



بهینه‌سازی زبری سطح در فرایند استریولیتوگرافی

سیدجواد اعرج خدایی¹، عبدالرضا رحیمی^{2*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، rahimi@aut.ac.ir, 15875-4413

چکیده

فرایند استریولیتوگرافی به دلیل دارا بودن همزمان دقت و استحکام، بیشترین سهم را در ایجاد قالب‌های تزریق پلاستیک و نمونه‌های ریخته‌گری در خلا و دیگر زمینه‌ها از میان شاخه‌های مختلف نمونه‌سازی سریع دارد. با این حال یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌های آن کیفیت پایین سطح ایجاد شده است. در این پژوهه تأثیر پارامترهای فرایند و جهت قرارگیری نمونه بر کیفیت سطح بررسی شد؛ بنابراین نمونه‌های در شرایط مختلف زاویه سطح، فاصله هاشور و زمان بازپخت ایجاد شده و پارامترهای زبری سطح به دو روش تماسی و غیرتماسی اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها درای زاویه سطح در بازه ۰ تا ۱۸۰ درجه با گام 2 درجه بودند. زمان‌های بازپخت در نظر گرفته شده 20، 50 و 80 دقیقه و مقدار فاصله هاشور ۵۰، ۷۵ و ۱۲۵ میکرومتر است. در روش غیرتماسی به کمک پیکروسکوب دیجیتالی، پروفیل سطح به دست آمده و سیس زبری سطح به کمک نرم‌افزار متلب محاسبه شد. در نهایت به کمک تحلیل آنالیز واریانس رابطه ریاضی بین ورودی‌ها و پاسخ‌ها ایجاد شد. تابع نشان داد که با افزایش فاصله هاشور، زبری سطح افزایش می‌یابد و زبری سطح در سطوح بالایی، با افزایش زاویه سطح ابتدا با سرعت افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در سطوح پایین با افزایش زاویه، زبری سطح به آرامی افزایش یافته و سیس کاهش می‌یابد. همچنین به نظر می‌رسد تغییرات زبری مستقل از زمان بازپخت است. مقایسه داده‌های واقعی با پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط مدل ایجاد شده نشان می‌دهد که خطای پیش‌بینی کمتر از ۱۴٪ است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۳ تیر ۱۳۹۳

پذیرش: ۰۹ مرداد ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۸ آذر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

استریولیتوگرافی

زبری سطح

زاویه سطح

فاصله هاشور

تحلیل آنالیز واریانس

Optimization of surface roughness in stereolithography

Seied Javad Aaraj Khodaii¹, Abdolreza Rahimi^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

*P.O.B. 15875-4413 Tehran, rahimi@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 24 June 2014

Accepted 31 July 2014

Available Online 09 December 2014

Keywords:

Stereolithography

Surface Roughness

Surface Angle

Hatch Space

ANOVA

ABSTRACT

Stereolithography has the most portions through rapid prototyping techniques in injection molding and vacuum casting manufacturing because of simultaneously possessing dimensional accuracy and strength. However, low surface finish and appearance of stair-step phenomenon restrict extensive of use of this process. In this research, the influence of process parameters and part orientation on surface finish was studied. For this purpose parts were built in various conditions of surface angle, hatch space and post curing time. Surface roughness was measured by contact and non-contact method. Surface angle was in 0-180 degree range by 2 degree step. Considered post curing time was 20, 50 and 80 minutes and hatch spacing was 50, 75, 100 and 125 micrometer. In non-contact method using digital microscope, surface profile was obtained and then surface roughness calculated using MATLAB software. Finally, using Analysis of Variance (ANOVA) a mathematical model has been developed among parameters and responses. Results showed that surface finish has reverse relation with hatch space and is almost independent of post curing time. Surface roughness in up-facing increases swiftly with surface angle enhancement and then drops. In down-facing surface roughness increases slowly with surface angle enhancement and then falls. Comparison of real dates with estimated values showed that estimation average error is less than 14 percent.

شناخته‌ترین شاخه‌های فرایندهای ساخت افزایشی² است که نمونه فیزیکی را توسط پخت پلیمرهای مایع حساس به نور یا فوتولیمیرها³ ایجاد می‌کند. انرژی مورد نیاز جهت اتصال تعداد بسیار زیادی از مولکول‌های کوچک و ایجاد پیوندهای بسیار قوی توسط پرتو لیزر تأمین می‌شود. براساس شکل ۱

2- Additive manufacturing

3- Photopolymer

نمونه‌سازی سریع به مجموعه فرایندهایی اطلاق می‌شود که قادر هستند قطعه کار را به صورت مستقیم از مدل سه‌بعدی ایجاد شده توسط نرم‌افزارهای طراحی به کمک رایانه تولید کند [۱]. استریولیتوگرافی¹ یکی از مهم‌ترین و

1- مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. J. Aaraj Khodaii, A. Rahimi, Optimization of surface roughness in stereolithography, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 245-256, 2015 (In Persian)

روش‌های افزایشی نظری پوشش دهی سطحی⁷ و در برخی موارد از ترکیبی از روشن‌های افزایشی و کاهشی جهت کاهش زبری سطح استفاده نمونه‌اند [5]. استفاده از این روش‌ها صافی سطح را به مقدار چشمگیری افزایش می‌دهد با این حال به دلیل پیچیدگی هندسی نمونه‌ها، این روش‌ها به صورت دستی روی نمونه‌ها اعمال می‌شود که با ماهیت و فلسفه فرایندهای نمونه‌سازی سریع در تضاد است زیرا منجر به کاهش تکرارپذیری، از بین رفتن ابعاد و هندسه مطلوب، افزایش زمان ساخت، و واپستگی به مهارت اپراتور می‌شود [5]. همچنین در سال‌های اخیر از روش ضخامت لایه متغیر⁸ برای افزایش تعداد لایه در نواحی با زبری سطح بالا استفاده شده است. با استفاده از این روش امکان کاهش زبری سطح بدون افزایش چشمگیر زمان ساخت وجود دارد با این حال از اصلی ترین محدودیت‌های آن می‌توان علاوه بر افزایش زمان ساخت به عدم کارآمدی برای رزین‌های با گرانوی بالا اشاره نمود [3,6]. در نهایت گروه سوم سعی کرداند تأثیر پارامترهای فرایند را بر زبری سطح بررسی کرده و آن‌ها را به گونه‌ای کنترل کنند که کمترین زبری سطح به دست آید. این روش منجر به افزایش زمان و هزینه ساخت نمی‌شود و روی تمامی دستگاه‌ها امکان‌پذیر است با این حال استفاده از آن به مقدار محدود زبری را بهمود می‌بخشد. در این پژوهش از روش سوم استفاده شده است.

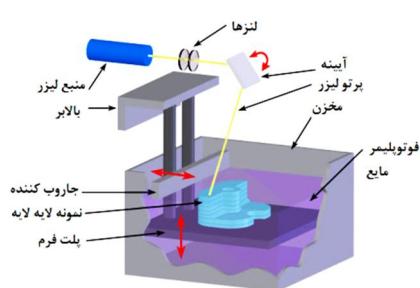
ویلیام و ملتون [7] در سال 1998 تأثیر پارامترهای فرایند ماشین کاری با جریان ساینده⁹ مانند فشار سیال، اندازه ساینده و پارامترهای فرایند استریولیتوگرافی نظری نوع رزین و جهت قارگیری قطعه را بر زیری سطح بررسی قرار داد. آن ها جهت بررسی تأثیر پارامترها بر کیفیت سطح، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی¹⁰ از سطح نمونه ها پس و پیش از ماشین کاری

چان کیم و هی لی [8] در سال 2005 با بیان این نکته که اصلی ترین عامل ایجاد زبری سطح در نمونه های ایجاد شده توسط فرایند استریولیتوگرافی ناشی از دو پدیده پله پله شدن و کنده شدن تکیه گاه و تکه های باقی مانده تکیه گاه هاست، سعی کردند نحوه قرار گیری قطعه را به گونه های بهینه کنند که میزان زمان و هزینه ایجاد نمونه برای دستیابی به زبری سطح مطلوب کمینه شود. آن ها برای این کار ابتدا زبری سطح نمونه هایی با زاویه سطوح مختلف را اندازه گیری کردند سپس میزان زمان طی شده و هزینه صرف شده برای هر بخش از فرایند پس پردازش¹¹ (شستن، جدا کردن تکیه گاه، باز پخت و پرداخت کاری) برای قطعاتی با ابعاد و پیچیدگی هندسی مختلف اندازه گیری کردند. سپس با توجه به زبری سطح قطعه در نحوه قرار گیری های¹² مختلف و همچنین با توجه به این که زمان و هزینه مورد نیاز برای هر مولفه پس پردازش با توجه به مساحت سطح متصل به تکیه گاه، زبری سطح و ... تغییر می کند تابعی بر اساس زمان و هزینه نوشته شد که با کمترین هزینه قرار گیری، قطعه به دست می آید.

پان و همکارانش [4] در سال 2012 روشی را برای بهبود صافی سطح در فرایند استریولیتوگرافی پیشنهاد دادند. این روش تنها برای فرایند استریولیتوگرافی انعکاس تصویر ماسک¹³ قابل استفاده بوده است و فقط صافی سطح سطوح بالابی را افزایش می‌داد.

این فرایند شامل تجهیزاتی نظیر مخزن رزین، فوتولیمیر، سکو با قابلیت جابجایی در راستای قائم، منبع تولید پرتو لیزر و همچنین مجموعه‌ای از آینه‌ها جهت کنترل مسیر حرکت لیزر است. رابطه از اطلاعات موجود در مدل لایه‌لایه شده جهت کنترل آینه‌ها استفاده می‌کند تا قسمت‌های مشخص شده را به حالت جامد تبدیل کند. پس از این که جاروب کردن یک لایه به پایان رسید سکو به مقدار یک ضخامت لایه به داخل مخزن فرو می‌رود (یا از آن خارج می‌شود) و پس از حرکت تیغه پوشش‌دهنده جهت مسطح کردن سطح پایینی و وارد کردن رزین به قسمت بالای لایه ایجاد شده و سپس درنگی کوتاه جهت کنترل تلاطم سیال، جاروب کردن لایه جدید آغاز می‌شود. جهت ایجاد یک لایه، ابتدا لیزر پیرامون لایه را جاروب می‌کند و سپس درنگی کوتاه جهت کنترل تلاطم سیال، جاروب کردن لایه جدید آغاز می‌شود. جهت ایجاد آن ناحیه را مطابق نحوه هاشور انتخاب شده، هاشور می‌زنند. سپس داخل آن ناحیه هاشور زدن را با عنوان فاصله هاشور¹ تعریف می‌کند که یکی از تأثیرگذارترین پارامترها در تعیین عمق پخت، میزان رزین خام پیش از بازپخت و زمان و هزینه نهایی ساخت نمونه فیزیکی است. پس از این که تمامی لایه‌ها ایجاد شدند قطعه از مخزن خارج می‌شود و اپراتور آن را از سکو جدا می‌کند. سپس تکیه گاهها و قسمت‌های اضافی از قطعه کار جدا می‌شود [2]. ناکافی بودن میزان پخت در فرایند منجر می‌شود که قطعه به دست آمده در این مرحله سبز یا ناپخته² نامیده شود. از حمام امواج ماوراء بنفش جهت تکمیل فرایند پخت استفاده می‌شود که به مجموعه این عملیات بازپخت³ گفته می‌شود. فرایند استریولیتوگرافی دارای مزایای بسیار مناسبی در زمینه نمونه‌سازی قالب است. با این حال یکی از اساسی‌ترین محدودیت‌های آن زبری سطح بالای نمونه ایجاد شده توسط این فرایند است [3, 4]. زبری سطح در مواردی نظیر لوزها، جریان سیال و موئیز پارامتر بحرانی است [4]. کاهش زبری سطح این فرایند، یکی از ضروری‌ترین اقدامات جهت افزایش کاربرد آن در زمینه‌های نمونه‌سازی، ابزارسازی سریع⁴ و ساخت مستقیم قالب‌هاست [3].

از میان فرایندهای نمونه‌سازی سریع موجود، استریولیتوگرافی بیشترین سهم را در زمینه ایجاد نمونه‌های فرایندهای ریخته‌گری در خلا^۵ و قالب‌های تزریق پلاستیک است [۵]. اصلی‌ترین محدودیت‌های قطعات ایجاد شده توسط قالب‌های تزریق پلاستیک ایجاد شده توسط فرایند استریولیتوگرافی، زبری سطح بالای آن هاست [۵]. مجموعه فعالیت‌هایی که جهت کاهش زبری سطح در فرایند استریولیتوگرافی انجام شده است را می‌توان در ۳ گروه دسته‌بندی کرد. عده‌ای از پژوهشگران از روش‌های کاهشی، نظر پرداخت کاری سایشی،^۶



شکل ۱ شمای کلی فرایند استریولیتوگرافی

- 1- Hatch space
 - 2- Green part
 - 3- Post curing
 - 4- Rapid tooling
 - 5- vacuum casting
 - 6- Abrasive finishing

غیرتماسی برای محاسبه زبری سطح پیشنهاد شده است که با توجه به سختی پایین این نمونه‌ها⁶، استفاده از این روش می‌تواند منجر به افزایش دقت شود؛ البته می‌بایست محدودیت‌های آن نیز در نظر گرفته شود.

بنابراین می‌توان این گونه جمع‌بندی کرد که در این مقاله سعی شده است، تأثیر پارامترهای زاویه سطح، فاصله هاشور و زمان بازپخت بر کیفیت سطح نمونه‌های ایجاد شده توسط فرایند استریولیتوگرافی مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهای زبری سطح⁷ به عنوان پارامترهای تعیین‌کننده کیفیت سطح بررسی شده‌اند. همچنین جهت اندازه‌گیری زبری سطح از دو روش تماسی و غیرتماسی استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. استفاده از تصاویر بزرگنمایی شده مقطع نمونه‌ها جهت مقایسه زبری سطح نمونه‌ها به صورت کیفی پیش از این نیز انجام شده است، اما در این پژوهش این عمل به صورت کمی و با تحلیل ریاضی داده‌ها صورت گرفته است. در نهایت جهت ارائه رابطه ریاضی بین پارامترهای فرایند و پاسخ‌ها از آنالیز واریانس استفاده شده است.

2- فعالیت‌های تجربی

جهت بررسی تأثیر پارامترهای فرایند استریولیتوگرافی بر کیفیت سطح، می‌بایست نمونه‌هایی در شرایط مختلف ایجاد می‌شد و سپس مقادیر پارامترهای خروجی مورد ارزیابی قرار می‌گرفت. جهت بررسی تأثیر زاویه لیزر نمونه‌ای توسط روس [12] طراحی شد که هندسه و ابعاد آن در شکل 2-الف نمایش داده شده است. این قطعه از 23 مکعب مستطیلی به ابعاد 20×5×5 نمایش داده شده است که مطابق شکل 3 نسبت به هم به اندازه 2 درجه دوران داده شده‌اند. در صورتی که سطح A را در نظر بگیریم با دوران این سطح، زوایای صفر تا 44 درجه با گام 2 درجه ایجاد می‌شود. برای سطح B زوایای 90 تا 46 درجه با دوران مکعب ایجاد می‌شود. با دوران سطح C زوایای 90 تا 134 درجه ایجاد می‌شود و سطح D زوایای 180 تا 136 درجه را ایجاد می‌کند؛ بنابراین در نهایت تمامی زوایای 0 تا 180 درجه با گام 2 درجه ایجاد می‌شوند. نکته‌ای که باید مردم نظر قرار گیرد این است که تنها در نمونه اول دو سطح دارای زاویه 90 درجه هستند. در نمونه استفاده شده در این پژوهه که نسبت به نمونه استفاده شده در تحقیق انجام شده توسط روس [3] تغییرات اندکی دارد، یک مکعب مستطیل به ابعاد 3.5×5×5 در مرکز نمونه در نظر گرفته شده است که اضلاع آن مطابق شکل 3 زوایای 0 یا 90 درجه با لیزر ایجاد می‌کنند. همچنین شماره هر نمونه در مدل سه بعدی روی سطح این مکعب مستطیل ایجاد شده است تا نیاز به شماره‌گذاری پس از ساخت رفع شود و احتمال خطا کاهش یابد. از آنجایی که کیفیت سطوح این مکعب مستطیل مورد بررسی نیست، کیفیت سطوح اصلی، مستقل از این شماره‌گذاری است. همچنین این شماره‌گذاری، به صورت شخصی عمل می‌کند که جهت ساخت را تعیین می‌کند. در انتهای هر مکعب یک استوانه به قطر 2 میلی‌متر و ارتفاع 1.5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است که انتهای مکعب مستطیل کوچک را به ابتداء مکعب مستطیل بعدی متصل می‌کند. پس از اتمام مراحل ساخت نمونه‌ها، این استوانه‌ها با نیرو بسیار کوچک شکسته شده و مکعب مستطیل‌ها از هم جدا شدند.

بنابراین برای پارامتر زاویه سطح که مطابق تعریف عبارت است از زاویه بردار نرمال سطح با بردار جهت ساخت [7]، مطابق جدول 1 تمامی مقادیر بین صفر تا 180 درجه، با گام 2 درجه انتخاب می‌شود. به عبارت دیگر برای این پارامتر 90 سطح در نظر گرفته می‌شود. برای پارامتر زمان پخت مطابق

صنعتی نژاد و همکارانش [9] الگوریتمی را پیشنهاد کردند که جهت قرار گیری نمونه را به گونه‌ای تعیین می‌کرد که زمان ساخت و زبری سطح را همزمان کمینه می‌کرد. در این روش از روش لایه زنی با ضخامت متغیر با توجه به انحنای سطوح استفاده می‌شد.

روس و کاب [5,3] در سال 1998 برای نخستین بار نمونه‌ای¹ جهت بررسی تأثیر زاویه سطح بر زبری را طراحی کرده و پس از ساخت این نمونه توسط دستگاه‌های استریولیتوگرافی² زبری نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرده و سپس منحنی زاویه سطح - زبری را ترسیم کرد. آن‌ها با بررسی این منحنی متوجه شدند که پدیده‌ای منجر به افت زبری سطح در بازه 90 تا 150 درجه نسبت به بازه 30 تا 90 درجه می‌شود و نتیجه‌گیری کردند که این نتیجه ناشی از پخت اضافی روزین موجود در ناحیه بین دو لایه در مراحل بعدی است که این پدیده پخت اضافی³ نامیده می‌شود.

در ادامه کمپل و همکارانش [10] در سال 2002 در ادامه از این نمونه جهت بررسی تأثیر زاویه سطح بر زبری نمونه‌ها ایجاد شده توسط فرایندهای نمونه‌سازی سریع مختلف⁴، استفاده کردند و مقادیر تجربی به دست آمده را با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه (1) مقایسه کردند. آن‌ها همچنین ملاحظه کردند که افت زبری در بازه (150-90) درجه فقط در فرایند استریولیتوگرافی و به واسطه پخت اضافی در سطوح پایه‌ی زیر می‌دهد.

$$(1) Ra = \alpha \times \sin\left(\frac{\theta}{4}\right) \times \tan(\theta)$$

در نهایت شاگر و روزن [11,6] در سال 2008 با عنوان کردن این نکته که پدیده پله‌پله شدن اصلی ترین عامل محدودکننده صافی سطح است سعی کردند ابتدا میزان زبری سطح را در شرایط مختلف پیش‌بینی کردند. شاگر و همکارش با توجه به پدیده پخت اضافی سرعت اسکن را به گونه‌ای تنظیم کردند که بیشترین میزان پخت در نواحی بین لایه‌ای رخ دهد؛ بنابراین کمترین میزان زبری سطح به دست آید. آن‌ها سه نمونه با زوایای 3.0 و 7.2 و 45 درجه در سطوح پایین، ضخامت لایه 0/1 و 0/2 و 0/7 و همچنین بازپخت در مخزن الكل پروبیلن با تمیزکننده التراسونیک به مدت زمان‌های 0 و 1 دقیقه را پیش و پس از بهبود سطح مورد بررسی قرار دادند و میزان صحت مدل تحلیلی و کارآبی روش پیشنهادی را ارزیابی کردند. آن‌ها جهت زبری‌سنجدی از روش تماسی استفاده کردند. در نهایت ملاحظه شد که زبری سطح به میزان چشمگیری کاهش یافته است. از جمله محدودیت‌هایی که برای روش خود عنوان کرده‌اند کاهش دقت ابعادی در اثر اعمال روش پیشنهادی است.

با توجه مطالب بالا ملاحظه می‌شود که ضخامت لایه و جهت قرار گیری قطعه یا زاویه سطح تعیین‌کننده پارامترهای کیفیت سطح هستند. همچنین تأثیر پارامتر فاصله هاشور بر زبری سطح نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد که فقط در یک مورد و بر هندسه خاص مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ماهیت تأثیر زمان بازپخت بر زبری سطح بررسی نشده است. از سویی تأثیر تداخل این پارامترها نیز می‌تواند قابل توجه باشد. بررسی‌های انجام گرفته تنها پارامتر متوسط زبری⁵ از کیفیت سطح را مورد بررسی قرار داده‌اند در حالی که سطوح با ساختارهای مختلف می‌توانند دارای مقادیر یکسان پارامتر متوسط زبری باشند، بنابراین بررسی تأثیر پارامترهای فرایند بر دیگر پارامترهای زبری سطح ضروری می‌کند. همچنین در این تحقیق روش

1-Turncheon

2-SLA250, SLA350, SLA500

3-print-through

4-SLA, MJM, FDM, LOM & SLS

5-Ra

شده است. این دستگاه از نوع تابش از بالا بوده و بیشینه توان لیزر آن ۱۰۰ میلی وات است. لیزر این دستگاه یاقوت کامپیویوم حالت جامد است که طول موج آن ۳۵۴/۷ نانومتر و قطر آن ۲۵۰ میکرومتر است. دقت این دستگاه در صفحه XY برابر $7/6$ میکرون و در راستای Z برابر $2/5$ میکرون است. پس از ایجاد مدل سه بعدی در نرم افزار^۳، جهت وارد کردن مدل به دستگاه، فایل ایجاد شده به صورت لایه لایه^۴ ذخیره شد تا توسط دستگاه قابل فرآخوانی باشد. همچنین از رزین فوتولیمیر^۵ استفاده شده است. سپس جاروب کننده برای مراحل پس از ایجاد تکیه گاه تعریف شد. کمترین ارتفاع ساپورت ۱۰ میلی متر تعریف شد. سپس فایل سه بار در نرم افزار فرآخوانی شده و پس از دوران و جابجایی در نهایت چیدمان نمایش داده شده در شکل ۴ و شکل ۵ حاصل شد. در مرحله بعد سکو توسط استون شسته شده و سپس نصب می شود. مؤلفه های تنظیم شده بر دستگاه در جدول ۴ نمایش داده شده است.

۲-۱- تولید^۶

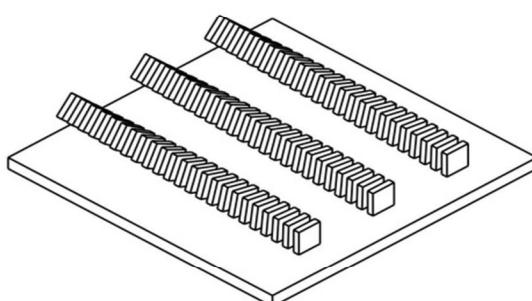
نمونه ها در دو گروه ایجاد شدند. در ست آپ اول سه دسته نمونه یکسان که در آن ها زاویه سطح تغییر کرده است ایجاد می شود تا هر دسته نمونه پس از تولید تحت زمان بازیخت مختلف قرار گیرد. در ست آپ دوم نیز سه دسته نمونه تولید شده است که زاویه سطح آن ها تغییر می کند با این تفاوت که برای هر دسته فاصله هاشور متفاوتی تعریف شده است و دسته ها مدت زمان یکسانی تحت بازیخت قرار خواهند گرفت.

۲-۲- پس تولید^۷

پس از ایجاد نمونه ها، توسط استون رزین مایع روی قطعه کار به آرامی شسته شد. سپس نمونه ها توسط کاردک و استون از سکو جدا شده و تکیه گاه های آن ها جدا شد (شکل عکسل ۷). سپس نمونه ها به مدت زمان تعیین شده در حمام ماوراء بخش قرار داده شدند تا پخت نهایی صورت پذیرد (شکل ۸). جهت اندازه گیری پارامترهای مورد نظر، نمونه های موجود در هر دسته از هم جدا شدند (شکل ۹، شکل ۱۰).

۲-۳- اندازه گیری زبری سطح

جهت اندازه گیری زبری سطح، از دو روش غیرتماسی و تماسی استفاده شد. از آن جایی که احتمال تغییر زبری در روش تماسی وجود دارد، ابتدا به صورت روش غیرتماسی و سپس روش تماسی اعمال شد.



شکل ۴ چیدمان قطعه کار در نرم افزار در ست آپ اول

جدول ۲، با توجه به حجم، نسبت به حجم به سطح نمونه و پژوهش های مشابه صورت گرفته، سه سطح انتخاب شد. برای پارامتر فاصله هاشور مطابق جدول ۳ چهار سطح در نظر گرفته شده است.

۱- پیش تولید^۱
در این پژوهش جهت تولید نمونه ها از دستگاه استریولیتوگرافی^۲ استفاده

جدول ۱ سطوح پارامتر زاویه سطح

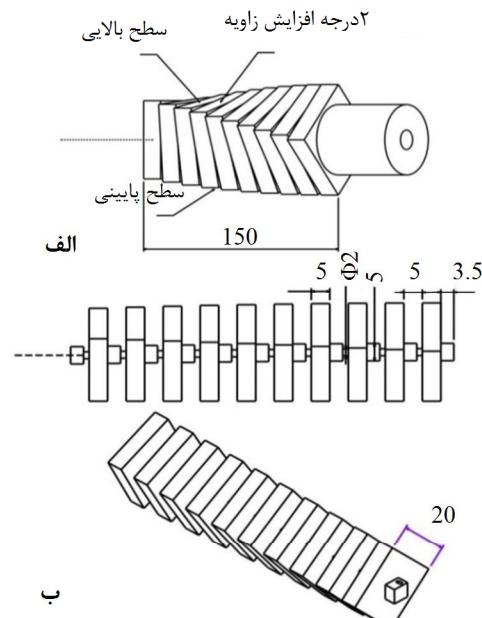
باشه زاویه ای (درجه)	گام
[۰-۱۸۰]	۲ درجه

جدول ۲ سطوح پارامتر زمان بازیخت

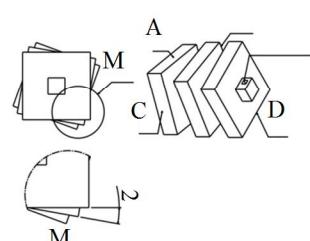
مقدار (دقیقه)	سطح
۲۰	۱
۵۰	۲
۸۰	۳

جدول ۳ سطوح پارامتر فاصله هاشور

مقدار (میلی متر)	سطح
۰/۰۵۰	۱
۰/۰۷۵	۲
۰/۱۰۰	۳
۰/۱۲۵	۴



شکل ۲ مقایسه نمونه استفاده شده الف- توسسط روس- ب- پژوهش حاضر



شکل ۳ هندسه و ابعاد قطعه نمونه

3- Solid Work 2012

4- *.STL

5- WaterShed 11120, DSM Somos

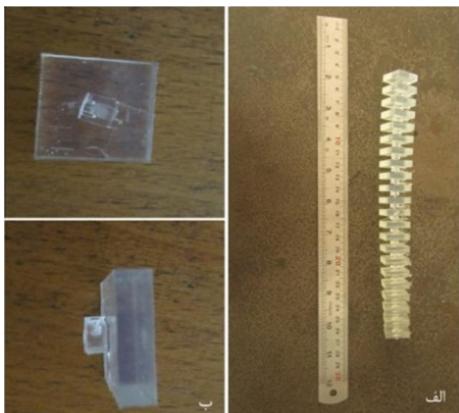
6- Sweeper

7- Processing

8- Post processing



شکل 9 نمونه‌ها پس از تولید

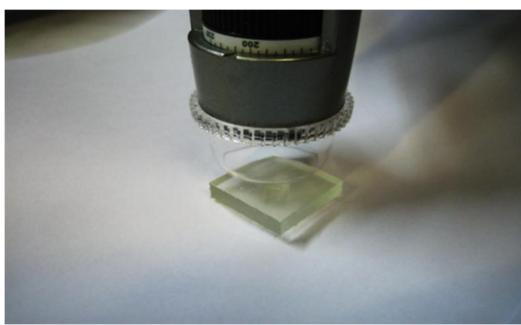


شکل 10 نمونه‌ها الف- پیش از جدا شدن ب- پس از جداسدن

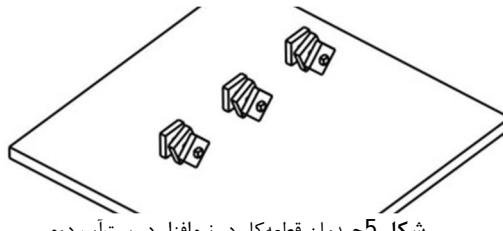
1-4-2- روش غیرتماسی

در روش غیرتماسی توسط میکروسکوپ دیجیتالی⁶ از سطوح نمونه‌ها تصویربرداری شد (شکل 11).

جهت افزایش دقیقی، از هر سطح هر نمونه سه تصویر بزرگنمایی 200 برابرگرفته شده است. ازان جایی که در نرم‌افزار این دستگاه با تعیین میزان بزرگنمایی تصویر، امکان تعیین فواصل وجود دارد پس از تصویربرداری، توسط نرم‌افزار⁷ در راستای سطح و در راستای عمود بر سطح، خطوطی با طول 1/5 میلی‌متر ایجاد شدند. سپس توسط نرم‌افزار داده‌برداری⁸ و انتخاب خطوط ایجاد شده به عنوان محور مختصات، از نقاط سطح داده‌برداری شده و نتایج در جداولی به صورت زوج مرتب (X_0, Y_0) ذخیره شد (شکل 12).



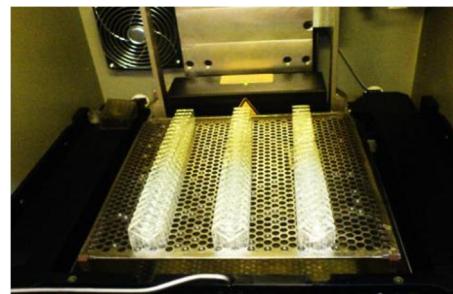
شکل 11 میکروسکوپ دیجیتالی هنگام تصویربرداری از سطح نمونه



شکل 5 چیدمان قطعه کار در نرم‌افزار در ست آپ دوم

جدول 4 مولفه‌های تنظیم شده روی دستگاه

مولفه	مقدار
توان لیزر در ایجاد محیط لایه ¹ (میلی‌وات)	100
توان لیزر در هاشورزنی ² (میلی‌وات)	58
سرعت در ایجاد محیط لایه ³ (اینج بر ثانیه)	20/5
سرعت در هاشورزنی ⁴ (اینج بر ثانیه)	124/1
عمق حرکت به پایین ⁵ (میلی‌متر)	6/25
بیشترین ارتفاع (میلی‌متر)	38/28
ضخامت لایه (میلی‌متر)	0/1
خروج خودکار قطعه پس از اتمام تمام مراحل	بله



شکل 6 نمونه‌ها پس از ایجاد شدن در درون دستگاه



شکل 7 جدا کردن تکیه گاه از قطعه کار



شکل 8 قرار دادن نمونه‌ها در حمام اتراسونیک جهت پخت نهایی

1- Border laser power

2- Hatch space laser power

3- Border speed

4- Hatch Space Speed

5- پس از اتمام هر لایه، سکو به مقادیر 6/25 و 6/15 به پایین حرکت کرده و سپس به مقادیر 6/15 بالا می‌اید. هدف از این حرکت این است که رزین به اندازه کافی بالای سطح ایجاد شده قرار گیرد.

جهت به دست آوردن موقعیت خط میانی³ ابتدا مقدار ارتفاع پایین ترین نقطه را برابر صفر قرار داده، سپس در درون حلقه در هر مرحله محور X به مقدار گام تعریف شده (0/0001) به بالا انتقال داده شده و مقدار مجموع انتگرال محاسبه شد و حلقه زمانی به پایان رسید که اختلاف مقدار انتگرال از صفر کمتر از خطای تعریف شده باشد، رابطه (14).

$$y_i = y_i - (y_i^{Min}) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} f_{i,i+1}(x) dx < error \quad (15)$$

$$y_i = y_i + (Step) \quad (16)$$

در نهایت مقدار پارامتر متوسط زبری به کمک رابطه (17) به دست می‌آید.

$$Ra = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} |f_{i,i+1}(x)| dx}{(X_{max} - X_{min})} \quad (17)$$

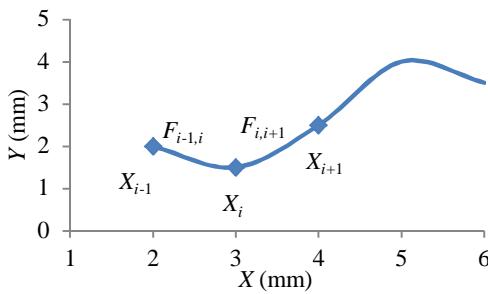
جهت اعتبار سنجی و بررسی کارآیی روش پیشنهاد شده از دوتابع با زبری مشخص استفاده شد و ملاحظه شد که مقدار زبری به دست آمده صحیح است. نتایج این اعتبار سنجی در جدول 5 و شکل 14 ارائه شده است. در پژوهش‌های پیشین نیز جهت به دست آوردن سطح پخت شده، منحنی‌هایی از داده‌های به دست آمده عبور داده و از آن استفاده کردند. در روش استفاده شده در پژوهش حاضر از نقاط منحنی‌های درجه سه عبور داده شده و در نهایت از منحنی‌ها به صورت تحلیلی انتگرال گیری شد. در این روش نیاز به تعیین یا محدود کردن تعداد داده‌ها نیست. همچنین در این روش در صورت نابرابری فاصله داده‌ها مشکلی در به دست آوردن معادله منحنی‌ها ایجاد نمی‌شود.

2-4-2- روش تماشی

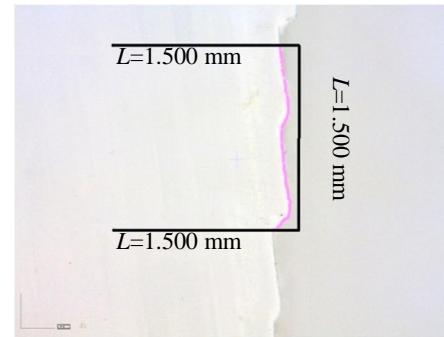
روش تماشی توسط دستگاه زبری سنج⁴ انجام شده است (شکل 15). با توجه به این که برای سطوح فرایند استریولیتوگرافی $Ra < 10$ میلی‌متر انتخاب شد [13]. جهت افزایش دقت، از هر نمونه برداری 2/5 میلی‌متر انتخاب شد. جهت افزایش دقت، از هر سطح در پنج نقطه مختلف عمل زبری سنجی صورت گرفته و نتایج ذخیره شد.

جدول 5 اعتبار سنجی روش پیشنهاد شده

ردیف	تابع	بازه	Ra پیش‌بینی شده (μm)	Ra به دست آمده (μm)
1	$y = 3x$	$0 < x < 2$	1.5	1.5000
2	$y = \sin(x)$	$0 < x < 2\pi$	$\frac{4}{2\pi} = 0.63$	0.6369



شکل 13 عبور دادن منحنی درجه سه از نقاط به دست آمده



شکل 12 داده‌برداری از سطح نمونه نسبت به محورهای مختصات توسط نرم‌افزار داده‌برداری

جهت به دست آوردن پارامتر زبری از نرم‌افزار متلب¹ استفاده شد. بداین صورت که مطابق شکل 13 از داده‌های به دست آمده، از هر دو نقطه یک منحنی درجه سه² عبور داده شد به‌گونه‌ای که در نقاط مرزی دارای شیب و تقریب یکسان با منحنی مجاور است؛ بنابراین برای سه نقطه 8 معادله و 8 مجهول به صورت رابطه‌های (9-1) خواهیم داشت.

$$(x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}) \quad (1)$$

$$f_{i-1,i} = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_1 \quad (2)$$

$$f_{i,i+1} = a_2 x^3 + b_2 x^2 + c_2 x + d_2 \quad (3)$$

$$f_{i-1,i}(x_i) = y_i \quad (4)$$

$$f_{i,i+1}(x_i) = y_{i+1} \quad (5)$$

$$f_{i-1,i}(x_{i-1}) = y_{i-1} \quad (6)$$

$$f_{i,i+1}(x_{i+1}) = y_{i+1} \quad (7)$$

$$f'_{i-1,i}(x_i) = f'_{i,i+1}(x_i) \quad (8)$$

$$f''_{i-1,i}(x_i) = f''_{i,i+1}(x_i) \quad (9)$$

در نهایت با حل این معادلات، تابع درجه سه به صورت رابطه‌های (11-10) به دست می‌آید.

$$f_{i-1,i+1}(x) = \frac{K_1}{6} \left[\frac{(x - x_{i+1})^3}{(x_i - x_{i+1})} - (x - x_{i+1})(x_i - x_{i+1}) \right] + \frac{K_{i+1}}{6} \left[\frac{(x - x_{i+1})^3}{(x_i - x_{i+1})} - (x - x_{i+1})(x_i - x_{i+1}) \right] + \frac{y_i(x - x_{i+1}) - y_{i+1}(x - x_i)}{x_i - x_{i+1}} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_2 & 2b_2 & c_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & 2b_3 & c_3 & \dots & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ \dots \\ K_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_2 \\ f_3 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$a_i = (x_{i+1} - x_i)$$

$$b_i = (x_{i+1} - x_{i+1})$$

$$c_i = (x_i - x_{i+1})$$

$$f_i = 6 \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \right) \quad (12)$$

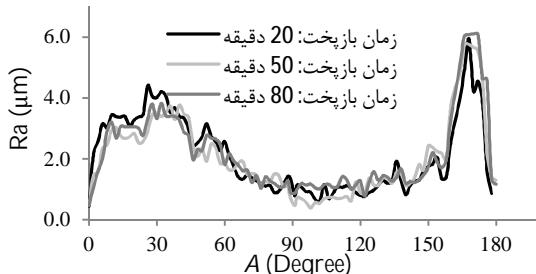
و انتگرال تابع به دست آمده برابر با رابطه (13) خواهد بود.

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f_{i,i+1}(x) dx = (x_i - x_{i+1})^3 \left[\frac{K_i}{24} + \frac{K_{i+1}}{24} \right] + (x_{i+1} - x_i) \left[\frac{y_i + y_{i+1}}{2} \right] \quad (13)$$

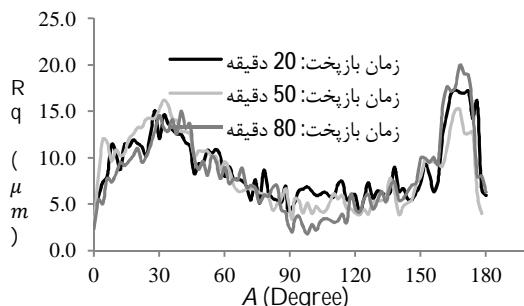
1- MATLAB

2- Cubic spline

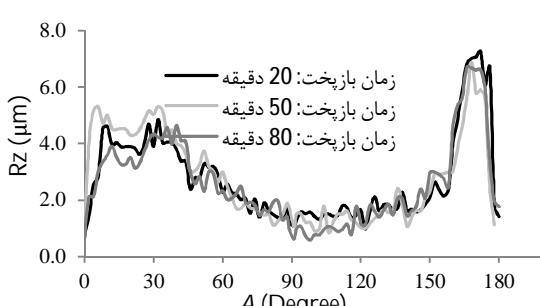
درجه، افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به بازه زاویه‌ای (25-22) درجه آغاز به کاهش می‌کند تا این که به بازه زاویه‌ای (90-110) درجه می‌رسد. دلیل این پدیده را می‌توان با اثر پله‌پله شدن توجیه کرد، به عبارت دیگر همان گونه که شکل 20 نمایش می‌دهد، ماهیت فرایند استریولیتوگرافی که عبارت است از تقسیم قطعه به لایه‌های با ضخامت یکسان (در برخی موارد با ضخامت متفاوت) در راستای محور Z، موجب می‌شود که در قسمت‌هایی از سطحی که بردار نرمال آن مواردی یا عمود بر محور Z نیست پخت کامل رخ نداده و سطوح تخت به صورت پله‌پله ایجاد شوند [7]. این پدیده موجب تشدید زیری سطح می‌شود و میزان آن به زاویه سطح وابسته است.



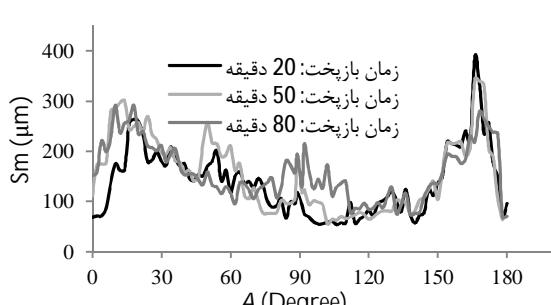
شکل 16 منحنی زاویه سطح- R_a . فاصله هاشورزنی: 0.100 mm



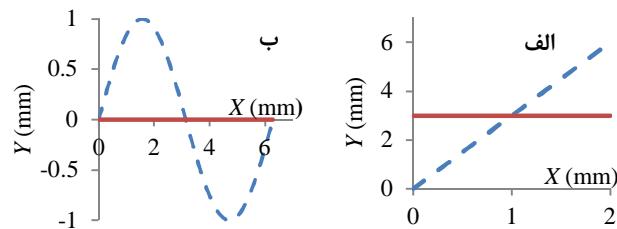
شکل 17 منحنی زاویه سطح- R_q . فاصله هاشورزنی: 0.100 mm



شکل 18 منحنی زاویه سطح- R_z . فاصله هاشورزنی: 0.100 mm



شکل 19 منحنی زاویه سطح- Sm . فاصله هاشورزنی: 0.100 mm



شکل 14 منحنی‌های ترسیم شده توسط روش پیشنهاد شده جهت اعتبارسنجی آن-الف) تابع $Y=3X-2$ -ب) تابع $Y=\sin(X)$



شکل 15 دستگاه زیری سنج هنگام اندازه‌گیری زیری سطح

3- نتایج و بحث

در زیری سنجی نمونه‌ها پنج بار برای هر سطح انجام شده و در نهایت میانگین این مقادیر برای هر سطح در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر سطح هر چهار مؤلفه زیری سطح اندازه‌گیری و ذخیره شده است. بدليل عدم پخت کامل نمونه‌ها و بی‌دقیقی اپراتور و پر هزینه بودن ساخت دوباره نمونه، سطحی که زاویه 168 درجه با لیزر ایجاد می‌کرد و به مدت 20 دقیقه باز پخت شد (نمونه A7) هنگام جدا کردن از تکیه‌گاه دچار آسیب شده و نتایج آن ارائه نشده است. از آنجایی که نمونه در 90 سطح از زاویه ایجاد شده است، به نظر می‌رسد عدم وجود یک سطح تأثیر چشمگیری بر کیفیت و نتیجه‌گیری نداشته باشد.

میانگین داده‌ها¹ از تقسیم کردن مجموع مقادیر بر تعداد آن‌ها به دست آمده است (رابطه (18)). همچنین واریانس استاندارد² و ضریب تغییرات³ داده‌ها به ترتیب از روابط (20-19) به دست آمده‌اند.

$$M(Ra) = \frac{\sum_{i=1}^5 Ra_i}{5} \quad (18)$$

$$S.V(Ra) = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (M(Ra) - Ra_i)^2}{5}} \quad (19)$$

$$C.V(Ra) = \frac{S.V(Ra)}{M(Ra)} \times 100 \quad (20)$$

1-3- تأثیر زاویه سطح بر زیری سطح

با بررسی منحنی‌های زاویه سطح-پارامتر زیری سطح در زمان بازپخت ثابت و فاصله هاشورزنی ثابت می‌توان تأثیر زاویه سطح را بر کیفیت سطح مورد بررسی قرار داد.

منحنی‌های زاویه سطح- R_a ، زاویه سطح- Rq ، زاویه سطح- Rz و زاویه سطح- Sm برای نمونه‌هایی با زمان‌های بازپخت 20، 50 و 80 دقیقه و با فاصله هاشورزنی 0/100 میلی‌متر به ترتیب در شکل 16 تا شکل 19 نمایش داده شده است.

با توجه به منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که به ازای تمامی زمان‌های بازپخت و برای تمامی پارامترهای زیری، زیری سطح نمونه‌ها با افزایش زاویه از صفر

1- Mean

2- Standard variance

3- Coefficient of variation

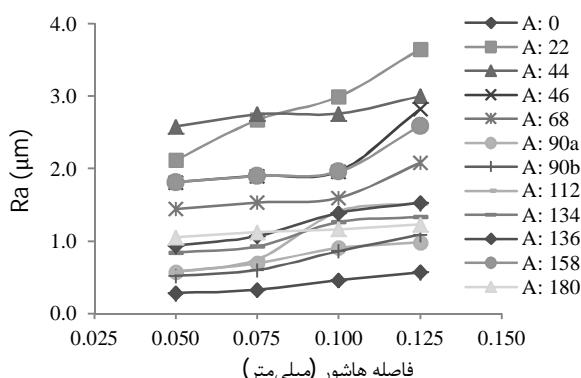
3-3- تأثیر فاصله هاشورزنجی بر زبری سطح

با بررسی منحنی‌های فاصله هاشور- پارامتر زبری سطح برای نمونه‌های تحت زمان بازپخت ثابت و با زاویه سطح ثابت ایجاد شده‌اند می‌توان تأثیر هاشورزنجی را بر کیفیت سطح مورد بررسی قرار داد. منحنی‌های فاصله هاشور- پارامتر زبری سطح (R_a, Rq, Rz, Sm) به ترتیب در شکل 21 تا شکل 24 نمایش داده شده‌اند.

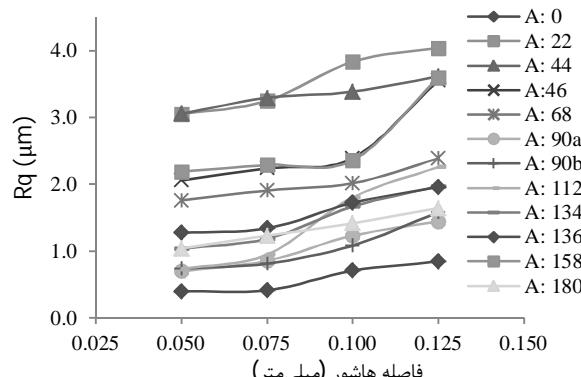
با بررسی منحنی‌های شکل 21 تا شکل 24 ملاحظه می‌شود که به‌ازای تمامی مقادیر زاویه سطح، مقدار زبری با افزایش فاصله هاشور افزایش می‌یابد. این امر بدلیل افزایش فاصله هاشور کردن بین دو لایه رخ می‌دهد. البته در مورد زوایای مختلف روند تغییر زبری متفاوت است که این امر ناشی از تغییر میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترهای زاویه سطح و فاصله هاشور در سطوح مختلف بر زبری است. با این حال در مجموع ملاحظه می‌شود که تأثیر فاصله هاشور بر زبری سطح معکوس است.

3-4- بررسی ضریب تغییرات داده‌ها

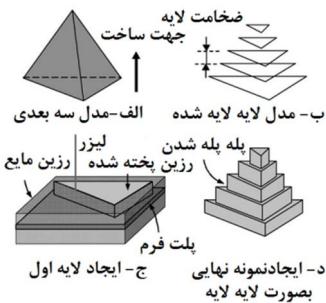
از آن‌جایی که برای هر سطح عمل داده‌داری پنج بار صورت گرفته و در نهایت از مقادیر به‌دست‌آمده میانگین‌گیری شد در این قسمت منحنی‌های ضریب تغییرات داده‌ها نمایش داده می‌شود تا میزان توزیع داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. منحنی زاویه سطح- ضریب تغییرات پارامتر زبری (Rq) به ترتیب در شکل 25 و شکل 26 ارائه شده است.



شکل 21 منحنی فاصله هاشور- Ra ، زمان بازپخت: 50 دقیقه، نمونه‌های D1, D2, E1, E2, E3, F1, F2, F3



شکل 22 منحنی فاصله هاشور- Rq ، زمان بازپخت: 50 دقیقه، نمونه‌های D1, D2, E1, E2, E3, F1, F2, F3



شکل 20 دلیل بروز پدیده پله شدن در فرایند استریولیتوگرافی [7]

به سطوحی که زاویه آن‌ها بین 0 تا 90 درجه باشد سطوح بالا¹ و سطوحی که زاویه آن‌ها بین 90 تا 180 درجه باشد سطوح پایین² اطلاق می‌شود [6]. انتظار می‌رفت که زبری سطوحی که دارای زاویای بین 90 تا 180 است یا سطوح پایین نسبت به سطوحی که دارای زاویای 0 تا 90 درجه هستند یا سطوح بالا بیشتر باشد، زیرا نمونه توسط تکیه‌گاه‌های سوزنی شکل و از سمت سطوح پایین به سکو متصل می‌شود و پس از تولید، هنگام جدا کردن تکیه‌گاه‌ها از نمونه، بخش‌هایی از سطح نمونه نیز کنده می‌شود، همچنین بخش‌هایی از تکیه‌گاه روی سطح نمونه‌ها باقی می‌ماند این عامل یکی از اصلی‌ترین موارد محدودکننده زبری سطح نمونه‌ها توسط پژوهشگاران معرفی شده است [6, 8]. با این حال ملاحظه می‌شود که زبری سطوح پایین نه تنها بیشتر از سطوح بالایی نیست، بلکه در برخی موارد کمتر نیز است. روس دلیل این افت زبری در سطوح پایین را به‌روز پدیده پخت اضافی³ مطرح کرد [3]. انرژی اعمال شده جهت پخت لایه‌های بعدی موجب پخت رزین موجود در قسمت‌های موجود در بین پله‌ها شده و موجب کاهش زبری سطح می‌شود؛ بنابراین پدیده پله‌شدن، کندن تکیه‌گاه‌ها و پدیده پخت اضافی زبری سطح سطوح پایینی را تعیین می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که روند کلی تمامی پارامترهای زبری با تغییر زاویه با تقریب مناسبی یکسان است. با این حال به‌نظر می‌رسد که روند تغییرات Sm با دیگر پارامترها تفاوت‌هایی دارد.

3-2- تأثیر زمان بازپخت بر زبری سطح

با توجه به منحنی‌های شکل 16 تا شکل 19 ملاحظه می‌شود که روند تغییرات زبری سطح با تغییر زمان بازپخت ثابت نیست. به عبارت دیگر در هر باره زاویه‌ای روند متفاوتی دارد. البته هدف از بررسی تأثیر زمان بازپخت، پی بردن به ماهیت تأثیر زمان باز پخت بر زبری سطح است که با توجه با منحنی‌های حاصله می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که تأثیر زمان بازپخت بر زبری قابل صرف‌نظر است. البته تفاوت‌های موجود بین داده‌هایی که فقط زمان بازپخت متفاوتی دارند، را می‌توان این گونه مقایسه کرد، که قطعاتی که در زمان بازپخت یکسان و در زاویه سطح متفاوت ایجاد شده‌اند در یک دسته 23 تا پوده بنابراین تقریباً شرایط یکسانی داشته‌اند، در صورتی که نمونه‌های با زمان بازپخت متفاوت به دسته متفاوتی متعلق بوده و احتمال دارد عواملی نظیر تمیز کردن دستی بر کیفیت سطح آن‌ها را تغییر داده و نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال همان‌گونه که در بخش 3-6 ملاحظه خواهد شد، ضرایب زمان بازپخت نیز در معادله زبری بسیار کوچک است که نشان از قابل صرف‌نظر بودن تأثیر آن است.

1- Up-facing
2- Down-facing
3- Print-through

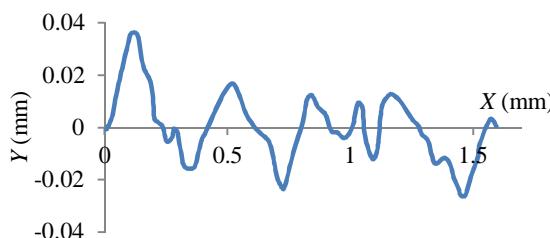
با توجه به این منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که ضریب تغییرات بیشتر داده‌های Ra کمتر از 30 % است. به عبارت دقیق‌تر بیش از 89 % داده‌های Ra دارای ضریب تغییرات کمتر از 30 % است. همچنین با توجه به شکل 26 ملاحظه می‌شود که کمتر از 12 % داده‌های Rq دارای ضریب تغییرات بالای 30 % است.

3- اندازه‌گیری غیرتماسی زیری سطح

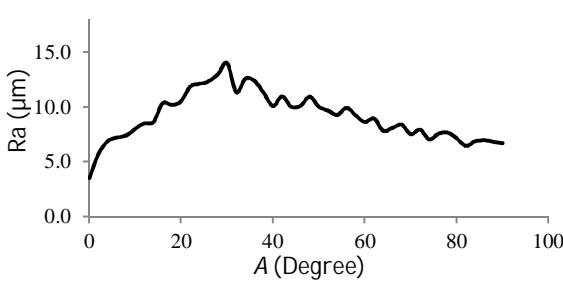
همان‌گونه که در بخش 1-4-2 اشاره شد، جهت به دست آوردن زیری سطح به روش غیرتماسی، تصویربرداری از سطوح نمونه‌ها، داده‌برداری و در نهایت ارسال داده‌ها به نرم‌افزار جهت محاسبه Ra صورت گرفت. شکل 27 دیاگرام ترسیم‌شده توسط نرم‌افزار متلب پس از محاسبه موقعیت خط میانی برای نمونه C14 با زاویه سطح 18 درجه نمایش می‌دهد. منحنی زاویه سطح-زیری سطح در شکل 28 ارائه شده است.

ملاحظه می‌شود که روند تغییرات زیری براساس زاویه سطح در 90 درجه اول منطقی است؛ به‌گونه‌ای که مطابق داده‌های به دست آمده از روش تماسی، زیری سطح با افزایش زاویه از صفر تا 30 درجه افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه از 30 تا 90 درجه، زیری کاهش می‌یابد. از آنجایی که در این روش از لبه قطعه کار تصویربرداری شده است، در تمامی موارد، زیری به دست آمده معرف صحیحی از زیری این سطوح نیست. به عبارت دیگر زیری به دست آمده زیری لبه نمونه است که در مواردی که اختلاف زیری لبه و سطح قابل چشم پوشی باشد، می‌توان از این روش استفاده کرد. شکل 29 مقایسه نتایج اندازه‌گیری تماسی و غیرتماسی زیری سطح برای زوایای صفر تا 90 درجه تحت زمان بازپخت 80 دقیقه را نمایش می‌دهد.

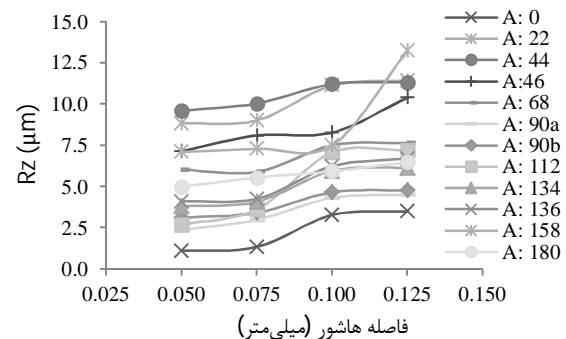
ملاحظه می‌شود با این که روند تغییرات زیری در دو روش با هم برابر است، اما زیری به دست آمده از روش غیرتماسی برای تماسی سطوح بیشتر از مقدار به دست آمده در روش تماسی است. در توجیه نتایج به دست آمده می‌توان این‌گونه بیان کرد که اصلی‌ترین دلیل بروز اختلاف در دو روش، پایین بودن میزان بزرگنمایی میکروسکوپ، کم بودن طول نمونه‌برداری قابل دسترس در هر تصویر (1.5 میلی‌متر) و اختلاف زیری سطح و لبه قطعه کار است.



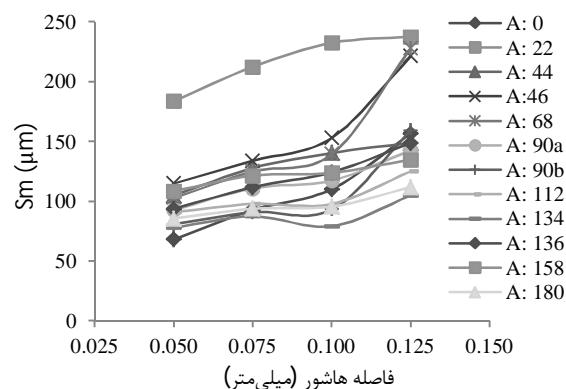
شکل 27 دیاگرام ترسیم شده توسط نرم‌افزار متلب پس از محاسبه موقعیت خط میانی نمونه C14، زاویه سطح: 18 درجه



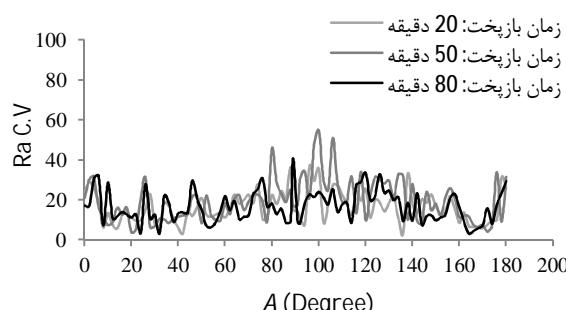
شکل 28 منحنی زاویه سطح-زیری سطح روش غیرتماسی زمان بازپخت: 80 دقیقه، فاصله هاشور 0/100 میلی‌متر



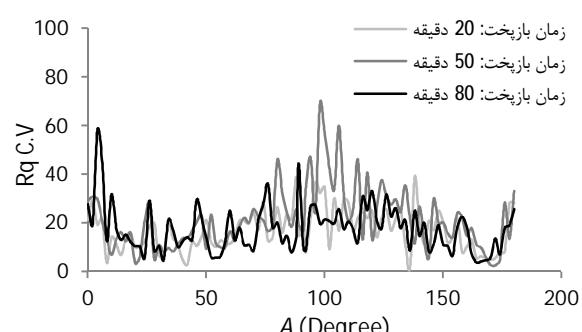
شکل 23 منحنی فاصله هاشور- Rz ، زمان بازپخت: 50 دقیقه، نمونه‌های D1, D2, E1, E2, E3, F1, F2, F3



شکل 24 منحنی فاصله هاشور- Sm ، زمان بازپخت: 50 دقیقه، نمونه‌های D1, D2, E1, E2, E3, F1, F2, F3



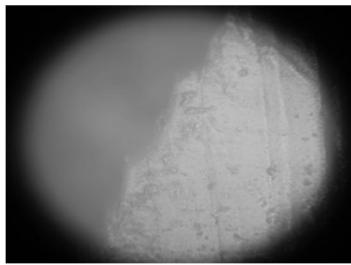
شکل 25 منحنی زاویه سطح-ضریب تغییرات Ra نمونه‌هایی با زمان بازپخت: 20، 50 و 80 دقیقه



شکل 26 منحنی زاویه سطح-ضریب تغییرات Rq نمونه‌هایی با زمان بازپخت: 20 و 50 و 80 دقیقه

جدول 6 مقایسه نتایج زیری سنجی روش تماشی و غیرتماسی نمونه A8، زاویه سطح: 76 درجه

Rz (μm)	Rq (μm)	Ra (μm)	
6/2	1/6	1/2	تماسی
6/0	1/3	1/0	غیرتماسی
%3/2	%18/7	%16/6	درصد اختلاف



شکل 30 تصویر مقطع نمونه A8، زاویه سطح: 76 درجه، بزرگنمایی 500 برابر

در مرحله بعد، تحلیل پاسخ‌ها انجام شده است. برای این کار برای هر پاسخ، مراحل زیر طی شده است:

⁴: در صورتی که نسبت بیشینه مقدار پاسخ به کمینه مقدار آن، کمتر از 3 باشد، نیازی به انتقال نیست، در صورتی که مقدار این پارامتر بین 3 و 10 باشد، انتقال می‌تواند موجب دقیق‌تر شدن شبیه‌سازی شود و در صورتی که این مقدار بالاتر از 10 باشد انتقال ضروری است. مقصود از انتقال این است که در مواردی که تطابق مناسبی بین داده‌ها و معادله درجه n متغیرها وجود نداشته باشد، می‌توان معادله درجه n را بر حسب تابعی از پاسخ به جای خود پاسخ نوشت. مقدار نسبت بیشینه مقدار پاسخ به کمینه مقدار آن در بازه‌های زاویه‌ای مختلف و نوع انتقال در جدول 9 جدول 10 ارائه شده است.

در مرحله بعد، با توجه به تأثیر هر کدام از متغیرها بر پاسخ، تعیین می‌شود که ضرایب هر متغیر تا چه درجه‌ای وجود داشته باشد. همچنین ضرایب تداخلی پارامترها که وجود آن‌ها در معادله نهایی تأثیر گذار است، تعیین می‌شود. همچنین مقادیر ضریب همبستگی برای هر پارامتر در جدول 11 و جدول 12 ارائه شده است.

مجموعی نتایج را که از این جداول می‌توان استخراج نمود را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- مقدار بالای پارامتر اف⁵ برای مدل نشان از کارآمدی مدل است.
- مقدار ضریب همبستگی بالای 0/8 حاکی از کارآمدی مدل ایجاد شده با توجه به داده‌های موجود است. همچنین تناسب موجود بین ضریب تعیین و ضریب تعیین تعديل شده⁶ معقول است.
- مقادیر بالاتر از 4 برای دقت کافی‌شان از کارآمدی مدل برای پیش‌بینی پاسخ است. در نهایت مدل ایجاد شده برای هر پارامتر در جدول 13 و جدول 14 ارائه شده است.

جدول 7 تعریف پارامترهای ورودی در نرم‌افزار

پارامتر	فاصله هاشور	زمان بازیخت	زاویه
C	B	A	ورودی

بدین ترتیب که بدليل پایین بودن میزان بزرگنمایی ووضوح پایین تصاویر امکان تشخیص صحیح دره‌ها و قله‌ها وجود نداشته و نقاطی غیر از نقاط سطح انتخاب شده است. همچنین از آنجایی که طول نمونه‌برداری در روش تماشی 2/5 میلی‌متر است، اما در روش غیرتماسی بدليل طول کم بودن طول نمونه‌برداری قابل دسترس در تصویر، طول نمونه‌برداری 1/5 میلی‌متر انتخاب شده است و این تفاوت در طول نمونه‌برداری به لحاظ آماری می‌تواند منجر به بروز اختلاف شود.

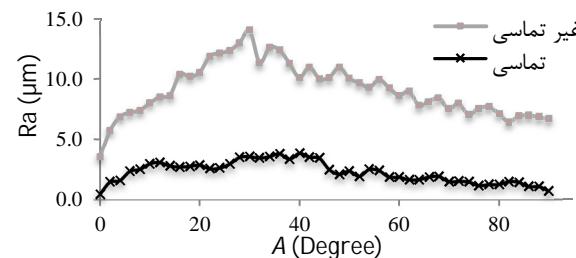
با این حال جهت ارزیابی روش پیشنهاد شده تصویر سطح با زاویه 76 درجه نمونه A8 توسط میکروسکوپ¹ موجود در آزمایشگاه متالوژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر با بزرگنمایی 500 برابر گرفته شد. سپس سطح داده‌برداری شد و نتایج جهت محاسبه به نرم‌افزار مطلب ارسال شد. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری در شکل 30 و جدول 6 می‌نمایش داده شده است.

با توجه به میزان اختلاف قابل قبول روش ارائه شده می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با استفاده از این روش می‌توان زیری سطح را به صورت غیرتماسی بدست آورد؛ با این حال این روش با محدودیت‌هایی مواجه است. به عنوان مثال، استفاده از این روش برای سطوح با زیری سطح پایین، مشروط به استفاده تصاویر با وضوح و بزرگنمایی بسیار بالاست. همچنین داده‌برداری باید با دقیق بسیار بالایی انجام شود. همچنین برای فرایند‌هایی که اختلاف ساختار سطح نمونه در لبه‌ها نسبت به مرکز سطح قابل چشم‌پوشی باشد استفاده از این امکان پذیر است.

3- شبیه‌سازی² ریاضی

در این قسمت جهت مدل‌سازی زیری سطح و به دست آوردن رابطه ریاضی بین پارامترهای ورودی و خروجی، از نرم‌افزار طراحی آزمایش³ استفاده شد. در این نرم‌افزار ابتدا پارامترهای ورودی و خروجی به ترتیب مطابق جدول 7 و جدول 8 تعریف شد. از آنجایی که روند تغییرات زیری سطح در بازه زاویه‌ای (0-90) درجه متفاوت از روند تغییرات آن در بازه (90-180) درجه است و همچنین با توجه به منحنی زاویه سطح- زیری سطح ملاحظه می‌شود که معادلات با درجه بالاتر از چهار، تطابق بیشتر با داده‌ها دارد و این که این نرم‌افزار تنها قادر است معادلات تا درجه سه را شبیه‌سازی کند؛ بنابراین شبیه‌سازی برای هر بازه زاویه‌ای به طور مجزا صورت گرفت تا در نهایت رابطه ریاضی به صورت بازه‌ای به دست آید.

در این قسمت داده‌ها به نرم‌افزار وارد شد. در هر بازه زاویه‌ای سه داده به نرم‌افزار وارد نشده است تا در نهایت پس از شبیه‌سازی، مقادیر این داده‌ها پیش‌بینی شده و میزان صحت مدل ایجاد شده ارزیابی شود.



شکل 29 مقایسه زیری سطح روش‌های تماسی و غیرتماسی مدت باز پخت: 80 دقیقه

1- Leitz WETZLAR

2- Simulation

3- Design-Expert 7.0

جدول 14 مدل‌سازی پاسخ‌ها بازه زاویه‌ای (90-180)

$\frac{1}{\sqrt{Sm}}$	$\frac{1}{\sqrt{Rz}}$	Rq	$\frac{1}{\sqrt{Ra}}$	
0/359	-1/258	0/689	0/417	
-2/708	33/130	34/601	42/214	A
-0/005	0/036	0/048	0/062	B
-0/003	0/009	-0/023	-0/019	C
0/051	-0/197	0/052	-0/017	A.C
1/65e-5	-21e-5	-3e-4	38e-5	B.C
-10/111	-219/952	-434/122	-479/677	A ²
7/07e-5	-43e-5	-56e-5	72e-5	B ²
9/29e-6	2/55e-5	19e-5	185e-6	C ²
0/094	1/567	3/191	3/551	A ² .C
-26e-5	-38e-5	-242e-5	-235e-5	C ² .A
-4/3e-7	3/05e-6	3/97e-6	5/17e-6	B ² .C
8/43e-8	-3/2e-7	-3/5e-7	-5e-7	C ² .B

به دلیل تأثیر ناچیز زمان بازیخت بر زبری سطح در این روابط نیز ملاحظه می‌شود که ضریب پارامتر زمان بازیخت بسیار کمتر از دو پارامتر دیگر است. همچنین تداخل آن با زاویه سطح در مرتبه اول و با فاصله هاشور در مرتبه دوم، به دلیل ناچیز بودن صفر در نظر گرفته شده است.

اکنون جهت ارزیابی مدل‌های ایجاد شده، مقادیر داده‌هایی که حین آموزش دادن مدل وارد نشده است را در قسمت پیش‌بینی³ وارد نموده و مقدار پیش‌بینی شده را با مقدار داده تجربی مقایسه نموده و مقدار خطای دست آمده است. جدول 15 مشخصات نمونه‌هایی که جهت آموزش وارد نشده‌اند را ارائه می‌کند و در جدول 16 و جدول 17 مقدار پیش‌بینی شده و مقدار داده تجربی مقایسه شده و مقدار خطای ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار متوسط خطای کمتر از 14% است.

جدول 15 داده‌های وارد نشده نرم‌افزار حین آموزش دادن

زاویه سطح	زمان بازیخت	فاصله هاشور	
66	20	0/1	1
14	50	0/1	2
68	80	0/1	3
46	50	0/075	4
154	20	0/1	5
134	50	0/1	6
134	50	0/1	7

جدول 16 پیش‌بینی مقادیر پاسخ‌های Ra, Rq توسط نرم‌افزار

Rq (μm)		Ra (μm)		
خطا	واقعی	پیش‌بینی	خطا	واقعی
%35	1/7	2/4	%21	1/4
%2	3/5	3/4	%7	2/7
%15	2/0	2/3	%6	1/6
%27	2/2	2/8	%26	1/9
%17	2/9	2/4	%10	2/0
%7	1/5	1/6	%0	1/2
%0	1/9	1/9	%7	1/3

جدول 8 تعریف پارامترهای خروجی (پاسخ‌ها) در نرم‌افزار

پارامتر	Sm	Rz	Rq	Ra
پاسخ	4	3	2	1
نسبت بیشینه به کمینه پاسخ‌ها در بازه زاویه‌ای 0 تا 90 درجه				
نسبت بیشینه به کمینه	4/52	6/62	7/60	7/10
انجام انتقال	بله	بله	خیر	بله
نوع انتقال	عکس	عکس	عکس	عکس
	مجذور	مجذور	---	مجذور

جدول 9 نسبت بیشینه به کمینه پاسخ‌ها در بازه زاویه‌ای 90 تا 180 درجه

	Sm	Rz	Rq	Ra
نسبت بیشینه به کمینه	7/21	9/98	11/70	13/13
انجام انتقال	بله	بله	بله	بله
نوع انتقال	عکس	عکس	عکس	عکس
	مجذور	مجذور	---	مجذور

جدول 10 نسبت بیشینه به کمینه پاسخ‌ها در بازه زاویه‌ای 90 تا 180 درجه

	Sm	Rz	Rq	Ra
نسبت بیشینه به کمینه	7/21	9/98	11/70	13/13
انجام انتقال	بله	بله	بله	بله
نوع انتقال	عکس	عکس	عکس	عکس
	مجذور	مجذور	---	مجذور

جدول 11 مقادیر ضریب همبستگی پارامترهای زبری در بازه (0-90) درجه

تعیین	ضریب تعیین	دقت	ضریب تعیین	پیش‌بینی شده	کافی
0/911	0/902	0/877	50/361	0/877	
0/850	0/836	0/814	29/653	0/814	
0/863	0/850	0/828	46/755	0/828	
0/611	0/567	0/480	14/386	0/480	

جدول 12 مقادیر ضریب همبستگی پارامترهای زبری در بازه (90-180) درجه

تعیین	ضریب تعیین	دقت	ضریب تعیین	پیش‌بینی شده	کافی
0/843	0/828	0/763	35/474	0/763	
0/831	0/815	0/718	33/864	0/718	
0/808	0/790	0/717	32/188	0/717	
0/694	0/665	0/601	19/744	0/601	

جدول 13 مدل‌سازی پاسخ‌ها بازه زاویه‌ای (0-90)

	$\frac{1}{\sqrt{Sm}}$	$\frac{1}{\sqrt{Rz}}$	Rq	$\frac{1}{\sqrt{Ra}}$
	0/089	0/353	7/134	0/819
A	-1/097	0/392	-6/946	-1/403
B	543e-6	0/004	0/146	0/008
C	508e-6	-0/007	-0/063	-0/0186
A.C	0/005	-0/002	0/335	0/071
B.C	-23e-6	-37e-6	0/002	11e-5
A ²	9/805	-11/925	76/031	-17/353
B ²	1/1e-6	41e-6	0/001	76e-5
C ²	25e-6	159e-6	31e-5	333e-6
A ² .C	-0/077	0/388	-0/388	0/449
C ² .A	146e-6	-84e-5	-0/003	-0/001
B ² .C	1/04e-7	4/36e-7	-19e-6	1/23e-6
C ² .B	9/05e-8	-1/9e-7	-1/7e-7	-3/7e-7

3- Point prediction

1- Predicted R-squared
2- Adequate precision

در نهایت می‌توان این گونه جمع‌بندی کرد که افزایش فاصله هاشور منجر به افزایش زبری سطح می‌شود و از سویی زمان تولید نمونه را کاهش می‌دهد. بنابراین با توجه به زبری سطح مطلوب و هزینه فرایندهای نهایی جهت کاهش زبری سطح می‌توان مقدار مطلوب را انتخاب نمود. تأثیر زمان بازیخت بر زبری سطح قابل صرف نظر است؛ بنابراین انتخاب مقدار آن باید با توجه به سایر ویژگی‌های مطلوب برای نمونه نظیر استحکام، زمان ساخت و ... صورت پذیرد. جهت انتخاب زاویه سطح یا جهت قرارگیری نمونه می‌توان به روش‌های مختلف رفتار کرد: در صورتی که کیفیت سطح مطلوب برای سطح خاصی مد نظر باشد، نظیر حفره داخل قالب تزریق پلاستیک، جهت قرارگیری قطعه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که زبری آن سطح کمترین میزان باشد، اما در صورتی که هدف به دست آوردن کمترین زبری در تمامی سطوح باشد، جهت قرارگیری نمونه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مجموع مقادیر حاصل ضرب زبری در مساحت سطح کمترین مقدار باشد.

5- مراجع

- [1] F. Javidrad, A. R. Pourmoayed, A Sliced Model for Manufacturing Aeronautical Structural Components using Rapid Prototyping Technology, *Modares Mechanical Engineering (Scientific Research Monthly Journal)*, Vol. 10, No. 4, pp. 27-36, 2010, (In Persian)
- [2] B. P. Jorge, *Stereolithography Materials Processes and Applications*, New York: Springer, 2011.
- [3] R. Philip, Reducing the surface deviation of Stereolithography components, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK, 1998.
- [4] Pan. Y, Zhao. X, Zhou. C.Chen. Y, Smooth Surface Fabrication in Mask Projection basedStereolithography, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.14, No 4, pp. 460-470.
- [5] P. Reeves, R. Cobb, Reduction the surface deviation of stereolithography using an alternative build strategy, in the *6th European Conference On Rapid Prototyping And Manufacturing*, 193-204, 1998.
- [6] B. Sager, Use of parameter estimation for stereolithography surface finish improvement, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 14, No. 4, pp. 213-220, 2008.
- [7] M. Williams, A. Robert, Abrasive flow finishing of stereolithography Prototypes, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 56-67, 1998.
- [8] H. Kim,S. Lee, Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction, *Computer-Aided Design*, Vol. 37, pp. 711-725, 2005.
- [9] A. Sanati nezhad 1, M. Vatani2 , F.Barazandeh3 and A.R. Rahimi, Best Part Orientation in Stereolithography With Genetic Algorithm, *9th Iranian Conference on Manufacturing Engineering*, Birjand, 2008, in Persian
- [10] S. Campbell, I. Martorelli, Surface Roughness visualisation for rapid prototyping models, Vol. 34, pp. 717-725, 2002.
- [11] B. Sager, *Sla Characterization for surface finish improvement inverse design method for process planning*, PhD Thesis, , School of Mechanical Engineering, Goeorgia Inistitue of Technology, 2008.
- [12] P. Reeves, Surface deviation modeling of LMT Processes - a comparative analysis, in *Proceedings of Fifth European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Nottingham, 1995.
- [13] F. Biglary, M. Dashtizadeh, *Surface metrology and contact roughness measurement*, Tehran, Amirkabir University of Technology, 2005, (In Persian)

جدول 17 پیش‌بینی مقادیر پاسخ‌های Ra, Rq توسط نرم‌افزار

خطا	پیش‌بینی	واقعی	$Sm (\mu\text{m})$		خطا	پیش‌بینی	واقعی	$Rz (\mu\text{m})$	
			%2	113	115	%23	6/4	7/9	1
%19	256	207	%1	9/1	9/0	2			
%16	140	118	%5	7/5	7/9	3			
%10	134	148	%21	8/1	9/8	4			
%41	217	127	%21	9/6	7/6	5			
%17	94	110	%4	5/2	5/4	6			
%7	105	112	%18	6/2	7/3	7			

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت بررسی تأثیر پارامترهای زاویه سطح، فاصله هاشور و زمان بازیخت، بر زبری سطح در فرایند استریولیتوگرافی، نمونه‌های در شرایط مختلف ایجاد شده و سپس پارامترهای زبری آن‌ها به روش‌های تماسی و غیرتماسی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که زبری سطح در زوایای صفر، نود و صد و هشتاد درجه دارای کمترین مقادیر است. با افزایش زاویه از صفر تا 90 درجه، زبری سطح ابتدا با سرعت زیاد افزایش یافته و سپس رو به کاهش می‌گذارد. در بازه 90 تا 180 درجه افزایش زبری با روند کندری رخ می‌دهد؛ ولی افت زبری بسیار سریع است. دلیل افت زبری در بازه 90 تا 180 درجه نسبت به بازه 0 تا 90 درجه با وجود قسمت‌های کنده‌شده تکیه‌گاه‌ها به وسیله پدیده پخت اضافی توجیه می‌شود، به گونه‌ای که رزین موجود در منطقه بین پله‌ها در اثر تابش لیزر به لایه‌های بالاتر دچار پخت شده و منجر به کاهش ماهیت پله پله سطح شده و زبری سطح را کاهش می‌دهد. همچنین مقایسه پارامترهای مختلف زبری نشان می‌دهد که تقریباً تمامی پارامترها روند یکسانی را طی می‌کنند و فقط پارامتر Sm دارای پراکنده‌گی بیشتری است.

همچنین بررسی منحنی‌های ضریب تغییرات داده‌ها نشان می‌دهد که ضریب تغییرات بیش از 80% داده‌ها کمتر از 30% است. به عبارت دیگر پراکنده‌گی داده‌هایی که از آن‌ها میانگین‌گیری شده است، معقول است.علاوه- براین منحنی‌ها نشان دادند که با افزایش فاصله هاشور، زبری سطح افزایش می‌یابد و تأثیر زمان بازیخت بر زبری قابل صرف نظر است. بررسی نتایج اندازه‌گیری زبری سطح غیرتماسی نشان داد که روند تغییرات زبری نسبت به زاویه سطح یکسان است؛ با این حال مقدار زبری به دست آمده برای تمامی نمونه‌ها بیش از روش تماسی است که علت آن می‌تواند کم بودن طول نمونه‌برداری در روش غیرتماسی، پایین بودن میزان بزرگنمایی و وجود تفاوت بین زبری لبه و زبری سطح اشاره نمود. با مقایسه نتایج زبری سنجی غیرتماسی با بزرگنمایی بیشتر ملاحظه شد که میزان خطای مقدار قابل ملاحظه‌ای افت می‌کند. تحلیل داده‌های به دست آمده توسط آنالیز واریانس، رابطه ریاضی بین پارامترهای ورودی و پارامترهای زبری ایجاد کرد که قادر است مقادیر پارامترها را با خطای متوسط کمتر از 14% پیش‌بینی کند.