



DOR:

بررسی پارامترهای موثر بر زبری و استوانه‌ای بودن سوراخ در قطعات PLA ساخته شده چاپ سه‌بعدی با فرآیند مدل‌سازی رسوب ذوبی به کمک روش روبه پاسخ (RSM)

محمد خسروی^{۱*}، سید محمد حسینی^۲ و محمد لاکھی^۳

^۱ استادیار دانشکده مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند ^۳ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴

چکیده

در این تحقیق به بررسی اهمیت نسبی پارامترهای ورودی روی کیفیت سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ محصول تولید شده با استفاده از مدل‌سازی رسوب ذوبی پرداخته شده است. کیفیت سطح و دقت ابعادی قطعه چاپ شده پس از فرآیند چاپ سه‌بعدی، بسیار با اهمیت است. از جمله موارد موثر بر فرآیند چاپ سه‌بعدی، می‌توان به ۳ پارامتر سرعت چاپ، درصد توپری و ضخامت لایه اشاره کرد که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته است. طراحی آزمایش‌ها با روش سطح پاسخ انجام شده و ۵۱ نمونه از جنس پی ال ای چاپ شده است. برای اندازه‌گیری صافی سطح و ابعاد محصول ساخته شده از دستگاه زبری‌سنج و ماشین اندازه‌گیری مختصات استفاده شده است. اساس این بررسی، مقایسه صافی سطح و انحراف از مرکز سوراخ نمونه‌ها جهت یافتن بهینه‌ترین حالت ممکن در پارامترهای مورد بررسی در رسیدن به کیفیت بالاتر است.

بهینه‌ترین انتخاب پارامترها برای کمینه مقدار همزمان زبری سطح (۰/۱۶ میلی‌متر) و ناستوانه‌ای بودن سوراخ (۵/۹۸ میکرون) برای ضخامت لایه ۰/۱ میلی‌متر، سرعت تزریق ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه و درصد توپری ۱۵ درصد در الگوی مثلثی است؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد که ضخامت لایه بیشترین تاثیر را نسبت به سرعت تزریق و درصد توپری در کیفیت سطح داراست.

کلمات کلیدی: نمونه‌سازی سریع؛ چاپگر سه بعدی؛ مدل‌سازی رسوب ذوبی؛ روش سطح پاسخ.

Investigation of Parameters Affecting the Roughness and Cylindricity of Holes in PLA Parts Made of 3D Printing by Fused Deposition Modeling Process Using Response Surface Method

M. Khosravi^{1,*}, S.M. Hosseini², M. Iakhi³

¹ Assis. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ. of Tech., Birjand, Iran.

² M.S. Student, Mech. Eng., Birjand Univ. of Tech., Birjand, Iran. ³ M.S. Graduate, Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran.

Abstract

In this paper, the effects of input parameters on the roughness and cylindricity of a hole were investigated using fused deposition modeling (FDM). The roughness and dimensional accuracy are very important for a 3D printed part. The investigated input parameters are injection speed, solid percentage, and layer thickness. The experiments were designed using the response surface method and 51 PLA samples were printed. To measure the roughness and dimensions of the manufactured products, a roughness-testing machine and a coordinate measuring machine (CMM) were used. The basis of this study is the comparison of roughness and deviation from the center to find the optimal set of the investigated parameters to achieve higher quality. The optimal levels of parameters for the minimum simultaneous roughness (0.016 mm) and cylindricity (5.98 microns) are a layer thickness of 0.1 mm, injection speed of 40 mm/s, and solidity percentage of 15% when the pattern is triangular. The results also suggest that the layer thickness has the strongest effect on the surface quality in comparison with the injection speed and percentage of solidity.

Keywords: Rapid Prototyping; 3D Printer; Fused Deposition Modeling; Response Surface Method.

۱- مقدمه

نمونه‌سازی سریع^۱ به دسته‌ای از فناوری‌های در حال توسعه ساخت قطعات مربوط می‌شود. در نمونه‌سازی سریع فایل طراحی به کمک کامپیوتر^۲ مربوط به قطعه با استفاده از فناوری ساخت افزایشی^۳ یا لایه‌گذاری، به یک مدل فیزیکی تبدیل می‌شود. این نمونه‌ها در نتیجه تعامل و مشارکت بین تولیدکنندگان و مشتریان می‌باشند؛ همچنین این مدل‌های فیزیکی، به فهم و تحلیل مشخصات محصول نهایی کمک می‌کنند. در حال حاضر گرایش صنعت، در جهت ساخت و تولید مدل‌های کاربردی با استفاده از فرآیند نمونه‌سازی سریع است. این فرآیند با نام ساخت و تولید سریع^۴ شناخته می‌شود که به آرامی در حال وارد شدن به چرخه تجاری-سازي است. با استفاده از روش ساخت و تولید سریع، هیچ محدودیتی در شکل یا پیچیدگی قطعه وجود ندارد؛ همچنین امکان سفارشی‌سازی قطعات نیز ممکن شده است [۱].

در حال حاضر اکثر چاپگرهای سه بعدی رومیزی از ای‌بی‌اس^۵ یا پی‌ال‌ای^۶، بعنوان ماده خام ترموپلاستیک استفاده می‌شود. پی‌ال‌ای یک پلاستیک دانه‌ای زیست تخریب‌پذیر هست که در دمای نازل معادل ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و در دمای بستر در نزدیکی دمای اتاق چاپ می‌شود. ای‌بی‌اس یک ترموپلاستیک قوی‌تر است که در دمای نازل حدوداً ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و دمای بستر حدوداً ۸۰ درجه سانتی‌گراد در تجهیزات تجاری قابل چاپ است [۲]. پی‌ال‌ای بسیار مقاوم و نسبت به ای‌بی‌اس صلب‌تر است. محصول چاپ شده با استفاده از پی‌ال‌ای به مراتب شفاف‌تر و براق‌تر از ای‌بی‌اس است و از سویی نسبت به ای‌بی‌اس زمان ماشین‌کاری و پولیش‌کاری بیشتری نیاز دارد. با توجه به دمای ذوب آن که پایین‌تر از ای‌بی‌اس است، استفاده از آن برای قسمت‌هایی توصیه نمی‌شود که دمای بالا دارند. سایر ترموپلاستیک‌ها شامل، الکل پلی‌وینیل، پلی‌کربنات و پلی‌اتیلن با چگالی بالا هستند، اگرچه این مواد به طور گسترده‌ای در تجهیزاتی که بصورت تجاری در دسترس است،

مورد استفاده قرار نمی‌گیرند [۳]. کاهش زمان ساخت و مصرف مواد خام بدون توجه به عملکرد مکانیکی از نگرانی‌های اصلی در بیشتر کاربردهای صنعتی است که بر هزینه تولید و کارکرد محصولات ساخته شده تاثیر می‌گذارد. زمان ساخت را می‌توان به صورت میزان زمان مورد نیاز مدل‌سازی برای ساخت قطعه واقعی در روش مدل‌سازی رسوب ذوبی^۷ تعریف کرد. زمان ساخت در فرآیند مدل‌سازی رسوب ذوبی تا حد زیادی به فاکتورهای متعددی بستگی دارد. در مجموع، مدل‌سازی رسوب ذوبی در مقایسه با فرآیندهای چاپ سه بعدی دیگر مانند، رسوب لیزر انتخابی^۸ و لیتوگرافی سه بعدی^۹ از نقطه نظر زمان ساخت، فرآیندی کندتر است. مصرف ماده خام، میزان ماده استفاده شده سیستم برای ساخت قطعه فیزیکی است. برخلاف سایر فرآیندهای ساخت افزایشی مانند رسوب لیزر انتخابی و لیتوگرافی سه بعدی، مصرف ماده خام و نرخ ته‌نشینی مواد در مدل‌سازی رسوب ذوبی از عوامل اساسی برای کاهش زمان ساخت هستند. نرخ ته‌نشینی مواد اساساً به برخی شرایط ساخت مثل ضخامت لایه و پهنای آن بستگی دارد. در حالی که مشخصات مکانیکی قطعات ساخته شده با مدل‌سازی رسوب ذوبی پایین‌تر از قطعات ساخته شده توسط فرآیندهای ساخت سنتی است. یک روش کاهش زمان ساخت و مصرف مواد خام، بهبود عملکرد مکانیکی از طریق تعدیل‌های مناسب در عوامل فرآیند مدل‌سازی رسوب ذوبی برای تهیه قطعه است [۴].

امروزه صنعت به طور چشم‌گیری از تکنیک‌های نمونه‌سازی سریع از جمله چاپ سه بعدی استفاده می‌کند. ساخت محصولاتی با عملکرد بالا، سبک و دارای استحکام نهایی مناسبی با تکنیک نمونه‌سازی سریع ایجاد می‌شود. چاپ سه بعدی بر خلاف روش‌های تولیدی سنتی با لایه به لایه قرار دادن ماده روی هم مدل سه بعدی را ایجاد می‌کند [۵]. استحکام نمونه چاپی به مقدار زیادی به جرم نمونه بستگی دارد؛ همچنین خواص مکانیکی قطعات چاپ سه بعدی را می‌توان با استفاده از طیف گسترده‌ای از نمونه‌های آزمون کشش مورد بررسی قرار داد [۶]. یکی از محبوب‌ترین

¹ Rapid Prototyping (RP)

² Computer Aided Design (CAD)

³ Additive Manufacturing

⁴ Rapid Manufacturing

⁵ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

⁶ Polylactic Acid (PLA)

⁷ Fused Deposition Modeling (FDM)

⁸ Selective Laser Sintering (SLS)

⁹ Stereo Lithography (SLA)

آن‌ها با روش‌های مختلفی همچون شبکه عصبی ارائه گشته است [۱۴-۱۶].

در تحقیقات دیگری نبی‌پور و همکاران [۱۷]، تاثیر پارامترهای چاپ بر استحکام قطعات کامپوزیتی ساخته شده توسط روش FDM را بررسی کردند. در این تحقیق تاثیر متغیرهایی همچون، قطر نازل، دمای نازل، الگوی چاپ و ضخامت لایه بر استحکام قطعه توسط روش تاگوچی بررسی شد؛ همچنین گل‌محمدی و خدایگان [۱۸] در تحقیقی به منظور تعیین جهت‌گیری بهینه چاپ سه‌بعدی برای کمینه‌کردن زمان ساخت و زبری سطح از روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی و مبتنی بر طراحی آزمایش استفاده کردند. در این پژوهش هر دو روش بهینه‌سازی جهت‌گیری بهینه‌یسانی را ارائه دادند، هر چند که روش تاگوچی روشی مناسب‌تر ارزیابی شد.

مرادی و همکاران [۱۹ و ۲۰] نیز، تحقیقاتی در مورد تاثیر پارامترهایی همچون قدرت لیزر، سرعت برش لیزر و موقعیت نقطه کانونی در پس‌پردازش برشکاری لیزری قطعات چاپ شده PLA به روش FDM بر ویژگی‌های هندسی، عرض بریدگی، زاویه مخروطی شدن و نسبت عرض بریدگی انجام داده‌اند. در پژوهش‌های دیگری نیز، مرادی و همکاران [۲۱ و ۲۲] تاثیر پارامترهای چاپی را بر استحکام قطعات چاپ شده با استفاده از فرآیند چاپ FDM توسط طراحی آزمایشات ارزیابی کردند.

با توجه به بررسی گسترده پژوهش‌ها می‌توان نشان داد که تلاش‌های زیادی برای مطالعه اثر برخی پارامترهای عملیاتی مدل‌سازی رسوب ذوبی روی کیفیت ساخت، مشخصات مکانیکی، صافی سطح و دقت ابعادی صورت گرفته است. علیرغم این هنوز کمبودهای مشخصی در پژوهش‌ها وجود دارد. بررسی‌ها نشان داده است که علاوه بر جنس قطعه، پارامترهای چاپگر سه‌بعدی تاثیر بسزایی در استحکام و دقت قطعه نهایی دارند که می‌توان به اصلی‌ترین این پارامترها یعنی سرعت چاپ، چگالی ماده پرینت گرفته شده و ضخامت لایه‌ها اشاره کرد. در این تحقیق به بررسی تاثیر پارامترهای فوق روی صافی سطح و استوانه‌ای بودن قطعات ساخته شده از مدل‌سازی رسوب ذوبی پرداخته شده است. طراحی آزمایش‌ها با روش سطح پاسخ انجام شده و از هر الگو (مثلی، لانه‌زنبوی، ضربدری) ۱۷ نمونه از جنس پی‌ال‌ای

فرآیندهای چاپ سه‌بعدی تولید مدل انعطاف‌پذیر و دارای استحکام مناسب است. با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی خواص مکانیکی نمونه، محصولات تولید شده به بهبود و بهینه‌سازی دست می‌یابد. این هدف با نشان دادن اینکه چگونه طراحی نمونه می‌تواند مقاومت مدل چاپ شده در برابر استحکام کششی، فشاری و شکست تولید کرد [۵].

چندین مطالعه برای بررسی اثر تغییر پارامترهای فرآیند مدل‌سازی رسوب ذوبی به‌منظور بهینه‌سازی مشخصات کیفی مانند ویژگی مکانیکی، زمان ساخت و صافی سطح قطعات صورت گرفته است؛ اما پیشرفت‌ها، به دلیل ماهیت پیچیده فرآیند مدل‌سازی رسوب ذوبی و پارامترهای متناقض برای فرآیند، چشم‌گیر نبوده است. تریمورتولو و همکاران [۷] مدل‌هایی تجربی برای بررسی ساخت بهینه در زمینه سختی سطحی و زمان ساخت تهیه کردند. اگر چه مدل‌ها نتوانست برای پیش‌بینی سایر پارامترهای فرآیند به کار روند. نانچاریا و همکاران [۸]، از طراحی‌های آماری برای بررسی اثر شرایط فرآیند روی صحت اندازه استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند، ارتفاع، یکی از تاثیرگذارترین پارامترها برای دقت قطعات ساخته شده با مدل‌سازی رسوب ذوبی است، اگرچه تنظیمات فرآیند بهینه تعیین نشد. مسعود و همکاران [۹]، اثر شرایط عملیاتی مدل‌سازی رسوب ذوبی را روی تاب ارتجاعی قطعات ساخته شده از پلی کربنات را ارزیابی کردند. ساهو و همکاران [۱۰] در مطالعه تازه‌تر، اثر شرایط ساخت روی دقت نمونه اولیه ساخته شده با استفاده از مدل فازی را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد، اختلاف درصدی ابعاد بین مقادیر برآورد شده و مقادیر واقعی با استفاده از شرایط بهینه کمتر از ۴/۵ درصد بود. کومار و رگالا [۱۱] از طرح فاکتوریل برای بررسی اثر پارامترها روی زمان ساخت استفاده کردند. مطالعه دیگری توسط نانچاریا و همکاران [۱۲] انجام شد که روابط بین شرایط ساخت و زمان تولید با استفاده از آرایه‌های تاگوچی تعیین شود. در ادامه رایگانی و اونوبولو [۱۳]، مطالعه‌ای برای تعیین مشخصات و بهینه‌سازی شرایط کاری مدل‌سازی رسوب ذوبی در عملکرد مکانیکی با استفاده از طراحی آماری انجام دادند. اخیرا نیز مطالعات مختلفی جهت بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند چاپ بر خصوصیات مکانیکی و کیفیت قطعه و بهینه‌سازی

داد. در روش سطح پاسخ فرض می‌شود که خطاها تصادفی هستند.

در روش سطح پاسخ همگرایی به سمت عنصر بهینه است؛ زیرا آنها اثرات عوامل بی‌نظمی را کاهش می‌دهند. در طرح‌های رویه پاسخ ساخت مدل‌های رویه پاسخ یک فرآیند تکراری است. به محض اینکه یک مدل تقریبی به دست آمد، توسط روش نیکویی برازش، مورد آزمون قرار می‌گیرد که آیا جواب رضایت بخش است یا خیر، اگر جواب تایید نشود، تخمین فرآیند دوباره شروع می‌شود و آزمایشات بیشتری انجام می‌شود. در طراحی آزمایش‌ها، هدف، شناسایی و تحلیل متغیرهای موثر بر خروجی‌ها با کمترین تعداد آزمایش است. روش‌شناسی سطح پاسخ، روشی ریاضی-آماري برای بهینه‌سازی خروجی‌های آزمایش‌ها است. این روش با کشف میزان بهینه هر یک از متغیرهای طراحی به بهترین سطح پاسخ دست می‌یابد [۲۱]. محاسبه سطح پاسخ مطابق رابطه (۱) است.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

۳- آزمایشات تجربی

طراحی آزمایشات این پژوهش با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱ انجام شده است. طراحی آزمایشات دیزاین اکسپرت یکی از ابزارهای مهم آماری بوده که به طور گسترده برای بالا بردن کیفیت محصول به کار می‌رود. در این روش عواملی که روی کیفیت محصول تاثیرگذار هستند، شناسایی شده و با تغییر دادن اندازه عامل‌ها در یک محیط کنترل شده و با بررسی پاسخ‌های متفاوت، بهترین پاسخ را می‌توان انتخاب کرد. طراحی آزمایشات همانند طراحی محصول بوده که در آن هدف باید کاملاً تعریف شده و مشخص باشد. در این فرآیند متغیرهای اصلی که بر مشخصه کیفی مورد نظر اثر می‌گذارند، مشخص شده و با بکارگیری دیزاین اکسپرت می‌توان عامل‌های ورودی قابل کنترل را تغییر داده و اثرات آنها را روی پارامترهای محصول خروجی ارزیابی کرد.

ساخته شده است. آزمایش‌های صافی سطح با دستگاه زبری‌سنج و استوانه‌ای بودن قطر داخلی سوراخ ایجاد شده روی قطعه با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات اندازه‌گیری شد. در نهایت مدل‌سازی و بهینه‌سازی با پارامترهای سرعت چاپ، چگالی ماده و ضخامت لایه‌ها انجام شده است.

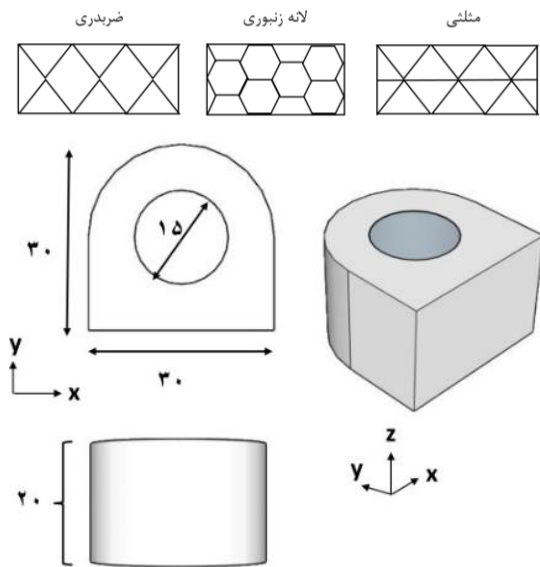
۲- روش سطح پاسخ

هنگامی که نسبت متغیرهای مهمی که بر خروجی فرآیند اثر داشته مشخص گردید، نیاز به تعیین طرح یا مدلی خواهد بود که بتواند رابطه بین متغیرهای ورودی و مشخصات کیفیت خروجی را توضیح دهد. یکی از روش‌های آماری قابل استفاده جهت مشخص کردن چنین مدل‌هایی شامل تجزیه و تحلیل رگرسیون است. زمانی که متغیرهای مهم شناسایی شده و ارتباط موجود بین متغیرهای مهم و مدل خروجی فرآیند مشخص شود، از روش کنترل فرآیند آماری می‌توان حین تولید جهت نظارت بر فرآیند به طور موثر استفاده کرد.

روش‌هایی نظیر نمودارهای کنترل را می‌تواند جهت بررسی خروجی فرآیند و مشخص نمودن زمان نیاز به ایجاد تغییر در فرآیند به منظور برگرداندن آن به حالت تحت کنترل استفاده کرد. مدل‌هایی که ورودی‌های تاثیرگذار و مهم را به خروجی فرآیند مرتبط ساخته و کمک می‌کنند تا نوع و اندازه تغییرات مورد نیاز تعیین گردند. روش سطح پاسخ یک مجموعه از روش‌های آماری برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های رویه پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) است.

در اصل روش سطح پاسخ برای مدل پاسخ‌های تجربی توسعه داده شد و سپس به سمت مدل کردن آزمایشات عددی سوق پیدا کرد. در آزمایشات فیزیکی، اشتباه در آزمایشات می‌تواند به صورت‌های مختلفی رخ دهد؛ برای مثال ارزیابی خطاها هنگامی که بی‌نظمی یا خطا بر اثر یک همگرایی اشتباه باشد (مثلاً خواب آلوده بودن آزمایشگر یا خستگی او و یا ناهمگن بودن مواد آزمایشی) و یا اینکه یک پدیده فیزیکی پیوسته را به صورت گسسته تعریف کنیم و این در حالی است که نتوان در واقعیت چنین کاری را انجام

¹ Design Expert



شکل ۲- الگوهای چاپی و مدل ارزیابی شده

در کنار پارامترهای کنترلی در تحقیق حاضر، سایر پارامترهای ثابت در فرآیند چاپ سه بعدی در جدول ۱ لیست شده‌اند. پارامترهای گزارش شده در جدول، پارامترهای ثابت برای تمامی حالات چاپ هستند.

همچنین قابل توجه است که فایل STL قطعه کار توسط نرم افزار SOLIDWORK به عنوان ورودی به چاپگر سه بعدی داده شده و برای پرینت قطعات از دستگاه SAZA با دقت ۱۰۰ میکرون مطابق شکل ۳ استفاده شده است.

طراحی آزمایش‌ها و ادامه تجزیه و تحلیل داده‌ها به کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت انجام شده است. قدم اول در روش طراحی آزمایش‌ها، تعیین محدوده پارامترهای مورد بررسی است. پارامترها و سطوح آن‌ها که بر عملکرد فرآیند تاثیر می‌گذارند، در جدول ۲ و در جدول ۳ طراحی آزمایشات، نشان داده شده است.

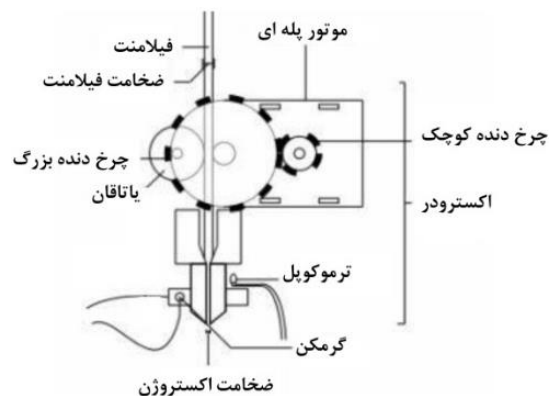
برای اندازه‌گیری قطر داخلی و استوانه‌ای بودن سوراخ از ماشین اندازه‌گیری مختصات^۱ به مدل CE-450 با دقت اسمی یک میکرون استفاده شده است و در شکل ۴ مشاهده می‌شود. برای اندازه‌گیری صافی سطح نیز از دستگاه زبری سنج Taylor Hobson استفاده شده و در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

^۱ Coordinate Measuring Machine (CMM)

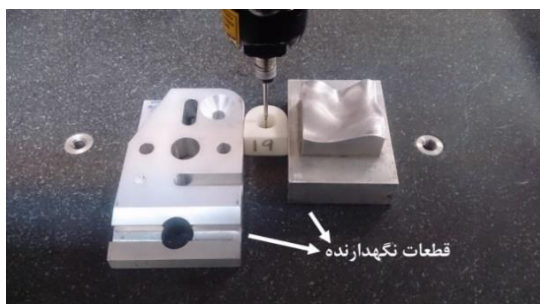
آزمایش‌هایی که به صورت آماری مطرح گردیده‌اند، می‌توانند به مقدار قابل توجهی از میزان تغییرات در مشخصات کیفی بکاهد و همچنین سطوح متغییرهای قابل کنترل که سبب بهینه‌سازی عملکرد فرآیند گردیده را تعیین نمایند. طراحی آزمایشات یکی از عمده‌ترین ابزارهای کنترل کیفیت قبل از تولید است که غالباً در فعالیت‌های توسعه‌ای و در مراحل اولیه تولید به کار می‌روند؛ در حالی که روش‌های کنترل فرآیند حین تولید در زمان تولید محصول استفاده می‌گردند.

روش سطح پاسخ مورد استفاده در این تحقیق شامل، ۱۷ مورد آزمایش بر اساس سه پارامتر ورودی و دو پارامتر خروجی در سه سطح برای آزمایشات تعیین شده است. پارامترهای ورودی شامل، ضخامت لایه فیلامنت، سرعت تزریق، درصد توپری و پارامترهای خروجی شامل صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ است. در این تحقیق از نمونه‌هایی از جنس فیلامنت پی ال ای استفاده گردید که توسط فرآیند مدل‌سازی رسوب ذوبی چاپ شده است. شکل شماتیک دستگاه و نقشه قطعه کار (در ابعاد میلی‌متر) به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

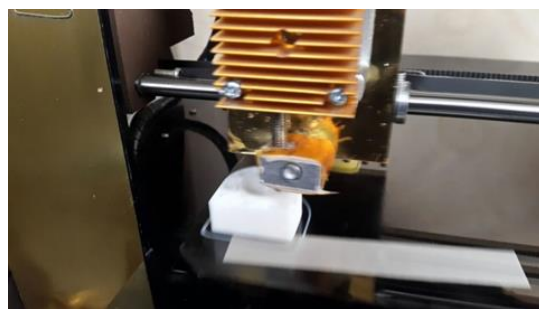
همچنین شایان ذکر است که برای چاپ قطعات نمونه از سه الگوی چاپ مثلثی، لانه زنبوری و ضربدری مطابق شکل ۲ استفاده شده است. این الگوها، بخصوص الگوی لانه زنبوری، از جمله الگوهای بسیار متداول برای چاپ سه بعدی قطعات است که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱- نمای شماتیک فرایند رسوب ذوبی



شکل ۴- اندازه گیری قطر داخلی با ماشین اندازه گیری مختصات



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) چاپ سه بعدی نمونه‌ها با فرآیند مدل سازی رسوب ذوبی و ب) نمونه‌های چاپ شده

جدول ۳- طراحی آزمایش‌ها

شماره آزمایش	ضخامت لایه	سرعت تزریق	درصد توپری
۱	0	0	1
۲	-1	0	0
۳	0	0	-1
۴	1	-1	-1
۵	0	0	0
۶	-1	1	1
۷	1	1	-1
۸	0	0	0
۹	0	1	0
۱۰	1	1	1
۱۱	-1	1	-1
۱۲	1	-1	1
۱۳	0	0	0
۱۴	-1	-1	1
۱۵	1	0	0
۱۶	-1	-1	-1
۱۷	0	-1	0

جدول ۱- پارامترهای ثابت در فرآیند چاپ

پارامتر ثابت	واحد	مقدار
قطر نازل	mm	۰/۵
عرض اکستروود	mm	۰/۶
دمای نازل	°C	۲۱۰
جهت گیری ساخت	°	۴۵

جدول ۲- عوامل کنترل و سطوح آن‌ها

پارامترهای کنترلی	سطوح		
	-۱	۰	+۱
ضخامت لایه برحسب میلی‌متر	۰/۱	۰/۲	۰/۳
سرعت تزریق برحسب میلی‌متر بر ثانیه	۴۰	۵۰	۶۰
درصد توپری	۱۵	۲۰	۲۵

۴- مدل سازی

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای تجزیه و تحلیل نتایج تجربی کاربرد دارد. این روش در طراحی، بهبود و فرمول‌بندی محصولات جدید نیز بسیار کاربردی است. گسترده‌ترین کاربرد روش سطح پاسخ در پاسخ در زمینه‌های صنعتی است. از روش سطح پاسخ در شرایطی استفاده می‌شود که متغیرهای ورودی زیادی به عملکرد و ویژگی‌های کیفیت محصول (پاسخ‌ها) در فرآیند تأثیر دارند. پس از انجام آزمایشات تجربی، پاسخ‌ها در نرم‌افزار

در جدول‌های ۴ تا ۶ نتایج آزمایشات تجربی و پاسخ‌های به دست آمده از روش سطح پاسخ برای سه الگوی مختلف لانه‌زنبوری، مثلثی و ضربدری ارائه شده است.



شکل ۵- آزمایش زبری سنجی با دستگاه Taylor Hobson

جدول ۵- پاسخ‌های به دست آمده در الگوی مثلثی

شماره قطعه	سطوح کنترلی			پاسخ‌ها	
	ضخامت لایه	سرعت تزریق	درصد توپری	صافی سطح	نااستوانه‌ای سوراخ
۱	۰/۲	۵۰	۲۰	0.011	9.8
۲	۰/۱	۶۰	۱۵	0.023	6.18
۳	۰/۳	۴۰	۱۵	0.054	7.46
۴	۰/۲	۵۰	۲۵	0.034	14.2
۵	۰/۱	۶۰	۲۵	0.064	14.6
۶	۰/۳	۴۰	۲۵	0.039	14
۷	۰/۳	۵۰	۲۰	0.016	9.8
۸	۰/۱	۴۰	۲۵	0.015	13.4
۹	۰/۲	۵۰	۲۰	0.014	9.82
۱۰	۰/۲	۵۰	۲۰	0.016	9.85
۱۱	۰/۲	۴۰	۲۰	0.012	9/72
۱۲	۰/۳	۶۰	۲۵	0.034	14.8
۱۳	۰/۱	۵۰	۲۰	0.015	9.84
۱۴	۰/۲	۵۰	۱۵	0.028	6.4
۱۵	۰/۳	۶۰	۱۵	0.035	6
۱۶	۰/۲	۶۰	۲۰	0.021	9.91
۱۷	۰/۱	۴۰	۱۵	0.016	5.98

جدول ۴- پاسخ‌های به دست آمده برای الگوی لانه‌زنبوری

شماره قطعه	سطوح کنترلی			پاسخ‌ها	
	ضخامت لایه	سرعت تزریق	درصد توپری	صافی سطح	نااستوانه‌ای سوراخ
۱	۰/۲	۵۰	۲۵	0.037	14.2
۲	۰/۱	۵۰	۲۰	0.05	12.4
۳	۰/۲	۵۰	۱۵	0.01	6.24
۴	۰/۳	۴۰	۱۵	0.094	7.51
۵	۰/۲	۵۰	۲۰	0.055	12.24
۶	۰/۱	۶۰	۲۵	0.031	13.29
۷	۰/۳	۶۰	۱۵	0.096	5.33
۸	۰/۲	۵۰	۲۰	0.05	12.26
۹	۰/۲	۶۰	۲۰	0.045	10.2
۱۰	۰/۳	۶۰	۲۵	0.02	12.61
۱۱	۰/۱	۶۰	۱۵	0.107	6.01
۱۲	۰/۳	۴۰	۲۵	0.029	15.47
۱۳	۰/۲	۵۰	۲۰	0.053	12.3
۱۴	۰/۱	۴۰	۲۵	0.105	7.57
۱۵	۰/۳	۵۰	۲۰	0.014	11.72
۱۶	۰/۱	۴۰	۱۵	0.04	16.15
۱۷	۰/۲	۴۰	۲۰	0.043	12.38

$$R_a = +38.38151 - 96.77359 * LT - 0.062365 * V - 1.39304 * SP + 1.8975 * LT * V + 4.135 * LT * SP - 0.00155 * V * SP - 147.25352 * LT^2 - 0.004025 * V^2 + 0.014699 * SP^2 \quad (۲)$$

$$Runout = +0.377127 + 1.52035 * LT - 0.015686 * V - 0.006886 * SP - 0.019 * LT * V - 0.0325 * LT * SP - (7.7927 * 10^{-19}) * V * SP - 0.11338 * LT^2 + 0.000194 * V^2 + 0.000295 * SP^2 \quad (۳)$$

(۲) صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی مثلثی

$$R_a = +0.014109 + 0.0045 * LT + 0.0041 * V + 0.0048 * SP - 0.01 * LT * V - 0.007 * LT * SP + 0.007 * V * SP + 0.004227 * LT^2 + 0.005227 * V^2 + 0.010727 * SP^2 \quad (۴)$$

$$Runout = +9.82855 + 0.206 * LT + 0.093 * V + 3.914 * SP - 0.2575 * LT * V - 0.0625 * LT * SP + 0.4075 * V * SP + 0.023636 * LT^2 + 0.018636 * V^2 + 0.42364 * SP^2 \quad (۵)$$

(۳) صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی ضربدری

$$R_a = +6.52546 + 38.11296 * LT - 0.149776 * V - 0.097882 * SP + 0.06 * LT * V - 0.34 * LT * SP - 0.0044 * V * SP + 13.26761 * LT^2 + 0.002277 * V^2 + 0.009307 * SP^2 \quad (۶)$$

$$Runout = +0.270124 - 0.78221 * LT$$

جدول ۶- پاسخ‌های به دست آمده در الگوی ضربدری

شماره قطعه	سطوح کنترلی			پاسخ‌ها	
	ضخامت لایه	سرعت تزریق	درصد توپری	صافی سطح	نااستوانه‌ای سوراخ
۱	۰/۲	۵۰	۲۵	0.023	13.95
۲	۰/۲	۵۰	۱۵	0.012	6.25
۳	۰/۲	۵۰	۲۰	0.014	6.1
۴	۰/۲	۵۰	۲۰	0.017	10.2
۵	۰/۲	۴۰	۲۰	0.022	10.06
۶	۰/۱	۶۰	۱۵	0.012	5.9
۷	۰/۳	۴۰	۱۵	0.024	6.22
۸	۰/۱	۶۰	۱۵	0.012	5.9
۹	۰/۳	۵۰	۲۰	0.015	10.18
۱۰	۰/۱	۶۰	۲۵	0.004	14.6
۱۱	۰/۳	۶۰	۲۵	0.036	13.4
۱۲	۰/۲	۶۰	۲۰	0.011	10.33
۱۳	۰/۱	۵۰	۲۰	0.019	10.22
۱۴	۰/۱	۴۰	۱۵	0.055	5.86
۱۵	۰/۲	۵۰	۲۰	0.058	10.24
۱۶	۰/۱	۴۰	۲۵	0.009	13.8
۱۷	۰/۳	۴۰	۲۵	0.046	14

دیزاین اکسپرت مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. سپس با استفاده از روش سطح پاسخ مدلی برای پاسخ‌ها در الگوهای ساخت متفاوت ارائه شده‌اند که در آنها LT، V و SP به ترتیب ضخامت لایه، سرعت تزریق و درصد توپری در فرآیند چاپ است.

(۱) صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی لانه زنبوری

آن نسبت به مقدار بهینه، گزارش شده است. مطابق جدول ۶، به ترتیب مدل‌های ریاضی حالات مثلثی، ضربدری و لانه-زنبوری نسبت به حالت بهینه کمترین خطای نسبی را دارا هستند.

۶- بحث و نتایج

در هر یک از جدول‌های ۳ تا ۵، پاسخ‌های صافی سطح و ناستوانه‌ای بودن سوراخ در روش سطح پاسخ با سه سطح کنترلی درصد توپری، سرعت تزریق و ضخامت‌های چاپ برای ۱۷ نمونه ساخته شده گزارش گردیده است. این جدول‌ها نشان می‌دهد که الگوهای مختلف چاپ توسط چاپگر سه‌بعدی تاثیر بسزایی بر پارامترهای کنترلی و به تبع آن پاسخ‌های روش سطح پاسخ دارد. با توجه به این جدول‌ها، بیشینه مقدار صافی سطح برای الگوی زنبوری با ضخامت لایه ۰/۱، سرعت تزریق ۶۰ و درصد توپری ۱۵ به مقدار ۰/۱۰۷ و کمینه آن برای الگوی ضربدری با ضخامت لایه ۰/۱، سرعت تزریق ۶۰ و درصد توپری ۲۵ به مقدار ۰/۰۰۴ است.

همچنین بیشینه مقدار استوانه‌ای بودن سوراخ برای الگوی زنبوری با ضخامت لایه ۰/۱، سرعت تزریق ۴۰ و درصد توپری ۱۵ به مقدار ۱۶/۱۵ و کمینه آن برای الگوی زنبوری با ضخامت لایه ۰/۳، سرعت تزریق ۶۰ و درصد توپری ۱۵ به مقدار ۵/۳۳ است.

با استفاده از تحلیل واریانس، شکل‌های ۶ تا ۹ اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری و همچنین اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق چاپ به ترتیب بر صافی سطح و استوانه-ای بودن سوراخ را در الگوی چاپ مثلثی نشان می‌دهند.

شکل ۶ و ۷ نشان می‌دهد که افزایش ضخامت لایه در مقادیر توپری یا سرعت تزریق مختلف تاثیر بسزایی بر صافی سطح قطعه دارد، چنانکه افزایش آن سبب بالا رفتن مقادیر Ra می‌شود. این نتیجه در حالی است که مقدار تاثیر توپری و سرعت تزریق در مقایسه با ضخامت لایه چاپ، چشم گیر نیست. البته با این حال با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ افزایش توپری و سرعت تزریق در ضخامت لایه ثابت منجر به افزایش مقدار صافی سطح می‌شود.

مطابق شکل‌های ۸ و ۹ نیز مشاهده می‌شود که رفتار استوانه بودن سوراخ نسبت به ضخامت لایه چاپ در مقادیر توپری یا سرعت تزریق مختلف رفتاری سهوی داشته است؛

$$\begin{aligned}
 & -0.00299 * V - 0.008178 * SP \\
 & +0.005 * LT * V + 0.025 * LT * SP \\
 & +(6.5 * 10^{-5}) * V * SP + 0.088028 * LT^2 \\
 & -(1.19718 * 10^{-6}) * V^2 \\
 & +(1.5 * 10^{-5}) * SP^2 \quad (7)
 \end{aligned}$$

۵- بهینه‌سازی

روش سطح پاسخ قادر است با کمترین داده‌ها، مقدار بهینه چندین متغیر را بصورت همزمان تعیین کند. در این روش، با برازش مدل مناسب بر داده‌های بدست آمده، منحنی‌های سطح پاسخ بدست می‌آید.

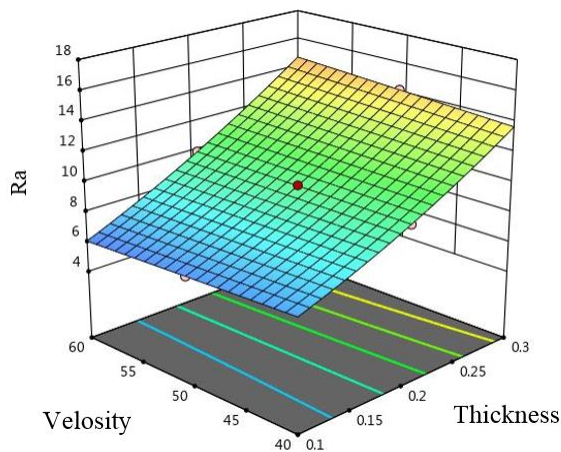
پس از انجام آزمایش‌ها و مدل‌سازی پاسخ‌های به دست آمده از آن‌ها، با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه‌ترین پارامترهای ساخت به دست آمده است. بهترین حالت ممکن زمانی اتفاق می‌افتد که پاسخ‌های صافی سطح و ناستوانه‌ای بودن سوراخ کمترین مقدار را داشته باشد.

بهترین حالت در ضخامت لایه ۰/۱ میلی‌متر، سرعت تزریق ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه و درصد توپری ۱۵ درصد در الگوی مثلثی است که همزمان کمترین مقادیر زبری سطح، ۰/۱۶ میلی‌متر و ناستوانه‌ای بودن سوراخ ۵/۹۸ میکرون را شامل می‌شود.

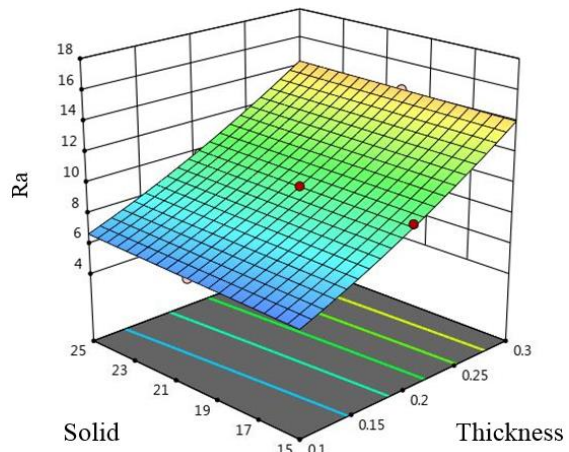
در جدول ۷ مقایسه‌ای برای زبری سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ در حالت بهینه بین مدل‌های ریاضی مختلف ارائه شده (ضخامت لایه ۰/۱ میلی‌متر، سرعت تزریق ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه و درصد توپری ۱۵ درصد) و درصد خطای

جدول ۷- درصد خطای نسبی مدل

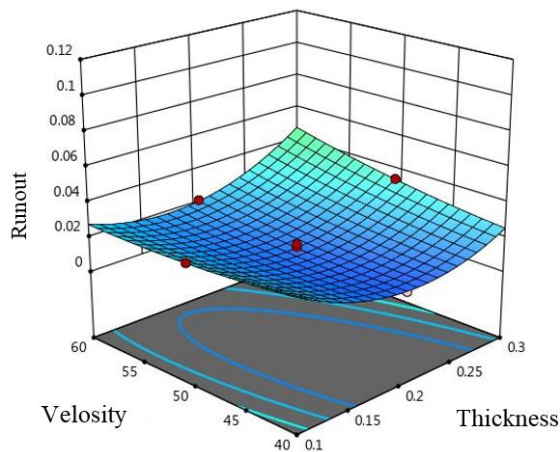
الگوی چاپ	مدل ریاضی		درصد خطا	
	زبری سطح	استوانه‌ای بودن	زبری سطح	استوانه‌ای بودن
لانه‌زنبوری	۰/۰۴۹	۱۳/۵۷	۶۷/۵۶	۵۵/۹۳
ضربدری	۰/۰۴۸	۸/۴۸	۶۷	۲۹/۴۶
مثلثی	۰/۰۱۳	۶/۲	۱۴/۶۵	۳/۴۴



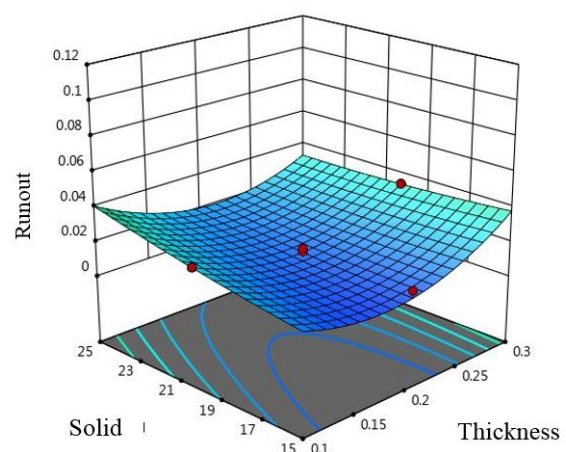
شکل ۷- اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق بر صافی سطح در الگوی مثلثی



شکل ۶- اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری بر صافی سطح در الگوی مثلثی



شکل ۹- اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق بر استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی مثلثی



شکل ۸- اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری بر استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی مثلثی

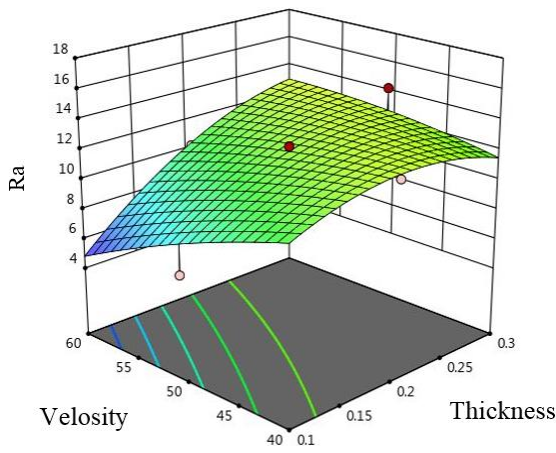
تزریق بالاتر، بیشتر است و برای مقادیر پایین آن‌ها تاثیر ضخامت لایه بر صافی سطح کاهش می‌یابد.

البته مقدار تاثیر توپری و سرعت تزریق با ضخامت لایه چاپ ثابت متفاوت است و در حقیقت اثر افزایش این دو پارامتر برای ضخامت لایه کم کاهشی و برای ضخامت لایه زیاد، افزایشی است.

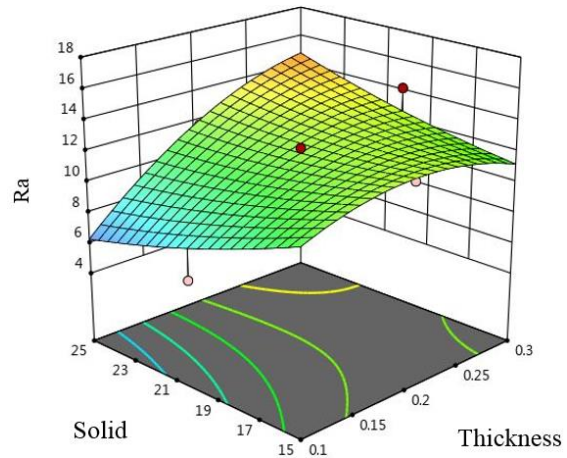
مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نیز مشاهده می‌شود که استوانه بودن سوراخ در الگوی لانه زنبوری با افزایش ضخامت لایه چاپ در مقادیر توپری یا سرعت تزریق مختلف کاهش می‌یابد.

به طوری که کمینه مقدار استوانه‌ای بودن در ضخامت ۰/۲ ایجاد می‌شود. البته قابل توجه است که مجدداً همانند صافی سطح، افزایش توپری و سرعت تزریق سبب افزایش استوانه‌ای بودن سوراخ می‌شود؛ همچنین در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نیز اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری و همچنین اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق چاپ به ترتیب بر صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ را در الگوی چاپ زنبوری نشان می‌دهند.

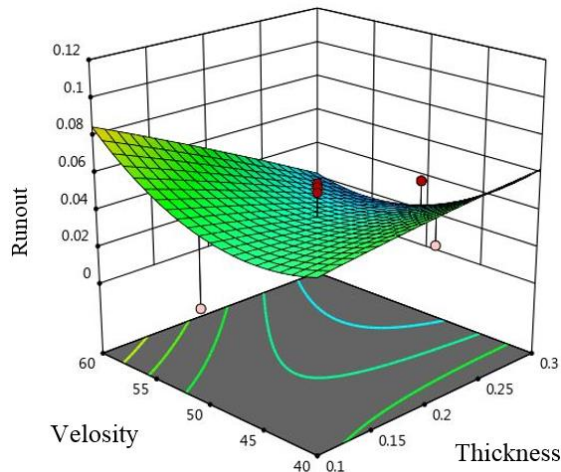
بر اساس شکل ۱۰ و ۱۱، افزایش ضخامت لایه در مقادیر توپری یا سرعت تزریق مختلف سبب افزایش صافی سطح قطعه می‌شود. هر چند که این تاثیر برای توپری و سرعت



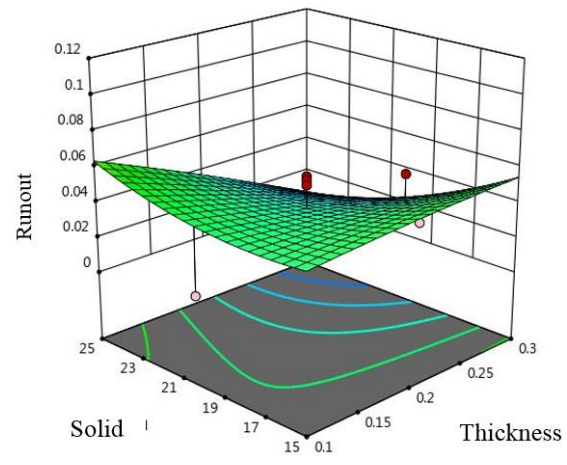
شکل ۱۱- اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق بر صافی سطح در الگوی لانه زنبوری



شکل ۱۰- اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری بر صافی سطح در الگوی لانه زنبوری



شکل ۱۳- اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق بر استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی لانه زنبوری



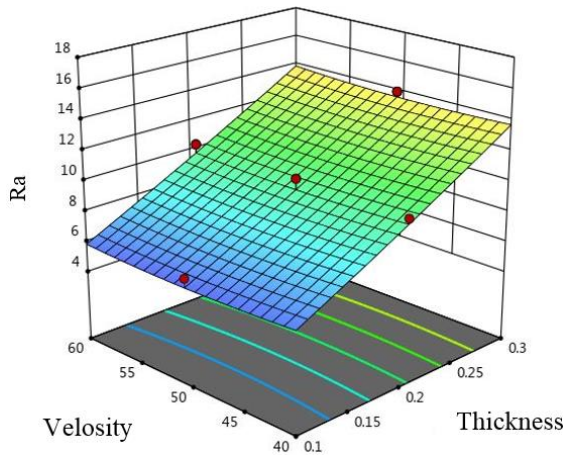
شکل ۱۲- اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری بر استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی لانه زنبوری

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نیز به ترتیب نمودارهای مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط روش سطح پاسخ برای صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ قطعه چاپ شده به روش رسوبی ذوبی گزارش شده است.

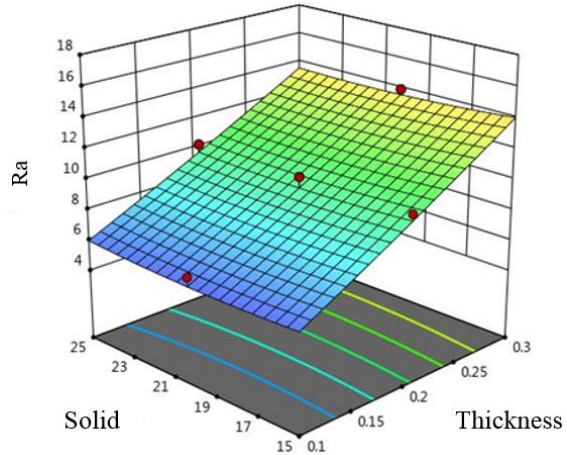
همچنین، در جدول ۸ و ۹ نیز تحلیل ANOVA پاسخ‌های صافی سطح و ناستوانه‌ای بودن سوراخ برای حالت بهینه نشان داده شده است. در این جدول مقادیری همچون مجموع مربعات و مربع میانگین برای پاسخ‌های صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ ارائه گردیده است.

در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نیز اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری و همچنین اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق چاپ به ترتیب بر صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ را در الگوی چاپ ضربدری نشان داده شده‌اند.

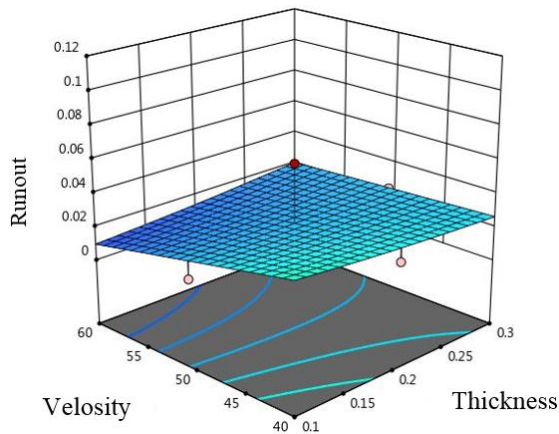
قابل توجه است که در تمامی این شکل‌ها، اثر متقابل ضخامت لایه، توپری و سرعت تزریق بر صافی سطح و استوانه‌ای بودن سوراخ برای الگوی ضربدری همانند الگوی مثلثی است.



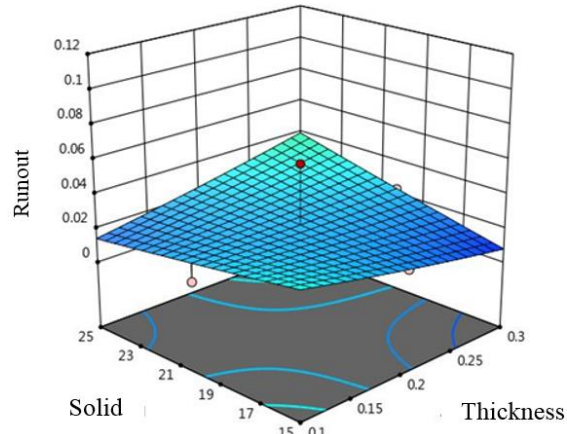
شکل ۱۵- اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق بر صافی سطح در الگوی ضربدری



شکل ۱۴- اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری بر صافی سطح در الگوی ضربدری



شکل ۱۷- اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تزریق بر استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی ضربدری



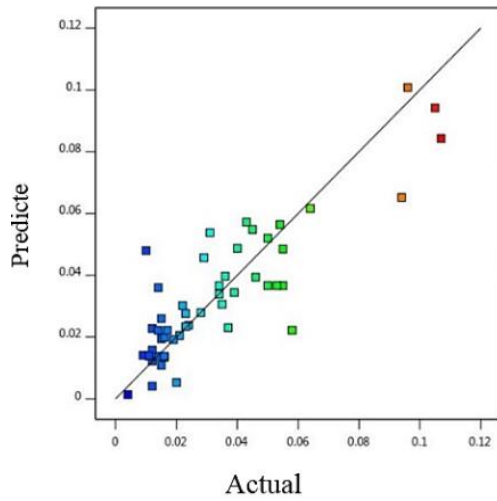
شکل ۱۶- اثر متقابل ضخامت لایه و درصد توپری بر استوانه‌ای بودن سوراخ در الگوی ضربدری

استدلال فیزیکی مربوطه به صورت جداگانه صورت پذیرفته است و همچنین تنظیمات بهینه پارامترها، برای بدست آوردن کیفیت سطح نهایی بهتر، دقت ابعادی بالاتر، پیشنهاد شده‌اند. به طور خلاصه نتایج نشان می‌دهند که:

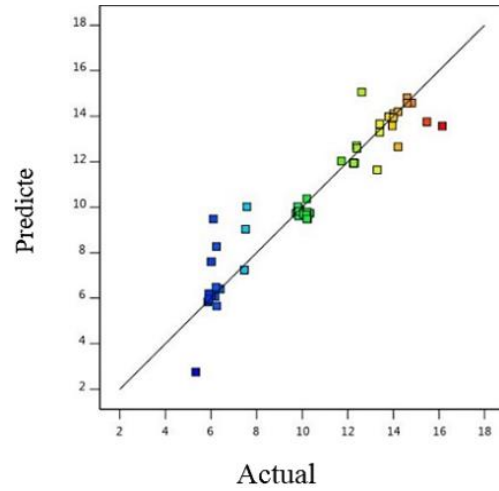
- الگوی ساخت ضربدری در رسیدن به کیفیت سطح بالاتر موثر بوده است. چنانکه کمینه مقدار زبری سطح با ضخامت لایه ۰/۱ میلی‌متر، سرعت تزریق ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه و درصد توپری ۲۵ درصد در این الگو بدست آمده است.

۷- نتیجه‌گیری

با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت طراحی آزمایشات انجام شده و توسط دستگاه SAZA 3D نمونه‌ها چاپ شده است. صافی سطح و استوانه‌ای بودن قطر سوراخ به ترتیب با استفاده از زبری سنج و ماشین اندازه‌گیری مختصات اندازه‌گیری شد. مدل ریاضی برای تمام پاسخ‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ طراحی شده است. تحلیل‌های موجود در این تحقیق بر اساس محدوده و سطوح پارامترهای مشخص شده (سرعت چاپ، چگالی ماده چاپ شده و ضخامت لایه-ها) انجام گرفت. تحلیل داده‌ها، بررسی تاثیر پارامترها و چگونگی تغییر هر کدام از پاسخ‌ها در آزمایشات به همراه



شکل ۱۹- نمودار مقدار واقعی و پیش‌بینی شده برای استوانه‌های بودن سوراخ



شکل ۱۸- نمودار مقدار واقعی و پیش‌بینی شده برای صافی سطح

جدول ۸- آنالیز ANOVA برای ناستوانه‌های بودن

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value
Model	156.61	9	17.40	502.14	<0.0001
TL	0.42	1	0.42	12.255	0.0057
V	0.086	1	0.086	2.50	0.1452
SP	153.19	1	153.19	4420.75	<0.0001
Residual	0.35	10	0.035		
Lack of fit	0.35	5	0.069		
Pure error	0.000	5	0.000		
Cor total	156.95	19			

جدول ۹- آنالیز ANOVA برای صافی سطح

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value
Model	3.72e-3	9	4.14e-4	12.12	0.0003
TL	2.02e-4	1	2.02e-4	5.93	0.0352
V	1.68e-4	1	1.68e-4	4.92	0.0509
SP	2.3e-4	1	2.3e-4	6.74	0.0267
Residual	3.42e-4	10	3.42e-4		
Lack of fit	3.42e-4	5	6.83e-5		
Pure error	0.000	5	0.000		
Cor total	4.07e-3	19			

- dimensional accuracy of FDM components. *Int J Emerg Technol* 1(2): 106-111.
- [9] Masood SH, Mau K, Song WQ (2010) Tensile properties of processed FDM polycarbonate material. *Mater Sci Forum* 654: 2556-2559.
- [10] Sahu RK, Mahapatra SS, Sood AK (2013) A study on dimensional accuracy of fused deposition modeling (FDM) processed parts using fuzzy logic. *J Manuf Sci Prod* 13(3): 183-197.
- [11] Gurralla PK, Regalla SP (2012) Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM). *Appl Mech Mater* 110: 2245-2251.
- [12] Nancharaiah T (2011) Optimization of process parameters in FDM process using design of experiments. *Int J Emerg Technol* 2(1): 100-102.
- [13] Rayegani F, Onwubolu GC (2014) Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *Int J Adv Des Manuf Technol* 73(1-4): 509-519.
- [14] Sheoran AJ, Kumar H (2020) Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. *Mater Today: Proc* 21: 1659-1672.
- [15] Yadav D, Chhabra D, Gupta RK, Phogat A, Ahlawat A (2020) Modeling and analysis of significant process parameters of FDM 3D printer using ANFIS. *Mater Today: Proc* 21: 1592-1604.
- [16] Yadav D, Chhabra D, Garg RK, Ahlawat A, Phogat A (2020) Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network. *Mater Today: Proc* 21: 1583-1591.
- [17] Nabipour M, Behraves AH, Akhoundi B (2017) Effect of printing parameters on mechanical strength of polymer-metal composites printed via FDM 3D printer. *Modares Mechanical Engineering* 17(1): 145-150. (In Persian)
- [18] Golmohammadi AH, Khodaygan S (2018) Comparison of analytical and experiment design-based optimization methods to determine the optimum part build orientation in rapid prototyping processes. *Modares Mechanical Engineering* 18(3): 115-125. (In Persian)
- [19] Moradi M, Falavandi H, Karami Moghadam M, Meiabadi MSM (2020) Experimental investigation of laser cutting post process of additive manufactured parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D printers using FDM method. *Modares Mechanical Engineering* 20(4): 999-1009. (In Persian)
- در ضخامت لایه ۰/۳ میلی‌متر، سرعت تزریق ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه و درصد توپری ۱۵ درصد با الگوی چاپ لانه‌زنبوری کمینه مقدار ناستوانه‌ای بودن سوراخ قطعه چاپ شده استخراج گردید.
 - با استفاده از آنالیز واریانس مشخص شد که ضخامت لایه، بیشتر از سرعت تزریق و درصد توپری در اندازه‌گیری صافی‌سطح تاثیرگذار بوده و کیفیت سطح به دست آمده در ضخامت لایه کمتر، بالاتر است.
 - بهینه‌ترین حالت در ضخامت لایه ۰/۱ میلی‌متر، سرعت تزریق ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه و درصد توپری ۱۵ درصد در الگوی مثلثی است که همزمان کمترین مقادیر زبری سطح، ۰/۰۱۶ میلی‌متر و ناستوانه‌ای بودن سوراخ ۵/۹۸ میکرون را شامل می‌شود.
- ### ۸- مراجع
- [1] Arumaikkannu G, Anil kumar N, Saravanan R (2008) study on the influence of rapid prototyping parameters on product quality in 3d printing. *India*.
- [2] Stephens B, Azimi P, El Orch Z, Ramos T (2013) Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmos Environ* 79: 334-339.
- [3] Postiglione G, Natale G, Griffini G, Levi M, Turri S (2015) Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling. *Composites, Part A* 76: 110-114.
- [4] Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL (2016) Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design. *Appl Math Model* 40(23-24): 10052-10073.
- [5] Khan S, Fayazbakhsh K, Fawaz Z, Nik MA (2018) Curvilinear variable stiffness 3D printing technology for improved open-hole tensile strength. *Addit Manuf* 24: 378-385.
- [6] Tanikella NG, Wittbrodt B, Pearce JM (2017) Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Addit Manuf* 15: 40-47.
- [7] Thrimurthulu K, Pandey PM, Reddy NV (2004) Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *Int J Mach Tool Manufact* 44(6): 585-594.
- [8] Nancharaiah T, Raju DR, Raju VR (2010) An experimental investigation on surface quality and

- bronze poly lactic acid composites. *J Compos Sci* 4(1): 17.
- [22] Moradi M, Meiabadi S, Kaplan A (2019) 3D printed parts with honeycomb internal pattern by fused deposition modelling; experimental characterization and production optimization. *Met Mater Int* 25(5): 1312-1325.
- [20] Moradi M, Karami Moghadam M, Shamsborhan M, Bodaghi M, Falavandi H (2020) Post-processing of FDM 3d-printed polylactic acid parts by laser beam cutting. *Polymers* 12(3): 550.
- [21] Moradi M, Karami Moghadam M, Shamsborhan M, Bodaghi M (2020) The synergic effects of FDM 3D printing parameters on mechanical behaviors of