



## بهینه‌سازی زبری سطح، انحنای خطوط و تشکیل پلیسه طی فرایند ماشین‌کاری آلومینیوم 2024-T351 با جت آب و ذرات ساینده

آرمین رضائی<sup>1</sup>، احسان شکوری<sup>2</sup>، پیام سرائیان<sup>3\*</sup>

- 1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
 3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران  
 \* نجف‌آباد، صندوق پستی 8514143131، p\_saraeian@iau-tnb.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

آلیاژهای آلومینیوم، با توجه به تنوع بالا و خواص مکانیکی مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. در این بین، آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، شکل‌پذیری، چقرمگی و مقاومت در برابر خستگی، در ساخت اجزائی نظیر بال و بدنه هواپیما، کاربرد ویژه‌ای دارد. حضور 1/4% منیزیم در ساختار شیمیایی این آلیاژ، سبب حساسیت آن نسبت به حرارت ایجاد شده طی عملیات مرسوم ماشین‌کاری شده است. به همین علت، استفاده از فرایند ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده (AWJM)، به عنوان روش مناسبی جهت ماشین‌کاری این دسته از مواد معرفی شده است. در این پژوهش، به بررسی تأثیر پارامترهای انتخابی فرایند ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده، نظیر فشار جت، سرعت گذار و ضریب بارگذاری بر زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و شکل‌گیری پلیسه در نمونه‌های آلومینیومی 2024-T351 پرداخته شده است. نتایج نشان داد که پس از سرعت‌گذار، فشارجت و ضریب بارگذاری به‌ترتیب بیشترین تأثیر را بر مشخصه‌های کیفی سطح نمونه‌ها داشته است. طی بهینه‌سازی انجام شده به روش سطح پاسخ، مقدار بهینه شده توسط مدل، برای زبری سطح در نواحی صاف و زبر به‌ترتیب، 2/53 و 3/17 میکرومتر و برای زاویه انحنای خطوط، 3.48 درجه بدست آمد. خطای مدل نیز در مقایسه با مقدار تجربی بدست آمده برای کمیت‌های ذکر شده به ترتیب 2/79%-، 5/98% و 16/23% محاسبه شد.

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 22 فروردین 1399  
 داوری اولیه: 22 اردیبهشت 1399  
 پذیرش: 26 تیر 1399  
 کلیدواژگان:  
 آلومینیوم 2024-T351  
 ماشین‌کاری با جت آب و ذرات  
 ساینده  
 زبری سطح  
 انحنای خطوط  
 تشکیل پلیسه

## Optimization of surface roughness, striation and burr formation during machining of aluminum 2024-T351 with abrasive water jet machining

Armin Rezaei<sup>1</sup>, Ehsan Shakouri<sup>2</sup>, Payam Saraeian<sup>3\*</sup>

- 1,2- Department of Mechanical Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
 3- Department of Mechanical Engineering, Najaf abad Branch, Islamic Azad University, Najaf abad, Iran.  
 \* P.O.B 8514143131, Najaf abad, Iran, p\_saraeian@iau-tnb.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper  
 Received: 10 April 2020  
 First Decision: 11 May 2020  
 Accepted: 16 July 2020

## Keywords:

Al 2024-T351  
 Abrasive Water Jet Machining  
 Surface Roughness  
 Angle of Striation  
 Burr formation

## Abstract

Aluminum alloys are widely used in various industries due to their high variety and desirable mechanical properties. In the meantime, Al 2024-T351 aluminum alloy, due to its features such as high strength-to-weight ratio, ductility, toughness and fatigue resistance, has a special use in the manufacture of components such as wings and fuselage. The presence of 1.4% magnesium in the chemical structure of this alloy has made it sensitive to heat generated during conventional machining operations. For this reason, the use of abrasive water jet machining (AWJM) has been introduced as a suitable method for machining these materials. In this study, the effect of selected parameters of abrasive water jet machining, such as jet pressure, traverse speed and loading factor on surface roughness angle of striation and the burr formation in 2024-T351 aluminum samples were investigated. The results showed that after the traverse speed, the jet pressure and loading factor had the greatest effect on the qualitative characteristics of the surface of the samples, respectively. Also, during the optimization of the response surface methodology, the value optimized by the model was 2.53 and 3.17 micrometer for smooth and rough regions respectively, and 3.48° for the angle of striation. the error model was calculated to be, -2.79%, -5.98% and 16.23% respectively, compared to the experimental value obtained for the mentioned quantities.

## 1- مقدمه

مقاومت در برابر خوردگی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا دارد. افزودن عناصری نظیر مس، منیزیم و منگنز به ساختار شیمیایی آلومینیوم، علاوه بر ایجاد انواع ترکیبات متنوع آلیاژی

آلیاژ آلومینیوم 2024-T351، به دلیل برخورداری از خواص مطلوبی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، شکل‌پذیری عالی و

## Please cite this article using:

A. Rezaei, E. Shakouri, P. Saraeian, Optimization of surface roughness, striation and burr formation during machining of aluminum 2024-T351 with abrasive water jet machining, Vol. 7, No. 10, pp. 12- 25, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده شد. تحلیل‌های آماری نشان داد که پارامتر فشارجت، بیشترین تأثیر را بر صافی سطح نمونه‌ها داشته است [8].

یکی از چالش‌های عمل‌های جراحی ارتوپدی، ازدیاد بیش از حد دمای استخوان و نکرور<sup>5</sup> حرارتی حین سوراخ‌کاری یا برش استخوان می‌باشد. نتایج حاصل از پژوهشی نشان داد، استفاده از ذرات زیست سازگار طی برش استخوان با استفاده از فرایند ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده، بهبود کیفیت برش و کاهش زبری سطح در موضع برش را به دنبال داشته است [9]. طی بررسی تأثیر پارامترهای فرایند برش با جت آب و ذرات ساینده بر کامپوزیت‌های لایه‌ای، نتایج نشان داد که تأثیر فشار جت آب، فاصله نازل تا قطعه کار و سرعت‌گذار نازل بر میزان مخروطی شدن شکاف به مراتب بیشتر از نرخ ریزش ذرات ساینده است [10، 11].

نتایج حاصل از بررسی مشخصه‌های کیفی سطح کامپوزیت زمینه فلزی Al-SiC طی برش کاری با جت آب به همراه ذرات ساینده نشان داد که کاهش فشارجت آب توأم با افزایش نرخ پیشروی، سبب کاهش انرژی جنبشی جت و بازشدگی آن در خروجی ناحیه برش شده که عمیق‌تر شدن خطوط ایجاد شده در ناحیه زبر را سبب می‌شود. علاوه بر آن، سرعت‌گذار و فشارجت، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح نمونه‌ها داشته‌اند و تأثیر نرخ ریزش ذرات ساینده بر زبری سطح نمونه‌ها چشمگیر نبوده است [12].

طی تحقیقی به ارزیابی زبری سطح آلیاژ آلومینیوم 6061 طی ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده پرداخته شد. جهت بهینه‌سازی پارامترها از منطق فازی خاکستری و شبکه عصبی مصنوعی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که بعد از فشارجت، نرخ ریزش ذرات ساینده بیشترین تأثیر را بر زبری سطح نمونه‌ها داشته است [13].

نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای ماشین کاری برای بهبود زبری سطح آلیاژ آلومینیوم/ منیزیم طی ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده نشان داد که نرخ پیشروی و نرخ ریزش ذرات ساینده به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح نمونه‌ها داشته است [14].

طی فرایند برش کامپوزیت کربن اپوکسی توسط جت آب و ذرات ساینده، به بررسی تأثیر پارامترهای فشارجت، سرعت‌گذار، فاصله نازل تا نمونه و نرخ ریزش ذرات ساینده بر زبری سطح در ناحیه برش پرداخته شد، نتایج نشان داد که تأثیر فاصله نازل تا سطح نمونه و نرخ ریزش ذرات ساینده بر زبری سطح نمونه‌ها

و حفظ خصوصیات مثبت ذاتی آن، ویژگی‌های مطلوب جدیدتری را نیز برای آن فراهم می‌سازد. این درحالی‌است که، حضور منیزیم در ساختار شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351، سبب حساسیت این آلیاژ نسبت به حرارت شده، به طوری که حرارت ایجاد شده طی عملیات مرسوم ماشین کاری، سبب بروز آسیب حرارتی و کاهش مقاومت به ترک ناشی از خوردگی و خستگی در این آلیاژ می‌شود [1، 2].

از مجموع حرارت ایجاد شده طی فرایند برش در ماشین کاری سنتی، قسمتی از حرارت تولید شده به ابزار منتقل می‌شود که افزایش دمای ابزار و فرسایش ابزار را به دنبال دارد، بخشی از آن به وسیله براده خارج می‌گردد و در نهایت بخشی از حرارت وارد قطعه کار شده که افزایش دما و تغییرات خواص قطعه کار را سبب می‌گردد [3].

بنابراین، برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر عدم تماس فیزیکی ابزار با قطعه کار، عدم تولید حرارت طی براده برداری، قابلیت برش طیف گسترده‌ای از مواد و عدم نیاز به تعویض ابزار، وجه تمایز ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده با دیگر روش‌های ماشین کاری سنتی و غیرسنتی می‌باشد. ضمن آنکه این فرایند، به دلیل عدم نیاز به سیالات روان کار و خنک‌کار، دوست‌دار محیط زیست محسوب می‌شود. بنابراین، مجموعه این عوامل سبب شده که استفاده از فرایند ماشین کاری با جت آب به همراه ذرات ساینده به عنوان یکی از روش‌های بالقوه برای برش این آلیاژ مطرح گردد [4-6].

طی تحقیقی، نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای برشی از قبیل فشارجت<sup>1</sup>، سرعت‌گذار<sup>2</sup>، نرخ جریان جرمی ذرات ساینده<sup>3</sup> و فاصله نازل از سطح قطعه کار<sup>4</sup>، بر زبری سطح آلیاژ آلومینیوم نشان داد که با افزایش فشارجت، زبری سطح قطعات کاهش یافته و فشارجت آب بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح قطعه کار داشته است [7].

طی پژوهشی به بررسی صافی سطح آلومینیوم 7075 طی ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده، با استفاده از مدل رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی پرداخته شد. در این مدل پارامترهای سرعت‌گذار، فشارجت، فاصله نازل تا قطعه کار، سایز ذرات ساینده و نرخ ریزش آنها به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شد. همچنین از آنالیز واریانس و آزمون F جهت اعتبار سنجی مدل رگرسیون و تعیین پارامترهای تأثیرگذار

<sup>1</sup> Jet pressure

<sup>2</sup> Traverse speed

<sup>3</sup> Abrasive mass Flow Rate (AMFR)

<sup>4</sup> Stand Off Distance (SOD)

<sup>5</sup> Necrosis

قطعه کار 3 میلی متر و زاویه برخورد جت آب با سطح قطعه 90 درجه و جنس ذرات ساینده گارنت با اندازه 80، ثابت در نظر گرفته شد.

پس از تعیین پارامترهای ورودی و آماده سازی نمونه ها، عملیات برش روی نمونه ها انجام شد، به طوری که طول برش در هر حالت فرایندی 45 میلی متر به موازات عرض نمونه در نظر گرفته شده است. پس از انجام عملیات برش، کمیت های زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و شکل گیری پلیسه در هر حالت فرایندی، اندازه گیری شد و در نهایت نیز، نتایج با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری مینی تب، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور افزایش دقت و جلوگیری از بروز خطا، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده و از میانگین ارقام بدست آمده برای بیان نتایج بهره گرفته شده است. در شکل 1، تصویر شماتیک نحوه انجام برش ارائه شده است.

## 2-1- معرفی ماده

در تحقیق حاضر آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 از آلیاژهای سری 2xxx با ضخامت 10 میلی متر و پهنای 45 میلی متر به عنوان قطعه کار انتخاب شده است. ترکیب شیمیایی و عناصر تشکیل دهنده این آلیاژ در جدول 1 و خواص مکانیکی منتخب آن در جدول 2 ارائه گردیده است.

## 2-2- تجهیزات

در این پژوهش، جهت ماشین کاری نمونه ها از دستگاه سی ان سی جت آب و ذرات ساینده Radox، استفاده شده است که مشخصات فنی آن طی جدول 3 ارائه شده است. در شکل 2، نمایی از نحوه انجام عملیات برش روی نمونه ها نشان داده شده است.

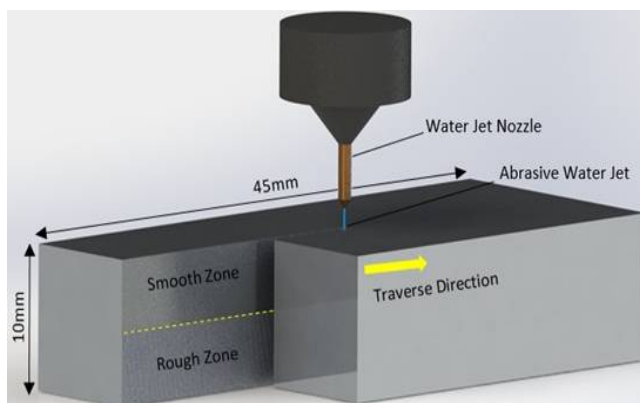


Fig. 1 Schematic of cutting work piece

شکل 1 شماتیک برش قطعه کار

جدول 1 عناصر شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 [17]

نسبت به سایر پارامترها ناچیز بوده و کمترین میزان مشارکت را در کنترل کیفیت سطح نمونه ها داشته اند [15].

نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای برش با استفاده از جت آب و ذرات ساینده بر زبری سطح فولاد نشان داد که سرعت گذار بیشترین تأثیر را بر کنترل کیفیت سطح نمونه ها داشته است و فاصله نازل تا قطعه کار و نرخ ریزش ذرات ساینده به ترتیب کمترین تأثیر را بر زبری سطح نمونه ها داشته اند [16]. وجود منیزیم در ساختار شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351، این آلیاژ را نسبت به حرارت ایجاد شده طی عملیات مرسوم ماشین کاری حساس نموده است. منیزیم موجود در ساختار این آلیاژ، تمایل به پخش شدن در امتداد مرزخانه ها و تشکیل فاز غنی از منیزیم را داشته که تشکیل این فاز در آلیاژ آلومینیوم، به شدت مقاومت آن را در برابر ترک ناشی از خوردگی و خستگی تنزل می دهد.

با توجه به اهمیت غیر قابل انکار آلومینیوم 2024-T351 در صنعت هوافضا و اهمیت کیفیت سطح نهایی و آسیب پذیری این آلیاژ طی روش های سنتی ماشین کاری، به منظور حذف چالش هایی نظیر ایجاد حرارت، تنش های پسماند، نیروهای ماشین کاری و ایجاد لبه انباشته طی عملیات ماشین کاری این آلیاژ، استفاده از جت آب و ذرات ساینده به عنوان یکی از روش های بالقوه مطرح شده است.

بنابراین، با توجه پیشینه به مقالات مطالعه شده در این زمینه و عدم وجود پژوهشی پیرامون برش کاری آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 با استفاده از جت آب و ذرات ساینده، در این تحقیق به بررسی تأثیر پارامترهای فشار جت، سرعت گذار و ضریب بارگذاری، بر زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و تشکیل پلیسه در دهانه خروجی شکاف، پرداخته شده است.

## 2- روش تجربی

عملکرد فرایند ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده وابسته به پارامترهای متعددی است که هر یک از این پارامترها به سهم خود، بر روی نتایج خروجی تأثیرگذار می باشند. بنابراین، تنها پارامترهای ورودی که بیشترین تأثیر را بر روی اهداف تحقیق یعنی زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و شکل گیری پلیسه دارند، مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، پارامترهای فشار جت، سرعت گذار و ضریب بارگذاری به عنوان متغیرهای ورودی و سایر پارامترهای فرایند، ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین در این پژوهش، پارامترهای قطر لوله متمرکز کننده 1 میلی متر، قطر اریفیس 0/35 میلی متر، فاصله نازل تا سطح

استاندارد ISO 4287 و با استفاده از دستگاه زبری سنج Hommel Werke مدل TKL300 با رزولوشن 8 نقطه بر میلی متر و سرعت گذار 30 میلی متر بر ثانیه انجام شد. به این ترتیب، میانگین زبری سطح نمونه‌ها (Ra)، طی حرکت رفت و برگشتی نوک سوزنی شکل دستگاه در راستای حرکت نازل، در مسیری به طول 4 میلی متر، در قسمت میانه برش در ناحیه صاف و زیر اندازه گیری شد. به منظور اطمینان از درستی نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار شد و از میانگین ارقام اندازه گیری شده در سه ناحیه از مسیری به طول 25 میلی متر در وسط طول نمونه و با فواصل 8 میلی متر، جهت تحلیل نتایج استفاده گردید. در شکل 4 نمایی از دستگاه زبری سنج ارائه شده است.

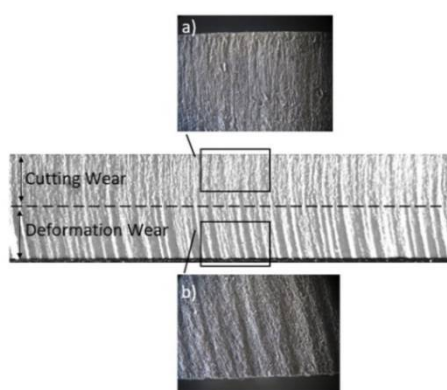


Fig. 3 Smooth and rough regions on cutting surface. (a) smooth zone, (b) rough zone

شکل 3 نواحی صاف و زبر در سطح برش. (a) ناحیه صاف، (b) ناحیه زبر

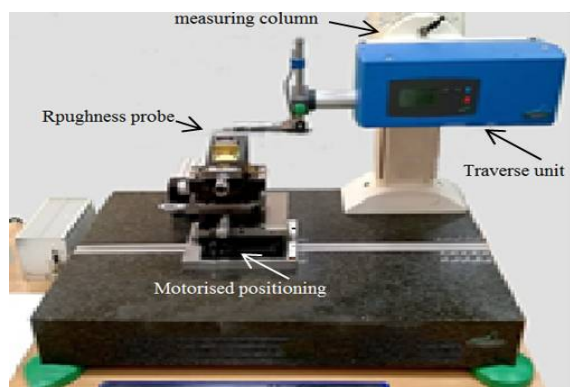


Fig. 4 Surface roughness tester

شکل 4 دستگاه زبری سنج

از سوی دیگر، افت توان جت در قسمت انتهایی ناحیه زبر، منجر به عقب ماندگی جت از محور اصلی برش و ایجاد انحنای خطوط در این ناحیه می شود که این مشخصه معیاری دیگری برای کاهش کیفیت برش محسوب می شود. در شکل 5 نمایی از انحنای ایجاد شده در خطوط برش نشان داده شده است.

Table 1 Chemical elements Al 2024-T351 alloy (wt %)[17]

Al	Cu	Mg	Fe	Mn	Si	Zn	Ti
93/03	4/2	1/4	0/12	0/49	0/06	0/18	0/02

جدول 2 خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 [17]

Table 2 Mechanical Properties of the Al 2024-T351 alloy[17]

مشخصات مکانیکی آلومینیوم 2024-T351	
سختی	120 برینل
چگالی	2780 گرم بر متر مکعب
استحکام کششی	469 مگاپاسکال
استحکام تسلیم	324 مگاپاسکال
مدول الاستیسیته	73/1 گیگا پاسکال
دمای ذوب	638 درجه سانتی گراد
درصد ازدیاد طول	20%

جدول 3 مشخصات فنی دستگاه جت آب و ذرات ساینده Radox

Table 3 Technical specifications of the Radox water jet

مشخصات فنی دستگاه جت آب	
بیشترین مقدار فشار پمپ	4000 بار
ابعاد میز دستگاه	3200×4300 میلی متر
بیشترین سرعت جابجای	15000 میلی متر بر دقیقه
بیشترین سرعت در راستای Z	3000 میلی متر بر دقیقه
نوع سیستم اختلاط	جت آب و ذرات ساینده تزریقی
جنس لوله متمرکز کننده	تنگستن کارباید
صحت در موقعیت	0/15 میلی متر در متر



Fig. 2 Cutting sample using abrasive water jet machining. (a) SOD setting; (b) Operation of material cutting

شکل 2 برش نمونه‌ها با استفاده از جت آب و ذرات ساینده. (a) تنظیم فاصله نازل تا سطح نمونه، (b) نحوه برش نمونه

به دلیل افت توان برشی جت، طی فرایند برش با جت آب و ذرات ساینده و ایجاد ناحیه صاف و ناحیه زبر که به ترتیب در نواحی فوقانی و تحتانی سطح مقطع برش ایجاد می شوند، لازم است که مقدار ارتفاع زبری سطح در هر دو ناحیه اندازه گیری و گزارش شود. در شکل 3 نمایی از نواحی صاف و زبر نشان داده شده است.

اندازه گیری زبری سطح نمونه‌های برش خورده، طی

و میزان تأثیرگذاری آنها، امکان پیش‌بینی و بهینه‌سازی پاسخ‌ها نیز میسر می‌شود.

روش سطح پاسخ در برگیرنده دو طرح کلی مرکب مرکزی<sup>2</sup> و باکس بنکن<sup>3</sup> می‌باشد [19]. در این پژوهش، جهت طراحی آزمایش‌ها از طراحی مرکب مرکزی استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آنها، تعداد کل آزمایش‌ها 27 عدد است که طی طراحی آزمایش انجام شده به روش سطح پاسخ، تعداد آزمایش‌ها به 20 عدد کاهش یافته است. در جدول 5، آزمایش‌های طراحی شده به روش سطح پاسخ و مقادیر مربوط به کمیت‌های هدف ارائه شده است.

جدول 4 پارامترها و سطوح انتخابی فرآیند

Table 4 Selected process parameters and their levels

نمایش متغیرها	پارامترها	سطوح
X <sub>1</sub>	فشارجت (MPa)	280 320 240
X <sub>2</sub>	سرعت گذار (mm/min)	200 300 100
X <sub>3</sub>	ضریب بارگذاری (%)	45 55 35

جدول 5 جدول طراحی آزمایش

Table 5 Design of Experiment table

NO	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	SR-Smooth (μm)	SR-Rough (μm)	Striation (°)
1	280	200	45	3/55	4/18	9
2	280	200	45	3/55	4/18	9
3	320	100	55	3/07	3/74	3
4	280	100	45	2/96	3/51	5
5	320	200	45	3/10	3/83	8
6	280	200	55	4/31	4/69	10
7	280	200	35	3/81	4/67	9
8	240	100	55	4/17	5/33	7
9	240	100	35	3/80	5/12	7
10	280	200	45	3/70	4/18	9
11	320	300	35	5/08	5/25	11
12	240	300	55	6/07	7/97	22
13	240	200	45	3/97	5/12	12
14	320	300	55	3/70	5/91	11
15	280	300	45	5/02	6/33	14
16	280	200	45	3/70	4/18	9
17	240	300	35	5/74	7/70	21
18	280	200	45	3/55	4/18	9
19	280	200	45	3/55	4/18	9
20	320	100	35	2/60	3/37	4

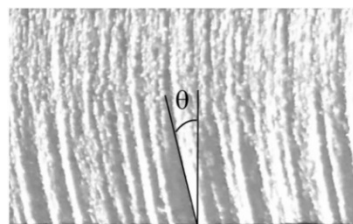


Fig. 5 View from the angle of striation of the cut lines

شکل 5 نمایی از زاویه انحراف خطوط برش

لذا، با اندازه‌گیری زاویه انحنای خطوط در هر حالت فرایندی، دیگر مشخصه کیفی سطح نیز بررسی گردید. از دیگر مشخصه‌های کیفی سطح در فرایند ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده، شکل‌گیری پلیسه در مقطع خروجی شکاف است که در این پژوهش، طی عکس‌برداری انجام شده از مقطع خروجی شکاف، با استفاده از دستگاه Stereo Microscope مدل 1740 ST با بزرگ‌نمایی 10 برابر، میزان شکل‌گیری پلیسه برای هر حالت فرایندی مورد بررسی قرار گرفته است.

### 2-3- پارامترها و سطوح آزمایش

انتخاب سطوح فرایند، با استفاده از مقادیر پیشنهادی سایر پژوهش‌ها و انجام آزمون‌های مقدماتی انجام شده است [7، 18]. نتایج آزمون‌های مقدماتی نشان داد که در سرعت‌های گذار بالاتر از 300 میلی‌متر بر دقیقه و فشار جت کمتر از 240 مگاپاسکال، جت آب و ذرات ساینده از توان برشی کافی برخوردار نبوده و برش قطعه‌کار به‌طور کامل انجام نمی‌شود. از این‌رو، در تعیین سطوح آزمایش، حد بالایی سرعت گذار 300 میلی‌متر بر دقیقه و حد پایینی فشار جت، 240 مگاپاسکال انتخاب گردیده است.

علت انتخاب کمترین مقدار ممکن به عنوان حد پایینی فشار جت، برخورداری از بازه وسیع‌تر جهت بررسی رفتار کمیت‌های خروجی می‌باشد. همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود، پارامترهای فشارجت، سرعت گذار و ضریب بارگذاری، هر کدام در سه سطح مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در مجموع 27 آزمایش طی روش فاکتوریل کامل را شامل می‌شود. در این پژوهش، به منظور بهره‌مندی از تحلیل آماری نتایج، از نرم‌افزار مینی‌تب 17 و روش سطح پاسخ<sup>1</sup> استفاده شده است. مینی‌تب، یک نرم‌افزار کنترل کیفیت آماری و مناسب برای طراحی و تجزیه و تحلیل داده‌ها است. اگر در بررسی رابطه بین متغیرهای ورودی و متغیرهای پاسخ نیاز به برازش مدل‌ها درجه دوم باشد، از روش سطح پاسخ جهت طراحی آزمایش‌ها بهره گرفته می‌شود. با استفاده از روش سطح پاسخ، علاوه بر تشخیص پارامترهای مؤثر

<sup>2</sup> Central Composite Design (CCD)

<sup>3</sup> Box-Behnken

<sup>1</sup> Response Surface Methodology (RSM)

### 3- نتایج و بحث

در این قسمت پس از انجام آزمایش‌ها، به تحلیل آماری نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای متغیر ورودی بر میزان زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و شکل‌گیری پلیسه در نمونه‌ها پرداخته شده است.

#### 3-1- تأثیر پارامترهای برش با جت آب و ذرات ساینده بر زبری سطح در ناحیه برش

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرایند برش با جت آب و ذرات ساینده بر زبری سطح نمونه‌ها، پس از اندازه‌گیری مقدار زبری سطح در نواحی صاف و زبر در هر حالت فرایندی، به منظور بررسی اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد. بنابراین، پس از بررسی کفایت مدل طی مواردی نظیر، نرمال بودن مقادیر، فرض ثابت بودن واریانس‌ها، نمودار هیستوگرام و نمودار مستقل از زمان، آنالیز واریانس برای زبری سطح نمونه‌ها، طی جدول‌های 6 و 7، به ترتیب برای دو ناحیه صاف و زبر، ارائه شده است. در این آنالیز، مقایسه انحراف کل نمونه‌ها با استفاده از آزمون F و تعیین سطوح معنادار نیز با استفاده از مقدار P Value انجام شده است. از آنجایی که پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0/05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است. همچنین، مقدار P Value برای مدل رگرسیون و برخی از دیگر جملات، کوچک‌تر از سطح معنادار 0/05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی‌کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند.

#### جدول 6 آنالیز واریانس مربوط به زبری سطح نمونه‌ها در ناحیه صاف

Table 6 Analysis of variance for surface roughness of smooth region

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	9	16/84	1/871	98/40	0/000
Linear	3	13/49	4/497	236/48	0/000
X <sub>1</sub>	1	2/14	2/14	112/70	0/000
X <sub>2</sub>	1	11/19	11/19	588/51	0/000
X <sub>3</sub>	1	0/15	0/15	8/21	0/017
Square	3	3/24	1/08	56/95	0/000
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	0/017	0/01	0/89	0/367
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1	0/78	0/78	41/17	0/000
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	0/24	0/24	12/89	0/005
Interaction	3	0/10	0/03	1/77	0/216
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	1	0/08	0/088	6/46	0/057
X <sub>1</sub> *X <sub>3</sub>	1	0/002	0/0002	0/01	0/920
X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub>	1	0/012	0/012	0/67	0/431

#### جدول 7 آنالیز واریانس مربوط به زبری سطح نمونه‌ها در ناحیه زبر

Table 7 Analysis of variance for surface roughness of rough region

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	9	30/34	3/37	95/87	0/000
Linear	3	23/20	7/73	219/93	0/000
X <sub>1</sub>	1	8/35	8/35	237/53	0/000
X <sub>2</sub>	1	14/61	14/61	415/06	0/000
X <sub>3</sub>	1	0/23	0/23	6/66	0/027
Square	3	6/91	2/30	65/56	0/000
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	0/15	0/15	4/30	0/065
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1	1/26	1/26	36/11	0/000
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	0/53	0/53	15/11	0/003
Interaction	3	0/22	0/07	2/13	0/161
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	1	0/17	0/17	4/87	0/052
X <sub>1</sub> *X <sub>3</sub>	1	0/03	0/03	1/08	0/324
X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub>	1	0/015	0/015	0/44	0/524

ضریب انطباق یا سازگاری مدل R<sup>2</sup> adj یا R<sup>2</sup> منطبق شده نیز برای ناحیه صاف و زبر به ترتیب، 97/98% و 97/82% بدست آمد که به این معنا است که داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است.

معادله عمومی رگرسیون برای زبری سطح نمونه‌ها، در قالب معادله (1)، ارائه شده است.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{21} X_1 * X_2 + \beta_{31} X_1 * X_3 + \beta_{23} X_2 * X_3 \quad (1)$$

در این معادله  $\beta_0$  ثابت سطح پاسخ،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  و  $\beta_3$  ضرایب خطی متغیرها و  $\beta_{11}$  و  $\beta_{22}$  و  $\beta_{33}$  ضرایب جملات مربعی و  $\beta_{21}$  و  $\beta_{31}$  و  $\beta_{23}$  ضرایب تعامل متغیرهای خطی هستند.

به این ترتیب، معادله رگرسیون برای زبری سطح نمونه‌ها در نواحی صاف و زبر به ترتیب، طی معادله‌های (2) و (3) ارائه شده است.

$$SR-Smooth (\mu m) = 17.09 - 0.0438 X_1 - 0.01632 X_2 - 0.2448 X_3 + 0.000049 X_1^2 + 0.000053 X_2^2 + 0.002986 X_3^2 + 0.000026 X_1 * X_2 - 0.000013 X_1 * X_3 - 0.000040 X_2 * X_3 \quad (2)$$

$$SR-Rough (\mu m) = 31.12 - 0.1054 X_1 - 0.00682 X_2 - 0.437 X_3 + 0.000147 X_1^2 + 0.000068 X_2^2 + 0.00440 X_3^2 - 0.000037 X_1 * X_2 + 0.000172 X_1 * X_3 + 0.000044 X_2 * X_3 \quad (3)$$

همچنین به منظور مقایسه مقادیر زبری سطح بدست آمده، طی مدل طراحی شده به روش سطح پاسخ (RSM) و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار زبری سطح بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، طی شکل‌های 6 و 7 ارائه شده است.

مدل می‌باشد. همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر فرایند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب زبری سطح نمونه‌ها در هر دو ناحیه صاف و زبر ترسیم شد. همان‌طور که در شکل‌های 8 و 9 مشاهده می‌شود، پس از سرعت گذار، فشارجت بیشترین تأثیر را بر زبری سطح نمونه‌ها در هر دو ناحیه صاف و زبر داشته است.

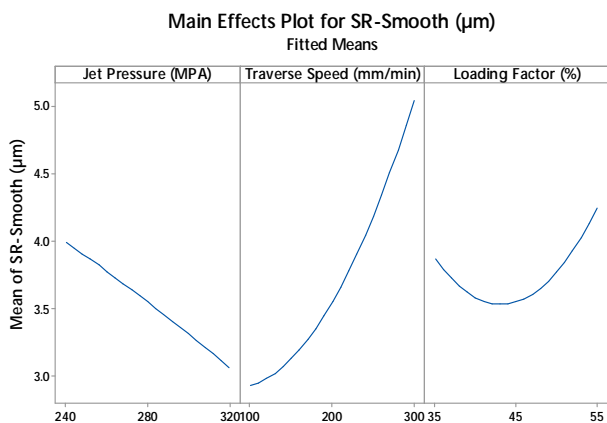


Fig. 8 Comparison the effect of process parameters on surface roughness of samples in smooth region

شکل 8 مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرایند بر زبری سطح نمونه‌ها در ناحیه صاف

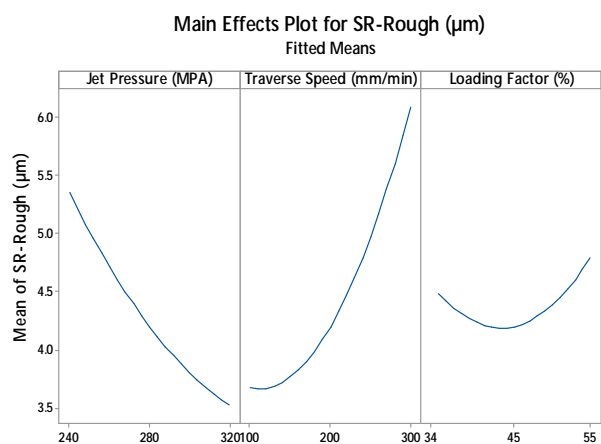


Fig. 9 Comparison of the effect of process parameters on surface roughness of samples in rough region

شکل 9 مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرایند بر زبری سطح نمونه‌ها در ناحیه زبر

طبق شکل‌های 8 و 9 با افزایش فشارجت، زبری سطح نمونه‌ها در هر دو ناحیه صاف و زبر کاهش یافته است. زیرا همان‌طور که در برخی منابع به آن اشاره شده، با افزایش فشارجت، انرژی جنبشی ذرات ساینده و توان برشی جت آب افزایش می‌یابد که موجب غلبه سازوکار برش<sup>1</sup> بر تغییر شکل<sup>2</sup> گردیده و کاهش

برای بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای زبری سطح طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، مقدار خطا برای بیشترین خطای ایجاد شده در اندازه‌گیری زبری سطح در هر ناحیه، طی جدول 8 ارائه شده است.

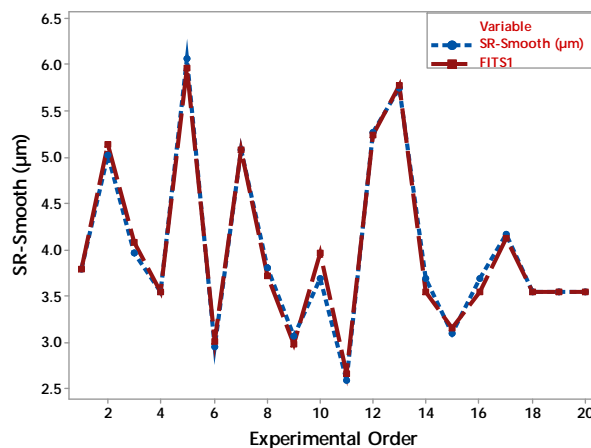


Fig. 6 Comparison of surface roughness of samples in smooth region by response surface methodology and experimental method

شکل 6 مقایسه زبری سطح نمونه‌ها در ناحیه صاف، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

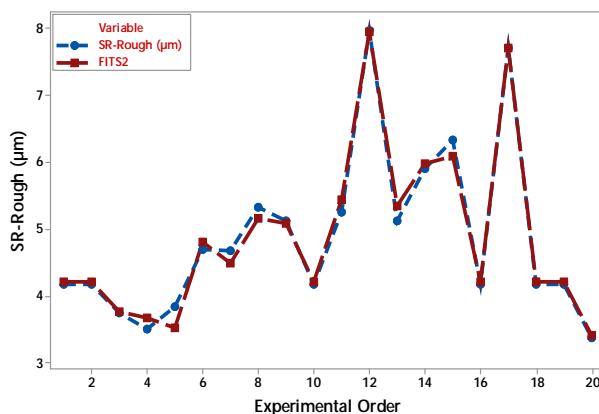


Fig. 7 Comparison of surface roughness of samples in rough region by response surface methodology and experimental method

شکل 7 مقایسه زبری سطح نمونه‌ها در ناحیه زبر، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

جدول 8 مقایسه درصد خطا برای زبری سطح نمونه‌ها، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

Table 8 Comparison error percentage for surface roughness of samples by response surface methodology and experimental method

NO	X <sub>1</sub> (MPA)	X <sub>2</sub> (mm/min)	X <sub>3</sub> (%)	SR-Smooth (µm)	RSM (µm)	Error (%)
10	280	200	45	3/70	3/91	5/67
NO	X <sub>1</sub> (MPA)	X <sub>2</sub> (mm/min)	X <sub>3</sub> (%)	SR-Rough (µm)	RSM (µm)	Error (%)
15	280	300	45	6/33	6/09	-3/79

مقادیر گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش‌بینی

<sup>1</sup> Cutting-Wear  
<sup>2</sup> Deformation-Wear



بین 47%- 38% برای ضریب بارگذاری و نرخ پیشروی 100 میلی‌متر بر دقیقه، حاصل شده است؛ در حالی که، میل مقدار ضریب بارگذاری به مقادیر 35% و 55% توأم با افزایش سرعت‌گذار، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را به همراه داشته است. مطابق با مقالات مطالعه شده در این زمینه، افزایش یا کاهش بیش از حد ضریب بارگذاری توأم با افزایش سرعت‌گذار، کاهش تعداد برخوردها، توان برشی جت و کاهش زمان تعامل ذرات ساینده با نمونه را در پی دارد که افزایش زبری سطح برش را سبب می‌شود [21، 24]. این افزایش به ازای مقادیر نزدیک‌تر به 55% برای ضریب بارگذاری و مقادیر بالاتر از 200 میلی‌متر بر دقیقه برای سرعت‌گذار، محسوس‌تر می‌باشد.

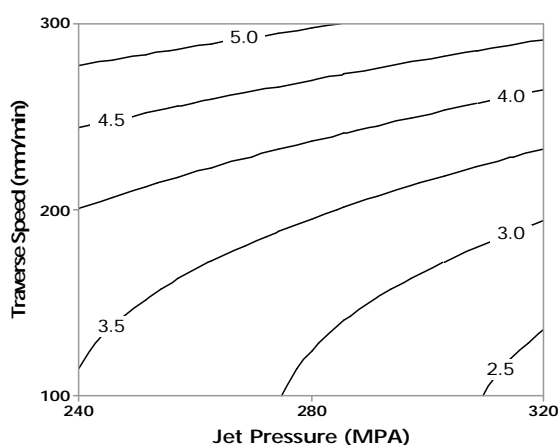


Fig. 10 Contour plot of surface roughness versus Jet pressure and Traverse speed (Loading Factor 45%)

شکل 10 نمودار کانتور زبری سطح بر حسب فشارجت و سرعت‌گذار (ضریب بارگذاری 45%)

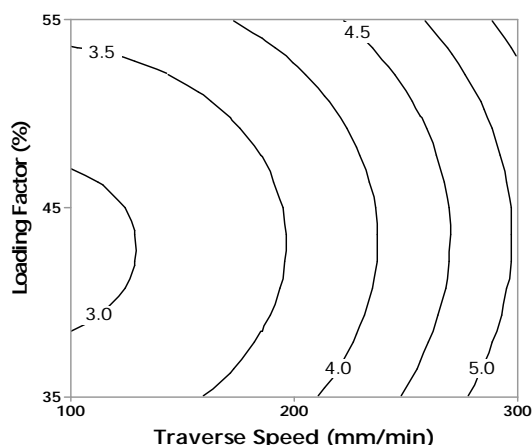


Fig. 11 Contour plot of surface roughness versus Traverse speed and loading factor (jet pressure 240 MPa)

شکل 11 نمودار کانتور زبری سطح بر حسب سرعت‌گذار و ضریب بارگذاری (فشار جت 240 MPa)

زبری سطح نمونه‌ها را سبب می‌شود [20].

بررسی تأثیر سرعت‌گذار بر زبری سطح نمونه‌ها نشان داد که افزایش سرعت‌گذار نیز افزایش زبری سطح نمونه‌ها را به همراه داشته است. زیرا مطابق مقالات مطالعه شده در این زمینه، با ازدیاد سرعت‌گذار و در پی آن افزایش سرعت عبور جت آب و ذرات ساینده از مقابل سطح نمونه، تعداد ذرات برخورد کننده با واحد سطح نمونه در واحد زمان، تقلیل یافته و به این ترتیب از توان برشی جت کاسته شده و سطح زبرتری حاصل می‌شود [21].

بررسی تأثیر ضریب بارگذاری بر زبری سطح نمونه‌ها نشان داد که با افزایش ضریب بارگذاری تا حدود 45%، ابتدا زبری سطح نمونه‌ها در هر دو ناحیه کاهش یافته و با ادامه روند افزایش ضریب بارگذاری به 55%، زبری سطح نمونه‌ها افزایش یافته است. نحوه تأثیر ضریب بارگذاری بر زبری سطح را می‌توان به تعداد برخوردها و همچنین انرژی جنبشی ذرات نسبت داد. با افزایش ضریب بارگذاری از 35% تا حدود 45%، تعداد برخوردها بر واحد سطح نمونه افزایش می‌یابد و در نتیجه آن ارتفاع زبری کاهش یافته و کیفیت سطح برش بهبود می‌یابد. در حالی که با ادامه روند افزایش ضریب بارگذاری و افزایش آن به 55%، به دلیل ازدیاد برخوردهای میان ذرات و افت انرژی جنبشی جت‌آب، زبری سطح افزایش می‌یابد که در برخی از منابع به آن اشاره شده است [7].

با توجه به روند مشابه تغییرات زبری سطح در نواحی صاف و زبر، طی شکل‌های 10 تا 12 به بررسی تأثیر تعاملی پارامترهای فرایند بر زبری سطح نمونه‌ها در ناحیه صاف پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، افزایش توأم فشارجت و کاهش سرعت‌گذار، کاهش زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشته است و تأثیر تغییرات سرعت‌گذار بر زبری سطح نمونه‌ها نسبت به فشارجت چشمگیرتر بوده است.

مطابق منابع مطالعه شده در این زمینه، افزایش فشارجت و به دنبال آن افزایش انرژی جنبشی و توان برشی جت آب، توأم با افزایش زمان تعامل ذرات ساینده با سطح نمونه و در پی آن همپوشانی بیشتر آثار عبور جت آب در ناحیه برش به ازای سرعت‌های‌گذار پایین‌تر، بهبود زبری سطح نمونه‌ها را سبب می‌شود [22، 23]. به‌طوری‌که، کمترین مقدار زبری سطح به ازای فشارجت 320 مگاپاسکال و سرعت‌گذار 100 میلی‌متر بر دقیقه حاصل شده است.

مطابق شکل 11، پیش‌بینی انجام شده توسط مدل نشان داد که کمترین مقدار برای زبری سطح نمونه‌ها، به ازای مقادیر



ذرات ساینده بر زاویه انحنای خطوط ایجاد شده در ناحیه زبر، پس از اندازه‌گیری زوایا در هر حالت فرایندی، به‌منظور بررسی اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد. به‌این ترتیب، آنالیز واریانس برای زاویه انحنای خطوط، در جدول ارائه شده است.

جدول 9 آنالیز واریانس مربوط به زاویه انحنای خطوط در ناحیه زبر

Table 9 Analysis of variance for angle of striation in rough region

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	9	420/17	46/68	82/96	0/000
Linear	3	383/40	127/80	227/11	0/000
X <sub>1</sub>	1	102/40	102/04	181/97	0/000
X <sub>2</sub>	1	280/90	280/90	499/18	0/000
X <sub>3</sub>	1	0/100	0/100	0/18	0/682
Square	3	11/27	3/75	6/68	0/009
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1	2/27	2/27	4/04	0/072
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1	0/46	0/46	0/82	0/387
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1	0/46	0/46	0/82	0/387
Interaction	3	25/50	8/500	15/11	0/000
X <sub>1</sub> * X <sub>2</sub>	1	24/50	24/50	43/54	0/000
X <sub>1</sub> * X <sub>3</sub>	1	0/500	0/500	0/89	0/368
X <sub>2</sub> * X <sub>3</sub>	1	0/500	0/500	0/89	0/368

از آنجایی که در این آنالیز پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0/05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است.

همچنین مقدار P Value برای برخی از جملات، کوچک‌تر از سطح معنادار 0/05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل R<sup>2</sup> یا R<sup>2</sup> adj منطبق شده نیز، حدود 97/49% بدست آمد که به این معنا است که داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است. به این ترتیب، معادله رگرسیون برای زاویه انحنای خطوط، با معادله (4)، ارائه شد.

$$\text{Striation}(\text{°}) = 44.7 - 0.283 X_1 + 0.1479 X_2 - 0.233 X_3 + 0.000568 X_1^2 + 0.000041 X_2^2 + 0.00409 X_3^2 - 0.000437 X_1 * X_2 - 0.000625 X_1 * X_3 + 0.000250 X_2 * X_3 \quad (4)$$

در ادامه، به منظور مقایسه خطای زوایای انحنای بدست آمده، طی مدل طراحی شده به روش سطح پاسخ و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار زاویه انحنای خطوط بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، در شکل 13 ارائه شده است.

در شکل 12 نیز تأثیر تعاملی ضریب بارگذاری و فشارجت ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میل مقدار ضریب بارگذاری به مقادیر 35% و 55% توأم با کاهش فشارجت، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشته است. زیرا، همان‌طور که در برخی از منابع به آن اشاره شده، افزایش یا کاهش بیش از حد ضریب بارگذاری توأم با کاهش فشارجت، کاهش تعداد برخوردها و توان برشی جت را در پی دارد که افزایش زبری سطح برش را سبب می‌شود [20، 25].

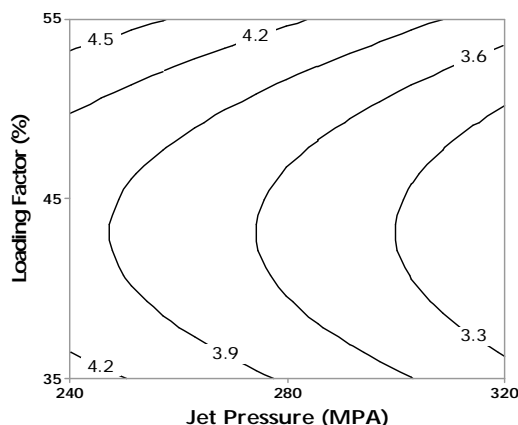


Fig. 12 Contour plot of surface roughness versus jet pressure and loading factor (traverse speed 200 mm/min)

شکل 12 نمودار کانتور زبری سطح بر حسب فشارجت و ضریب بارگذاری (سرعت‌گذار 200 mm/min)

مقایسه خطوط کانتور در شکل‌های 11 و 12 نشان داد که تأثیر تعاملی تغییرات ضریب بارگذاری با سرعت‌گذار چشمگیرتر بوده است.

نکته حائز اهمیت آن است که سازوکارهای مختلف براده برداری، زبری سطح‌های متفاوتی را ایجاد می‌نمایند، در منطقه فوقانی (ناحیه صاف) به دلیل غالب بودن سازوکار برش، کیفیت سطح بهتری حاصل می‌گردد. اما با عبور از منطقه فوقانی و ورود به منطقه تحتانی (ناحیه زبر)، به دلیل غلبه نمودن سازوکار تغییر شکل، کیفیت سطح تنزل می‌یابد که این پدیده، ناشی از افت انرژی جت آب می‌باشد. طی عقب افتادگی و انحراف جت آب از محور اصلی برش و افزایش زاویه برخورد آن با قطعه‌کار، ارتفاع زبری در دیواره برش افزایش می‌یابد و هر چه عمق برش بیشتر باشد، تأثیرگذاری سازوکار تغییر شکل بیشتر بوده و ارتفاع زبری افزایش می‌یابد [15، 26].

3-2- تأثیر پارامترهای برش با جت آب و ذرات ساینده بر زاویه انحنای خطوط در ناحیه برش  
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرایند برش با جت آب و

مطابق شکل 14 مشاهده می‌شود، پس از سرعت‌گذار، فشارجت بیشترین تأثیر را بر زاویه انحناي خطوط داشته است. چگونگی تأثیر پارامترهای فرایند بر زاویه انحناي خطوط را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش فشارجت، انرژی جنبشی ذرات ساینده و توان برشی جت آب افزایش می‌یابد که این افزایش موجب غلبه سازوکار برش (برخورد ذرات ساینده تحت زوایای کوچک) بر سازوکار تغییر شکل گردیده و کاهش انحراف جت آب و در پی آن، کاهش زاویه انحناي خطوط را سبب می‌شود. همچنین با افزایش فشارجت آب، ذرات ساینده ترد به اندازه‌های کوچک‌تری شکسته شده و در نتیجه، این ذرات که اینک از ابعاد کوچک‌تری برخوردارند، مشابه ابزاری با تعداد لبه برنده بیشتر و عمق براده برداری کمتر، عمل نموده و به این ترتیب با انجام براده‌برداری یکنواخت‌تر از سطح قطعه‌کار، سطح صاف‌تری را ایجاد می‌نماید [15، 21].

بررسی تأثیر سرعت‌گذار بر زبری سطح نمونه‌ها نشان داد که افزایش سرعت‌گذار، افزایش زاویه انحناي خطوط را در پی داشته است. زیرا، با افزایش سرعت‌گذار، تعداد ذرات ساینده عبورکننده از مقابل واحد سطح قطعه‌کار، تقلیل یافته و به این ترتیب، زاویه انحناي خطوط افزایش می‌یابد. همچنین، کاهش زمان تماس ذرات ساینده با نمونه و به این ترتیب، تنزل توان برشی جت آب نیز منجر به غلبه سریع سازوکار تغییر شکل بر سازوکار برش شده و افزایش شکل‌گیری خطوط و زاویه آنها را سبب می‌شود [21، 27]. بررسی تأثیر ضریب بارگذاری بر زبری سطح نمونه‌ها نشان داد که تغییرات ضریب بارگذاری تأثیر چندانی بر زاویه انحناي خطوط نداشته است.

در ادامه، تأثیر تعاملی پارامترهای فرایند بر زاویه انحناي خطوط نیز در شکل‌های 15 تا 17 مورد بررسی قرار گرفته است.

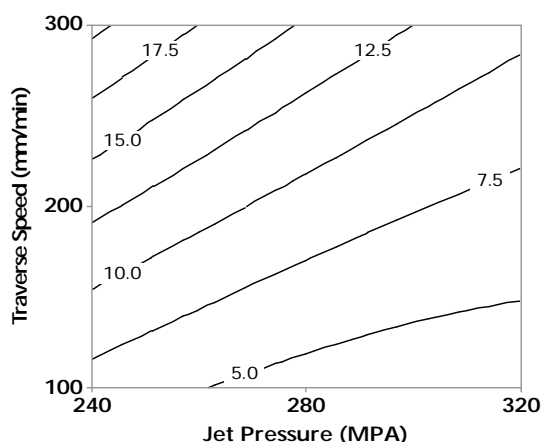


Fig. 15 Contour plot of angle of striation versus Jet pressure and Traverse speed (Loading Factor 45%)

شکل 15 نمودار کانتور زاویه انحناي خطوط بر حسب فشارجت و سرعت گذار (ضریب بارگذاری 45%)

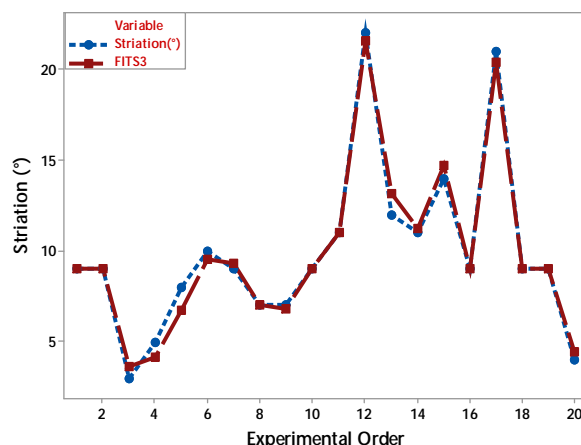


Fig. 13 Comparison angle of striation of samples in rough region by response surface methodology and experimental method

شکل 13 مقایسه زاویه انحناي خطوط نمونه‌ها در ناحیه زبر، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

برای بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای زاویه انحناي خطوط، طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، بیشترین مقدار خطای اندازه‌گیری شده، در جدول 10 ارائه شده است.

همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامترها بر فرایند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب زاویه انحناي خطوط نیز در شکل 14 ترسیم شد.

جدول 10 مقایسه درصد خطا برای زاویه انحناي خطوط، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

Table 10 Comparison error percentage for angle of striation of samples by response surface methodology and experimental method

NO	X <sub>1</sub> (MPa)	X <sub>2</sub> (mm/min)	X <sub>3</sub> (%)	Striation (°)	RSM (μm)	Error (%)
5	320	200	45	8	7/3	-8/7

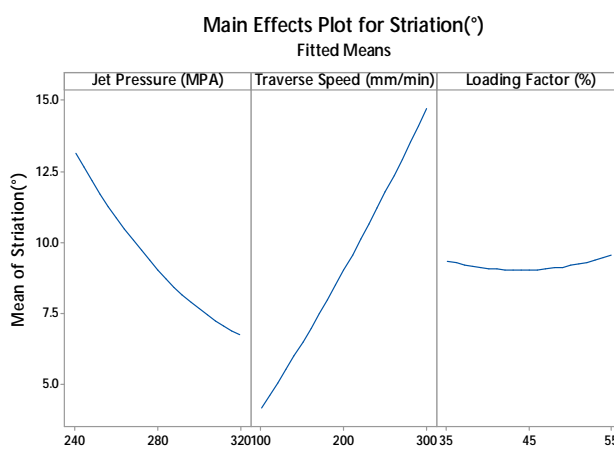


Fig. 14 Comparison of the effect of process parameters on angle of striation

شکل 14 مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرایند بر زاویه انحناي خطوط

برای مشاهده بهتر انحنای ایجاد شده در دیواره شکاف، تصاویری از انحنای ایجاد شده در ناحیه زبر موضع برش به ازای حالت‌های مختلف فرایندی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل 18 مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت‌گذار، زاویه انحنای خطوط افزایش یافته است.

در شکل 19 نمایی از تأثیر تغییرات فشارجت آب بر زاویه انحنای خطوط به ازای سرعت‌گذار 200 میلی‌متر بر دقیقه و ضریب بارگذاری 45%، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشارجت آب از زاویه انحنای خطوط کاسته شده است.

در شکل 20 نمایی از تأثیر تغییرات ضریب بارگذاری بر زاویه انحنای خطوط به ازای فشارجت آب 280 مگاپاسکال و سرعت‌گذار 200 میلی‌متر بر دقیقه، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر ضریب بارگذاری بر زاویه انحنای خطوط ناچیز می‌باشد.

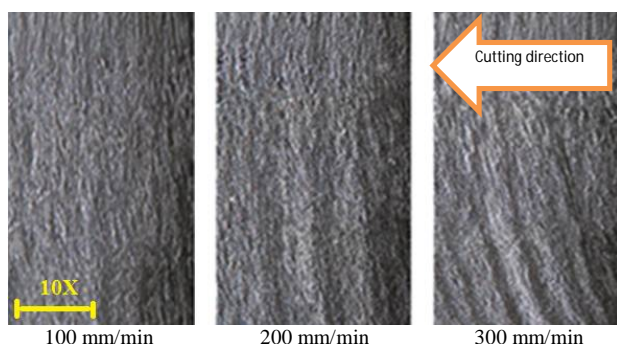


Fig. 18 Image of impact of traverse speed change on angle of striation (jet pressure 280 MPa, loading factor 45%)

شکل 18 نمایی از تأثیر تغییرات سرعت‌گذار بر زاویه انحنای خطوط (فشارجت 280 MPa و ضریب بارگذاری 45%)

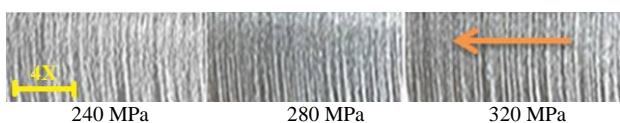


Fig. 19 image of impact of jet pressure change on angle of striation (traverse speed 300 mm/min, loading factor 35%)

شکل 19 نمایی از تأثیر تغییرات فشارجت بر زاویه انحنای خطوط (سرعت‌گذار 200 mm/min و ضریب بارگذاری 45%)



Fig. 20 image of impact of loading factor change on angle of striation (jet pressure 280 MPa, traverse speed 200 mm/min)

شکل 20 نمایی از تأثیر تغییرات ضریب بارگذاری بر زاویه انحنای خطوط (فشارجت 280 MPa و سرعت‌گذار 200 mm/min)

همان‌طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود، افزایش توأم فشارجت و کاهش سرعت‌گذار، کاهش زاویه انحنای خطوط را در پی داشته است و تأثیر تغییرات سرعت‌گذار بر زاویه انحنای خطوط نسبت به فشارجت چشمگیرتر بوده است.

مطابق منابع مطالعه شده در این زمینه، کاهش توأم سرعت‌گذار و افزایش فشارجت، به ترتیب به دلیل افزایش تعداد برخوردها بر واحد سطح نمونه و کاهش بازشدگی جت‌آب در ناحیه تحتانی برش، کاهش شکل‌گیری خطوط و زاویه آنها را سبب می‌شود [12، 15].

همان‌طور که در شکل 16 مشاهده می‌شود، تأثیر تغییرات ضریب بارگذاری بر زاویه انحنای خطوط ناچیز است و افزایش سرعت‌گذار تنها خطوط کانتور را به نواحی با زاویه انحنای بالاتر جابجا می‌کند و مطابق با شکل 17، افزایش فشارجت نیز با تأثیر معکوس بر زاویه انحنای خطوط تنها خطوط کانتور را به نواحی با زاویه انحنای کوچکتر جابجا می‌کند.

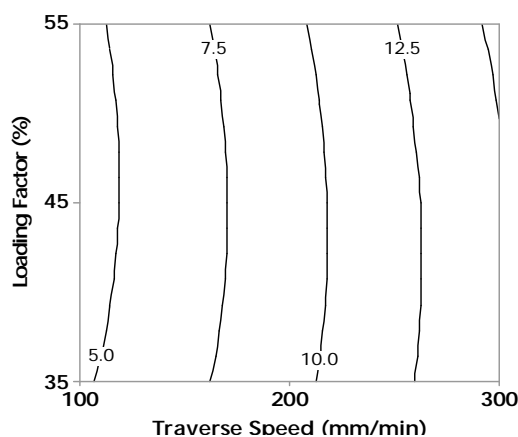


Fig. 16 Angle of striation versus Loading factor and Traverse speed (Jet pressure 280 MPa)

شکل 16 نمودار کانتور زاویه انحنای خطوط بر حسب ضریب بارگذاری و سرعت‌گذار (فشارجت 240 MPa)

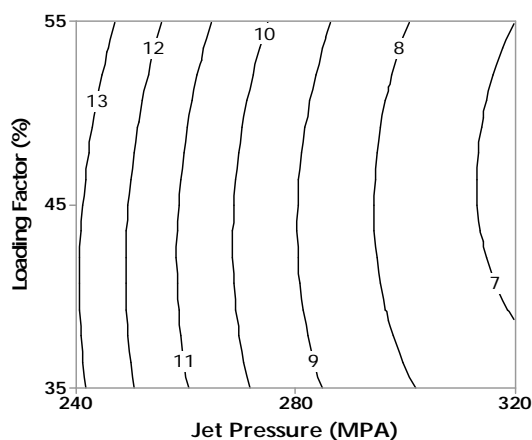


Fig. 17 Contour plot of angle of striation versus jet pressure and loading factor (traverse speed 200 mm/min)

شکل 17 نمودار کانتور زاویه انحنای خطوط بر حسب فشارجت و ضریب بارگذاری (سرعت‌گذار 200 mm/min)

### 3-3- تأثیر پارامترهای برش با جت آب و ذرات ساینده بر شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش

برای بررسی تأثیر پارامترهای ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده بر شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش، از قسمت انتهایی ناحیه زیر یا محل خروج جت آب از نمونه تصویر برداری شد. در شکل 22 نمایی از شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به ازای سرعت گذار 100 میلی‌متر بر دقیقه و ضریب بارگذاری 45٪، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با ثابت نگه داشتن پارامترهای ذکر شده، مقدار پلیسه ایجاد شده در نمونه برش کاری شده با فشار 320 مگاپاسکال نسبت به نمونه برش کاری شده با فشار 240 مگاپاسکال کمتر است. مطابق نتایج عنوان شده در برخی منابع، با افزایش فشارجت، به دلیل افزایش انرژی جنبشی جت آب و برخورد ذرات ساینده با سطح نمونه تحت زوایای کوچکتر، از میزان شکل‌گیری پلیسه در مقطع برش کاسته می‌شود [29].

در شکل 23 نمایی از شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به ازای فشارجت آب 240 مگاپاسکال و ضریب بارگذاری 55٪، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت گذار، مقدار پلیسه ایجاد شده در نمونه افزایش یافته است. این پدیده را می‌توان به کاهش تعداد برخوردها و لبه‌های برشی در واحد سطح نمونه و تنزل توان برشی جت نسبت داد [7].

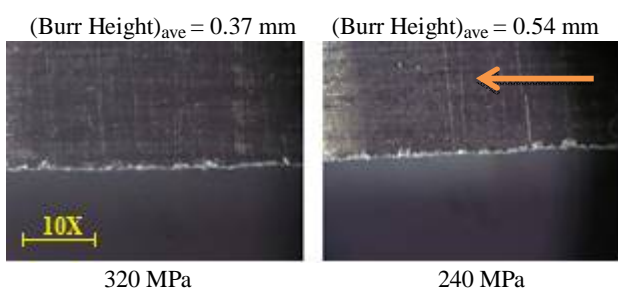


Fig. 22 The effect of jet pressure on burr formation (traverse speed 100 mm/min and loading factor 45%)

شکل 22 تأثیر فشارجت بر شکل‌گیری پلیسه به ازای سرعت گذار 100 mm/min و ضریب بارگذاری 45٪

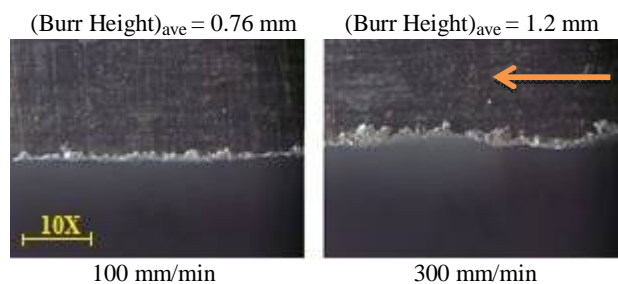


Fig. 23 The effect of traverse speed on burr formation (jet pressure 240 MPa and loading factor 55%)

شکل 23 تأثیر سرعت گذار بر شکل‌گیری پلیسه به ازای فشارجت 240 MPa و ضریب بارگذاری 55٪

روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که جهت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی که پاسخ آنها تحت تأثیر چندین متغیر قرار دارد استفاده می‌شود و هدف آن، بهینه‌سازی پاسخ بوده و قادر است چندین متغیر پاسخ را به ازای قیود داده شده بهینه‌سازی نماید [28]. پارامترهای وارد شده به نرم‌افزار برای توابع هدف به ازای کمترین مقدار برای زبری سطح و زاویه انحناى خطوط، تنظیم شده است. مطابق شکل 21، مقدار بهینه شده توسط مدل، برای زبری سطح در ناحیه صاف و زیر به ترتیب، 2/53 و 3/17 میکرومتر و برای زاویه انحناى خطوط، 3/48 درجه بدست آمده است.

همچنین طی بهینه‌سازی انجام شده، سطوح بهینه نیز برای فشارجت، سرعت گذار و ضریب بارگذاری به ترتیب به مقدار 314/3 مگاپاسکال، 100 میلی‌متر بر دقیقه 43/08٪ تعیین گردیده است.

با توجه به نزدیک بودن مقادیر سطوح بهینه به فشارجت 320 مگاپاسکال و سرعت گذار 100 میلی‌متر بر دقیقه و ضریب بارگذاری 45٪، مقدار تجربی کمیت‌های زبری سطح در ناحیه صاف و زیر و زاویه انحناى خطوط در این حالت فرایندی اندازه‌گیری شد و با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل مورد مقایسه قرار گرفت. به این ترتیب، مقدار خطای پیش‌بینی انجام شده در مقایسه با مقدار تجربی برای کمیت‌های زبری سطح در ناحیه صاف و زیر و زاویه انحناى خطوط به ترتیب 2/79٪، 5/98٪ و 16/23٪ به دست آمد.

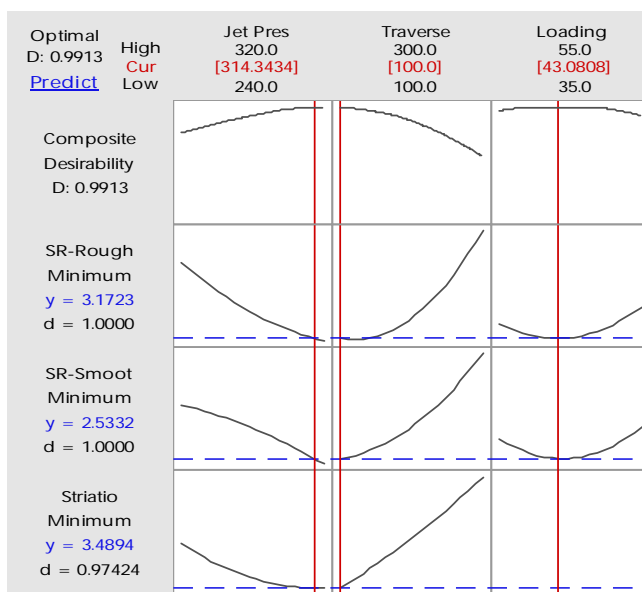


Fig. 21 Optimal values for the surface roughness and angle of striation of the samples

شکل 21 مقادیر بهینه برای کمیت‌های زبری سطح و زاویه انحناى خطوط نمونه‌ها

خطوط، می‌تواند تأیید کننده کارآیی فرایند انتخاب شده برای برش آلیاژ آلومینیوم حساس به حرارت 2024-T351 باشد.

### 5- مراجع

- [1] Mackenzie DS, Totten GE. Handbook of aluminum: Dekker; 2003.
- [2] Lipski A, Mroziński S. The effects of temperature on the strength properties of aluminium alloy 2024-T3. *acta mechanica et automatica*. 2012;6:62-6.
- [3] Knight WA, Boothroyd G. Fundamentals of metal machining and machine tools: CRC Press; 2005.
- [4] Krajcarz D. Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting. *Procedia Engineering*. 2014;69:838-43.
- [5] Sharif MN, Pervaiz S, Deiab I. Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;89(5-8):2447-79.
- [6] Momber AW, Kovacevic R. Principles of abrasive water jet machining: Springer Science & Business Media; 2012.
- [7] Selvan MCP, Raju NMS, Sachidananda H. Effects of process parameters on surface roughness in abrasive waterjet cutting of aluminium. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2012;7(4):439-44.
- [8] Caydas U, Hascalik A. A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method. *Journal of materials processing technology*. 2008;202(1-3):574-82.
- [9] Shakouri E, Abbasi M. Investigation of cutting quality and surface roughness in abrasive water jet machining of bone. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2018;232(9):850-61.
- [10] Shanmugam D, Masood S. An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites. *Journal of materials processing technology*. 2009;209(8):3887-93.
- [11] Sasikumar K, Arulshri K, Ponappa K, Uthayakumar M. A study on kerf characteristics of hybrid aluminium 7075 metal matrix composites machined using abrasive water jet machining technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2018;232(4):690-704.
- [12] Ares M, Pedro F, Rodríguez-Parada L, Gómez-Parra Á, Batista Ponce M. Characterization and Defect Analysis of Machined Regions in Al-SiC Metal Matrix Composites Using an Abrasive Water Jet Machining Process. *Applied Sciences*. 2020;10(4):1512.
- [13] Shahu PK, Maity S. Machining Performance Evaluation of Al 6061 T6 Using Abrasive Water Jet Process. *Advances in Unconventional Machining and Composites: Springer*; 2020. p. 127-39.
- [14] Maneiah D, Shunmugasundaram M, Reddy AR,

در شکل 24 نمایی از شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به ازای فشار جت آب 240 مگاپاسکال و سرعت گذار 100 میلی‌متر بر دقیقه، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ثابت نگه داشتن پارامترهای ذکر شده، مقدار پلیسه ایجاد شده در نمونه برش‌کاری شده با ضریب بارگذاری 45%، نسبت به نمونه برش‌کاری شده با ضریب بارگذاری 55% کمتر است. مطابق مقالات مطالعه شده در این زمینه، افزایش مقدار پلیسه به ازای ضریب بارگذاری 55%، به ازدیاد برخوردهای میان ذرات، افت انرژی جنبشی جت‌آب و تأثیرگذاری آن بر تغییر نوع سازوکار براده‌برداری مربوط می‌شود [20].

(Burr Height)<sub>ave</sub> = 0.54 mm      (Burr Height)<sub>ave</sub> = 0.76 mm

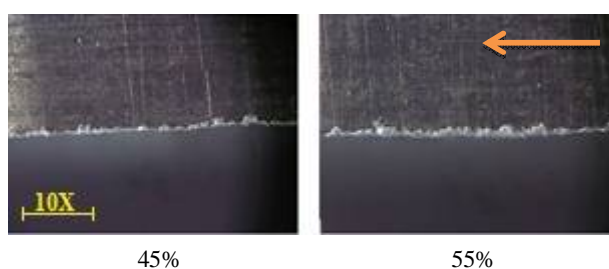


Fig. 24 The effect of loading factor on burr formation (jet pressure 240 MPa and traverse speed 100 mm/min)

شکل 24 تأثیر ضریب بارگذاری بر شکل‌گیری پلیسه به ازای فشار جت 240 MPa و سرعت‌گذار 100 mm/min

### 4- نتیجه‌گیری

این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر فشارجت، سرعت‌گذار و ضریب بارگذاری بر زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و شکل‌گیری پلیسه طی فرایند برش با جت آب و ذرات ساینده انجام شده است که اهم نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد.

- طی تحلیل آماری انجام شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب با سطح اطمینان 95%، نتایج نشان داد که بعد از سرعت‌گذار، فشارجت بیشترین تأثیر را بر زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و میزان شکل‌گیری پلیسه در نمونه‌ها داشته است.
- ضریب بارگذاری تأثیر قابل توجهی بر مشخصه کیفی سطح برش نداشته است.

- طی بهینه‌سازی انجام شده به روش سطح پاسخ، مقدار بهینه شده توسط مدل، برای زبری سطوح در نواحی صاف و زبر به ترتیب، 2/53 و 3/17 میکرومتر و برای زاویه انحنای خطوط، 3/48 درجه، بدست آمد.

- با توجه به اهمیت کیفیت سطح نهایی و حذف حرارت ماشین‌کاری طی فرایند نوین انتخاب شده در این تحقیق، مقادیر بهینه بدست آمده برای زبری سطح و زاویه انحنای

- abrasive waterjet cutting process by using statistical modeling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018;6:22-30.
- [23] Dhanawade A, Kumar S. Experimental study of delamination and kerf geometry of carbon epoxy composite machined by abrasive water jet. *Journal of Composite Materials*. 2017;51(24):3373-90.
- [24] Doreswamy D, Shivamurthy B, Anjaiah D, Sharma NY. An investigation of abrasive water jet machining on graphite/glass/epoxy composite. *International Journal of Manufacturing Engineering*. 2015;2015.
- [25] Ming IWM, Azmi AI, Chuan LC, Mansor AF. Experimental study and empirical analyses of abrasive waterjet machining for hybrid carbon/glass fiber-reinforced composites for improved surface quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95(9-12):3809-22.
- [26] Xu QW, Qiang CH, Guo CW, editors. Experimental Study on the Surface Roughness of 1060 Aluminum Alloy Cut by Abrasive Water Jet. *Materials Science Forum*; 2019: Trans Tech Publ.
- [27] Yuvaraj N, Pradeep Kumar M. Study and evaluation of abrasive water jet cutting performance on AA5083-H32 aluminum alloy by varying the jet impingement angles with different abrasive mesh sizes. *Machining Science and Technology*. 2017;21(3):385-415.
- [28] Saeid Amini SARF. Investigation of the effect of abrasive water jet cutting process parameters on cutting depth and surfaces quality of inconell 617 . thesis (in persian). 2016:1-80.
- [29] Kumaran ST, Ko TJ, Uthayakumar M, Islam MM. Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using regression analysis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;724:1037-45.
- Begum Z. Optimization of machining parameters for surface roughness during abrasive water jet machining of aluminium/magnesium hybrid metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*. 2020.
- [15] Dhanawade A, Kumar S. Study on carbon epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining. *Journal of Composite Materials*. 2019;53(20):2909-24.
- [16] Dumbhare PA, Dubey S, Deshpande YV, Andhare AB, Barve PS. Modelling and multi-objective optimization of surface roughness and kerf taper angle in abrasive water jet machining of steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018;40(5):259.
- [17] www.aalco.co.uk. 2019.
- [18] Verma K, Anandkrishnan V, Sathish S. Modelling and analysis of abrasive water jet machining of AA2014 alloy with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> abrasive using fuzzy logic. *Materials Today: Proceedings*. 2019.
- [19] Nasri M REE. Experimental Investigation of Machining Parameters of Near Dry Electrical Discharge Machining (EDM) of Mo40 Steel Using Vegetable Oil. *Modares Mechanical Engineering*, (in persian). 2019:1539-1549.
- [20] Ay M, Caydas U, Haşçalik A. Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of age hardened Inconel 718 nickel-based superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010;25(10):1160-5.
- [21] Balamurugan K, Uthayakumar M, Sankar S, Hareesh U, Warriar K. Abrasive Waterjet Cutting of Lanthanum Phosphate—Yttria Composite: A Comparative Approach. *Micro and Nano Machining of Engineering Materials*: Springer; 2019. p. 101-19.
- [22] Ahmed TM, El Mesalamy AS, Youssef A, El Midany TT. Improving surface roughness of