



## بهینه‌سازی زبری سطح در فرایند استریولیتوگرافی

سیدجواد اعرج‌خدایی<sup>1</sup>، عبدالرضا رحیمی<sup>2\*</sup>

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

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

\* تهران، 4413-15875-rahimi@aut.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 تیر 1393

پذیرش: 09 مرداد 1393

ارائه در سایت: 18 آذر 1393

کلید واژگان:

استریولیتوگرافی

زبری سطح

زاویه سطح

فاصله هاشور

تحلیل آنالیز واریانس

## 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 داراست. با این حال یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌های آن کیفیت پایین سطح ایجاد شده است. در این پروژه تأثیر پارامترهای فرایند و جهت قرارگیری نمونه بر کیفیت سطح بررسی شد؛ بنابراین نمونه‌هایی 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 برای زاویه سطح در بازه 0 تا 180 درجه با گام 2 درجه بودند. زمان‌های بازپخت در نظر گرفته شده 20، 50 و 80 دقیقه و مقدار فاصله هاشور 50، 75، 100 و 125 میکرومتر است. در روش غیرتماسی به کمک میکروسکوپ دیجیتالی، پروفیل سطح به دست آمده و سپس زبری سطح به کمک نرم‌افزار متلب محاسبه شد. در نهایت به کمک تحلیل آنالیز واریانس رابطه ریاضی بین ورودی‌ها و پاسخ‌ها ایجاد شد. نتایج 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 سپس 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 14% است.

## Optimization of surface roughness in stereolithography

Seied Javad Aaraj Khodaii<sup>1</sup>, Abdolreza Rahimi<sup>2\*</sup>

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

2- 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.

## 1- مقدمه

شناخته‌ترین شاخه‌های فرایندهای ساخت افزایشی<sup>2</sup> است که نمونه فیزیکی را توسط پخت پلیمرهای مایع حساس به نور یا فوتوپلیمرها<sup>3</sup> 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 1

نمونه‌سازی سریع به مجموعه فرایندهایی اطلاق می‌شود که قادر هستند قطعه‌کار را به صورت مستقیم از مدل سه‌بعدی ایجاد شده توسط نرم‌افزارهای طراحی به کمک رایانه تولید کند [1]. استریولیتوگرافی<sup>1</sup> یکی از مهم‌ترین و

2- Additive manufacturing  
3- Photopolymer

1- Stereolithography

روش‌های افزایشی نظیر پوشش دهی سطحی<sup>7</sup> و در برخی موارد از ترکیبی از روش‌های افزایشی و کاهش‌ی جهت زبری سطح استفاده نموده‌اند [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 وابستگی به مهارت اپراتور می‌شود [5]. همچنین در سال‌های اخیر از روش ضخامت لایه متغیر<sup>8</sup> 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 اصلی‌ترین محدودیت‌های آن می‌توان علاوه بر افزایش زمان ساخت به عدم کارآمدی برای رزین‌های با گرانبوی بالا اشاره نمود [3، 6]. در نهایت گروه سوم سعی کرده‌اند 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 بهبود می‌بخشد. در این پژوهش از روش سوم استفاده شده است.

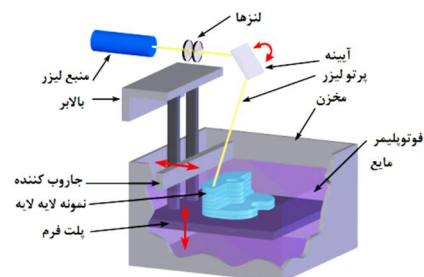
ویلیام و ملتون [7] در سال 1998 تأثیر پارامترهای فرایند ماشین‌کاری با جریان ساینده<sup>9</sup> مانند فشار سیال، اندازه ساینده و پارامترهای فرایند استریولیتوگرافی نظیر نوع رزین و جهت قرارگیری قطعه را بر زبری سطح بررسی قرار داد. آن‌ها جهت بررسی تأثیر پارامترها بر کیفیت سطح، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>10</sup> از سطح نمونه‌ها پس و پیش از ماشین‌کاری برداشته و آن‌ها را مقایسه کردند.

چان کیم و هی لی [8] در سال 2005 با بیان این نکته که اصلی‌ترین عامل ایجاد زبری سطح در نمونه‌های ایجاد شده توسط فرایند استریولیتوگرافی ناشی از دو پدیده پله‌پله شدن و کنده شدن تکیه‌گاه و تکه‌های باقی‌مانده تکیه‌گاه‌هاست، سعی کردند نحوه قرارگیری قطعه را به گونه‌ای بهینه کنند که میزان زمان و هزینه ایجاد نمونه برای دستیابی به زبری سطح مطلوب کمینه شود. آن‌ها برای این کار ابتدا زبری سطح نمونه‌هایی با زاویه سطوح مختلف را اندازه‌گیری کرده سپس میزان زمان طی شده و هزینه صرف شده برای هر بخش از فرایند پس پردازش<sup>11</sup> (شستن، جداکردن تکیه‌گاه، باز پخت و پرداخت کاری) برای قطعاتی با ابعاد و پیچیدگی هندسی مختلف اندازه‌گیری کردند. سپس با توجه به زبری سطح قطعه در نحوه قرارگیری‌های<sup>12</sup> 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 تکیه‌گاه، زبری سطح و ... تغییر می‌کند تابعی براساس زمان و هزینه نوشته شد که با کمینه کردن آن بهترین نحوه قرارگیری قطعه به دست می‌آید.

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 ماسک<sup>13</sup> قابل استفاده بوده است و فقط صافی سطح سطوح بالایی را افزایش می‌داد.

این فرایند شامل تجهیزاتی نظیر مخزن رزین، فوتوپلیمر، سکو با قابلیت جابجایی در راستای قائم، منبع تولید پرتو لیزر و همچنین مجموعه‌ای از آینه‌ها جهت کنترل مسیر حرکت لیزر است. رایانه 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 داخل آن ناحیه را مطابق نحوه هاشور انتخاب شده، هاشور می‌زند. فاصله بین دو خط موازی حین هاشور زدن را با عنوان فاصله هاشور<sup>1</sup> 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 تکیه‌گاه‌ها 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 ناپخته<sup>2</sup> نامیده شود. از حمام امواج ماورا بنفش جهت تکمیل فرایند پخت استفاده می‌شود که به مجموعه این عملیات بازپخت<sup>3</sup> 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 لنزها، جریان سیال و مونتاژ پارامتر بحرانی است [4]. کاهش زبری سطح این فرایند، یکی از ضروری‌ترین اقدامات جهت افزایش کاربرد آن در زمینه‌های نمونه‌سازی، ابزارسازی سریع<sup>4</sup> و ساخت مستقیم قالب‌هاست [3].

از میان فرایندهای نمونه‌سازی سریع موجود، استریولیتوگرافی بیشترین سهم را در زمینه ایجاد نمونه‌های فرایندهای ریخته‌گری در خلا<sup>5</sup>، و قالب‌های تزریق پلاستیک است [5]. اصلی‌ترین محدودیت‌های قطعات ایجاد شده توسط قالب‌های تزریق پلاستیک ایجاد شده توسط فرایند استریولیتوگرافی، زبری سطح بالای آن‌هاست [5]. مجموعه فعالیت‌هایی که جهت کاهش زبری سطح در فرایند استریولیتوگرافی انجام شده است را می‌توان در 3 گروه دسته‌بندی کرد. عده‌ای از پژوهشگران از روش‌های کاهش‌ی نظیر پرداخت کاری سایشی<sup>6</sup> و



شکل 1 شمای کلی فرایند استریولیتوگرافی

7- Surface coating  
8- Adaptive slicing method  
9- Abrasive flow finishing  
10- SEM  
11- Post processing  
12- Part orientation  
13- mask-image-projection-based Stereolithography (MIP-SL)

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 نمونه‌ها<sup>6</sup>، استفاده از این روش می‌تواند منجر به افزایش دقت شود؛ البته می‌بایست محدودیت‌های آن نیز در نظر گرفته شود.

بنابراین می‌توان این‌گونه 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 سطح<sup>7</sup> به‌عنوان 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 به‌صورت کیفی پیش از این نیز انجام شده است، اما در این پژوهش این عمل به‌صورت 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  $5 \times 20 \times 20$  ساخته 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 مورد نظر قرار گیرد این است که تنها در نمونه اول دو سطح دارای زاویه 90 درجه هستند. در نمونه استفاده شده در این پروژه که نسبت به نمونه استفاده شده در تحقیق انجام شده توسط روس [3] تغییرات اندکی دارد، یک مکعب مستطیل به ابعاد  $5 \times 5 \times 3.5$  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 سه‌بعدی روی ضلع 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، به‌صورت شاخصی 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 ابتدا مکعب مستطیل بعدی متصل می‌کنند. پس از اتمام مراحل ساخت نمونه‌ها، این استوانه‌ها با نیرو بسیار کوچکی 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. به‌عبارت 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 قرارگیری نمونه را به‌گونه‌ای تعیین می‌کرد که زمان ساخت و زبری سطح را همزمان کمینه می‌کرد. در این روش از روش لایه زنی با ضخامت متغییر با توجه به انحنا سطوح استفاده می‌شد.

روس و کاب [5,3] در سال 1998 برای نخستین بار نمونه‌ای<sup>1</sup> جهت بررسی تأثیر زاویه سطح بر زبری را طراحی کرده و پس از ساخت این نمونه توسط دستگاه‌های استریولیتوگرافی<sup>2</sup> 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 رزین موجود در ناحیه بین دو لایه در مراحل بعدی است که این پدیده پخت اضافی<sup>3</sup> 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 مختلف<sup>4</sup>، استفاده کردند و مقادیر تجربی به‌دست آمده را با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه (1) مقایسه کردند. آن‌ها همچنین ملاحظه کردند که افت زبری در بازه (90-150) درجه فقط در فرایند استریولیتوگرافی و به واسطه پخت اضافی در سطوح پایینی رخ می‌دهد.

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

در نهایت شاگرد و روزن [6,11] در سال 2008 با عنوان کردن این نکته که پدیده پله‌پله شدن اصلی‌ترین عامل محدودکننده صافی سطح است سعی کردند ابتدا میزان زبری سطح را در شرایط مختلف پیش‌بینی کردند. شاگرد و همکارش با توجه به پدیده پخت اضافی سرعت اسکن را به‌گونه‌ای تنظیم کردند که بیشترین میزان پخت در نواحی بین لایه‌های رخ دهد؛ بنابراین کمترین میزان زبری سطح به‌دست 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 الکل پروپیلن با تمیزکننده التراسونیک به مدت زمان‌های 0 و 1 و 5 دقیقه را پیش و پس از بهبود سطح مورد بررسی قرار دادند و میزان صحت مدل تحلیلی و کارایی روش پیشنهادی را ارزیابی کردند. آن‌ها جهت زبری‌سنجی 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 قرارگیری 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 زبری<sup>5</sup> 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

6- 85 Shore D  
7- Ra, Rq, Rz & Sm

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

۱-۲- پیش تولید<sup>۱</sup>

در این پژوهش جهت تولید نمونه‌ها از دستگاه استریولیتوگرافی<sup>۲</sup> استفاده

جدول ۱ سطوح پارامتر زاویه سطح	
گام	بازه زاویه‌ای (درجه)
۲ درجه	[۰-۱۸۰]
جدول ۲ سطوح پارامتر زمان بازیخت	
سطح	مقدار (دقیقه)
۱	۲۰
۲	۵۰
۳	۸۰
جدول ۳ سطوح پارامتر فاصله هاشور	
سطح	مقدار (میلی‌متر)
۱	۰/۰۵۰
۲	۰/۰۷۵
۳	۰/۱۰۰
۴	۰/۱۲۵

۲-۲- تولید<sup>۲</sup>

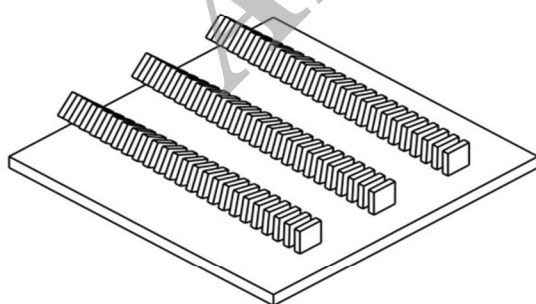
نمونه‌ها در دو گروه ایجاد شدند. در ست‌آپ اول سه دسته نمونه یکسان که در آن‌ها زاویه سطح تغییر کرده است ایجاد می‌شود تا هر دسته پس از تولید تحت زمان بازیخت مختلف قرار گیرد. در ست‌آپ دوم نیز سه دسته نمونه تولید شده است که زاویه سطح آن‌ها تغییر می‌کند با این تفاوت که برای هر دسته فاصله هاشور متفاوتی تعریف شده است و دسته‌ها مدت زمان یکسانی تحت بازیخت قرار خواهند گرفت.

۳-۲- پس تولید<sup>۳</sup>

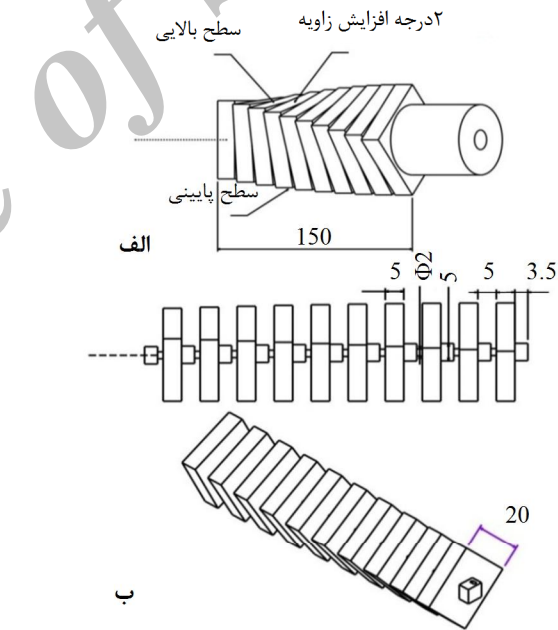
پس از ایجاد نمونه‌ها، توسط استون رزین مایع روی قطعه‌کار به آرامی شسته شد. سپس نمونه‌ها توسط کاردک و استون از سکو جدا شده و تکیه‌گاه‌های آن‌ها جدا شد (شکل ۶، شکل ۷). سپس نمونه‌ها به مدت زمان تعیین شده در حمام ماورابنفش قرار داده شدند تا پخت نهایی صورت پذیرد (شکل ۸). جهت اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر، نمونه‌های موجود در هر دسته از هم جدا شدند (شکل ۹، شکل ۱۰).

۴-۲- اندازه‌گیری زبری سطح

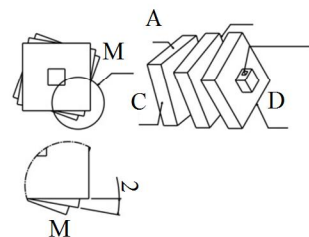
جهت اندازه‌گیری زبری سطح، از دو روش غیرتماسی و تماسی استفاده شد. از آنجایی که احتمال تغییر زبری در روش تماسی وجود دارد، ابتدا به‌صورت روش غیرتماسی و سپس روش تماسی اعمال شد.



شکل ۴ چیدمان قطعه‌کار در نرم‌افزار در ست‌آپ اول



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



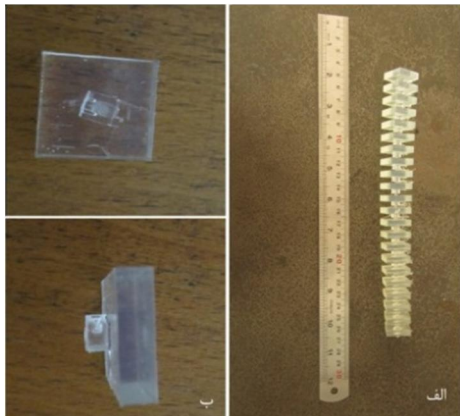
شکل ۳ هندسه و ابعاد قطعه نمونه

3- Solid Work 2012  
 4- \*.STL  
 5- WaterShed 11120, DSM Somos  
 6- Sweeper  
 7- Processing  
 8- Post processing

1- Pre processing  
 2- Viper Si2 SLA System



شکل 9 نمونه‌ها پس از تولید

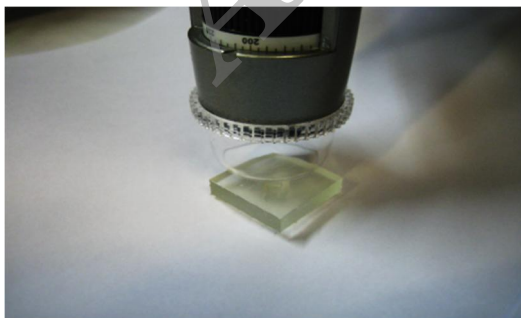


شکل 10 نمونه‌ها الف - پیش از جدا شدن ب - پس از جدا شدن

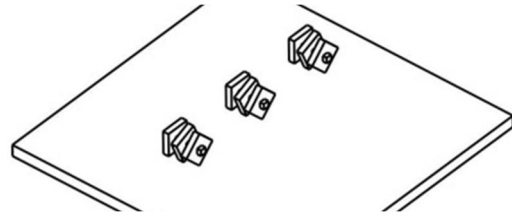
2-4-1- روش غیر تماسی

در روش غیر تماسی توسط میکروسکوپ دیجیتالی<sup>6</sup> از سطوح نمونه‌ها تصویربرداری شد (شکل 11).

جهت افزایش دقت، از هر سطح هر نمونه سه تصویر بزرگ‌نمایی 200 برابر گرفته شده است. از آنجایی که در نرم‌افزار این دستگاه با تعیین میزان بزرگ‌نمایی تصویر، امکان تعیین فواصل وجود دارد پس از تصویربرداری، توسط نرم‌افزار<sup>7</sup> در راستای سطح و در راستای عمود بر سطح، خطوطی با طول 1/5 میلی‌متر ایجاد شدند. سپس توسط نرم‌افزار داده‌برداری<sup>8</sup> و انتخاب خطوط ایجاد شده به‌عنوان محور مختصات، از نقاط سطح داده‌برداری شده و نتایج در جداولی به‌صورت زوج مرتب  $(X_0, Y_0)$  ذخیره شد (شکل 12).



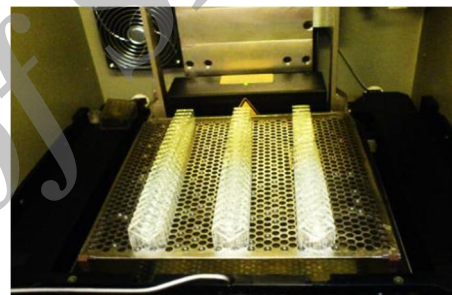
شکل 11 میکروسکوپ دیجیتالی هنگام تصویربرداری از سطح نمونه



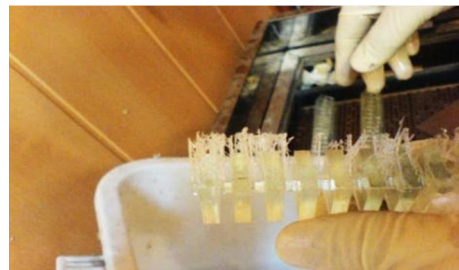
شکل 5 چیدمان قطعه‌کار در نرم‌افزار در ست‌آپ دوم

جدول 4 مولفه‌های تنظیم‌شده روی دستگاه

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



شکل 6 نمونه‌ها پس از ایجاد شدن در درون دستگاه



شکل 7 جداکردن تکیه‌گاه از قطعه‌کار



شکل 8 قرار دادن نمونه‌ها در حمام التراسونیک 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 مقدار 6/25 به پایین حرکت کرده و سپس به مقدار 6/15 بالا می‌آید، هدف از این حرکت این است که رزین به اندازه کافی بالای سطح ایجاد شده قرار گیرد.

6- Dino-lite digital microscope AM413T  
7- DinoCapture 2.0  
8- Get Date Graph Digitizer 2.24

جهت به دست آوردن موقعیت خط میانی<sup>3</sup> 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 می آید.

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

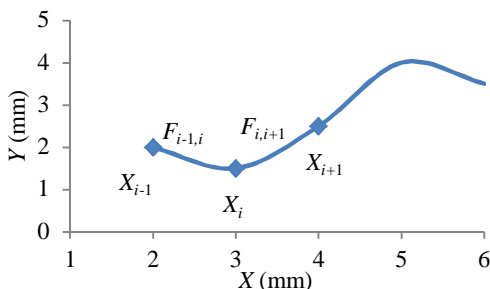
جهت اعتبار سنجی و بررسی کارایی روش پیشنهاد شده از دو تابع با زبری مشخص استفاده شد و ملاحظه شد که مقدار زبری به دست آمده صحیح است. نتایج این اعتبارسنجی در جدول 5 و شکل 14 ارائه شده است. در پژوهش های پیشین نیز جهت به دست آوردن سطح پخت شده، منحنی هایی از داده های به دست آمده عبور داده و از آن استفاده کرده اند. در روش استفاده شده در پژوهش حاضر از نقاط منحنی های درجه سه عبور داده شده و در نهایت از منحنی ها به صورت تحلیلی انتگرال گیری شد. در این روش نیاز به تعیین یا محدود کردن تعداد داده ها نیست. همچنین در این روش در صورت نابرابری فاصله داده ها مشکلی در به دست آوردن معادله منحنی ها ایجاد نمی شود.

#### 2-4-2- روش تماسی

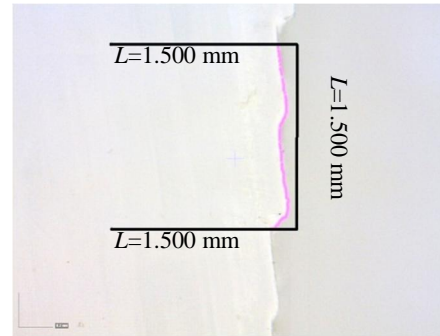
روش تماسی توسط دستگاه زبری سنج<sup>4</sup> انجام شده است (شکل 15). با توجه به این که برای سطوح فرایند استریولیتوگرافی  $2 < Ra < 10$  است، بنابراین طول نمونه برداری 2/5 میلی متر انتخاب شد [13]. جهت افزایش دقت، از هر سطح در پنج نقطه مختلف عمل زبری سنجی صورت گرفته و نتایج ذخیره شد.

جدول 5 اعتبار سنجی روش پیشنهاد شده

ردیف	تابع	بازه (mm)	Ra پیش بینی 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 داده برداری از سطح نمونه نسبت به محورهای مختصات توسط نرم افزار داده برداری

جهت به دست آوردن پارامتر زبری از نرم افزار متلب<sup>1</sup> استفاده شد. به این صورت که مطابق شکل 13 از داده های به دست آمده، از هر دو نقطه یک منحنی درجه سه<sup>2</sup> عبور داده شد به گونه ای که در نقاط مرزی دارای شیب و تقعر یکسان با منحنی مجاور است؛ بنابراین برای سه نقطه 8 معادله و 8 مجهول به صورت رابطه های (9-1) خواهیم داشت.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

در نهایت با حل این معادلات، تابع درجه سه به صورت رابطه های (10-11) به دست می آید.

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

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

$$\begin{aligned} a_i &= (x_{i-1} - x_i) \\ b_i &= (x_{i-1} - x_{i+1}) \\ c_i &= (x_i - x_{i+1}) \\ f_i &= 6 \left[ \frac{y_{i-1} - y_i}{x_{i-1} - x_i} - \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

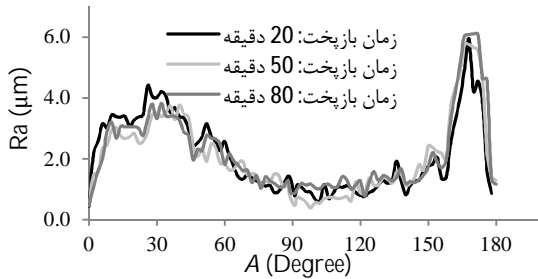
و انتگرال تابع به دست آمده برابر با رابطه (13) خواهد بود.

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

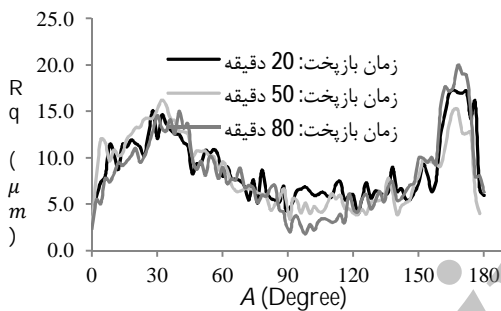
3- Mean value  
4- Taylor hobson precision surtronic 3P

1- MATLAB  
2- Cubic spline

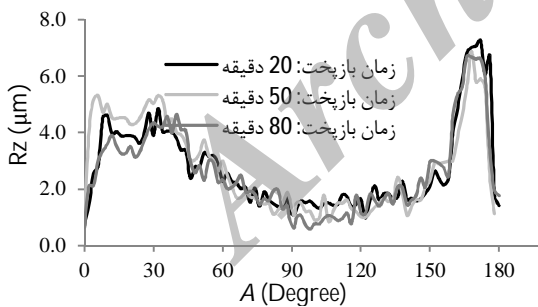
درجه، افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به بازه زاویه‌ای (22-25) درجه آغاز به کاهش می‌کند تا این‌که به بازه زاویه‌ای (90-110) درجه می‌رسد. دلیل این پدیده را می‌توان با اثر پله‌پله شدن توجیه کرد، به عبارت دیگر همان گونه که شکل 20 نمایش می‌دهد، ماهیت فرایند استریولیتوگرافی که عبارت است از تقسیم قطعه به لایه‌های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



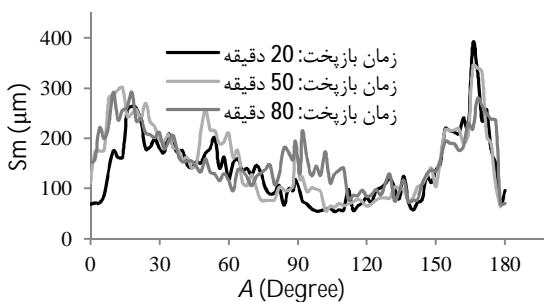
شکل 16 منحنی زاویه سطح - Ra، فاصله هاشورزنی: 0.100 mm



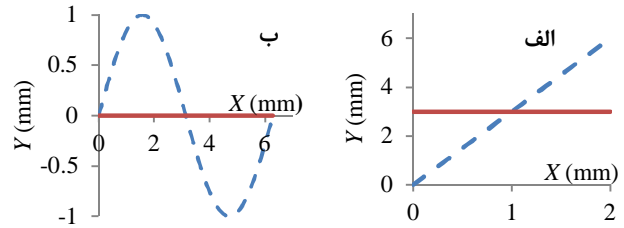
شکل 17 منحنی زاویه سطح - Rq، فاصله هاشورزنی: 0.100 mm



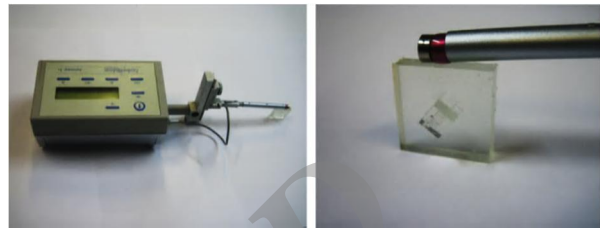
شکل 18 منحنی زاویه سطح - Rz، فاصله هاشورزنی: 0.100 mm



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  $Y=3X$  (ب)  $Y=\sin(X)$



شکل 15 دستگاه زبری سنج هنگام اندازه‌گیری زبری سطح

### 3- نتایج و بحث

در زبری 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 زبری سطح اندازه‌گیری و ذخیره شده است. به دلیل عدم پخت کامل نمونه‌ها و بی‌دقتی 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 داده‌ها<sup>1</sup> از تقسیم کردن مجموع مقادیر بر تعداد آن‌ها به دست آمده است (رابطه (18)). همچنین واریانس استاندارد<sup>2</sup> و ضریب تغییرات<sup>3</sup> داده‌ها به ترتیب از روابط (19-20) به دست آمده‌اند.

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

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

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

#### 3-1- تأثیر زاویه سطح بر زبری سطح

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

منحنی‌های زاویه سطح - Ra، زاویه سطح - Rz، زاویه سطح - Rq 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 زبری، زبری سطح نمونه‌ها با افزایش زاویه از صفر

1- Mean  
2- Standard variance  
3- Coefficient of variation

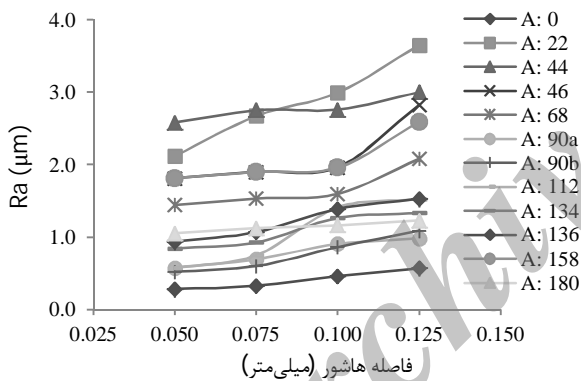
3-3- تأثیر فاصله هاشورزنی بر زبری سطح

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

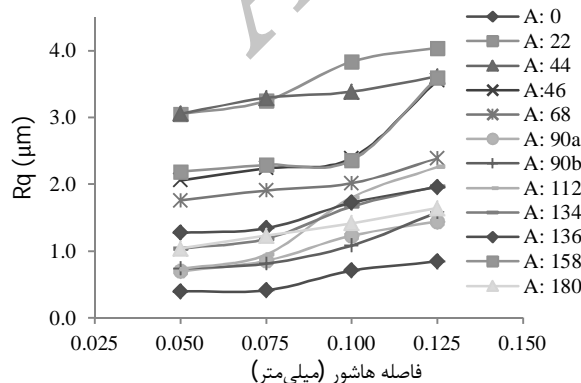
با بررسی منحنی‌های شکل 21 تا شکل 24 ملاحظه می‌شود که به‌ازای تمامی مقادیر زاویه سطح، مقدار زبری با افزایش فاصله هاشور افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش فاصله جاروب کردن بین دو لایه رخ می‌دهد. البته در مورد زوایای مختلف روند تغییر زبری متفاوت است که این امر ناشی از تغییر میزان تأثیرگذاری هر یک از 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

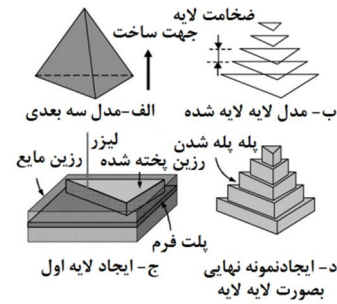
از آنجایی که برای هر سطح عمل داده‌برداری پنج بار صورت گرفته و در نهایت از مقادیر به‌دست‌آمده میانگین‌گیری شد در این قسمت منحنی‌های ضریب تغییرات داده‌ها نمایش داده می‌شود تا میزان توزیع داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. منحنی زاویه سطح- ضریب تغییرات پارامتر زبری ( $Ra, Rq$ ) به ترتیب در شکل 25 و شکل 26 ارائه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



شکل 21 منحنی فاصله هاشور -  $Ra$ ، زمان بازپخت: 50 دقیقه، نمونه‌های D1, D2, D3, E1, E2, E3, F1, F2, F3



شکل 22 منحنی فاصله هاشور -  $Rq$ ، زمان بازپخت: 50 دقیقه، نمونه‌های D1, D2, D3, E1, E2, E3, F1, F2, F3



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

به سطوحی که زاویه آن‌ها بین 0 تا 90 درجه باشد سطوح بالا<sup>1</sup> و به سطوحی که زاویه آن‌ها بین 90 تا 180 درجه باشد سطوح پایین<sup>2</sup> اطلاق می‌شود [6]. انتظار می‌رفت که زبری سطوحی که دارای زوایای بین 90 تا 180 است یا سطوح پایین نسبت به سطوحی که دارای زوایای 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 نمونه باقی می‌ماند این عامل یکی از اصلی‌ترین موارد محدودکننده زبری سطح نمونه‌ها توسط پژوهشگران 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 اضافی<sup>3</sup> 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 به نظر 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 بازه زاویه‌ای روند متفاوتی دارد. البته هدف از بررسی تأثیر زمان بازپخت، پی بردن به ماهیت تأثیر زمان بازپخت بر زبری سطح است که با توجه به منحنی‌های حاصل می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که تأثیر زمان بازپخت بر زبری قابل صرف‌نظر است. البته تفاوت‌های موجود بین داده‌هایی که فقط زمان بازپخت متفاوتی دارند، را می‌توان این‌گونه مقایسه کرد، که قطعاً که در زمان بازپخت یکسان و در زاویه سطح متفاوت ایجاد شده‌اند در یک دسته 23 تا بوده 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 دهند. 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



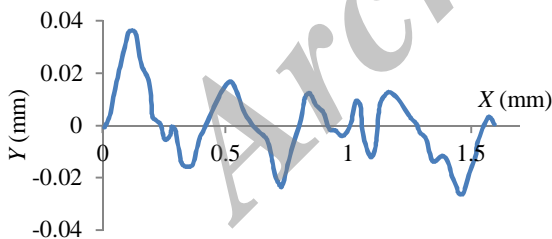
با توجه به این منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که ضریب تغییرات بیشتر داده‌های  $Ra$  کمتر از 30% است. به عبارت دقیق‌تر بیش از 89% داده‌های  $Ra$  دارای ضریب تغییرات کمتر از 30% است. همچنین با توجه به شکل 26 ملاحظه می‌شود که کمتر از 12% داده‌های  $Rq$  دارای ضریب تغییرات بالای 30% است.

### 3-5- اندازه‌گیری غیرتماسی زبری سطح

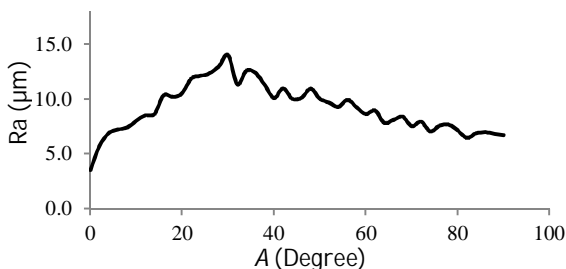
همان‌گونه که در بخش 2-4-1 اشاره شد، جهت به‌دست آوردن زبری سطح به روش غیرتماسی، تصویربرداری از سطوح نمونه‌ها، داده‌برداری و در نهایت ارسال داده‌ها به نرم‌افزار جهت محاسبه  $Ra$  صورت گرفت. شکل 27 دیاگرام ترسیم‌شده توسط نرم‌افزار متلب پس از محاسبه موقعیت خط میانی برای نمونه C14 با زاویه سطح 18 درجه نمایش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

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

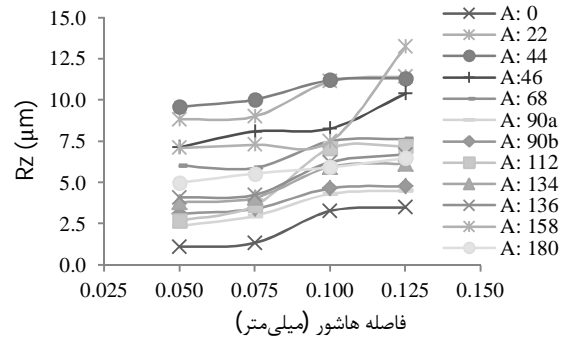
ملاحظه می‌شود با این‌که روند تغییرات زبری در دو روش با هم برابر است، اما زبری به‌دست‌آمده از روش غیرتماسی برای تمامی سطوح بیشتر از مقدار به‌دست‌آمده در روش تماسی است. در توجیه نتایج به‌دست‌آمده می‌توان این‌گونه بیان کرد که اصلی‌ترین دلیل بروز اختلاف در دو روش، پایین بودن میزان بزرگ‌نمایی میکروسکوپ، کم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



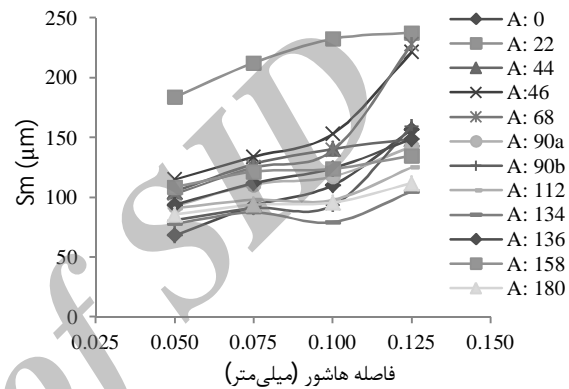
شکل 27 دیاگرام ترسیم شده توسط نرم‌افزار متلب پس از محاسبه موقعیت خط میانی نمونه C14، زاویه سطح: 18 درجه



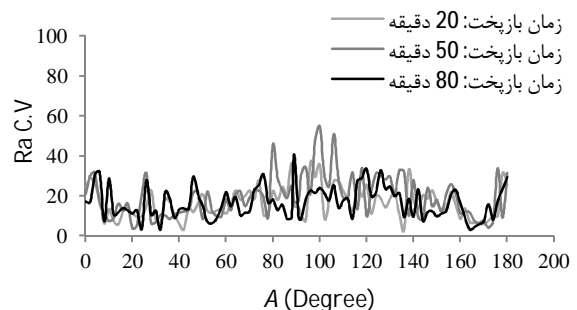
شکل 28 منحنی زاویه سطح-زبری سطح روش غیرتماسی زمان بازیخت: 80 دقیقه، فاصله هاشور 0/100 میلی‌متر



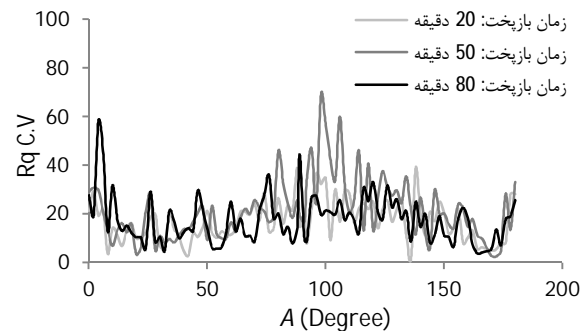
شکل 23 منحنی فاصله هاشور -  $Rz$ ، زمان بازیخت: 50 دقیقه، نمونه‌های D1, D2, D3, E1, E2, E3, F1, F2, F3



شکل 24 منحنی فاصله هاشور -  $Sm$ ، زمان بازیخت: 50 دقیقه، نمونه‌های D1, D2, D3, E1, E2, E3, F1, F2, F3



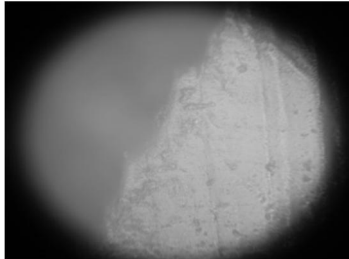
شکل 25 منحنی زاویه سطح - ضریب تغییرات  $Ra$  نمونه‌هایی با زمان بازیخت: 20، 50 و 80 دقیقه



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

جدول 6 مقایسه نتایج زبری سنجی روش تماسی 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:

انتقال<sup>4</sup>: 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 برحسب 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 تداخل 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 نکاتی را که از این جداول می‌توان استخراج نمود را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- مقدار بالای پارامتر اف<sup>5</sup> 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 تعدیل شده<sup>6</sup> 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 بازپخت	زاویه
ورودی	A	B	C

بدین ترتیب که به دلیل پایین بودن میزان بزرگنمایی و وضوح پایین تصاویر امکان تشخیص صحیح دره‌ها و قله‌ها وجود نداشته و نقاطی غیر از نقاط سطوح انتخاب شده است. همچنین از آنجایی که طول نمونه‌برداری در روش تماسی 2/5 میلی‌متر است، اما در روش غیرتماسی به دلیل 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.

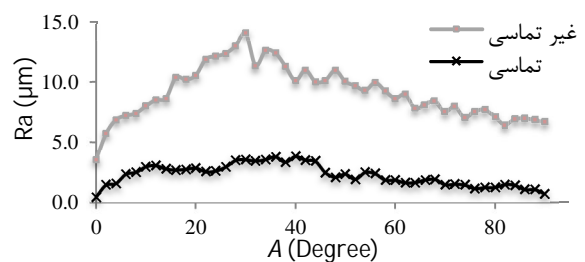
بالین‌حال جهت ارزیابی روش پیشنهاد شده تصویر سطح با زاویه 76 درجه نمونه A8 توسط میکروسکوپ<sup>1</sup> موجود در آزمایشگاه متالوژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر با بزرگنمایی 500 برابر گرفته شد. سپس سطح داده‌برداری شد و نتایج جهت محاسبه به نرم‌افزار متلب ارسال شد. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری در شکل 30 و جدول 6 نمایش داده شده است.

با توجه به میزان اختلاف قابل قبول روش ارائه‌شده می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با استفاده از این روش می‌توان زبری سطوح را به صورت غیرتماسی بدست آورد؛ بالین‌حال این روش با محدودیت‌هایی مواجه است. به عنوان مثال، استفاده از این روش برای سطوح با زبری سطح پایین، مشروط به استفاده تصاویر با وضوح و بزرگنمایی بسیار بالاست. همچنین داده‌برداری باید با دقت 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.

### 3-6- شبیه‌سازی<sup>2</sup> ریاضی

در این قسمت جهت مدل‌سازی زبری سطح و به دست آوردن رابطه ریاضی بین پارامترهای ورودی و خروجی، از نرم‌افزار طراحی آزمایش<sup>3</sup> 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 زبری 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- زبری 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 زبری سطح روش‌های تماسی و غیرتماسی مدت باز پخت: 80 دقیقه

4- Transform  
5- F-value  
6- R-Squared & Adjusted R-Squared

1- Leitz WETZLAR  
2- Simulation  
3- Design-Expert 7.0

جدول 14 مدل‌سازی پاسخ‌ها بازه زاویه‌ای (90-180)

$1/\sqrt{Sm}$	$1/\sqrt{Rz}$	Rq	$1/\sqrt{Ra}$	
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 <sup>2</sup>
7/07e-5	-43e-5	-56e-5	72e-5	B <sup>2</sup>
9/29e-6	2/55e-5	19e-5	185e-6	C <sup>2</sup>
0/094	1/567	3/191	3/551	A <sup>2</sup> .C
-26e-5	-38e-5	-242e-5	-235e-5	C <sup>2</sup> .A
-4/3e-7	3/05e-6	3/97e-6	5/17e-6	B <sup>2</sup> .C
8/43e-8	-3/2e-7	-3/5e-7	-5e-7	C <sup>2</sup> .B

به‌دلیل 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، به‌دلیل 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 پیش‌بینی<sup>3</sup> وارد نموده و مقدار پیش‌بینی‌شده را با مقدار داده تجربی مقایسه نموده و مقدار خطا به دست آمده است. جدول 15 مشخصات نمونه‌هایی که جهت آموزش وارد نشده‌اند را ارائه می‌کند و در جدول 16 و جدول 17 مقدار پیش‌بینی‌شده و مقدار داده تجربی مقایسه شده و مقدار خطا ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار متوسط خطا کمتر از 14% است.

جدول 15 داده‌های وارد نشده نرم‌افزار حین آموزش دادن

فاصله هاشور	زمان بازیخت	زاویه سطح
0/1	20	66
0/1	50	14
0/1	80	68
0/075	50	46
0/1	20	154
0/1	50	134
0/1	50	134

جدول 16 پیش‌بینی مقادیر پاسخ‌های Ra, Rq توسط نرم‌افزار

	Ra (µm)		Rq (µm)	
	واقعی	خطا	واقعی	خطا
1	1/7	1/4	2/1	3/5
2	2/5	2/7	3/4	3/5
3	1/7	1/6	2/3	2/0
4	2/4	1/9	2/8	2/2
5	1/8	2/0	2/4	2/9
6	1/2	1/2	1/6	1/5
7	1/4	1/3	1/9	1/9

جدول 8 تعریف پارامترهای خروجی (پاسخ‌ها) در نرم‌افزار

پارامتر	Ra	Rq	Rz	Sm
پاسخ	1	2	3	4

جدول 9 نسبت بیشینه به کمینه پاسخ‌ها در بازه زاویه‌ای 0 تا 90 درجه

نسبت بیشینه به کمینه	Ra	Rq	Rz	Sm
نسبت بیشینه به کمینه	7/10	7/60	6/62	4/52
انجام انتقال	بله	خیر	بله	بله
نوع انتقال	عکس	---	عکس	عکس
	مجذور		مجذور	مجذور

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

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

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

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

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

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

جدول 13 مدل‌سازی پاسخ‌ها بازه زاویه‌ای (0-90)

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

1- Predicted R-squared  
2- Adequate precision

3- Point prediction

جدول 17 پیش‌بینی مقادیر پاسخ‌های  $Ra$ ,  $Rq$  توسط نرم‌افزار

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

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت بررسی تأثیر پارامترهای زاویه سطح، فاصله هاشور و زمان بازیخت، بر زبری سطح در فرایند استریولیتوگرافی، نمونه‌هایی 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 کندتری رخ می‌دهد؛ ولی افت زبری بسیار سریع است. دلیل افت زبری در بازه 90 تا 180 درجه نسبت به بازه 0 تا 90 درجه باوجود قسمت‌های کنده‌شده تکیه‌گاه‌ها به وسیله پدیده پخت اضافی توجیه می‌شود، به‌گونه‌ای 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 پراکندگی بیشتری است.

همچنین بررسی منحنی‌های ضریب تغییرات داده‌ها نشان می‌دهد که ضریب تغییرات بیش از 80% داده‌ها کمتر از 30% است. به‌عبارت دیگر پراکندگی داده‌هایی که از آن‌ها میانگین‌گیری شده است، معقول است. علاوه بر این منحنی‌ها نشان دادند که با افزایش فاصله هاشور، زبری سطح افزایش می‌یابد و تأثیر زمان بازیخت بر زبری قابل صرف‌نظر است. بررسی نتایج اندازه‌گیری زبری سطح غیرتماسی نشان داد که روند تغییرات زبری نسبت به زاویه سطح یکسان است؛ باین‌حال مقدار زبری به‌دست 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 زبری‌سنجی غیرتماسی با بزرگ‌نمایی بیشتر ملاحظه شد که میزان خطا به مقدار قابل ملاحظه‌ای افت می‌کند. تحلیل داده‌های به‌دست 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.

در نهایت می‌توان این‌گونه 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 صرف‌نظر 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 به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که زبری آن سطح کمترین میزان باشد، اما در صورتی که هدف به‌دست آوردن کمترین زبری در تمامی سطوح باشد، جهت قرارگیری نمونه به‌گونه‌ای 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 based Stereolithography, *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. Vatani 2, F. Barazandeh 3 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, Georgia Institute 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)