‌های پلیمری بر روی یکدیگر است. در این فرآیند رشته پلیمری از یک نازل گرم اکسترود می‌شوند و با جابجایی نازل، یک‌لایه از رشته‌های پلیمری مطابق الگوی حرکت نازل قابل‌تولید است. در نهایت باروی هم قرار گرفتن لایه‌های تولید شده، یک قطعه سه‌بعدی تولید می‌شود [۱].



شکل ۱ عملکرد فرآیند مدل‌سازی رسوبی ذوب‌شده

ویژگی‌ها و مزیت‌های منحصربه‌فرد فرآیند FDM مانند سادگی برنامه‌ریزی فرآیند، ساخت قطعات با شکل هندسی پیچیده، صرف زمان و هزینه‌ی پایین و استفاده از گستره‌ی وسیعی از مواد، باعث شده که این فرآیند در علوم مختلف مهندسی و پزشکی کاربرد گسترده‌ای داشته باشد. ساخت ایمپلنت‌ها، پروتزها و داربست‌های استخوانی با توجه به ویژگی‌های فردی هر بیمار ازجمله قطعات قابل‌تولید توسط این فرآیند است [۲، ۳]. همچنین مزایا و ویژگی‌های این فرآیند منجر به استفاده از آن برای ساخت برخی از قطعات در هواپیماها، فضاپیماها، کاوشگرها، ربات‌ها و تجهیزات فضایی شده است [۲، ۴] و تولید الگوهایی با ساختار هندسی پیچیده به‌منظور استفاده در فرآیند ریخته‌گری دقیق از دیگر کاربردهای مهم و گسترده این فرآیند در تولید قطعات غیرمستقیم است که می‌توان به آن اشاره کرد [۵].

یکی از ویژگی‌های مهم قطعات FDM به‌منظور استفاده در کاربردهای ذکرشده و دیگر کاربردهای دقیق، حساسیت کیفیت سطح این قطعات است که از جمله چالش‌های مهم فرآیند FDM در مقایسه با دیگر چالش‌ها مانند مواد خام، استحکام و تکرارپذیری است [۶]. یکی از بزرگ‌ترین محدودیت‌های قطعات چاپ‌شده توسط FDM، کیفیت سطح پایین و دقت ابعادی ضعیف قطعات تولیدی به علت ماهیت ساخت لایه‌ای است. زبری بالای سطح، کاربرد قطعات چاپی توسط این فرآیند را در بسیاری از زمینه‌ها محدود می‌سازد [۲، ۷]. پایین بودن کیفیت سطح نقطه ضعف مهمی است زیرا زبری سطح بر رفتار مکانیکی محصولات مانند مقاومت در برابر سایش، شروع ترک، ثبات، عمر خستگی، آب‌بندی، اتصال و دینامیک سیال تأثیر می‌گذارد. در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهشگران به‌منظور حل این مشکل، فرآیندهای پیش پردازش و پس پردازش را به‌عنوان دو نوع استراتژی، برای کاهش زبری سطح قطعات ساخته شده استفاده کرده‌اند [۸].

[1] Additive Manufacturing
[2] Fused Deposition Modeling

اوغلو و همکاران [۸] با هدف بهبود کیفیت سطح و دقت ابعادی قطعات پلی لاکتیک اسید چاپ شده به روش FDM دو استراتژی بهبود کیفیت سطح، یعنی بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند و استفاده از فرایند پس پردازش را مورد مطالعه قراردادند. در طی این پژوهش دمای چاپ و ضخامت لایه گذاری به‌عنوان پارامترهای ورودی و پرداخت سطح به روش ارتعاشی به‌عنوان فرآیند پس پردازش در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش ضخامت لایه به‌عنوان عامل اصلی تعیین کیفیت سطح قطعات معرفی گردید که این عامل، زبری سطح قطعات را حدود ۷۶ درصد هنگام چاپ و حدود ۷۱ درصد هنگام پس پردازش تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین میزان تاثیر دمای چاپ هنگام ساخت نمونه‌ها حدود ۲۰ درصد و هنگام پس پردازش حدود ۹ درصد گزارش گردید. بوون [۹] با هدف کاهش اثر پله‌ای شدن از تطبیق ضخامت لایه‌ها به‌گونه‌ای که از کیفیت سطوح کاسته نشود و زمان ساخت را کاهش دهد، استفاده کرد. در این پژوهش از ضخامت لایه‌های متفاوت برای ساخت یک قطعه استفاده شد. تکنیک مذکور با استفاده از لایه‌های ضخیم‌تر در قسمت‌هایی از قطعه که شیب کمتری دارد، باعث افزایش سرعت ساخت قطعه شده و با استفاده از لایه‌های نازک‌تر در قسمت‌هایی از قطعه که شیب تندتری دارد، از کاهش کیفیت سطح محصول نهایی جلوگیری می‌نماید. پرز و همکاران [۱۰] به‌طور تجربی تأثیر پارامترهای چاپ را بر زبری سطح نمونه‌های پلی لاکتیک اسید بررسی کردند. در طی این پژوهش پنج پارامتر ارتفاع لایه، ضخامت دیواره، مسیر چاپ، سرعت چاپ و دما به‌منظور ارائه کیفیت سطح بهینه در شرایط گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج با استفاده از روش‌های تحلیل واریانس و روش‌های گرافیکی مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، ارتفاع لایه‌گذاری و ضخامت دیواره مهمترین عوامل برای کنترل زبری سطح معرفی شد. واگ و گید [۱۱] تأثیر سه عامل مهم چاپ یعنی ضخامت لایه، سرعت چاپ و درصد پر شدن را بر کیفیت سطح قطعات پلی لاکتیک اسید مورد مطالعه قراردادند. نمونه‌ها بر اساس طرح آزمایشی تاگوچی ،L27 با سه عامل چاپ با سه سطح ساخته شدند. اثربخشی هر پارامتر بر زبری سطح با تحلیل واریانس مورد بحث قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که به ترتیب ضخامت لایه، سرعت چاپ و درصد پر شدن(چگالی) به‌عنوان مؤثرترین پارامترهای ورودی هستند.

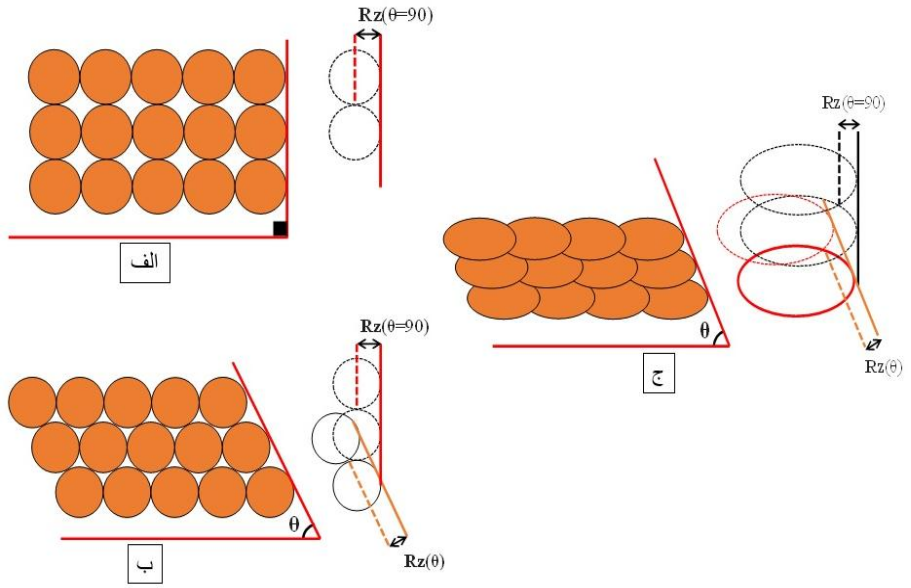
کیفیت سطح قطعات تولیدی توسط فرآیند FDM را می‌توان با بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند بهبود بخشید، اما نمی‌توان آن را به محدوده قابل قبولی برای کاربردهای صنعتی رساند. علاوه بر این، روش بهینه‌سازی پارامترها زمان‌بر و پیچیده است، بنابراین استفاده از فرآیندهای پس پردازش مختلف برای بهبود کیفیت سطح قطعات FDM به‌عنوان یک‌راه حل کاهش زبری سطح، توسط پژوهشگران در حال توسعه است. گالانتوچی و همکاران [۱۲] اثر عملیات شیمیایی پس از پردازش را بر زبری سطح قطعات آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) مطالعه کردند. در این پژوهش فعالیت تجربی در دو مرحله با تمرکز بر متغیرهای مستقل در هر دو فرآیند FDM و تکمیل شیمیایی انجام گرفت. در مرحله اول که شامل نمونه‌های تولیدی است، قطر نازل، عرض رشته و ارتفاع برش به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شد. فرآیند پس پردازش شامل غوطه وری در حجم ۹۰ درصد دی متیل کتون (استون) و ۱۰درصد آب به مدت ۳۰۰ ثانیه بود. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش نمونه‌ها پس از پرداخت شیمیایی کمتر از یک درصد کوچک شدند، در حالی‌که میانگین وزن اولیه نمونه‌ها کمتر از یک درصد افزایش یافت. در طی این پژوهش در بهینه‌ترین حالت زبری سطح از ۲۸،۵ میکرومتر به ۱۱،۵ میکرومتر کاهش یافت. جین و همکاران [۱۳] سطح قطعات پلی لاکتیک اسید ساخته شده به کمک FDM را به ترتیب با محلول NaOH و بخار دی کلرومتان پرداخت کردند. آن‌ها در مرحله اول تعدادی از نمونه‌ها را به مدت نیم ساعت در محلول NaOH قراردادند و مرحله بعد تعدادی از نمونه‌ها را به مدت ۳۰۰ ثانیه در بطری حاوی بخار دی کلرومتان قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، بخار دی کلرومتان نسبت به محلول NaOH توانایی بالاتری برای بهبود کیفیت سطح قطعات پلی لاکتیک اسید دارد. سطح قطعات پرداخت شده با بخار دی کلرومتان نسبت به حالت قبل از پرداخت حدود ۸۸ درصد بهبود یافت. بر اساس این آمار به‌نظر می‌رسد استفاده از این نوع پرداخت بسیار مناسب است اما با توجه به اینکه میزان خطای ابعادی و تغیر وزن و شکل هندسی در این مقاله گزارش نشده، لذا بررسی دقت ابعادی و خواص مکانیکی قطعات پرداخت شده با بخار دی‌کلرومتان به‌منظور افزایش کارایی این روش در قطعات حساس بسیار ارزشمند خواهد بود. تأثیر پولیش بخار استون بر زبری سطح و خواص مکانیکی قطعات آکریلونیتریل بوتادین استایرن باضخامت‌های مختلف در طی پژوهش نف و همکاران [۱۴] مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، این نوع فرآیند پس پردازش به‌طور قابل توجهی زبری سطح را کاهش می‌دهد، اما تأثیر کمی بر عملکرد مکانیکی دارد، که با افزایش ضخامت قطعه کاهش می‌یابد. در طی این پژوهش زبری سطح قطعات مورد پرداخت حدود ۷۲ درصد کاهش یافت.

فرآیندهای پس پردازش سنتی دارای معایب متعددی مانند ناتوانی در پردازش قطعات با هندسه پیچیده، مشکلات زیست‌محیطی، مصرف زمان و هزینه بالا هستند. در این میان، پولیش لیزری یک فرآیند پس پردازش نوظهور است که می‌تواند کیفیت سطح قطعات چاپ‌شده را بهبود ببخشد [۱۵] و در مقایسه با فرآیندهای پولیش سنتی، دارای ویژگی‌های قابل‌توجه‌ای است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به مواردی همچون عدم سایش ابزار، زمان پردازش کوتاه و مناسب بودن برای قطعات پیچیده اشاره نمود. بررسی پارامترهای لیزر باهدف پرداخت سطح قطعات FDM از اهمیت بسزایی در کسب یک زبری ایدئال برخوردار است. در این میان، زبری قبل و بعد از پولیش لیزری قطعات، مهم‌ترین عامل تعیین پارامترهای لیزر خواهد بود. از این‌رو در این پژوهش به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر زبری سطح قطعات ساخت افزایشی شده پلیمری توسط فرآیند FDM پرداخته شده است.

۲- تئوری زبری سطح قطعات تولید شده توسط فرآیند FDM

در چاپ سه‌بعدی یک قطعه با دیواره‌های عمود بر میز ساخت، در حالت ایدئال سطح مقطع رشته‌های پلیمری رسوبی به شکل دایره هستند که با یک فصل مشترک کوچک به رشته اطراف خود متصل شده‌اند. در این حالت به‌صورت تئوری و مطابق با شکل ۲-الف، زبری (Rz) برابر با نصف قطر سطح مقطع رشته‌های رسوبی خواهد بود. مطابق شکل ۲-ب، در حالت ایدئال زاویه قطعه نسبت به میز ساخت تأثیری بر زبری قطعات چاپی نخواهد داشت و در هر زاویه دلخواهی، زبری (Rz) مجدداً برابر با نصف قطر سطح مقطع رشته‌های رسوبی خواهد بود. اما در واقعیت، سطح مقطع رشته‌های پلیمری رسوبی به شکل بیضوی هستند. از جمله مهم‌ترین علل بیضی شدن سطح مقطع رشته‌ها، در زیر اشاره شده است.

- نرم شدگی رشته‌ها به علت دمای بالای نازل که به تغییر سطح مقطع رشته‌های چاپی می‌انجامد.
- ایجاد فشار نازل بر رشته‌های در حال چاپ به علت کم‌تر بودن ارتفاع لایه گذاری نسبت به قطر خروجی نازل



شکل ۲ سطح مقطع رشته‌های پلیمری رسوبی در چاپ سه‌بعدی الف) قطعه با دیواره عمود بر میز ساخت در حالت ایدئال ب) قطعه با دیواره زاویه‌دار نسبت به میز ساخت در حالت ایدئال ج) قطعه با دیواره زاویه دار نسبت به میز ساخت در حالت واقعی

در این حالت فصل مشترک دو رشته متصل‌به‌هم یک ناحیه بزرگ را تشکیل خواهد داد که علاوه بر کاهش یا حذف حفره‌های هوایی بین رشته‌های رسوبی، منجر به افزایش استحکام قطعات چاپ‌شده می‌شود. همچنین مطابق شکل ۲-ج، در این حالت زاویه قطعه نسبت به میز ساخت بر زبری قطعات چاپی تأثیرگذار خواهد بود و با تغییر زاویه، زبری (Rz) نیز تغییر خواهد کرد. لذا به‌طورکلی پارامترهای مؤثر بر زبری سطح قطعات چاپ‌شده در واقعیت، شامل شکل هندسی قطعه (زاویه) و پارامترهای تنظیمی برای چاپگر سه‌بعدی خواهد بود [۱۶، ۱۷].

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای چاپگر سه‌بعدی و شکل هندسی قطعات بر روی زبری سطح قطعات تولید شده به‌صورت مجزا بررسی شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای چاپگر از مجموعه داده یک منبع کتابخانه‌ای [۱۸] استفاده شده است. این مجموعه حاوی اطلاعات ۵۰ قطعه پلیمری چاپ شده توسط فرآیند FDM بوده که ۱۰ ویژگی آن اندازه‌گیری و مورد مطالعه قرارگرفته است. ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در این مجموعه داده در جدول۱ ارائه شده است.

باهدف بررسی تاثیر پارامترهای چاپ بر روی زبری سطح، نسبت اثرگذاری هرکدام از ویژگی‌های مجموعه داده نسبت به یکدیگر در یک نقشه حرارتی ترسیم شده است. سپس نمودار زبری سطح برحسب تأثیرگذارترین ویژگی ترسیم شده است. برای این منظور از کتابخانه‌های Matplotlib، Seaborn و scikit-learn و برنامه‌نویسی پایتون استفاده شده است.

پارامتر شکل هندسی تأثیرگذار بر زبری سطح قطعات چاپ شده به زاویه سطوح چاپ شده، محدود می‌شود. با هدف بررسی زاویه سطح بر زبری قطعات، زبری سطح قطعات چاپ شده برای ۵ زاویه (۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) توسط زبری سنج TR200 شرکت INNOVATEST اندازه‌گیری شده و نمودار زبری قطعات برحسب زاویه سطح آن‌ها تحت پارامترهای ثابت ساخت، ترسیم شده است. مشخصات و پارامترهای انتخابی چاپگر سه‌بعدی FDM مورد استفاده در تولید قطعات در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در مجموعه داده‌های چاپ سه‌بعدی قطعات پلیمری توسط فرآیند FDM

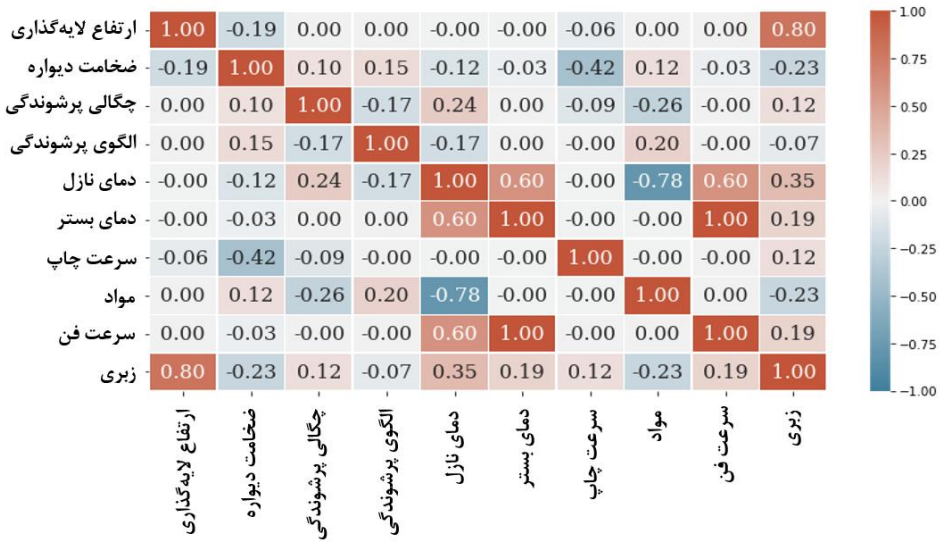
ویژگی‌ها
ارتفاع لایه گذاری
ضخامت دیواره
تراکم داخلی
الگوی پر شوندگی داخلی
دمای نازل
دمای میز ساخت
سرعت چاپ
جنس
درصد فعالیت دمنده
زبری سطح

جدول ۲ مشخصات و پارامترهای انتخابی چاپگر سه‌بعدی FDM مورد استفاده در تولید قطعات با زوایای مختلف

مشخصات و پارامترها	مقدار
مدل چاپگر سه‌بعدی	SIZAN 4 Desktop
قطر نازل	0.5 میلی‌متر
ارتفاع لایه گذاری	0.2 میلی‌متر
سرعت چاپ	60 میلی‌متر/ثانیه
دمای نازل	260 درجه سانتی‌گراد
دمای میز ساخت	100 درجه سانتی‌گراد
ضخامت دیواره	2 میلی‌متر
نسبت تراکم داخلی	100 %
درصد فعالیت دمنده	0 %
جنس	ABS
قطر فیلامنت	1.75 میلی‌متر
شرکت سازنده فیلامنت	YOUSU
زوایای سطح قطعات تولیدی (درجه)	30 - 45 - 60 - 75 - 90

۴- نتایج و بحث

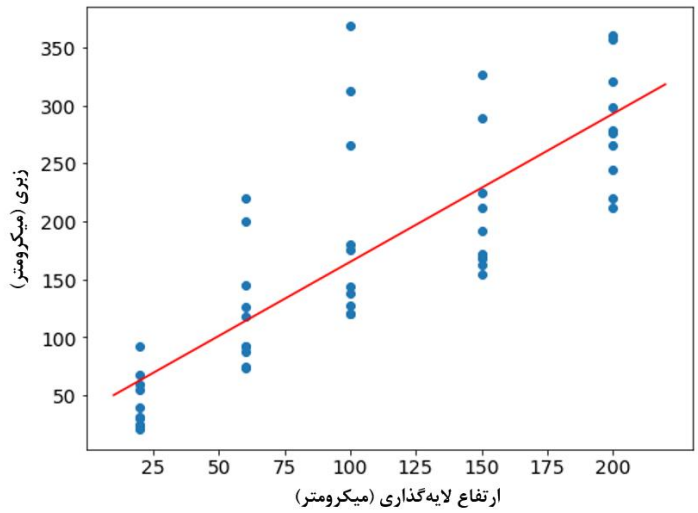
نقشه حرارتی مقدار تأثیرگذاری پارامترهای چاپ سه‌بعدی نسبت به یکدیگر، در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده از این شکل، ارتفاع لایه گذاری بیشترین تأثیر را بر زبری سطح قطعات چاپ سه‌بعدی داشته و پس از آن، دمای نازل تأثیرگذاری قابل توجه‌ای بر زبری سطح دارد. با توجه به اینکه برای هر ماده مصرفی در چاپ سه‌بعدی قطعات، یک محدوده دمای معین وجود دارد، تغییرات دما برای هر ماده زیاد نخواهد بود و در نتیجه می‌توان از تأثیرگذاری دمای نازل بر زبری قطعات تولید شده صرف‌نظر کرد.



شکل ۳ نقشه حرارتی مقدار تأثیرگذاری پارامترهای چاپ سه‌بعدی نسبت به یکدیگر

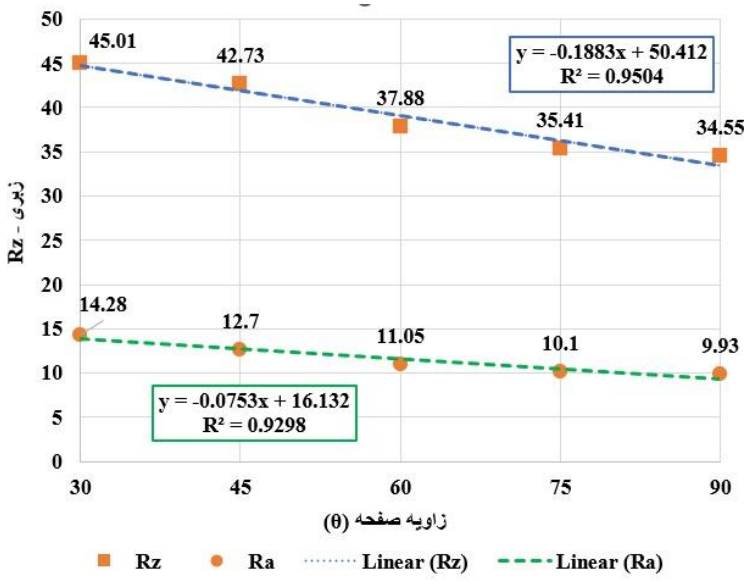
در بخش بعدی با هدف بررسی چگونگی تغییرات زبری سطح قطعات چاپ شده برحسب ارتفاع لایه گذاری، نمودار زبری برحسب ارتفاع لایه گذاری در شکل ۴ ترسیم شده است. رفتار خطی با معادله ۱ بهترین عملکرد در مدل‌سازی زبری برحسب ارتفاع لایه گذاری را نمایش می‌دهند. در این حالت R2 برابر 0.54 خواهد بود.

$$R = 1275.15 \times LH + 37.5 \quad (۱)$$



شکل ۴ زبری سطح قطعات چاپ شده برحسب ارتفاع لایه گذاری

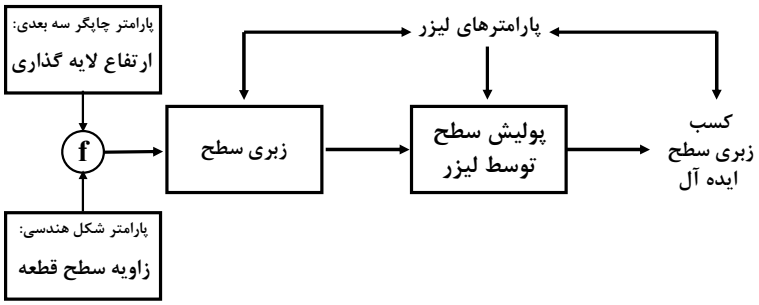
مطابق نتیجه به‌دست آمده از شکل ۳ و ۴، ارتفاع لایه گذاری تأثیرگذارترین پارامتر چاپ بر زبری خواهد بود و با افزایش ارتفاع لایه گذاری، زبری به‌صورت خطی افزایش خواهد یافت. در بخش بعدی و با بررسی رفتار زبری برحسب شکل هندسی (زاویه) قطعات، مقادیر زبری (Ra و Rz) برحسب زاویه سطح قطعات چاپ شده، توسط زبری سنج اندازه‌گیری و در شکل۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵ زبری سطح قطعات چاپ‌شده بر حسب زاویه سطح قطعات

مطابق شکل ۵، زبری رفتاری خطی را برحسب زاویه سطح قطعات از خود نمایش می‌دهد و با افزایش زاویه از ۳۰ تا ۹۰ درجه، زبری به‌صورت خطی کاهش یافته است. معادله‌های خطی حاکم بر رفتار زبری Rz و Ra در شکل ۵ نمایش داده شده است.

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، انتخاب پارامترهای مناسب لیزر در پولیش لیزری قطعات وابسته به زبری قبل از پولیش و زبری مورد انتظار خواهد بود. مطابق تمامی نتایج به‌دست آمده، زبری سطح قطعات چاپ سه‌بعدی شده توسط فرآیند ساخت افزایشی FDM، تابع ارتفاع لایه گذاری و زاویه سطح قطعات تولیدی است. لذا مطابق شکل ۶، می‌توان تابع f که ورودی‌های ارتفاع لایه گذاری و زاویه سطح قطعات را به زبری سطح قطعات تولید شده نسبت می‌دهد، محاسبه کرده و از این تابع جهت انتخاب پارامترهای لیزر در پولیش لیزری بدون اندازه‌گیری زبری سطح قطعات چاپ شده، بهره برد.



شکل ۶ روند نمایی از ارتباط پارامترهای لیزر در پولیش لیزری نسبت به پارامترهای چاپگر سه‌بعدی و شکل هندسی قطعات

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به کمک برنامه‌نویسی به زبان پایتون و ترسیم یک نمودار حرارتی، میزان تأثیر ده پارامتر چاپ بر زبری سطح قطعات تولید شده با فرایند مدل‌سازی رسوبی ذوب شده، به‌صورت مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. با بررسی نقشه حرارتی، ارتفاع لایه گذاری و دمای نازل به‌عنوان مؤثرترین پارامترهای چاپ بر زبری سطح قطعات معرفی گردید. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش،

افزایش ارتفاع لایه گذاری و افزایش دمای نازل سبب افزایش زبری سطح خواهند شد. همچنین در طی این پژوهش روند تغییرات زبری بر اساس زاویه سطح قطعات چاپ شده به‌صورت مجزا مورد مطالعه قرار گرفت. با افزایش زاویه سطح قطعات چاپ شده نسبت به میز ساخت، زبری سطح به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. بنابراین انتخاب ارتفاع لایه گذاری و دمای نازل مناسب برای چاپ سطح قطعات در زوایای مشخص به‌صورت تعاملی سبب کاهش زبری سطح قطعات تولیدی خواهد شد. اما این کار، زمان ساخت و پیچیدگی چاپ قطعات را افزایش خواهد داد. لذا این پژوهش علاوه بر معرفی پولیش لیزر به‌عنوان یک فرایند نوظهور پس پردازش، با ارائه روند نمایی از ارتباط انتخاب پارامترهای لیزر بر اساس پارامترهای چاپ و شکل هندسی، گام مهمی برای افزایش کیفیت سطح قطعات تولید شده با این فرایند برداشته است. درنهایت مطابق نتیجه به‌دست آمده از این پژوهش، تنها با داشتن ارتفاع لایه گذاری و زاویه سطح قطعات، می‌توان به انتخاب بهینه پارامترهای لیزر در پولیش لیزری دست یافت.

فهرست علائم

R	زبری میانگین (µm)
LH	ارتفاع لایه گذاری (µm)

References

[1] Redwood B, Schöffer F, Garret B. The 3D Printing Handbook [Internet]. Vol. 3, 3D Hubs. 3D Hubs; 2017. 304 p.

[2] Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition. Springer; 2015:1–498. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3

[3] El-Katatny I, Masood SH, Morsi YS. Error analysis of FDM fabricated medical replicas. Rapid Prototyping Journal. 2010;16(1):36–43. doi: 10.1108/13552541011011695

[4] Sidambe AT. Biocompatibility of advanced manufactured titanium implants-A review. Materials (Basel). 2014;7(12):8168–88. doi: 10.3390/ma7128168

[5] Singh R, Singh G. Investigations for statistically controlled investment casting solution of FDM-based ABS replicas. Rapid Prototyp Journal. 2014;20(3):215–20. doi: 10.1108/RPJ-03-2013-0036

[6] Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. Materials and Design. 2009;30(10):4243–52. doi: 10.1016/j.matdes.2009.04.030

[7] Melenka GW, Cheung BKO, Schofield JS, Dawson MR, Carey JP. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. Composite Structures. 2016;153:866–75. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.018

[8] Taşcıoğlu E, Kıtay Ö, Keskin AÖ, Kaynak Y. Effect of printing parameters and post-process on surface roughness and dimensional deviation of PLA parts fabricated by extrusion-based 3D printing. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022;44(4):1–14. doi: 10.1007/s40430-022-03429-7

[9] Tyberg J, Bøhn JH. Local adaptive slicing. Rapid Prototyping Journal. 1998;4(3):118–27. doi: 10.1108/135525498102993

[10] Pérez M, Medina-Sánchez G, García-Collado A, Gupta M, Carou D. Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters. Materials (Basel). 2018;11(8):1382. doi: 10.3390/ma11081382

[11] Gade SR, Vagge ST. Process optimization of additively manufactured PLA specimens on surface quality using the Taguchi method. International Journal of Mechanical Engineering.

[12] Galantucci LM, Lavecchia F, Percoco G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2009;58(1):189–92. doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.071

[13] Jin Y, Wan Y, Liu Z. Surface polish of PLA parts in FDM using dichloromethane vapour. InMATEC Web of Conferences 2017 (Vol. 95, p. 05001). EDP Sciences. doi: 10.1051/matecconf/20179505001

[14] Neff C, Trapuzzano M, Crane NB. Impact of vapor polishing on surface quality and mechanical properties of extruded ABS. Rapid Prototyp Journal. 2018;24(2):501–8. doi: 10.1108/RPJ-03-2017-0039

[15] Chen L, Zhang X, Gan S. Effects of laser polishing on surface quality and mechanical properties of PLA parts built by fused deposition modeling. Journal of Applied Polymer Science. 2020;137(3):48288. doi: 10.1002/app.48288
[16] Ahn D, Kweon JH, Kwon S, Song J, Lee S. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. Journal of Materials Processing Technology. 2009;209(15–16):5593–600. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016
[17] Garzon-Hernandez S, Garcia-Gonzalez D, Jérusalem A, Arias A. Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. Materials and Design. 2020;188:108414. doi: 10.1016/j.matdes.2019.108414
[18] Khodaygan S. (2021). Academic presentation, Sharif UT