



بررسی اثر جهت ساخت بر کیفیت سطح و زمان ساخت در فناوری مدل سازی رسوب ذوب شده

محمدجواد هوشمند¹، سعید منصور^{2*}

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استاد، مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی 4413-15875، mj.hooshmand@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 تیر 1399

داوری اولیه: 21 مهر 1399

پذیرش: 14 آبان 1399

کلیدواژگان:

مدل سازی رسوب ذوب شده

روش شناسی سطح پاسخ

جهت ساخت

زبری سطح

زمان ساخت

پیشرفت هایی که در فناوری ساخت افزودنی به دست آمده، منجر به بهبود کیفیت سطح و زمان ساخت قطعات در این فناوری شده است. هدف این مقاله بهینه سازی هم زمان دو متغیر پاسخ زمان ساخت و کیفیت سطح در فناوری مدل سازی رسوب ذوب شده می باشد. به همین منظور، برای یافتن بهترین مقادیر پارامترهای فرایند که در این مقاله جهت ساخت به همراه پهنای مسیر، ضخامت لایه، درصد پرکردن و پهنای مسیر می باشد، از طراحی آزمایش ها و رویکرد روش شناسی سطح پاسخ استفاده گردید. 50 آزمایش برای دو شکل استوانه و قطعه ای پیچیده تر به نام تری دی بنچی با استفاده از طراحی مرکب مرکزی چرخشی انجام شد. هر کدام از پارامترهای فرایند در دو سطح مورد بررسی قرار گرفتند که روش بهینه سازی نوینی به نام روش مبتنی بر پس آینه استفاده شد تا مقادیر بهینه برای متغیرهای پاسخ حاصل شوند. نتایج نشان داد که نه تنها جهت ساخت و ضخامت لایه بر روی هر دو متغیر پاسخ اثر زیادی دارند بلکه زمان ساخت به پارامترهای پهنای مسیر و درصد پرکردن نیز وابسته است. این مطالعه نشان داد که مقادیر بهینه حاصل شده برای پارامترهای فرایند می توانند منجر به ساخت قطعاتی در فناوری مدل سازی رسوب ذوب شده با کیفیتی بالا در کمترین زمان ساخت ممکن شوند که مقادیر بهینه به دست آمده برابرند با جهت ساخت 0° ، پهنای مسیر $0/61$ میلی متر، ضخامت لایه $0/22$ میلی متر، درصد پرکردن 20% و زاویه مسیر 0° .

Investigating the effect of build orientation on surface roughness and build time using Fused Deposition Modelling

Mohammad Javad Hooshmand, Saeid Mansour*

Department of Industrial Engineering and Managements Systems, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 4413-15875, Tehran, Iran, mj.hooshmand@aut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 1 June 2020

First Decision: 12 October 2020

Accepted: 4 November 2020

Keywords:

Fused Deposition Modeling (FDM)

Response Surface Methodology

(RSM)

Build Orientation

Surface Roughness

Build Time

Abstract

The advancement of AM technologies has resulted in producing parts of high quality and reduced manufacturing time. The purpose of this study is to simultaneously optimize the values of two response variables, build time and surface roughness. In order to achieve the best values for build orientation and other process parameters including raster width, layer thickness, infill percentage, and raster angle, the effects of process parameters and response variables were adopted by the Design of Experiments approach to develop empirical models using Response Surface Methodology. The experimental parts of this research were conducted using an inexpensive and locally assembled FDM machine. Fifty runs for two different geometries, namely cylinder and 3DBenchy, were performed using the Rotatable Central Composite Design, and each process parameters was investigated in two levels in order to develop empirical models. Also, a novel optimization method, namely, the Posterior-Based method, was accomplished to find the best values for the response variables. The results demonstrated that not only build orientation and layer thickness have notable effects on both response variables but also build time is dependent on raster width and infill percentage. This study shows that through adopting the developed model by considering the process parameters, parts of high quality (improved surface finish) with reduced build time could be produced by FDM technology. Optimum process parameters found to be build direction of 0° , raster width of 0.61 mm, layer thickness of 0.22 mm, infill percentage of 20% , and raster angle of 0° .

1- مقدمه

توسط چاک هال² به دنیا معرفی شد که توانست در سال 1986

اولین شرکت در این زمینه را نیز پایه گذاری کند. در ابتدا هدف

فناوری نمونه سازی سریع (RP)¹ در اواسط دهه 1980 میلادی

² Chuck Hull

¹ Rapid Prototyping

Please cite this article using:

M. J. Hooshmand, S. Mansour, Investigating the effect of build orientation on surface roughness and build time using Fused Deposition Modelling, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 37- 53, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تلاش آن‌ها برای بهبود سرعت ساخت قطعات به جهت کسب رضایت مشتری می‌باشد [4، 6]. در این فناوری برنامه‌ریزی فرایند شامل تعیین جهت ساخت و ساختار ساپورت و برنامه‌ریزی مسیر لایه‌گذاری و برش می‌باشد که به صورت مستقیم بر زمان ساخت اثر می‌گذارند [7].

انتخاب جهت صحیح برای ساخت قطعات در FDM یکی از مهم‌ترین عواملی است که نه تنها بر کیفیت و خواص مکانیکی بلکه بر زمان ساخت نیز اثرگذار است [6، 7]. جهت ساخت بسته به هدف اپراتور ممکن است برای بهبود کیفیت سطح، زمان ساخت و یا خواص مکانیکی قطعات FDM انتخاب شود. در صورتیکه هدف اپراتور بهبود هم‌زمان این متغیرها باشد، می‌توان با توسعه مدل‌های ریاضی و بهینه‌سازی چندهدفه به این هدف دست یافت [7].

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که تلاش‌های زیادی برای بهبود زبری سطح، کاهش هزینه با کم کردن زمان ساخت، خواص مکانیکی بهتر و دقت ابعاد بالاتر با استفاده از بهینه‌سازی ریاضی در FDM صورت پذیرفته است. برخی از این تحقیقات با استفاده از بررسی‌های تجربی و یا الگوریتم‌های تکاملی¹² سعی در افزایش کیفیت ساخت کرده‌اند [8، 9]. اثر پلکانی که در سطوح شیب‌دار و منحنی به وجود می‌آید به علت ضخامت هر لایه می‌باشد که از عمده‌ترین دلیل برای زبری سطح بالا در قطعات ساخته شده در FDM می‌باشد [10، 11]. برخی مطالعات اذعان داشتند که هرچه ضخامت لایه مقدار پایین‌تری داشته باشد، کیفیت سطح بهتری هم حاصل می‌شود [12، 13]. با این وجود، برخی از مطالعات پیشین به این نتیجه رسیدند که در FDM با کاهش ضخامت لایه، زمان ساخت افزایش می‌یابد [14-16].

پارامتر فرایند دیگری که بر زبری سطح قطعات FDM اثر چشمگیری دارد، جهت ساخت می‌باشد زیرا آن سطوحی که اثر پلکانی در آن مشهود می‌شود توسط جهت ساخت تعیین می‌گردند. انتخاب جهت ساخت مناسب، بر روی تعداد لایه‌ها و متعاقباً بر زمان ساخت و هزینه تأثیر می‌گذارد [17-19]. هم‌چنین برخی از کارهای گذشته اثر جهت ساخت بر زمان ساخت را در FDM مورد بررسی قرار دادند [15، 20، 21]. آن‌ها نشان دادند که جهت‌های ساخت متفاوت منجر به تفاوت در زمان ساخت می‌شود [22-25].

مرور ادبیات صورت گرفته نشان داد که ضخامت لایه، جهت ساخت، پهنای مسیر و غیره بر روی متغیرهایی نظیر زبری

از این فناوری ساخت نمونه بود ولی چند سال بعد اعضای کمیته‌ی انجمن تست و مواد آمریکا (ASTM)¹ تصمیم به استفاده از واژه‌ی ساخت افزودنی (AM)² کردند چراکه قطعات تمام‌شده این فناوری به کیفیت مطلوبی رسیده بودند و همچنین لازم به استفاده از واژه‌ای بود که ساختار لایه‌لایه‌ای فرایند را بیان کند [1].

ASTM ساخت افزودنی را بدین صورت تعریف نموده است [2]:

"فرایندی است از به هم پیوستن مواد به صورت لایه به لایه به منظور ایجاد قطعاتی فیزیکی که این قطعات از داده‌های طرح سه‌بعدی ایجاد می‌شوند."

طبقه‌بندی‌های مختلفی از فناوری‌های تولید افزایشی صورت گرفته است ولی می‌توان از دسته‌بندی ایجاد شده توسط ASTM به عنوان معتبرترین طبقه‌بندی نام برد که به هفت گروه فتوپلیمریزاسیون مخزنی³، پاشش مواد⁴، پاشش چسب⁵، ذوب با انرژی مستقیم⁶، گداخت بستر پودر⁷، لایه‌های ورقه‌ای⁸ و اکستروژن کردن مواد⁹، تقسیم‌بندی شده‌اند [3]. امروزه متداول‌ترین روش مورد استفاده در AM، از رسته‌ی اکستروژن کردن مواد و به نام فناوری مدل‌سازی رسوب ذوب شده (FDM)¹⁰ می‌باشد. این فناوری در سال 1988 توسط کرامپ¹¹ توسعه یافت. FDM توانایی ساخت قطعاتی از جنس کامپوزیت و پلیمر را دارد که از مزایای این فناوری می‌توان به مقرون‌به‌صرفه بودن، غیر سمی بودن و سازگار با محیط‌زیست و هم‌چنین استفاده از دو نازل به عنوان ایجاد مواد برای قطعه و ساپورت اشاره کرد [4].

AM به منظور ساخت قطعاتی پیچیده و نوین که در روش‌های سنتی غیرقابل انجام است، فرصت‌های زیادی را برای تولیدکنندگان ایجاد می‌کند. با این وجود موانع متعددی سر راه آن‌ها وجود دارد [5]. از مهم‌ترین مشکلات این صنعت می‌توان به کیفیت قطعات اشاره کرد، به نحوی که هم تولیدکنندگان دستگاه‌های AM و هم شرکت‌هایی که به صورت خدماتی از این دستگاه‌ها استفاده می‌کنند را به چالش کشیده است. مورد دیگری که می‌تواند بر بازدهی این شرکت‌ها اثر شگرفی بگذارد،

¹ American Society of Test and Material

² Additive Manufacturing

³ Vat photopolymerization

⁴ Material jetting

⁵ Binder jetting

⁶ Directed energy deposition

⁷ Powder bed fusion

⁸ Sheet lamination

⁹ Material extrusion

¹⁰ Fused Deposition Modelling

¹¹ Crump

¹² Evolutionary Algorithms

میلی متر در نظر گرفته شدند که در شکل 1 قابل مشاهده می باشد.

نرم افزار برشی که به منظور تنظیم پارامترهای فرایند استفاده شد، نرم افزار سیمپلی فای تری دی⁶ است که به وسیله آن از هر هر شکل 50 نمونه توسط دستگاه FDM سیزان 1 ساخته شد. به دلیل اینکه دستگاه تولید داخل است و دستگاه ارزان قیمتی می باشد، در مقایسه با نمونه های مشابه خارجی آن هزینه های بسیار کمتری را در بر می گیرد.

زمان ساخت در این تحقیق، زمانی است که دستگاه FDM لایه گذاری مواد را انجام می دهد. هر چند نرم افزار برش زمان ساخت هر نمونه را می تواند تخمین بزند ولی برای ارزیابی دقیق تر این متغیر پاسخ از کرنومتر استفاده شده است. متغیر پاسخ دیگر یعنی زبری سطح از روش غیر تماسی جدیدی اندازه گیری شده است که می تواند با استفاده از نماهای دوبعدی به دست آمده از روی قطعه، زبری سطح قطعات را اندازه گیری نماید [28]. به جهت اندازه گیری دقیق تر زبری سطح قطعات، از هر نمونه دو عکس گرفته شد که در ادامه با استفاده کد ایجاد شده در نرم افزار متلب⁷، مقادیر زبری سطح به دست آمدند. به صورت کلی مراحل که در این تحقیق طی شده است در شکل 2 نمایش داده شده اند.

2-2- انتخاب پارامترهای فرایند

بر طبق مطالب بیان شده در [20] پارامترهای فرایند در فناوری FDM به چهار نوع هندسی، مواد، عملیات و بر اساس مدل دسته بندی می شوند. همان گونه که در مرور ادبیات مشاهده شد شکاف هوا از مهم ترین پارامترهای برای دو متغیر پاسخ مدنظر می باشد ولی نرم افزار برشی که در این مقاله استفاده شد، قابلیت تنظیم این پارامتر فرایند را ندارد؛ از این رو، پارامتر مشابه دیگری به نام درصد پر کردن به منظور حذف این محدودیت انتخاب شد.

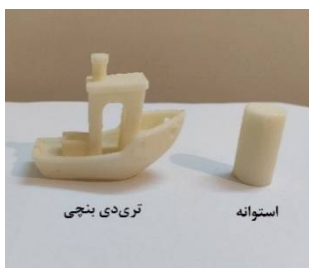


Fig. 1 Two different shapes used in this research

شکل 1 دو شکل مورد بررسی در این تحقیق

سطح، زمان ساخت، حجم مواد، حجم ساپورت و دقت ابعاد اثرگذار است. این مطالعات به این نتیجه رسیدند که جهت ساخت در فناوری AM اثر زیادی بر زمان ساخت و زبری سطح دارد. اگرچه تعدادی از محققان به بررسی اثر جهت ساخت بر زمان ساخت و زبری سطح پرداختند ولی مطالعات اندکی اثر جهت ساخت بر این دو متغیر را به صورت هم زمان، مورد بررسی قرار دادند [9, 13, 26]. البته در [16] به هدف کمینه کردن زمان ساخت قطعات ساخته شده در FDM و با در نظر داشتن جهت ساخت به عنوان متغیر تصمیم، زبری سطح را به عنوان محدودیت مسئله برگزیدند. با این وجود، این مقاله با نگاهی دقیق تر به بررسی هم زمان دو متغیر پاسخ زمان ساخت و زبری سطح از طریق بهینه سازی با روشی نوین پرداخته است.

بنابراین، هدف اصلی این مقاله بررسی اثر جهت ساخت بر کیفیت سطح و زمان ساخت قطعات ساخته شده در FDM به صورت هم زمان می باشد که بدین منظور از طراحی آزمایش ها (DoE)¹ برای توسعه مدل های تجربی استفاده شد. با توجه به کارهای پیشین، جهت ساخت، پهنای مسیر، ضخامت لایه، درصد پر کردن و زاویه مسیر به عنوان پارامترهای فرایند انتخاب شدند. نکته ای که در این مقاله حائز اهمیت است این است که تاکنون اثرات این پارامترهای فرایند به طور هم زمان بر روی زمان ساخت و کیفیت سطح در فناوری FDM مورد مطالعه قرار نگرفته اند.

2- ابزار تحقیق

2-1- مواد و تجهیزات

در این مطالعه، برای هر دو قسمت ساپورت و قطعه اصلی نمونه هایی از جنس آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)² پلاس ساخته شد. به علت خواص مکانیکی بالا، مقرون به صرفه و در دسترس بودن ABS پلاس، این ماده اولیه یکی از رایج ترین مواد مورد استفاده در FDM می باشد [6].

دو شکل هندسی استوانه و تری دی بنچی³ در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفتند که استوانه در نرم افزار اسکچ آپ⁴ و بر مبنای مدل سازی هندسی/ساختاری جامدات (CGS)⁵ طراحی شده [27] و تری دی بنچی به منظور بررسی اثر جهت ساخت بر متغیرهای پاسخ در شکل های پیچیده فناوری FDM استفاده شده است. ابعاد نمونه های ساخته شده برای استوانه و تری دی بنچی به ترتیب برابر با $15 \times 15 \times 30$ و $54 \times 27 \times 9 \times 43 \times 2$

¹ Design of Experiments

² Acrylonitrile Butadiene Styrene

³ 3DBenchy

⁴ SketchUp Pro 2018 V 18

⁵ Constructive Solid Geometry

⁶ Simplify3D V 4.0.1

⁷ MATLAB

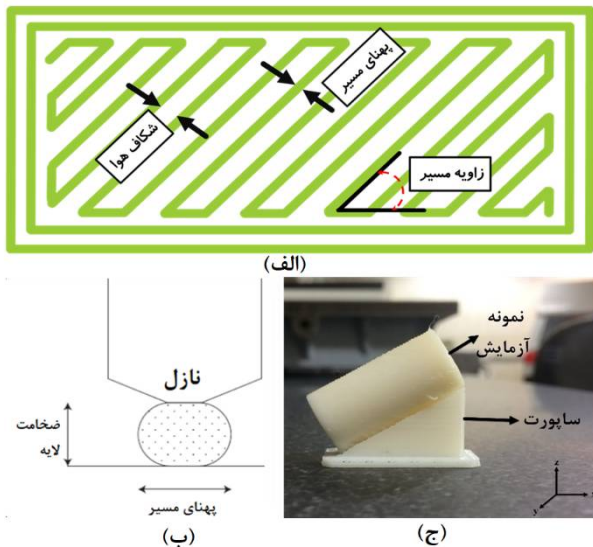


Fig. 3 a) Air gap, extrusion width, and raster angle, b) The difference between layer thickness and extrusion width in FDM, c) An example of build orientation of 60° toward the z-axis

شکل 3 الف) پهناي مسير، شکاف هوا و زاويه مسير، ب) تفاوت بين ضخامت لايه و پهناي مسير در FDM، ج) نمونه ساخته شده در زاويه 60 درجه نسبت به محور Z

Table 1 Fixed factors and their levels

مقدار	پارامتر
1	تعداد مسيرهای پيرامون قطعه
بله	استفاده از دامن
بله	استفاده از پايه
خطوط مستقيم	الگوی مسير داخل قطعه
50	درصد پرکردن ساپورت
2 ميلي متر	قطر ستون ساپورت
40°	حداکثر زاويه آویزان بودن
95°c	دمای کف
220°c	دمای نازل
20 ميلي متر بر ثانيه	سرعت لايه گذاری
30 ميلي متر بر ثانيه	سرعت برگرداندن مواد
0/15 ميلي متر	فاصله ي بين ساپورت و قطعه
0/4 ميلي متر	قطر نازل

2-3- روش شناسی تحقیق

با در نظر گرفتن مطالعات پیشین و اطلاعات واقع در جدول 2 [29]، روش شناسی سطح پاسخ (RSM)¹ در مقایسه با سایر رویکردها مزایای بیشتری به منظور بررسی اثر پارامترهای فرایند بر متغیرهای پاسخ در FDM دارد چراکه این روش قادر است در مواقعی که داده‌ی کمی در دسترس است مسائل غیرخطی و چندهدفه را به خوبی بهینه کند.

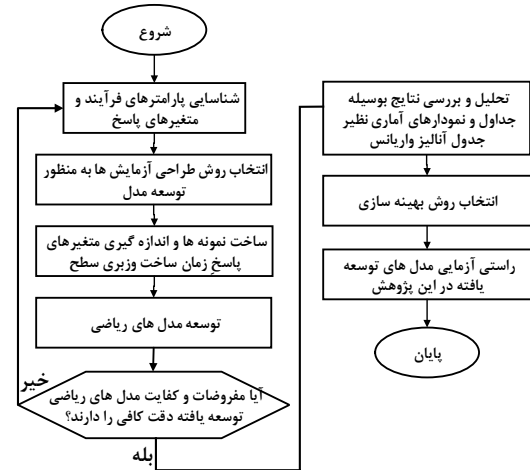


Fig. 2 Experimental procedure flowchart to optimize response variables
شکل 2 فلوچارت روش شناسی استفاده شده در این تحقیق

مطالعات پیشین نشان دادند که پنج پارامتر اثر به سزایی بر روی زمان ساخت و زبری سطح در فناوری FDM دارند. پهناي مسير، ضخامت لايه، درصد پرکردن و زاويه مسير در دسته‌ی بر اساس مدل و جهت ساخت در دسته‌ی هندسی قرار می‌گیرند [20]. این پارامترهای فرایند در شکل 3 نشان داده شده‌اند و تعاریف آن‌ها به صورت زیر می‌باشد:

- پهناي مسير به کلفتی مواد اولیه ذوب شده در مسير لايه گذاری می‌گویند که به اندازه‌ی قطر سر نازل بستگی دارد.
- ضخامت لايه یا ارتفاع لايه، ارتفاع هر لايه‌ای که از نازل بیرون می‌آید را مشخص می‌کند.
- درصد پرکردن به درصدی از مسيرهای لايه گذاری شده درون قطعه گفته می‌شود که توسط نازل‌ها به وجود می‌آید.
- زاويه مسير زاويه به وجود آمده توسط مسيرهای ایجاد شده در درون قطعه نسبت به محور X را نشان می‌دهد که برای لايه‌های متوالی و یکی پس از دیگری اعمال می‌شود و در شکل 3 الف) قابل مشاهده است.

جهت ساخت زاويه‌ای است که اپراتور با توجه به هدف ساخت قطعه اعم از کاهش زمان ساخت، افزایش خواص مکانیکی و کیفیت سطح، کاهش مقدار ساپورت و غیره به قطعه در داخل پلتفرم ساخت می‌دهد. این جهت می‌تواند زاويه ایجاد شده نسبت به محورهای X، Y و Z باشد که در شکل 3 ج) نشان داده شده است.

دیگر پارامترهای فرایند که در این مقاله مقادیر آن‌ها ثابت در نظر گرفته شده در جدول 1 آمده است. این مقادیر بر اساس نظر خبره و تجربه انتخاب گردیدند.

¹ Response Surface Methodology

Table 2 The comparison of mathematical methods used to build orientation in FDM

جدول 2 مقایسه روش های ریاضی استفاده شده برای بهینه سازی جهت ساخت در فناوری FDM با در نظر گرفتن متغیرهای پاسخ زمان ساخت و زبری سطح

روش		قابلیت	
روش شناسی سطح پاسخ	شبکه عصبی مصنوعی	ژنتیک	تاگوچی
دارد	دارد	دارد	ندارد
گسترده	گسترده	اندک	گسترده
منظم	منظم یا غیرمنظم	منظم یا غیرمنظم	منظم یا غیرمنظم
کوتاه	طولانی	بسیار طولانی	کوتاه
بسیار زیاد	بسیار زیاد	زیاد	کم
دارد	دارد	دارد	ندارد
دارد	دارد	ندارد	ندارد
کم	زیاد	زیاد	متوسط
توسط مدل	توسط مدل	مستقیم	مستقیم
دارد	ندارد	ندارد	دارد

$$\alpha = \sqrt[4]{n_F} \quad (1)$$

از آنجایی که این تحقیق از طراحی فاکتوریل کامل برای به دست آوردن مدلی دقیق استفاده کرده است، مقدار n_F در رابطه (1) برابر با 32 قرار داده شد که در نتیجه مقدار α برابر با 2/378 می گردد. حداقل تعداد نقاط مرکزی در RCCD باید بین 3 تا 5 نقطه باشد [30، 31] ولی این مطالعه به منظور افزایش دقت پیش بینی مدل های تجربی از 8 نقطه مرکزی استفاده کرده است. در نهایت با استفاده از نرم افزار آماری دیزاین اکسپرت⁴، 50 آزمایش به هدف یافتن اثرات پنج پارامتر فرایند مدنظر بر زمان ساخت و زبری سطح نمونه های استوانه و تری دی بنچی طراحی شدند که سطوح پارامترهای فرایند در جدول 3 قابل مشاهده است. نتایج آزمایش های صورت گرفته به منظور دستیابی به مقادیر متغیرهای پاسخ برای دو شکل استوانه و تری دی بنچی، به ترتیب در جداول 4 و 5 قابل مشاهده می باشد. تحلیل این نتایج توسط نرم افزارهای آماری دیزاین اکسپرت و مینی تب⁵ صورت پذیرفت.

Table 3 Process parameters and their levels

جدول 3 پارامترهای ورودی و سطوح آنها

نماد	عامل	واحد	سطح 1	سطح 2
A	جهت ساخت	درجه	30	60
B	پهنای مسیر	میلی متر	0/35	0/5
C	ضخامت لایه	میلی متر	0/2	0/34
D	درصد پرکردن	درصد	45	70
E	زاویه مسیر	درجه	30	60

این روش از دقت بالایی در پیش بینی برخوردار است و در زمان کوتاهی می تواند اثرات متقابل بین متغیرهای پاسخ را نیز پیدا کند. از این رو این تحقیق RSM را به عنوان ابزاری از طراحی آزمایش ها به منظور پیدا کردن بهترین جهت ساخت با بهینه کردن زمان ساخت و زبری سطح برگزیده است.

یکی از رایج ترین رویکردها در RSM، استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD)¹ می باشد که در سال 1951 توسط باکس و ویلسون² ارائه شد. این رویکرد که برای مدل های درجه دوم نیز بسیار مفید می باشد، شامل یک طرح عاملی 2^k با n_F نقطه عاملی، $2k$ نقطه محوری و n_C نقطه مرکزی است. نقاط عاملی باعث می شوند که گزاره های برهم کنش در مدل ارزیابی شوند، در صورتی که نقاط محوری نقش بسیار مهمی در ارزیابی گزاره های درجه دوم دارند. نقاط مرکزی علاوه بر کمک به ارزیابی گزاره های درجه دوم، خطای خالص را نیز مشخص می کنند. به صورت ساده تر می توان گفت که نقاط مرکزی اطلاعاتی در مورد وجود خمیدگی مهیا می کنند و هنگامی که به وجود خمیدگی در مدل پی برده شد، می توان با اضافه کردن نقاط محوری ارزیابی دقیق تری از گزاره های درجه دوم در مدل داشت [30، 31].

این مطالعه از طراحی مرکب مرکزی چرخشی (RCCD)³ که ارزیابی دقیق و برابری از تمام نقاط انجام می دهد بهره جسته است. در این روش α به معنی فاصله ی نقاط محوری از مرکز طرح می باشد که مقدار آن با استفاده از رابطه (1) به دست می آید [30، 31].

⁴ Design Expert V 10.0.4
⁵ Minitab

¹ Central Composite Design
² Box and Wilson
³ Rotatable Central Composite Design

53/645	-1/77555	60	45	0/34	0/5	30	43
31/2975	-0/0361571	30	45	0/2	0/5	30	44
58/21	-1/26349	60	70	0/34	0/5	30	45
51/0375	-0/1372	45	57	0/27	0/42	80/68	46
46/045	0/462201	30	45	0/2	0/5	60	47
37/19	0/374516	45	57	0/27	0/42	45	48
53/665	0/374616	45	57	0/27	0/42	45	49
36/16	0/462201	60	45	0/2	0/5	60	50

Table 5 Experimental results of 3DBenchy samples

جدول 5 نتایج آزمایش نمونه های تری دی بنچی

متغیرهای پاسخ		پارامترهای فرایند					اجرا
زمان ساخت (تبدیل جانسون) (میکرومتر)	زبری سطح	E	D	C	B	A	
52/3	0/00425293	30	45	0/34	0/35	60	1
63/93	-0/55262	60	70	0/34	0/5	60	2
51/42	0/374923	45	57	0/27	0/42	45	3
47/02	-0/958928	60	45	0/34	0/35	30	4
26/74	0/374923	45	57	0/27	0/42	45	5
33/17	1/40618	30	45	0/2	0/35	60	6
34/95	0/374923	45	57	0/27	0/42	45	7
36/7	-0/137121	45	57	0/27	0/42	80/68	8
29/21	0/935629	30	70	0/2	0/5	60	9
44/37	-0/973639	30	45	0/34	0/35	30	10
45/87	-1/7829	30	45	0/34	0/5	30	11
22/51	-0/0359119	30	45	0/2	0/5	30	12
48/88	0/886169	45	87	0/27	0/42	45	13
46/92	-0/297942	30	70	0/34	0/35	30	14
30/12	0/374923	45	57	0/27	0/42	45	15
18/29	1/24858	60	70	0/2	0/35	30	16
18/57	0/569521	30	45	0/2	0/35	30	17
44/21	1/73866	45	57	0/27	0/24	45	18
42/94	0/469785	30	70	0/34	0/35	60	19
32/11	0/37688	81	57	0/27	0/42	45	20
47/84	-0/545188	30	70	0/34	0/5	60	21
56/31	-0/973639	45	57	0/4365	0/42	45	22
37/24	1/39824	60	45	0/2	0/35	60	23
23/24	1/25395	30	70	0/2	0/35	30	24
34/85	-0/37895	45	57	0/27	0/6	45	25
33/11	0/46222	30	45	0/2	0/5	60	26
38/57	-1/77547	60	45	0/34	0/5	30	27
29/07	-0/856113	45	57	0/27	0/42	9/32	28
45/52	-0/0006399	60	45	0/34	0/35	60	29
53/87	-0/993383	60	45	0/34	0/5	60	30
16/77	0/359539	30	70	0/2	0/5	30	31
41/86	-1/26339	60	70	0/34	0/5	30	32
35/27	0/374923	45	57	0/27	0/42	45	33

Table 4 Experimental results of cylindrical samples

جدول 4 نتایج آزمایش نمونه های استوانه ای شکل

متغیرهای پاسخ		پارامترهای فرایند					اجرا
زمان ساخت (تبدیل جانسون) (میکرومتر)	زبری سطح	E	D	C	B	A	
48/46	-0/379181	45	57	0/27	0/6	45	1
23/32	0/359365	30	70	0/2	0/5	30	2
25/435	1/24839	60	70	0/2	0/35	30	3
51/795	1/39806	60	45	0/2	0/35	60	4
29/38	0/371356	9	57	0/27	0/42	45	5
88/9	-0/552866	60	70	0/34	0/5	60	6
40/425	-0/856172	45	57	0/27	0/42	9/32	7
32/32	1/25383	30	70	0/2	0/35	30	8
67/975	0/886046	45	87	0/27	0/42	45	9
61/485	1/73857	45	57	0/27	0/24	45	10
35/15	0/35061	60	70	0/2	0/5	30	11
61/7	-0/973488	30	45	0/34	0/35	30	12
74/92	-0/993562	60	45	0/34	0/5	60	13
25/825	0/569228	30	45	0/2	0/35	30	14
65/255	-0/297882	30	70	0/34	0/35	30	15
71/505	0/374616	45	57	0/27	0/42	45	16
31/955	-0/0399721	60	45	0/2	0/5	30	17
53/365	0/374616	45	57	0/27	0/42	45	18
72/7333	0/00419409	30	45	0/34	0/35	60	19
78/305	-0/973488	45	57	0/4365	0/42	45	20
63/3	-0/0008159	60	45	0/34	0/35	60	21
41/885	0/374616	45	57	0/27	0/42	45	22
60/79	0/46115	60	70	0/34	0/35	60	23
46/13	1/40613	30	45	0/2	0/35	60	24
37/64	0/928581	60	70	0/2	0/5	60	25
64/615	-0/285273	60	70	0/34	0/35	30	26
59/71	0/469544	30	70	0/34	0/35	60	27
49/045	0/374616	45	57	0/27	0/42	45	28
53/935	0/374616	45	57	0/27	0/42	45	29
44/66	0/376788	81	57	0/27	0/42	45	30
28/24	2/87995	45	57	0/1035	0/42	45	31
63/7967	-1/78297	30	45	0/34	0/5	30	32
40/62	0/935604	30	70	0/2	0/5	60	33
65/385	-0/958985	60	45	0/34	0/35	30	34
48/6	0/374616	45	57	0/27	0/42	45	35
62/335	-0/212228	45	28	0/27	0/42	45	36
27/48	0/563171	60	45	0/2	0/35	30	37
66/535	-0/545137	30	70	0/34	0/5	60	38
68/535	-0/984419	30	45	0/34	0/5	60	39
54/22	-1/26755	30	70	0/34	0/5	30	40
29/835	1/90235	30	70	0/2	0/35	60	41
51/145	1/89567	60	70	0/2	0/35	60	42

علاوه براین، با استفاده از نمودارهای باکس-کاکس³ می توان دریافت که مشاهدات نیاز به تبدیل شدن به توزیع نرمال را دارند یا خیر. این نمودار به یافتن بهترین تابع توانی برای تبدیل به توزیع نرمال کمک می کند. در این مطالعه با وجود اینکه تبدیل های توانی مختلفی صورت گرفت، ولی بهترین تبدیل استفاده از تبدیل جانسون⁴ بود که این تبدیل در سال 1949 و توسط جانسون معرفی شد [32]. این تبدیل در محیط نرم افزار مینی تب صورت پذیرفت و قبل از این تبدیل، واحد زمان ساخت ثانیه در نظر گرفته شده بود. نمودارهای باکس-کاکس در قبل و بعد از تبدیل جانسون برای شکل های استوانه و تری دی بنچی در شکل 5 (الف) و (ب) آورده شده است. در این نمودارها می توان مشاهده کرد که مقدار $\lambda=1$ در بین حد بالا و پایین سطوح اطمینان، بعد از تبدیل جانسون قرار گرفته است که گویای این مطلب است که تمامی مشاهدات برای دو شکل به توزیع نرمال تبدیل شده اند [31].

36/78	1/89587	60	70	0/2	0/35	60	34
38/59	0/374923	45	57	0/27	0/42	45	35
19/76	0/563455	60	45	0/2	0/35	30	36
20/31	2/87999	45	57	0/1035	0/42	45	37
38/37	0/374923	45	57	0/27	0/42	45	38
21/13	0/371657	9	57	0/27	0/42	45	39
43/71	0/461273	60	70	0/34	0/35	60	40
22/98	-0/0397331	60	45	0/2	0/5	30	41
25/27	0/35066	60	70	0/2	0/5	30	42
46/46	-0/285311	60	70	0/34	0/35	30	43
38/78	0/374923	45	57	0/27	0/42	45	44
21/45	1/90243	30	70	0/2	0/35	60	45
49/28	-0/984589	30	45	0/34	0/5	60	46
38/99	-1/26766	30	70	0/34	0/5	30	47
26	0/46222	60	45	0/2	0/5	60	48
44/82	-0/212005	45	28	0/27	0/42	45	49
27/07	0/928771	60	70	0/2	0/5	60	50

3- نتایج

برای رسیدن به بهترین زمان ساخت و زبری سطح در فناوری FDM، راه حل های بهینه برای پارامترهای فرایند با استفاده از روش مبتنی بر پس آیند¹ به دست آمدند. بنابراین در ابتدا به منظور تحلیل مدل های تجربی توسعه یافته، آن ها باید از فرض های رگرسیون حداقل مربعات² که شامل بررسی فرض نرمال بودن مشاهدات و مستقل بودن واریانس و مشاهدات می باشد، پیروی کنند.

3-1- تحلیل نمودار باقی مانده ها

همان گونه که در شکل های 4 (الف) و (ب) نشان داده شده است، باقی مانده ها برای زمان ساخت هر دو شکل تقریباً در خط راست در کنار یکدیگر قرار گرفتند که نشان دهنده پیروی کردن از توزیع نرمال مشاهدات می باشد. با این وجود، چندین نقطه در این نمودارها خارج از خط راست قرار دارند. با بررسی آن ها مشخص شد به دلیل اینکه جز نقاط محوری می باشند، از خط راست دور افتاده اند. بدین معنی که چون فقط دو نقطه محوری از هر عامل در نظر گرفته شد و این نقاط در نزدیکی حد بالا و پایین عامل می باشند، دور افتادگی این نقطه به دوراز منطق نیست. از این رو بهتر است این نقطه در مدل لحاظ شود تا مدل ریاضی از دقت بالاتری برای پیش بینی مدل های توسعه یافته برخوردار باشد.

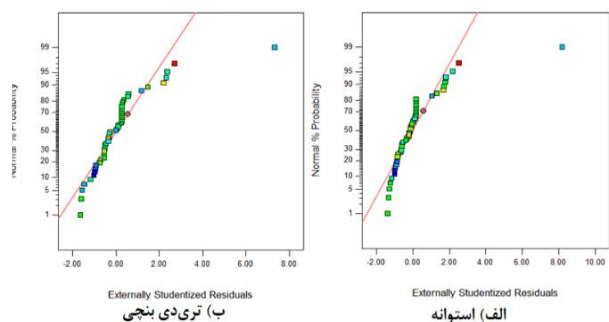


Fig. 4 Normal plots for build time of investigated samples

شکل 4 نمودار نرمال زمان ساخت نمونه های مورد بررسی

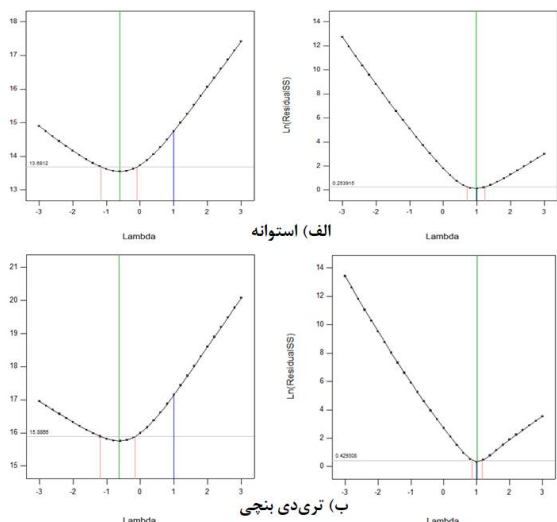


Fig. 5 Box-Cox plots before and after Johnson transformation of build time

شکل 5 نمودارهای باکس-کاکس قبل و بعد از تبدیل جانسون برای زمان ساخت

³ Box-Cox

⁴ Johnson transformation

¹ Posterior-Based method

² Least-Square assumptions

اگر روش CCD نقاط محوری بیشتری را پوشش می‌داد، مدل‌های توسعه یافته با اطمینان بیشتری مورد قبول واقع می‌شدند.

مستقل بودن مشاهدات از طریق نمودار شماره‌ی آزمایش در مقابل باقی مانده‌ها قابل بررسی است که در صورت تصادفی پخش شدن نقاط بین دو خط می‌توان دریافت که مشاهدات به زمان انجام آزمایش وابسته نیستند. این مطلب در شکل‌های 10 و 11 به خوبی قابل مشاهده است. ضمناً نقطه‌ای که در شکل 10 بیرون از دو خط قرار گرفته است از نقاط محوری می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده، فرض رگرسیون حداقل مربعات بررسی گردید و می‌توان نتیجه گرفت که مشاهدات هر کدام از اشکال از توزیع نرمال پیروی می‌کنند.

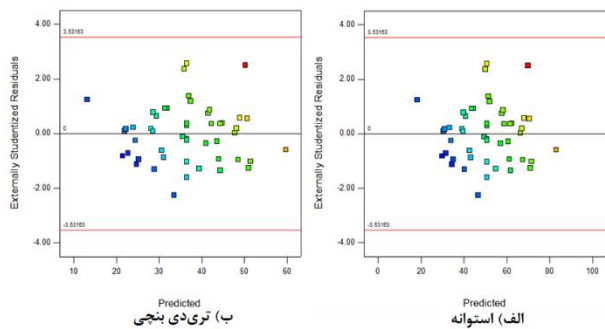


Fig. 9 Predicted vs. residuals plot for surface roughness of two shapes
شکل 9 نمودار باقی مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای زبری سطح

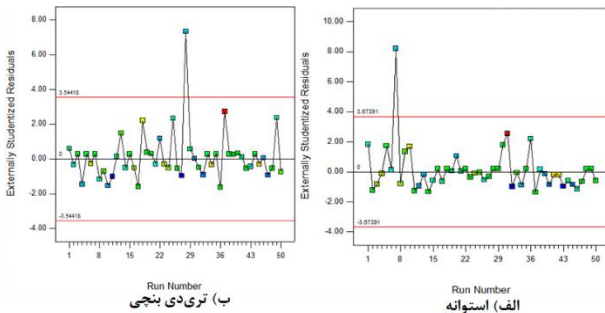


Fig. 10 Residuals vs. runs plot for build time
شکل 10 نمودار باقی مانده‌ها در برابر زمان اجرای آزمایش‌ها برای زمان ساخت

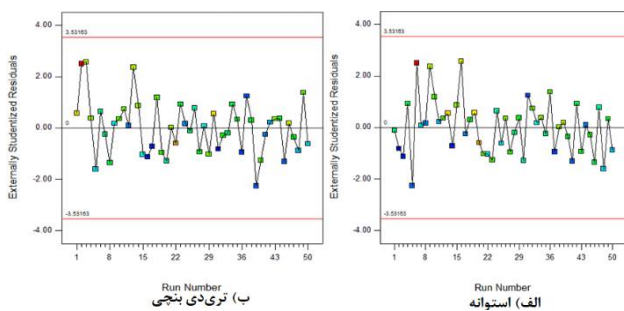


Fig. 11 Residuals vs. runs plot for surface roughness
شکل 11 نمودار باقی مانده‌ها در برابر زمان اجرای آزمایش‌ها برای زبری سطح

همچنین در شکل 6 (الف) و (ب) نمودارهای نرمال برای زبری سطح را نشان می‌دهد. تمامی نقاط در اطراف خط راست پخش شده‌اند که نشان می‌دهد مشاهدات از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. همان‌طور که در شکل 7 مشخص است، این مشاهدات برای پیروی از توزیع نرمال به تبدیلی نیاز ندارند. با استفاده از نمودار مشاهدات پیش‌بینی شده در مقابل باقی مانده‌ها می‌توان به بررسی فرض مستقل بودن واریانس‌ها پی برد. با توجه به شکل‌های 8 و 9 و پخش شدن تصادفی نقاط بین دو خط، مستقل بودن واریانس‌ها برای دو شکل مورد استفاده تأیید می‌شود.

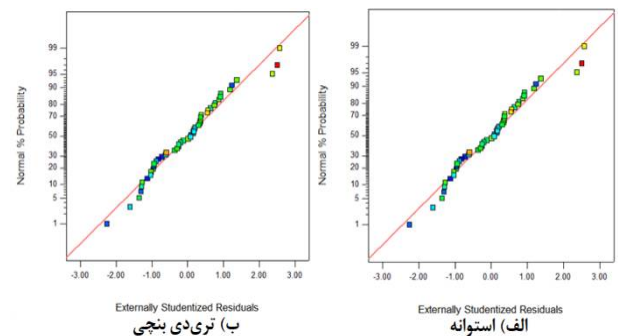


Fig. 6 Normal plots of surface roughness of investigated samples
شکل 6 نمودار نرمال زبری سطح نمونه‌های مورد بررسی

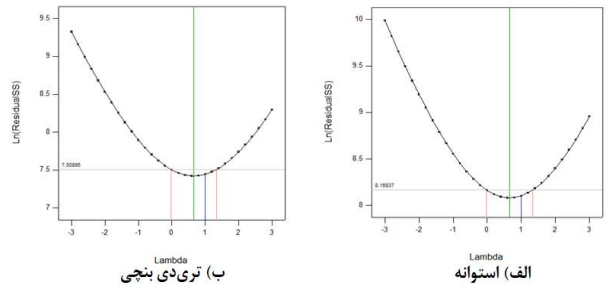


Fig. 7 Box-Cox plots for surface roughness of investigated shapes
شکل 7 نمودارهای باکس-کاکس برای زبری سطح

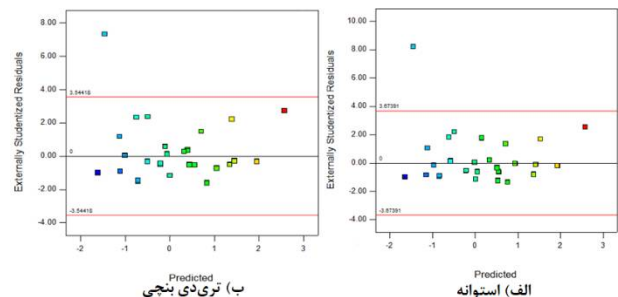


Fig. 8 Predicted vs. residuals plot for build time of two shapes
شکل 8 نمودار باقی مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای زمان ساخت

یکی از نقاط در شکل 8 (که جز نقاط محوری می‌باشد) خارج از دو خط قرار گرفته است که نشان‌دهنده‌ی این است که

2-3- آنالیز واریانس (ANOVA)¹

برای بررسی کیفیت مدل های توسعه یافته، باید از نتایج جدول آنالیز واریانس استفاده نمود که در این مطالعه از نرم افزار دیزاین اکسپرت استفاده شده است که نتایج آن در جدول های 6 تا 9 قابل مشاهده است. با توجه به کمتر بودن مقادیر احتمال² در سطر مدل از 0/05 در این جداول می توان نتیجه گرفت مدل های توسعه یافته به خوبی قابل استفاده می باشند. همان طور که در جداول 6 و 7 نشان داده شده، هیچ مقداری برای مقدار احتمال عدم برازش (LOF)³ وجود ندارد زیرا نقاط مرکزی در متغیر زمان ساخت مقادیر یکسانی دارند؛ اما برای متغیر پاسخ زبری سطح، مقدار احتمال LOF گواهی بر این مطلب است که مدل های توسعه یافته مقادیر زیادی از مشاهدات را در خود پوشش می دهند که نشان دهنده دقت بالای مدل برای هر دو شکل است.

Table 6 ANOVA result of build time for cylindrical specimens

جدول 6 جدول آنالیز واریانس زمان ساخت برای نمونه های استوانه ای شکل

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-value	Remarks at 95% CL
Model	44/05	7	6/29	188/32	< 0/0001	Significant
A-Build Orientation	4/08	1	4/08	122/15	< 0/0001	Significant
B-Extrusion Width	8/72	1	8/72	261/01	< 0/0001	Significant
C-Layer thickness	26/02	1	26/02	778/79	< 0/0001	Significant
D-Infill Percentage	2/74	1	2/74	81/88	< 0/0001	Significant
A ²	1/97	1	1/97	59/02	< 0/0001	Significant
C ²	0/29	1	0/29	8/61	0/0054	Significant
D ²	0/083	1	0/083	2/49	0/1220	Not Significant
Residual	1/40	42	0/033			
Lack of Fit	1/40	35	0/040			
Pure Error	0/000	7	0/000			
Cor Total	45/45	49				
Std. Dev.	0/1828		R-Squared		0/9691	
Mean	0/1921		Adj R-Squared		0/9640	
CV %	95/1667		Pred R-Squared		0/9105	
PRESS	4/0686		Adeq Precision		57/157	
-2 Log Likelihood	-36/767		BIC		-5/47	
			AICc		-17/25	

ضریب تعیین یا ضریب تشخیص (R^2) نشان می دهد که متغیرهای مستقل چند درصد از تغییرات متغیر وابسته را سهمیم هستند و هرچه این مقدار بیشتر باشد نشان دهنده بالاتر بودن

دقت مدل می باشد [33]. مقادیر بالای R^2 در جداول 6 و 7 برای زمان ساخت نشان دهنده ای این است که این مدل های توسعه یافته از دقت بالایی برای پیش بینی برخوردار هستند. با افزایش تعداد مشاهدات و یا متغیرهای مستقل، مقدار R^2 نیز افزایش پیدا می کند اما این افزایشی کاذب است که به همین دلیل از ضریب تعیین تعدیل شده⁴ استفاده می شود. هرچه اختلاف بین ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده کم باشد، گویای این نکته است که انتخاب متغیرهای مستقلی که به مدل اضافه گردیدند، به خوبی صورت پذیرفته است. ضریب تعیین دیگری که بررسی آن حائز اهمیت می باشد، ضریب تعیین پیش بینی شده⁵ نام دارد. این ضریب تعیین بر اساس پیش بینی خطای جمع مربعات محاسبه می گردد و هنگامی که تعداد زیادی گزاره با درجه اهمیت پایین وارد مدل شوند، مقدارش کاهش می یابد. معیار دیگری که در این مقاله برای کفایت مدل در نظر گرفته شد، مقدار دقت کافی⁶ مدل می باشد. هرچه این مقدار بزرگ تر باشد نشان دهنده عملکرد مناسب مدل در پیش بینی است [30].

Table 7 ANOVA result of build time for 3DBenchy specimens

جدول 7 جدول آنالیز واریانس زمان ساخت برای نمونه های تری دی بنچی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-value	Remarks at 95% CL
Model	44/05	7	6/29	188/30	< 0/0001	Significant
A-Build Orientation	4/08	1	4/08	122/13	< 0/0001	Significant
B-Extrusion width	8/72	1	8/72	260/96	< 0/0001	Significant
C-Layer thickness	26/02	1	26/02	778/72	< 0/0001	Significant
D-Infill Percentage	2/74	1	2/74	81/86	< 0/0001	Significant
A ²	1/97	1	1/97	59/03	< 0/0001	Significant
C ²	0/29	1	0/29	8/60	0/0054	Significant
D ²	0/083	1	0/083	2/49	0/1218	Not Significant
Residual	1/40	42	0/033			
Lack of Fit	1/40	35	0/040			
Pure Error	0/000	7	0/000			
Cor Total	45/45	49				
Std. Dev.	0/18		R-Squared		0/9691	
Mean	0/19		Adj R-Squared		0/9640	
CV %	95/11		Pred R-Squared		0/9105	
PRESS	4/07		Adeq Precision		57/150	
-2 Log Likelihood	-36/76		BIC		-5/46	
			AICc		-17/24	

⁴ Adjusted R²

⁵ Predicted R²

⁶ Adequate precision

¹ Analysis of Variance

² p-value

³ Lack-of-fit

هستند اما این بدین معنی نیست که مقادیر بهینه برای زمان ساخت در رابطه‌های (2) و (3) با یکدیگر برابر است چون پس به دست آوردن مقادیر بهینه، آن‌ها باید از معکوس تبدیل جانسون استفاده کنند تا مقادیر بهینه به واحد ثانیه تبدیل شوند. همچنین زمان ساخت قطعات در AM به ابعاد و پیچیدگی قطعات نیز وابستگی دارد. به منظور ساده سازی، مدل‌های رگرسیون می‌توانند به صورت مدل‌های کد شده نیز لحاظ شوند که در رابطه‌های (6) تا (9) نشان داده شده است. در واقع این تبدیل باعث می‌شود تا شناسایی بزرگی اثر هر عامل بر متغیر پاسخ با مقایسه ضرایب صورت پذیرد.

4- بحث و بررسی نتایج

با توجه به جداول 6 و 7، پارامترهای فرایند A, B, C, D, A² و C² به دلیل اینکه مقادیر احتمال آن‌ها در این جداول کمتر از 0/05 می‌باشد، تأثیر به سزایی بر زمان ساخت قطعات استوانه‌ای شکل و تری دی بنچی می‌گذارند. همچنین زبری سطح شکل‌های بررسی شده در فناوری FDM وابستگی زیادی به جهت ساخت و ضخامت لایه دارند که در جداول 8 و 9 قابل مشاهده است. بنابراین در ادامه، بررسی اثرات پارامترهای فرایند بر متغیرهای پاسخ و سپس روش بهینه سازی جدید مورد استفاده شرح داده شده است.

4-1- اثرات پارامترهای فرایند بر متغیرهای پاسخ

یک راه برای پیدا کردن اهمیت هر عامل، بررسی ضرایب آن‌ها در معادله‌های کد شده می‌باشد. در صورتی که علامت ضریب منفی باشد، رابطه‌ی بین گزاره و متغیر پاسخ غیرمستقیم و در صورتیکه علامت مثبت داشته باشد، رابطه‌ی بین گزاره و متغیر پاسخ مستقیم می‌باشد.

با توجه به جداول آنالیز واریانس می‌توان دریافت که مدل پیش‌بینی به دست آمده برای متغیر زمان ساخت از دقت و همبستگی بسیار بالایی برخوردار است؛ چراکه مقادیر ضریب تعیین، ضریب تعیین تعدیل شده و ضریب تعیین پیش‌بینی شده بسیار بالا می‌باشند و اختلاف پایین بین مقدار ضریب تعیین کننده و ضریب تعیین کننده تعدیل شده نشان دهنده دقیق بودن مدل می‌باشد. همچنین اختلاف کمتر از 0/2 بین ضریب تعیین تعدیل شده و ضریب تعیین پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که مدل از دقت بالایی برای پیش‌بینی برخوردار است. در واقع ضریب تعیین 97/51% نشان می‌دهد که فقط 2/49% از متغیرهای وابسته توسط مدل نمی‌توانند بیان شوند. به علاوه اینکه دقت کافی مدل از مقدار 4 بسیار بالاتر است و گواه بر پیش‌بینی بسیار دقیق مدل می‌باشد؛ اما برای متغیر زبری سطح، به دلیل خطای اندازه‌گیری‌ای که در حین گرفتن عکس از نمونه‌ها حاصل شده، ضرایب تعیین بسیار بالایی ندارند. با این حال می‌توان به این مدل‌های تجربی اعتماد کرد و از آن‌ها برای یافتن راه‌حل‌های بهینه استفاده کرد. همان‌گونه که در جداول آنالیز واریانس مشخص است مقدار بسیار بالای دقت کافی نمونه‌های بررسی شده نشان می‌دهند که داده‌ها به خوبی با مدل‌های توسعه یافته سازگار هستند.

در نتیجه، پس از تأیید کفایت مدل و مفروضات مسئله، مدل‌های توسعه یافته برای زمان ساخت و زبری سطح به ترتیب در رابطه‌های (2) و (3) و رابطه‌های (4) و (5) برای هر دو متغیر پاسخ به دست آمده است. دقیق‌ترین مدلی که برای زبری سطح این دو شکل حاصل شد به صورت خطی است در حالیکه برای زمان ساخت، مدل کوادراتیک، بهترین مدل توسعه یافته می‌باشد. در رابطه‌های (2) و (3)، به دلیل دقت بالای اندازه‌گیری زمان ساخت نمونه‌ها، ضرایب هر پارامتر فرایند تقریباً با یکدیگر برابر

$$\text{Build time of cylindrical specimen (Johnson transformation)} = +2.35820 + 0.094650 * A - 5.98279 * B - 18.88009 * C + 0.048151 * D - 8.24289 \times 10^{-4} * A^2 + 14.45847 * C^2 - 2.43871 \times 10^{-4} * D^2 \quad (2)$$

$$\text{Build time of 3DBenchy specimen (Johnson transformation)} = +2.35695 + 0.094666 * A - 5.98285 * B - 18.87393 * C + 0.048166 * D - 8.24466 \times 10^{-4} * A^2 + 14.44580 * C^2 - 2.44008 \times 10^{-4} * D^2 \quad (3)$$

$$\text{Surface roughness of cylindrical specimen} = -16.31606 + 0.30851 * A - 7.21772 * B + 194.31770 * C - 0.025093 * D + 0.11541 * E \quad (4)$$

$$\text{Surface roughness of 3DBenchy specimen} = -11.72911 + 0.22182 * A - 5.19372 * B + 139.72908 * C - 0.018015 * D + 0.082968 * E \quad (5)$$

$$\text{Build time of cylindrical specimen in terms of coded factors (Johnson transformation)} = +0.32 + 0.31 * A - 0.45 * B - 0.78 * C + 0.25 * D - 0.19 * A^2 + 0.071 * C^2 - 0.038 * D^2 \quad (6)$$

$$\text{Build time of 3DBenchy specimen in terms of coded factors (Johnson transformation)} = +0.32 + 0.31 * A - 0.45 * B - 0.78 * C + 0.25 * D - 0.19 * A^2 + 0.071 * C^2 - 0.038 * D^2 \quad (7)$$

$$\text{Surface roughness of cylindrical specimen in terms of coded factors} = 50.72 + 4.63 * A - 0.54 * B + 13.60 * C - 0.31 * D + 1.73 * E \quad (8)$$

$$\text{Surface roughness of 3DBenchy specimen in terms of coded factors} = 36.47 + 3.33 * A - 0.39 * B + 9.78 * C - 0.23 * D + 1.24 * E \quad (9)$$

علاوه بر این می توان از طریق نمودارهای پَرشیدگی یا اغتشاش¹ درجهی اهمیت پارامترهای فرایند را متوجه شد. با توجه به شکل 12، شیب بسیار کم پارامتر زاویه مسیر نشان دهندهی اثر ناچیز آن بر زمان ساخت است ولی مابقی پارامترها، مخصوصاً ضخامت لایه، شیب زیادی دارند. پرواضح است که با افزایش ضخامت لایه زمان ساخت کاهش می یابد. علت اثر زیاد پهنای مسیر بر زمان ساخت این است که هرچه پهنای مسیر بیشتر باشد، مسیرها با سرعت بیشتری لایه گذاری می شوند.

پس از ضخامت لایه و پهنای مسیر، جهت ساخت بیشترین تأثیر را بر زمان ساخت در فناوری FDM می گذارد. محدب بودن عامل جهت ساخت در شکل 12 نشان می دهد که در ابتدا با افزایش زاویه ساخت قطعه، زمان ساخت افزایش می یابد ولی در ادامه، کاهش پیدا می کنند. به این دلیل که در زوایای بیشتر از 40°، قطعه به ساپورت نیاز پیدا می کند (این زاویه در جدول 1 در قسمت حداکثر زاویه آویزان بودن تعیین گردیده است) ولی زاویهی ساخت بین 0° تا 40° مقدار بسیار کمی ساپورت می خواهد و می توان آن را نادیده گرفت. قابل ذکر است که در زاویه 90°، مقدار ساپورت مورد نیاز بسیار ناچیز است.

همچنین، روشن است که افزایش تراکم بخش های داخلی قطعهی ساخت شده توسط فناوری FDM منجر به حرکت بیشتر مسیرهای لایه گذاری برای ساخت قطعه می شود که بدین معنی است با افزایش درصد پرکردن، زمان ساخت نیز افزایش پیدا می کند.

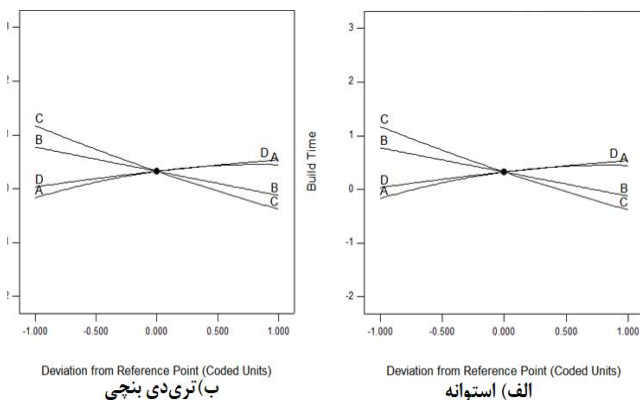


Fig. 12 Perturbation plots of surface roughness for two shapes
شکل 12 نمودار اغتشاش زمان ساخت

همان گونه که در شکل 13 مشخص است از آنجایی که مدل های توسعه یافته برای زبری سطح به صورت خطی می باشند،

Table 8 ANOVA result of surface roughness for cylindrical specimens
جدول 8 جدول آنالیز واریانس زبری سطح برای نمونه های استوانه ای شکل

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	Remarks at 95% CL
Model	9088/25	5	1817/65	24/20	< 0/0001	Significant
A-Build Orientation	927/55	1	927/55	12/35	0/0010	Significant
B-Extrusion Width	12/69	1	12/69	0/17	0/6830	Not Significant
C-Layer thickness	8013/94	1	8013/94	106/69	< 0/0001	Significant
D-Infill Percentage	4/26	1	4/26	0/057	0/8128	Not Significant
E-Raster Angle	129/80	1	129/80	1/73	0/1955	Not Significant
Residual	3305/13	44	75/12			
Lack of Fit	2580/33	37	69/74	0/67	0/7971	Not Significant
Pure Error	724/80	7	103/54			
Cor Total	12393/38	49				
Std. Dev.	8/67		R-Squared		0/7333	
Mean	50/72		Adj R-Squared		0/7030	
CV %	17/09		Pred R-Squared		0/6561	
PRESS	4262/62		Adeq Precision		21/551	
-2 Log Likelihood	351/45		BIC		374/93	
			AICc		365/41	

Table 9 ANOVA result of surface roughness for 3DBenchy specimens
جدول 9 جدول آنالیز واریانس زبری سطح برای نمونه های تری دی بنچی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-value	Remarks at 95% CL
Model	4699/14	5	939/83	24/19	< 0/0001	Significant
A-Build Orientation	479/52	1	479/52	12/34	0/0010	Significant
B-Extrusion width	6/57	1	6/57	0/17	0/6828	Not Significant
C-Layer thickness	4143/76	1	4143/76	106/67	< 0/0001	Significant
D-Infill Percentage	2/20	1	2/20	0/057	0/8132	Not Significant
E-Raster Angle	67/09	1	67/09	1/73	0/1956	Not Significant
Residual	1709/29	44	38/85			
Lack of Fit	1334/37	37	36/06	0/67	0/7972	Not Significant
Pure Error	374/92	7	53/56			
Cor Total	6408/43	49				
Std. Dev.	6/23		R-Squared		0/7333	
Mean	36/47		Adj R-Squared		0/7030	
CV %	17/09		Pred R-Squared		0/6560	
PRESS	2204/44		Adeq Precision		21/549	
-2 Log Likelihood	318/48		BIC		341/96	
			AICc		332/44	

¹ Perturbation plot

را بر زمان ساخت می گذارند. از این رو تنها اثرات متقابل بین جهت ساخت و ضخامت لایه و همچنین بین پهناى مسیر ضخامت لایه مورد بررسی قرار گرفتند. با افزایش جهت ساخت (نسبت به محور z) از 30° تا 60°، زمان ساخت در ابتدا کمی افزایش می یابد و سپس کاهش پیدا می کند که در شکل 14 (الف) قابل مشاهده است. با کاهش ضخامت لایه از 0/34 میلی متر تا 0/2 میلی متر، زمان ساخت افزایش می یابد ولی در مقایسه با اثر جهت ساخت اثر بیشتری بر زمان ساخت می گذارد؛ بنابراین بهترین زمان ساخت هنگامی به دست می آید که بیشترین ضخامت لایه و کمترین جهت ساخت انتخاب شوند. اثر متقابلی که در شکل 14 (ب) بین دو پارامتر ضخامت لایه و پهناى مسیر مشخص شده است نشانگر این مطلب است که افزایش ضخامت لایه از سطح پایین تا سطح بالای آن اثر بیشتری نسبت به افزایش پهناى مسیر از 0/35 میلی متر تا 0/5 میلی متر بر کاهش زمان ساخت می گذارد. از آنجایی که هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر جهت ساخت بر زبری سطح و زمان ساخت می باشد، اثرات متقابل بین جهت ساخت و پهناى مسیر و بین جهت ساخت و درصد پرکردن در شکل 15 نشان داده شده است.

فقط پارامترهای ضخامت لایه و جهت ساخت اثر شدیدی بر آن دارند. کاهش ضخامت لایه منجر به بهبود کیفیت سطح قطعات ساخته شده توسط فناوری FDM می شود زیرا اثر پلکانی کمتری بر سطح قطعات ظاهر می شود. با افزایش جهت ساخت زبری سطح نیز افزایش می یابد چون افزایش جهت ساخت تا 90° منجر به افزایش اثر پلکانی می شود.

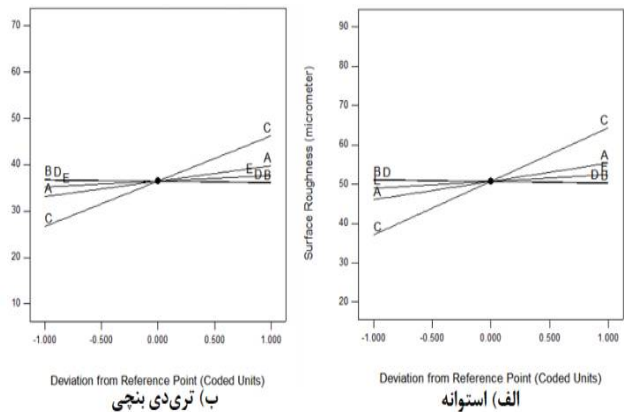


Fig. 13 Perturbation plots of surface roughness for three shapes
شکل 13 نمودار اغتشاش زبری سطح

با توجه به جداول آنالیز واریانس و معادله های کد شده، ضخامت لایه، پهناى مسیر و جهت ساخت به ترتیب بیشترین اثر

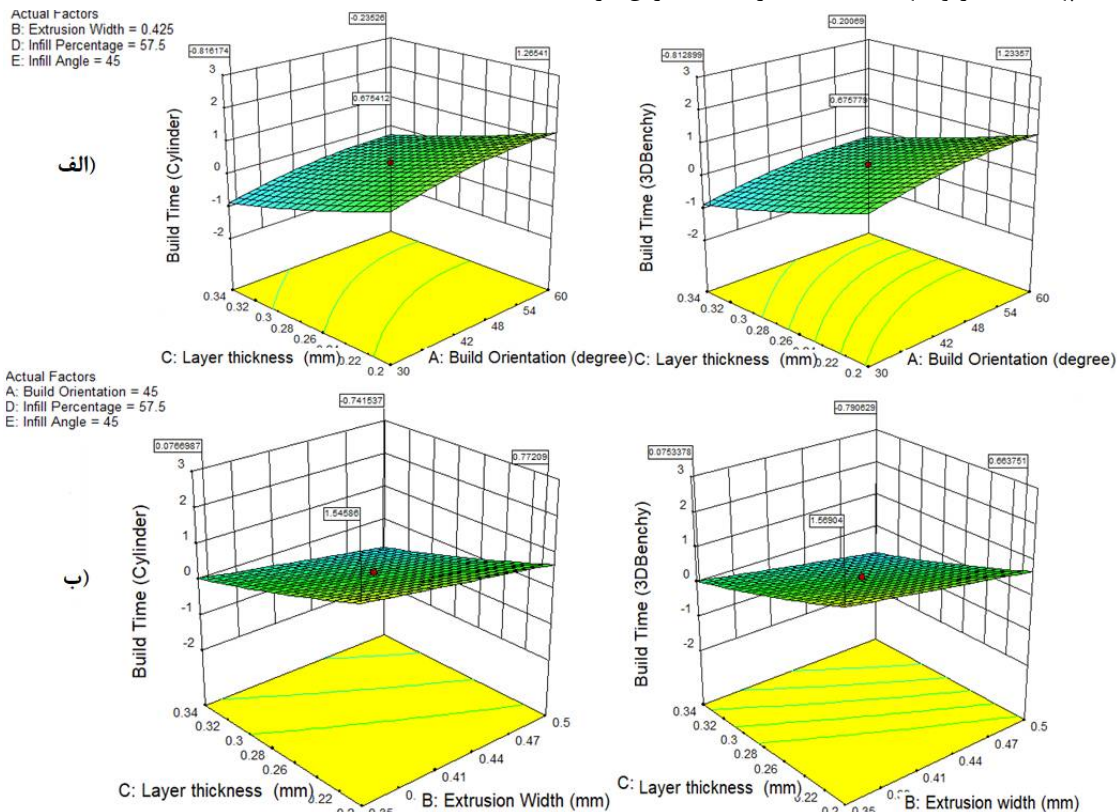


Fig. 14 3D graphs for interactions between a) build orientation and layer thickness, b) extrusion width and layer thickness

شکل 14 اثر متقابل بین (الف) جهت ساخت و ضخامت لایه و (ب) پهناى مسیر و ضخامت لایه

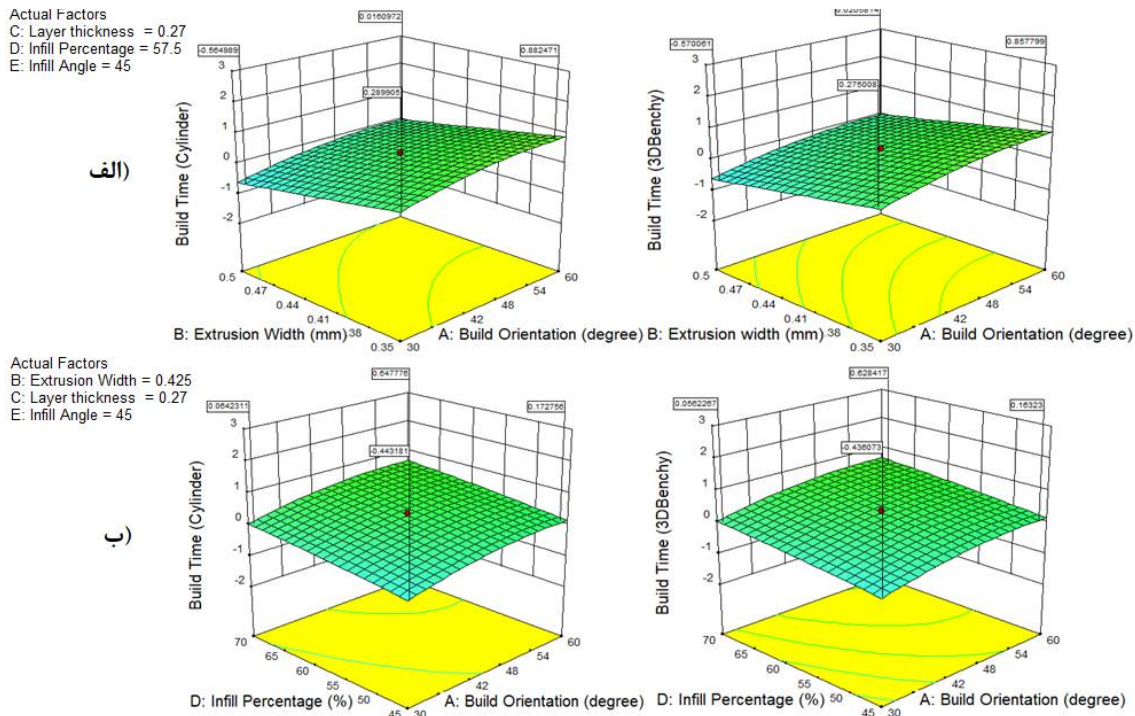


Fig. 15 3D Graphs for interactions between a) build orientation and extrusion width, b) build orientation and infill percentage

شکل 15 اثر متقابل بین الف) جهت ساخت و پهنای مسیر و ب) جهت ساخت و درصد پرکردن

نمی بیند، جواب با اولویت بالاتر برای تصمیم گیرنده، جواب ارجح مرتبط با آنچه او تاکنون دیده و مقایسه کرده است، می باشد. روش های جز به کل جواب های کارای مسئله را به وجود می آورند و سپس تصمیم گیرنده از بین این جواب ها، جواب ارجح را انتخاب می کند [34].

هرچند در روش های جز به کل زمان لازم جهت محاسبه جواب های کارا طولانی می باشد ولی در این روش هیچ جواب کارایی بدون بررسی حذف نمی گردد. از متداول ترین رویکردها در این روش، رویکردهای وزنی⁵ و محدودیت افسیلون⁶ می باشند. یکی از مزیت های روش محدودیت افسیلون نسبت به روش وزنی این است که می توان با به کارگیری گام های مناسب برای بازه ی محدودیت های تابع هدف، کنترل بیشتری بر جواب های کارای تولید شده داشت که در روش وزنی کار آسانی نیست. همچنین دلیل متداول بودن این روش را می توان نسبتاً ساده بودن آن مخصوصاً در زمینه مهندسی نامید [35]. با وجود استفاده از روش محدودیت افسیلون در این مقاله، روش مشابه دیگری به نام روش مبتنی بر پس آینه نیز به کار گرفته شد که در مقایسه با روش محدودیت افسیلون از نتایج بهتری برخوردار بود. در روش مبتنی بر پس آینه، توابع هدف با اولویت بالا انتخاب و مابقی توابع هدف به عنوان محدودیت در نظر گرفته می شوند.

کاهش پهنای مسیر از 0/5 میلی متر تا 0/35 میلی متر و همزمان با آن، افزایش جهت ساخت از 30° تا 60° باعث افزایش زمان ساخت می شود اما با توجه به شکل 15 الف) می توان دریافت که پهنای مسیر در مقایسه با جهت ساخت اثر بیشتری بر زمان ساخت می گذارد. افزایش درصد پرکردن از 45% تا 70% منجر به افزایش زمان ساخت می شود که تقریباً اثر مشابهی با افزایش جهت ساخت در محدوده ی خود دارد که در شکل 15 ب) نمایان است.

2-4- بهینه سازی

به منظور رسیدن به هدف این مقاله که یافتن مقادیر بهینه برای دو متغیر پاسخ می باشد، از بهینه سازی چندهدفه استفاده شده است. برنامه ریزی ریاضی چندهدفه (MOMP)¹ که به اولویت های تصمیم گیرندگان وابسته است، به سه دسته ی از کلیات به جزییات²، فعل و انفعالی³ و از جز به کل⁴ تقسیم بندی می شوند. یکی از معایب روش های کل به جز این است که تصمیم گیری برای تعیین اولویت های تصمیم گیرنده قبل از به کارگیری روش دشوار می باشد. عیب روش های فعل و انفعالی این است که به دلیل اینکه تصمیم گیرنده تصویر کلی از فرایند

¹ Multi-Objective Mathematical Programming

² Priori methods

³ Interactive methods

⁴ Posterior methods

⁵ Weighting

⁶ ε-constraint

انتخاب بهترین مقدار برای ضخامت لایه بود تا بتوان بهترین مقادیر را برای زمان ساخت و زبری سطح در فناوری FDM پیدا کرد. از آنجایی که رابطه‌ی بین ضخامت لایه و متغیرهای پاسخ با یکدیگر در تناقض هستند، صرفاً بررسی اثر ضخامت لایه کافی نیست. در واقع برای یافتن بهترین مقدار ضخامت لایه باید اثرات دیگر پارامترهای فرایند نیز در نظر گرفت. بنابراین با توجه به جدول 10، هنگامی که کمترین مقدار ضخامت لایه انتخاب شود، مطلوب ترین حالت به دست می‌آید. همچنین درصد پرکردن نیز اثری همانند اثر ضخامت لایه دارد که روش مبتنی بر پس‌آیند مقدار کمینه از این پارامتر را پیشنهاد داده است. در آخر اینکه زاویه مسیر اثر زیادی بر متغیرهای پاسخ ندارد و می‌توان آن را نادیده در نظر داشت.

3-4- اعتبارسنجی مدل‌های توسعه یافته تجربی

به منظور تأیید راه‌حل‌های بهینه به دست آمده (جدول 10) توسط بهینه‌سازی مدل‌های تجربی، آزمایش‌های بیشتری صورت پذیرفت. برای هر کدام از اشکال تری‌دی بنچی و استوانه یک آزمایش تأییدیه انجام شد که نتایج آن در جدول 11 قابل مشاهده است.

Table 10 Optimal solutions for two shapes using Posterior-Based method

جدول 10 جواب‌های بهینه به دست آمده برای دو شکل توسط روش مبتنی بر پس‌آیند

تری‌دی بنچی	استوانه	پارامترهای فرایند
$6/99 \times 10^{-7}$	$3/49 \times 10^{-6}$	جهت ساخت (درجه)
0/610	0/610	پهنای مسیر (میلی‌متر)
0/221	0/221	ضخامت لایه (میلی‌متر)
20/000	20/000	درصد پرکردن
$1/08 \times 10^{-5}$	$5/39 \times 10^{-5}$	زاویه مسیر (درجه)
68/005	20/433	زمان ساخت بهینه (دقیقه)
15/644	21/750	زبری سطح بهینه (میکرومتر)

Table 11 Confirmation experiments for validation of developed empirical models

جدول 11 مقادیر متغیرهای پاسخ در صحت سنجی مدل‌های توسعه یافته توسط آزمایش‌های واقعی

متغیرهای پاسخ		اشکال بررسی شده
زمان ساخت (دقیقه)	زبری سطح (میکرومتر)	
29/65	26/03	استوانه
87/45	11/06	تری‌دی بنچی

این نتایج نشان داد که مدل‌های توسعه یافته برای زمان ساخت

در صورتی که مسئله اصلی به صورت رابطه (10) باشد،

$$\min_{x \in X} (f_1(x), \dots, f_p(x)) \quad (10)$$

مسئله اصلی جدید به صورت رابطه (11) خواهد بود:

$$\begin{aligned} & \min_{x \in X} f_j(x) \\ & \text{Subject to } |f_k(x) - \varepsilon| \leq \beta \\ & k = 1, \dots, p \quad k \neq j \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن p تعداد توابع هدف، j توابع هدف با اولویت بالاتر، k توابع هدفی است که به محدودیت‌ها اضافه شده‌اند، ε جواب بهینه مختص مسائل $f_k(x)$ و β مقدار بسیار کوچک می‌باشند. با اضافه شدن توابع هدف به محدودیت‌های مسئله اصلی، فضای جواب کوچک‌تر می‌شود که باعث می‌شود جواب بهینه در اطراف فضای جواب بهینه $f_k(x)$ پیدا شود.

از آنجایی که زمان ساخت و زبری سطح از اولویت یکسانی در این مقاله برخوردار بودند، توابع هدف هر دو متغیر پاسخ به صورت جداگانه در رابطه (11) لحاظ شدند. مقدار β در این پژوهش 0.1 در نظر گرفته شد که بدین معنی است راه‌حل‌های بهینه‌ی تابع هدف با اولویت بالا در 10 درصد از فضای جواب توابع هدفی که به محدودیت‌ها اضافه شده‌اند یافت می‌شوند.

مقادیر ε و جواب‌های بهینه در محیط متلب به دست آمدند و محدودیت‌های پارامترهای فرایند مطابق با رابطه (12) می‌باشند:

$$\begin{aligned} 0 & \leq A \leq 90 \\ 0.3 & \leq B \leq 0.61 \\ 0.22 & \leq C \leq 0.4 \\ 20 & \leq D \leq 90 \\ 0 & \leq E \leq 90 \end{aligned} \quad (12)$$

به صورت کلی بهترین نتیجه وقتی حاصل شد که تابع هدف زبری سطح هر کدام از اشکال به محدودیت‌ها اضافه شد که بر اساس جدول 10 جواب‌های بهینه برای هر دو شکل مشابه با یکدیگر به دست آمدند. با توجه به مدل‌های توسعه یافته، جهت ساخت رابطه مستقیمی با زمان ساخت و زبری سطح دارد، پس پرواضح است که بهترین مقدار برای متغیرهای پاسخ، کمترین زاویه ساخت می‌باشد. هر چند گزاره‌ی درجه دوم جهت ساخت در مدل‌های توسعه یافته‌ی زمان ساخت به صورت محدب می‌باشد ولی حداکثر زاویه‌ی ساخت منجر به کمترین زمان ساخت نمی‌گردد. پهنای مسیر با هر دو متغیر پاسخ رابطه‌ی معکوس دارد، بنابراین با حداقل کردن مقدار پهنای مسیر می‌توان متغیرهای پاسخ را کمینه کرد.

مهم‌ترین چالشی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت

از دقت بیشتری نسبت به مدل های توسعه یافته زبری سطح دارند. با این وجود، به دلیل اینکه رویکرد RCCD تعداد نقاط اندکی را در حد بالا و پایین پارامترها شامل می شود، جواب های بهینه برای زمان ساخت از دقت بسیار بالایی برخوردار نیستند. همچنین علت اصلی پایین بودن دقت در مدل های توسعه یافته زبری سطح، احتمال وجود خطای اندازه گیری به هنگام گرفتن عکس از نمونه ها بوده است.

با وجود این موارد، راه حل های بهینه به دست آمده را می توان قابل قبول ارزیابی کرد چراکه با توجه به جداول 4 و 5، این راه حل های بهینه جز بهترین جواب ها در میان آزمایش های صورت گرفته می باشند. همچنین لازم به ذکر است که جواب های بهینه به دست آمده برای متغیرهای پاسخ لزوماً کمینه ی زمان ساخت و زبری سطح نیستند و مقادیر جدول 11، بهترین مقادیر برای پارامترهای فرایند را نشان می دهند.

5- نتیجه گیری

هدف اصلی این مقاله بررسی اثر جهت ساخت بر زمان ساخت و زبری سطح به صورت هم زمان در قطعات ساخته شده توسط فناوری FDM می باشد. از این روش طراحی آزمایش ها به کار گرفته شد و مدل های توسعه یافته به دست آمدند. همچنین با استفاده از RCCD، اثر دیگر پارامترهای فرایند که شامل پهنای مسیر، ضخامت لایه، درصد پرکردن و زاویه مسیر می باشند بر زبری سطح و زمان ساخت مورد بررسی قرار گرفتند. برای هر کدام از اشکال تری دی بنچی و استوانه 50 قطعه ساخته شد که هر کدام در دو سطح مورد آزمایش قرار گرفتند. با بررسی کفایت مدل و مفروضات مسئله، مدل های تجربی توسعه یافته برای زمان ساخت و زبری سطح به ترتیب به صورت درجه دوم و خطی به دست آمدند. در نهایت، برای یافتن مقادیر بهینه متغیرهای پاسخ و بهترین مقادیر برای پارامترهای فرایند، یک روش بهینه سازی جدید به نام روش پس آیند به کار گرفته شد. مدل های توسعه یافته حاصله برای هر دو شکل تقریباً یکسان بودند که نتایج و تحلیل آن ها به صورت خلاصه در ادامه آمده است:

- جهت ساخت و ضخامت لایه اثر به سزایی بر زمان ساخت و کیفیت سطح در FDM دارند. همچنین پهنای مسیر و درصد پرکردن بر زمان ساخت اثر شدیدی می گذارند.

- افزایش جهت ساخت با توجه به محور Z (مطابق با شکل 3 ج) منجر به افزایش زبری سطح می شود ولی افزایش جهت ساخت در ابتدا باعث افزایش زمان ساخت و در ادامه باعث

کاهش اندک این متغیر پاسخ می گردد.

- با افزایش پهنای مسیر و درصد پرکردن، زمان ساخت به ترتیب کاهش و افزایش می یابد.

- به منظور دستیابی به بهترین مقدار زمان ساخت و زبری سطح به صورت هم زمان برای اشکال مورد بررسی، بهترین جهت ساخت، زاویه ی 0° نسبت به محور Z به دست آمد.

- با توجه به رابطه متناقض ضخامت لایه با متغیرهای پاسخ، روش مبتنی بر پس آیند کمترین مقدار برای ضخامت لایه را پیشنهاد داد که منجر به مطلوب ترین قطعه در FDM شد. اگرچه با افزایش ضخامت لایه، زمان ساخت کاهش می یابد ولی با اضافه شدن تابع هدف زبری سطح به محدودیت ها در روش مبتنی بر پس آیند، کمترین مقدار ضخامت لایه بهترین جواب را ایجاد می کند.

- برای جبران افزایش زمان ساخت که ناشی از انتخاب کمترین مقدار ضخامت لایه می باشد، مقادیر پهنای مسیر و درصد پرکردن باید به ترتیب در حد بالا و پایین خود انتخاب شوند.

- بر اساس مرور ادبیات، شکاف هوا عامل مهمی در متغیرهای پاسخ می باشد. با این وجود این مقاله نشان داد که درصد پرکردن که جایگزین شکاف هوا بود، اثر بسیار زیادی نداشت.

- نتایج نشان داد که بهترین مقادیر برای پارامترهای فرایند جهت ساخت، پهنای مسیر، ضخامت لایه، درصد پرکردن و زاویه مسیر به ترتیب برابرند با 0° ، $0/61$ میلی متر، $0/22$ میلی متر، 20% و 0° .

در کارهای آینده، علاوه بر زمان ساخت و زبری سطح، دیگر متغیرهای پاسخ نظیر حجم مواد، دقت ابعاد، استحکام کششی و غیره می توانند به منظور یافتن بهترین جهت ساخت مورد بررسی قرار گیرند. همچنین استفاده از دیگر رویکردهای RSM که منجر به پوشش بیشتر نقاط متغیرهای ورودی و متعاقباً، به دست آمدن مدلی دقیق تر می شود، نیز پیشنهاد می شود.

6- مراجع

- [1] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2015.
- [2] ASTM and ISO, "Standard Terminology for Additive Manufacturing- General Principles – Terminology," *Iso/Astm*, Vol. 52900. ASTM International, West Conshohocken, PA, p. 9, 2015.
- [3] S. Ford, L. Mortara, and T. Minshall, "The Emergence of Additive Manufacturing: Introduction

- 45, No. 7–8, pp. 714–730, 2009.
- [18] A. Hoseinian, F. Azimifar, and O. Ghahraei “The investigation of effective parameters on surface roughness in FDM using Artificial Neural Network,” Applied Researching in Electrical, Mechanical, Mechatronic Conference, pp 1-17, 2017. (in persian)
- [19] M. Srivastava, S. Maheshwari, T. K. Kundra, R. Yashaswi, and S. Rathee, “Integration of Fuzzy Logic with Response Surface Methodology for Predicting the Effect of Process Parameters on Build Time and Model Material Volume in FDM Process,” in *Concurrent Engineering*, Vol. 21, No. 4, 2016, pp. 195–206.
- [20] S. Rathee, M. Srivastava, S. Maheshwari, and A. N. Siddiquee, “Effect of varying spatial orientations on build time requirements for FDM process: A case study,” *Def. Technol.*, Vol. 13, No. 2, pp. 92–100, 2017.
- [21] M. Srivastava, S. Maheshwari, T. K. Kundra, and S. Rathee, “An Integrated RSM-GA Based Approach for Multi Response Optimization of FDM Process Parameters for Pyramidal ABS Primitives,” *J. Manuf. Sci. Prod.*, Vol. 16, No. 3, pp. 15–18, 2016.
- [22] F. Lin, W. Sun, and Y. Yan, “Optimization with minimum process error for layered manufacturing fabrication,” *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 7, No. 2, pp. 73–81, 2001.
- [23] D. S. Ingole, T. R. Deshmukh, A. M. Kuthe, and K. M. Ashtankar, “Build orientation analysis for minimum cost determination in FDM,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, Vol. 225, No. 10, pp. 1925–1938, 2011.
- [24] J. A. García Galicia and B. Benes, “Improving printing orientation for Fused Deposition Modeling printers by analyzing connected components,” *Addit. Manuf.*, Vol. 22, No. June 2017, pp. 720–728, 2018.
- [25] M. Khosravi, K. Shiri, “Optimization of fast prototyping method with the help of milk and particle mass algorithms”, *Int. Conf. Mech. aerospace Eng.*, pp. 1–8, 2018. (in persian)
- [26] Y. Zhang, A. Bernard, R. Harik, and K. P. Karunakaran, “Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing,” *J. Intell. Manuf.*, Vol. 28, No. 6, pp. 1393–1407, 2017.
- [27] M. Srivastava, S. Maheshwari, T. K. Kundra, and S. Rathee, “Estimation of the Effect of Process Parameters on Build Time and Model Material Volume for FDM Process Optimization by Response Surface Methodology and Grey Relational Analysis,” in *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 29–38.
- [28] H. H. Shahabi and M. M. Ratnam, “Noncontact roughness measurement of turned parts using machine vision,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 46, No. 1–4, pp. 275–284, 2010.
- [29] O. a. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, “Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects,” *Adv. Manuf.*, pp. 42–53, 2015.
- to the Special Issue,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, Vol. 102, pp. 156–159, 2016.
- [4] D. T. Pham and S. S. Dimov, *Rapid Manufacturing*, Vol. 138, No. 2. London: Springer London, 2001.
- [5] C. Chee Kai, W. Chee How, and Y. Wai Yee, *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*. Technology & Engineering; Academic Press, 2017.
- [6] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Vol. 32, No. 2. New York, NY: Springer New York, 2015.
- [7] D. Dutta, F. B. Prinz, D. Rosen, and L. Weiss, “Layered Manufacturing: Current Status and Future Trends,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, Vol. 1, No. 1, p. 60, 2002.
- [8] I. Durgun and R. Ertan, “Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost,” *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 20, No. 3, pp. 228–235, 2014.
- [9] K. Thrimurthulu, P. M. Pandey, and N. Venkata Reddy, “Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 44, No. 6, pp. 585–594, May 2004.
- [10] D. Frank and G. Fadel, “Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes,” *J. Intell. Manuf.*, Vol. 6, No. 5, pp. 339–345, 1995.
- [11] D. Devika and N. S. Gupta, “Modeling the process parameters of RP-FDM using Anova and Response SurfACE Methodology for PC-ABS materials,” *Int. Conf. Electr. Electron. Optim. Tech. ICEEOT 2016*, pp. 2059–2062, 2016.
- [12] C. C. Wang, T. W. Lin, and S. S. Hu, “Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis,” *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 13, No. 5, pp. 304–315, 2007.
- [13] V. B. Nidagundi, R. Keshavamurthy, and C. P. S. Prakash, “Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process,” *Mater. Today Proc.*, Vol. 2, No. 4–5, pp. 1691–1699, 2015.
- [14] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, “Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, Vol. 81, pp. 174–196, 2016.
- [15] G. P. Kumar and S. P. Regalla, “Optimization of Support Material and Build Time in Fused Deposition Modeling (FDM),” *Appl. Mech. Mater.*, Vol. 110–116, No. January 2016, pp. 2245–2251, 2011.
- [16] E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, and P. Lafon, “Multi-Objective Optimization of Additive Manufacturing Process,” *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 11, pp. 152–157, 2018.
- [17] V. Canellidis, J. Giannatsis, and V. Dedoussis, “Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.

- algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 160, No. 1, pp. 70–76, Mar. 2005.
- [34] C.-L. Hwang and A. S. M. Masud, *Multiple Objective Decision Making-Methods and Applications*, Vol. 164. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1979.
- [35] G. Mavrotas, “Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems,” *Appl. Math. Comput.*, Vol. 213, No. 2, pp. 455–465, 2009.
- [30] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. Wiley, 2017.
- [31] R. H. Myres, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 4th ed., Vol. 6, No. 2. Wiley, 2016.
- [32] N. L. Johnson, “Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation,” *Biometrika*, Vol. 36, No. 1, pp. 149–176, 1949.
- [33] D. S. Correia, C. V. Gonçalves, S. S. da Cunha, and V. A. Ferraresi, “Comparison between genetic