



## Study of the Effect of Cutting Parameters with Abrasive Water Jet on the Surface Roughness, Burr Formation and Striation Angle in Aluminum 111H-5754 Parts

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Emami H.<sup>1</sup> MSc,  
Shakouri E.<sup>1</sup> PhD,  
Saraeian P.<sup>\*2</sup> PhD

#### How to cite this article

Emami H, Shakouri E, Saraeian P. Study of the Effect of Cutting Parameters with Abrasive Water Jet on the Surface Roughness, Burr Formation and Striation Angle in Aluminum 111H-5754 Parts. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(7):1801-1814.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Mechanic Faculty, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Mechanic Faculty, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanic Faculty, Islamic Azad University, Daneshgah Boulevard, Najafabad, Isfahan, Iran  
Phone: +98 (21) 88076139  
Fax: -  
p.saraeian@iaui-tnd.ac.ir

#### Article History

Received: January 16, 2020  
Accepted: March 31, 2020  
ePublished: July 20, 2020

### ABSTRACT

Aluminum alloys, due to their high variety and favorable mechanical properties, are widely used in industries. Aluminum alloy 111H-5754 due to its properties such as high strength to weight ratio, ductility, toughness, and corrosion resistance, are applied in the manufacture of automotive body, offshore, and offshore oil equipment. The presence of 3% magnesium in the chemical structure of this alloy makes it susceptible to heat and therefore, it is not possible to perform most of the traditional machining processes on it. Water jet machining with abrasive particles (AWJM), because of the use of water and abrasive particles as cutting tools, can be a good method for machining these materials. In the present study, the effect of water jet and abrasive particle machining process parameters, including water jet pressure, traverse speed and loading coefficient on surface roughness, angle of striation, and burr formation in aluminum alloy 111H-5754 samples is discussed. The results showed that after traverse speed, water jet pressure and loading coefficient have the most effects on the surface quality characteristics, respectively. So, for a loading factor of 45% and a jet pressure of 300MPa, increasing the traverse speed from 200 to 300mm/min, the surface roughness value in the smooth area is about 50%, and the angle of striation of the lines in the rough area, increased by about 25%.

**Keywords** Abrasive Water Jet Machining; Aluminum Alloy H111-5754; Surface Roughness; Striation Angle; Burr Formation

### CITATION LINKS

[1] Handbook of ... [2] Delamination of a sensitized commercial Al-Mg alloy during fatigue crack ... [3] Fundamentals of metal machining and machine ... [4] Principles of abrasive water jet machining, Springer Science & Business ... [5] Comparison metal water jet cutting with laser and plasma ... [6] Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (MQL) based ... [7] Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet ... [8] Abrasive waterjet cutting of aluminum alloys: Workpiece surface ... [9] Investigation on the cutting quality characteristics of abrasive water jet machining ... [10] Experimental Investigation on Cryogenic Assisted Abrasive Water Jet Machining of ... [11] Investigation of cutting quality and surface roughness in abrasive water jet machining ... [12] Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of ... [13] Experimental study on surface roughness in abrasive water jet ... [14] A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis ... [15] An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered ... [16] A study on kerf characteristics of hybrid aluminium 7075 metal matrix composites machined using abrasive water jet machining ... [17] Penetration ability of abrasive waterjets in cutting of aluminum-silicon carbide particulate metal matrix ... [18] An Experimental investigation on depth of cut in abrasive waterjet cutting of ... [19] Improving surface roughness of abrasive waterjet cutting process by using ... [20] Optimization of machining parameters for surface roughness during abrasive water jet machining of aluminium/magnesium hybrid metal matrix ... [21] Characterization and Defect Analysis of Machined Regions in Al-SiC metal ... [22] Machining performance evaluation of Al 6061 T6 using abrasive water jet ... [23] Birmingham: The UK's largest independent multi-metals ... [24] Effects of process parameters on surface roughness in ... [25] Modelling and analysis of abrasive water jet machining of AA2014 alloy with Al2O3 abrasive using ... [26] Abrasive waterjet cutting of lanthanum phosphate-yttria composite: a comparative ... [27] Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of age ... [28] Study and evaluation of abrasive water jet cutting ... [29] Study on carbon epoxy composite surfaces machined by abrasive ... [30] Experimental Study on the Surface Roughness of 1060 ... [31] Prediction of surface roughness in abrasive water jet ...

# مطالعه تاثیر پارامترهای برشکاری با جت آب همراه با ذرات ساینده بر زبری سطح، شکل‌گیری پلیسه و زاویه انحنای خطوط برش در قطعات آلومینیومی ۱۱۱H-۵۷۵۴

هادی امامی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

احسان شکوری PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پیام سرائیان PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

## چکیده

آلیاژهای آلومینیوم، با توجه به تنوع بالا و خواص مکانیکی مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در صنایع دارند و در این بین، آلیاژ آلومینیوم ۱۱۱H-۵۷۵۴ به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، شکل‌پذیری، چقرمگی و مقاومت به خوردگی بالا، در ساخت بدنه خودرو، صنایع دریایی و تجهیزات نفتی فراساحلی کاربرد ویژه‌ای دارند. حضور ۳٪ منیزیم در ساختار شیمیایی این آلیاژ، سبب حساسیت آن نسبت به حرارت شده و به همین دلیل، اجرای اکثر فرآیندهای ماشین‌کاری سنتی بر روی آن امکان‌پذیر نیست. ماشین‌کاری با جت آب به همراه ذرات ساینده (AWJM)، به دلیل استفاده از آب و ذرات ساینده به عنوان ابزار برشی، می‌تواند روش مناسبی جهت ماشین‌کاری این دسته از مواد باشد. در پژوهش حاضر، به بررسی تاثیر پارامترهای اصلی فرآیند ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده، از جمله فشار جت آب، سرعت گذار و ضریب بارگذاری بر زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و شکل‌گیری پلیسه در نمونه‌های آلومینیومی ۱۱۱H-۵۷۵۴ پرداخته شده است. نتایج نشان داد، پس از سرعت گذار، فشار جت آب و ضریب بارگذاری به ترتیب بیشترین تاثیر را بر مشخصه‌های کیفی سطح دارند. به طوری که، به ازای ضریب بارگذاری ۴۵٪ و فشار جت ۳۰۰ مگاپاسکال، با افزایش سرعت گذار از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، مقدار زبری سطح در ناحیه صاف، در حدود ۵۰٪، و زاویه انحنای خطوط در ناحیه زبر، در حدود ۲۵٪، افزایش یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** ماشین‌کاری با جت آب به همراه ذرات ساینده (AWJM)، آلیاژ آلومینیوم ۱۱۱H-۵۷۵۴، زبری سطح، زاویه انحنای خطوط، شکل‌گیری پلیسه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲

\*نویسنده مسئول: p\_saraeian@iau-tnd.ac.ir

## مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل برخورداری از نسبت استحکام به وزن بالا، رسانش حرارتی و الکتریکی مطلوب، مقاومت بالا در برابر خوردگی و قیمت مناسب، به طور گسترده در صنایع دریایی، هوایی و خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود بیش از ۳٪ منیزیم در ترکیب شیمیایی آلیاژهای سری ۵xxx، آنها را نسبت به ترک ناشی از خستگی و خوردگی به هنگام قرارگیری در دمای بیش از ۵۰ درجه سانتی‌گراد حساس می‌نماید. این حساسیت ناشی

از تمایل به پخش منیزیم در امتداد مرزخانه‌ها و تشکیل فاز غنی از منیزیم است. تشکیل این فاز در آلیاژ آلومینیوم، موجب کاهش شدید مقاومت به ترک ناشی از خوردگی و خستگی می‌شود [1,2].

همچنین معایبی نظیر وجود محدودیت در تحمل حرارت حین فرآیند برش، متغیربودن ضخامت براده تغییر شکل‌یافته، تشکیل لبه انباشته در فصل مشترک براده و ابزار و به دنبال آن فرسایش ابزار، از جمله عوامل محدودکننده طی ماشین‌کاری این دسته از مواد به روش سنتی هستند. زیرا طی فرآیند برش، قسمتی از حرارت تولیدشده وارد ابزار شده که افزایش دمای ابزار و فرسایش ابزار را به دنبال دارد، بخشی از آن به وسیله براده خارج می‌شود و در نهایت بخشی از حرارت وارد قطعه‌کار شده که افزایش دما و تغییرات خواص قطعه‌کار را سبب می‌شود [3]. مجموعه این عوامل سبب شده که استفاده از فرآیند ماشین‌کاری با جت آب به همراه ذرات ساینده به عنوان یکی از روش‌های بالقوه برای برش این آلیاژ مطرح شود. ماشین‌کاری با جت آب نخستین بار در سال ۱۹۷۴ به منظور تمیزکاری سطح فلزات پیش از مرحله پرداخت سطح فلز مورد استفاده قرار گرفت. اما با ورود به دهه ۸۰، مهندسين دریافتند که می‌توان با افزودن ذرات ساینده، توان برشی جت آب را افزایش داد. برخورداری این روش از ویژگی‌هایی نظیر اعمال نیروهای برشی اندک به قطعه‌کار بدون تماس فیزیکی با ابزار، عدم تولید حرارت طی براده‌برداری، قابلیت برش طیف گسترده‌ای از مواد و عدم نیاز به تعویض ابزار، آن را از دیگر روش‌های ماشین‌کاری سنتی و ماشین‌کاری غیرسنتی نظیر ماشین‌کاری با لیزر یا پلاسما متمایز نموده است. ضمن آنکه این روش به دلیل استفاده از آب به عنوان ابزار برشی، و عدم نیاز به سیالات روانکار و خنک‌کار که آلاینده محیط زیست بوده و مشکلات متعددی در فرآیند بازیافت آنها وجود دارد، دوست‌دار محیط زیست محسوب می‌شود [4-7].

طی پژوهشی، تاثیر پارامترهای فرآیند جت آب به همراه ذرات ساینده بر زبری سطح دو نوع آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و ۶۰۶۱ با خواص مکانیکی متفاوت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد، با کاهش سرعت گذار، زبری سطح کاهش می‌یابد و همچنین آلیاژ ۷۰۷۵ که از خواص مکانیکی بالاتری برخوردار است زبری سطح کمتری را نتیجه داده است [8].

طی بررسی کیفیت سطح کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم ۶۰۶۱ ماشین‌کاری‌شده با جت آب به همراه ذرات ساینده، مشخص شد که فشار جت آب و سرعت گذار بیشترین تاثیر را بر زبری سطح و زاویه مخروطی‌شدن شکاف دارند [9]. ترکیب فرآیند خنک‌کاری مادون سرد (Cryogenic) با نیتروژن مایع و ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، نشان داد که افزودن قابلیت خنک‌کاری مادون سرد به فرآیند ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده، موجب بهبود ویژگی‌های عملکرد برش شامل عمق برش، نرخ باربرداری، و مشخصات هندسی شکاف شده است [10].

نازل از قطعه کار، نرخ پیشروی و نرخ ریزش ذرات ساینده طی روش تجربی و تحلیل آماری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که نرخ پیشروی و نرخ ریزش ذرات ساینده بیشترین تاثیر را بر زبری سطح نمونه‌ها داشته است [20].

نتایج حاصل از بررسی و تحلیل مشخصه‌های کیفی سطح کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم-سیلیکون/کارباید طی برشکاری با جت آب به همراه ذرات ساینده نشان داد، تاثیر توأم کاهش فشار جت آب و افزایش نرخ پیشروی، سبب کاهش انرژی جنبشی جت و بازشدگی آن در خروجی ناحیه برش شده که عمیق‌تر شدن خطوط ایجاد شده در ناحیه زیر را سبب می‌شود [21].

طی تحقیقی به ارزیابی عملکرد آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ طی ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده پرداخته شد. جهت بهینه‌سازی پارامترها از منطق فازی خاکستری و شبکه عصبی مصنوعی بهره گرفته شد و به این ترتیب تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر زبری سطح نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بعد از فشار جت آب، نرخ ریزش ذرات ساینده بیشترین تاثیر را بر زبری سطح نمونه‌ها داشته است [22].

وجود منیزیم در ساختار شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۱۱۱H-۵۷۵۴، آن را نسبت به حرارت ایجاد شده طی عملیات مرسوم ماشین‌کاری حساس نموده است. منیزیم موجود در ساختار این آلیاژ، تمایل به پخش شدن در امتداد مرزها و تشکیل فاز غنی از منیزیم را داشته و تشکیل این فاز در آلیاژ آلومینیوم، به شدت مقاومت آن را در برابر ترک ناشی از خوردگی و خستگی تنزل می‌دهد. بنابراین، به منظور حذف چالش‌هایی نظیر ایجاد حرارت، نیروهای ماشین‌کاری و ایجاد لبه انباشته طی عملیات ماشین‌کاری این آلیاژ، استفاده از جت آب و ذرات ساینده به عنوان یکی از روش‌های بالقوه مطرح شده است. از این رو، با توجه پیشینه مقالات مطالعه شده در این زمینه و عدم انجام پژوهشی پیرامون برشکاری آلیاژ آلومینیوم ۱۱۱H-۵۷۵۴ با استفاده از جت آب و ذرات ساینده، در این پژوهش به منظور تعیین شرایط فرآیندی بهینه و دستیابی به مناسب‌ترین مشخصه‌های کیفی سطح، به بررسی تاثیر پارامترهای فشار جت آب، سرعت گذار و ضریب بارگذاری، بر مشخصه‌های کیفی سطح برش، نظیر زبری سطح، زاویه انحنای خطوط، و تشکیل پلیسه در دهانه خروجی شکاف، پرداخته شده است.

### روش تجربی

همان‌گونه که در مقدمه بیان شد، ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده، طیف وسیعی از پارامترهای فرآیندی را دربر می‌گیرد که هر یک از این پارامترها به سهم خود، بر روی نتایج خروجی تاثیرگذار هستند. از این رو، تنها پارامترهای ورودی که بیشترین تاثیر را بر روی اهداف تحقیق (زبری سطح، زاویه انحنای خطوط (Striation) و شکل‌گیری پلیسه (Burr) دارند، مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش اخیر، ابتدا نمونه‌هایی از جنس آلیاژ

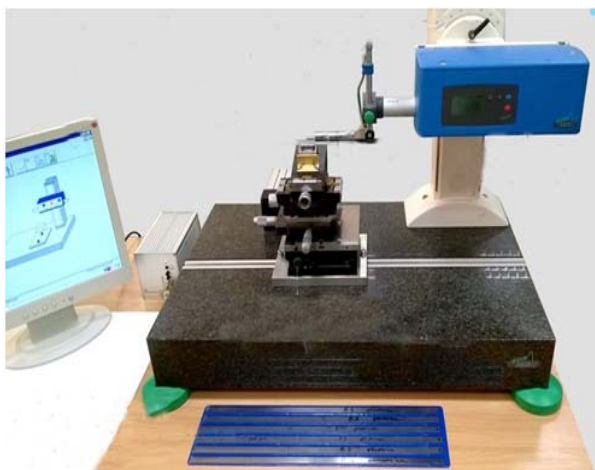
یکی از چالش‌های عمل‌های جراحی ارتوپدی، ازدیاد بیش از حد دمای استخوان و نکرور گرمایی حین سوراخ‌کاری یا برش استخوان است. نتایج حاصل از پژوهش انجام شده پیرامون تاثیر استفاده از ذرات زیست‌سازگار طی برش استخوان با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده نشان داد که استفاده از این ذرات، بهبود کیفیت برش و کاهش زبری سطح موضع برش را در پی داشته است [11]. نتایج حاصل از مطالعه انجام شده پیرامون تاثیر نوع ذرات ساینده بر میزان مخروطی شدن شکاف نشان داد که هر چه جنس ذرات ساینده سخت‌تر باشد، عمق و پهنای شکاف بیشتر و زاویه مخروطی شدن کمتری ایجاد می‌شود [12].

بررسی تاثیر پارامترهای نرخ جریان جرمی ذرات ساینده (گارنت) و سرعت گذار نازل، بر برش قطعات آلومینیومی با ضخامت‌های مختلف نشان داد که هر چه ضخامت قطعه کار بیشتر باشد، لازم است که نرخ ریزش ذرات ساینده بیشتر و سرعت گذار کمتر باشد [13]. طی پژوهشی به بررسی صافی سطح آلومینیوم ۷۰۷۵ طی ماشین‌کاری با جت آب همراه با ذرات ساینده، با استفاده از مدل رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی پرداخته شد. در این مدل پارامترهای سرعت گذار، فشار جت آب، فاصله نازل تا قطعه کار، سایز ذرات ساینده و نرخ ریزش آنها به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. همچنین از آنالیز واریانس و آزمون F جهت اعتبارسنجی مدل رگرسیون و تعیین پارامترهای تاثیرگذار استفاده شد. تحلیل‌های آماری نشان داد که پارامتر فشار، بیشترین تاثیر را بر صافی سطح نمونه‌ها داشته است [14]. بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند برش با جت آب و ذرات ساینده بر کامپوزیت‌های لایه‌ای، نتایج نشان داد که تاثیر فشار جت آب، فاصله نازل تا قطعه کار و سرعت گذار نازل بر میزان مخروطی شدن شکاف به مراتب بیشتر از نرخ ریزش ذرات ساینده است [15, 16].

مطالعه قابلیت نفوذ جت آب همراه با ذرات ساینده، طی برش کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم-سیلیکون/کارباید نشان داد که پارامترهای سرعت گذار و فشار جت آب بیشتر از نرخ ریزش ذرات ساینده بر توانایی نفوذ جت آب در کامپوزیت زمینه فلزی مؤثر بوده است [17]. نتایج حاصل از بررسی عمق برش در برشکاری آلومینیوم، با استفاده از جت آب همراه با ذرات ساینده نشان داد، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، افزایش فشار جت آب، افزایش عمق برش و افزایش سرعت گذار، کاهش عمق برش در نمونه‌ها را به همراه داشته است [18]. بررسی صافی سطح طی برش آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ توسط جت آب همراه با ذرات ساینده با استفاده از روش سطح پاسخ نشان داد که صافی سطح بهتر، به ازای حالت‌های تعاملی افزایش فشار جت آب و کاهش سرعت گذار، کاهش فشار جت آب و سرعت گذار بالا و یا کاهش فاصله نازل و کاهش فشار و سرعت گذار امکان پذیر است [19].

طی پژوهشی به بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری برای بهبود زبری سطح آلیاژ آلومینیوم/منیزیم طی ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده پرداخته شد. به این منظور تاثیر پارامترهای فاصله

عملیات برش روی نمونه‌ها، مطابق با جدول طراحی آزمایش جدول ۴ انجام گرفته است. طبق جدول طراحی آزمایش ارائه شده، پارامترهای فشار آب، سرعت گذار و نرخ جریان جرمی ذرات ساینده یا ضریب بارگذاری به عنوان پارامترهای ورودی متغیر در نظر گرفته شد و سایر پارامترها ثابت فرض شده است. بنابراین، پارامترهایی نظیر قطر لوله متمرکز کننده امیلی متر، قطر اریفیس ۳۵/۰ میلی متر، ذرات ساینده از جنس گارنت با اندازه ۸۰، فاصله نازل تا سطح قطعه کار ۳ میلی متر و زاویه برخورد جت آب با سطح قطعه ۹۰ درجه، ثابت در نظر گرفته شده است. سطوح پارامترهای ذکر شده نیز، با استفاده از آزمون‌های مقدماتی و پیشینه مقالات مطالعه شده در این زمینه تعیین شده است [24, 25]. آزمون‌های مقدماتی نشان داد که به ازای سرعت گذار بالاتر از ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه و فشار جت کمتر از ۲۰۰ مگاپاسکال، برش قطعه کار به طور کامل انجام نمی‌شود، از این رو حد بالایی سرعت گذار ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه و حد پایینی فشار جت آب، ۲۰۰ مگاپاسکال، انتخاب شد. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آنها، در مجموع ۲۷ آزمایش با روش فاکتوریل کامل انجام شده است. همچنین به منظور کسب اطمینان از به حداقل رسیدن خطا و افزایش دقت نتایج، هر یک از آزمایش‌ها با سه بار تکرار انجام شده است. در ادامه زبری سطح نمونه‌های برش خورده، با استفاده از دستگاه زبری سنج Hommel Werke TKL300، و با استاندارد ISO 4287 اندازه‌گیری شد. نمایی از دستگاه زبری سنج در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) دستگاه زبری سنج Hommel Werke TKL300

به منظور مطالعه دقیق کیفیت سطح در ناحیه برش و به دلیل ایجاد ناحیه صاف و ناحیه زیر به ترتیب در نواحی فوقانی و تحتانی سطح مقطع برش، لازم است مطابق شکل ۳ مقدار ارتفاع زبری سطح در هر دو منطقه اندازه‌گیری و گزارش شود. اندازه‌گیری میانگین زبری سطح نمونه‌ها، طی حرکت رفت و برگشتی نوک سوزنی شکل دستگاه در راستای حرکت نازل (عمود بر خطوط ایجاد شده) در مسیری به طول ۴ میلی متر در قسمت میانه برش و در هر دو ناحیه صاف و

آلومینیوم ۵۷۵۴-H۱۱۱، از سری آلیاژهای ۵xxx، در ابعاد ۱۵۲×۴۵ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر تهیه و آماده سازی شد. خواص فیزیکی و مکانیکی منتخب این آلیاژ در جدول ۱ و ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است. سپس جهت انجام عملیات برش روی نمونه‌ها، از ماشین جت آب سی‌ان‌سی Radox استفاده شده است که در شکل ۱ نمایی از دستگاه جت آب و در جدول ۳ مشخصات فنی ماشین ارائه شده است.

جدول ۱) مشخصات فیزیکی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴-H۱۱۱ [23]

| مشخصات فیزیکی      | مشخصات مکانیکی             |
|--------------------|----------------------------|
| سختی برینل         | ۴۴HB                       |
| چگالی              | $2.76 \text{ g.cm}^{-3}$   |
| ماکزیموم کشش نهایی | ۸۰ MPa                     |
| مدول الاستیسیته    | ۶۸ MPa                     |
| رسانش حرارتی       | $147 \text{ W.(m.K)}^{-1}$ |
| نقطه ذوب           | $600^\circ\text{C}$        |

جدول ۲) ترکیب شیمیایی و درصد وزنی عناصر در آلیاژ آلومینیوم ۵۷۵۴-H۱۱۱ [23]

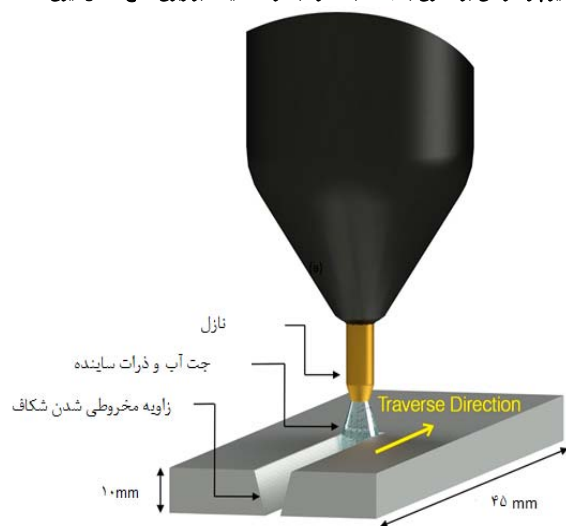
| نماد شیمیایی | مقادیر (%) |
|--------------|------------|
| Al           | ۹۵/۸۴      |
| Mg           | ۳/۰۷       |
| Si           | ۰/۳۲       |
| Fe           | ۰/۲۸       |
| Mn           | ۰/۲۴       |
| Cu           | ۰/۰۸       |
| Cr           | ۰/۰۷       |
| Zn           | ۰/۰۴       |



شکل ۱) دستگاه جت آب Radox

جدول ۳) مشخصات فنی دستگاه جت آب

| مشخصات                   | توضیح                      |
|--------------------------|----------------------------|
| بیشترین مقدار فشار پمپ   | ۴۰۰۰ بار                   |
| ابعاد میز دستگاه         | ۳۰۰×۳۲۰ میلی متر           |
| بیشترین سرعت جابجایی     | ۱۵۰۰ میلی متر بر دقیقه     |
| بیشترین سرعت در راستای Z | ۳۰۰۰ میلی متر بر دقیقه     |
| نوع سیستم اختلاط         | جت آب و ذرات ساینده تزریقی |
| جنس لوله متمرکزکننده     | تنگستن کارباید             |
| صحت در موقعیت            | ۱۵/۰ میلی متر در متر       |



شکل ۵) شماتیک فرآیند و مشخصات هندسی شکاف طی برش نمونه با جت آب و ذرات ساینده



شکل ۶) نحوه برش نمونه ها توسط جت آب و ذرات ساینده

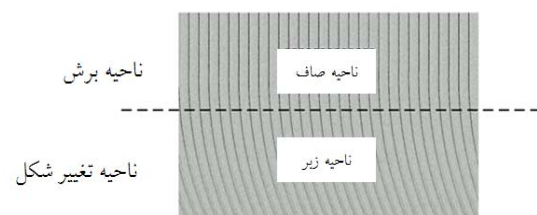
### نتایج و بحث

در این قسمت نتایج حاصل از تاثیر پارامترهای ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده، بر کیفیت سطح نمونه های آلومینیومی ۱۱۱H-۵۷۵۴، مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل تجربی و همچنین بررسی میزان تاثیر هر پارامتر روی فرآیند، بهترین مقادیر برای پارامترهای فرآیند برش روی نمونه های آلومینیومی با استفاده از جت آب به همراه ذرات ساینده تعیین شده است.

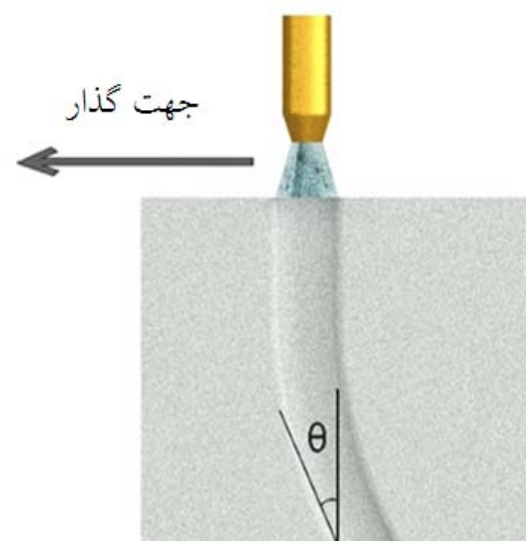
### بررسی تاثیر پارامترهای برش با جت آب به همراه ذرات ساینده بر کیفیت سطح ناحیه برش

به منظور بررسی کیفیت سطح در ناحیه برش، مقدار زبری سطح در نواحی صاف و زیر در هر آزمایش، مطابق با جدول طراحی آزمایش اندازه گیری شد. همچنین جهت افزایش دقت نتایج، هر آزمایش با سه بار تکرار انجام شد و برای مقایسه ساده تر و بحث پیرامون آنها، نتایج به صورت نمودار ارایه شده است. تغییرات زبری سطح (ناحیه صاف) برحسب سرعت گذار، به ازای ضریب بارگذاری ۳۵٪ در نمودار ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود،

زیر انجام شد. به این ترتیب، پس از انجام و تکرار آزمایش ها برای هر حالت فرآیندی، مقدار زبری سطح در هر دو ناحیه و با دقت ۲ رقم اعشار اندازه گیری و گزارش شده است. از سوی دیگر، افت توان جت آب در بخش های انتهایی ناحیه زیر (سطح تحتانی نمونه)، منجر به عقب ماندگی جت از محور اصلی برش و ایجاد خطوط در ناحیه برش می شود که این معیاری برای تنزل کیفیت برش محسوب می شود. با توجه به اینکه بیشترین میزان انحراف در قسمت انتهایی ناحیه زیر ایجاد می شود، به منظور اندازه گیری میزان انحراف خطوط در شرایط فرآیندی مختلف، زاویه بین راستای وارد شدن جت آب به همراه ذرات ساینده و خط مماس بر انحنای ایجاد شده در انتهایی ترین قسمت ناحیه برش، توسط دستگاه Stereo Microscope ST1740 اندازه گیری شده است. لذا مطابق شکل ۴ با اندازه گیری زاویه انحنای خطوط در هر حالت فرآیندی، دیگر مشخصه کیفی سطح نیز بررسی شده است. در نهایت نیز، به منظور تصویربرداری از سطح مقطع برش، زوایای انحنای خطوط و میزان شکل گیری پلیسه (در ناحیه خروجی جت آب از نمونه) در هر حالت فرآیندی، از دستگاه Stereo Microscope ST1740 با بزرگنمایی ۴۰ برابر، بهره گرفته شده است. شماتیک فرآیند و هندسه شکاف طی برش نمونه با جت آب به همراه ذرات ساینده در شکل ۵ ارایه شده و در شکل ۶ نیز نمایی از نحوه برش انجام شده روی نمونه ها نشان داده شده است.

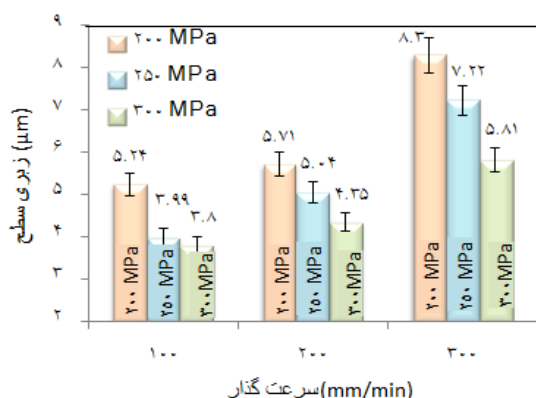


شکل ۳) شماتیک نواحی صاف و زیر در ناحیه برش



شکل ۴) شماتیک زاویه انحنای خطوط ایجاد شده

و با ادامه روند افزایش سرعت گذار از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، زبری سطح در حدود ۳۴٪ افزایش یافت. همچنین، همان طور که در نمودار ۲ مشاهده می‌شود مقدار زبری سطح به‌ازای فشار ۳۰۰ مگاپاسکال ۳/۸ میکرومتر گزارش شده است. با کاهش فشار جت آب به ۲۵۰ مگاپاسکال، زبری سطح در حدود ۵٪ افزایش یافته و با ادامه روند کاهش فشار جت آب از ۲۵۰ به ۱۰۰ مگاپاسکال، مقدار زبری سطح در حدود ۳۱٪ افزایش یافته است.

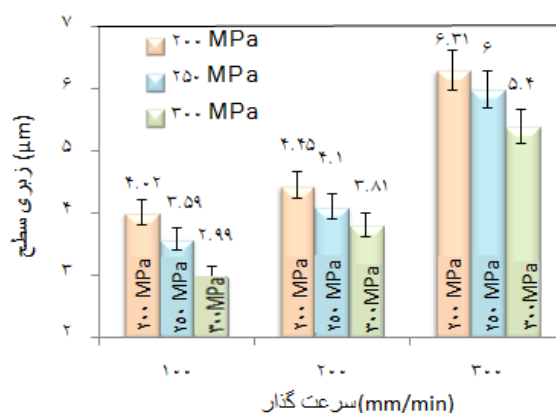


نمودار ۲) تغییرات زبری سطح برحسب سرعت گذار به‌ازای فشار جت آب مختلف (ناحیه زیر- ضریب بارگذاری: ۳۵٪)

مقایسه نتایج حاصل از نمودارهای ۱ و ۲ نشان داد که در حالت برش با فشار جت ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، کمترین مقدار زبری سطح در هر دو ناحیه، حاصل شده است و با عبور از ناحیه صاف به ناحیه زیر، مقدار زبری سطح در حدود ۲۷٪ افزایش یافته است. نکته حایز اهمیت آن است که سازوکارهای مختلف براده‌برداری، زبری سطح‌های متفاوتی را ایجاد می‌نمایند، در ناحیه صاف، به دلیل غالب بودن سازوکار برش، کیفیت سطح بهتری حاصل می‌شود. اما با عبور از منطقه فوقانی و ورود به منطقه تحتانی (ناحیه زیر)، به دلیل غلبه نمودن سازوکار تغییر شکل، کیفیت سطح تنزل می‌یابد. تغییر نوع سازوکار براده‌برداری با افزایش عمق برش، ناشی از اُفت انرژی جت است. با اُفت انرژی، جت آب از محور اصلی برش عقب مانده و زاویه‌ای که تحت آن با ماده برخورد می‌نماید، افزایش می‌یابد. بنابراین هرچه عمق برش بیشتر باشد، تاثیرگذاری سازوکار تغییر شکل، بیشتر شده و ارتفاع زبری سطح افزایش بیشتری می‌یابد [28].

تغییرات زبری سطح نواحی صاف و زیر، برحسب سرعت گذار، به‌ازای ضریب بارگذاری ۴۵٪ در نمودارهای ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، کمترین مقدار زبری سطح در ناحیه صاف و به‌ازای فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، به مقدار ۲/۸۳ میکرومتر گزارش شده و به‌طور مشابه با نمودارهای ۱ و ۲، افزایش سرعت گذار و کاهش فشار جت آب و ذرات ساینده، افزایش زبری سطح در ناحیه برش را به همراه داشته است.

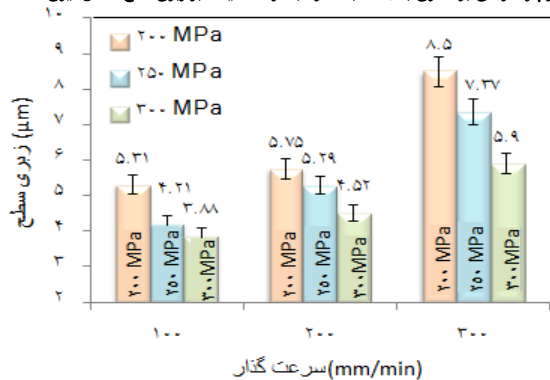
کمترین مقدار برای زبری سطح به‌ازای فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، به مقدار ۲/۹۹ میکرومتر به‌دست آمده است. با افزایش سرعت گذار به ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، زبری سطح در حدود ۲۷٪ افزایش نشان داد و با ادامه روند افزایش سرعت گذار از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، زبری سطح در حدود ۴۲٪ افزایش یافت. دلیل افزایش زبری سطح با افزایش سرعت گذار را می‌توان به کاهش توان برشی به دنبال کاهش تعداد برخوردها نسبت داد، زیرا با ازدیاد سرعت گذار و در پی آن افزایش سرعت عبور جت آب و ذرات ساینده از مقابل قطعه‌کار، تعداد ذرات ساینده عبورکننده از واحد سطح قطعه در واحد زمان، تقلیل یافته و در نتیجه تعداد برخوردها و لبه‌های برشی موجود در واحد سطح، کاهش می‌یابد و به این ترتیب سطح زبرتری حاصل می‌شود [26].



نمودار ۱) تغییرات زبری سطح برحسب سرعت گذار به‌ازای فشار جت آب مختلف (ناحیه صاف- ضریب بارگذاری: ۳۵٪)

همچنین، کمترین مقدار زبری سطح به‌ازای فشار ۳۰۰ مگاپاسکال ۲/۹۹ میکرومتر گزارش شده است. با کاهش فشار جت آب به ۲۵۰ مگاپاسکال، زبری سطح در حدود ۲۰٪ افزایش یافته و با ادامه روند کاهش فشار جت آب از ۲۵۰ به ۱۰۰ مگاپاسکال، مقدار زبری سطح در حدود ۱۲٪ افزایش یافته است. همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، این روند به‌ازای سرعت‌های گذار بالاتر نیز ادامه دارد. زیرا، با افزایش فشار جت آب، انرژی جنبشی ذرات ساینده و توان برشی جت افزایش می‌یابد که این موجب غلبه سازوکار برش (Cutting-Wear) بر تغییر شکل شده و کاهش انحراف جت و زبری سطح را به دنبال دارد [27]. به این ترتیب، با افزایش فشار جت آب، از ارتفاع زبری سطح کاسته شده و سطح صاف‌تری حاصل شده است.

تغییرات زبری سطح (ناحیه زیر) برحسب سرعت گذار، به‌ازای ضریب بارگذاری ۳۵٪ در نمودار ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، کمترین مقدار زبری سطح به‌ازای فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، به مقدار ۳/۸ میکرومتر گزارش شد. با افزایش سرعت گذار به ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، زبری سطح در حدود ۱۴٪ افزایش نشان داد



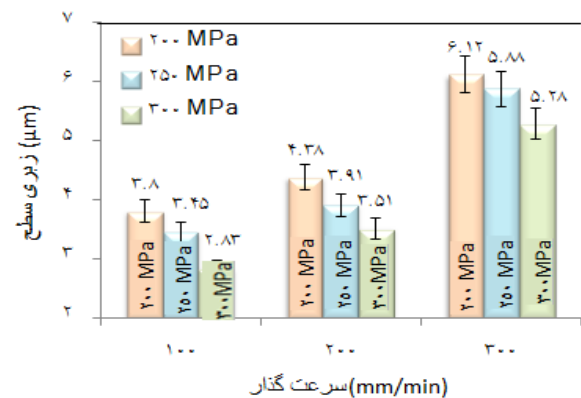
**نمودار ۶** تغییرات زبری سطح برحسب سرعت گذار به ازای فشار جت آب مختلف (ناحیه زیر- ضریب بارگذاری: ۵۵٪)

از آنجایی که دستیابی به کمترین زبری سطح از حالت های مطلوب برشمرده می شود و طی نمودارهای ارائه شده کمترین زبری سطح به ازای فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه حاصل شده، با ثابت نگه داشتن این پارامترها به بررسی تاثیر ضریب بارگذاری بر زبری سطح پرداخته شده است. همان طور که در نمودار ۷ مشاهده می شود، کمترین مقدار زبری سطح در ناحیه صاف و به ازای ضریب بارگذاری ۳۵٪، در حدود ۲/۹۹ میکرومتر گزارش شده است. افزایش ضریب بارگذاری به ۴۵٪، سبب کاهش جزئی زبری سطح شد، به طوری که زبری سطح در این حالت با ۵٪ کاهش به مقدار ۲/۸۳ میکرومتر ثبت شده است. این در حالی است که، ادامه روند افزایش ضریب بارگذاری از ۴۵ به ۵۵٪، سبب افزایش زبری سطح در حدود ۶٪ شد. این روند برای ناحیه زیر نیز بر همین منوال بوده که نشان دهنده تاثیر جزئی این پارامتر بر زبری سطح نمونه ها است.

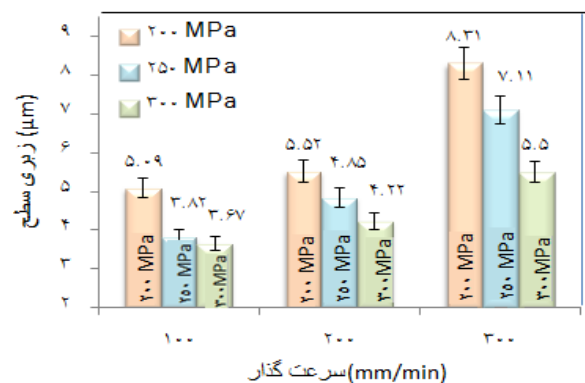


**نمودار ۷** تغییرات زبری سطح برحسب ضریب بارگذاری (فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال- سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه)

نحوه تاثیر نرخ جریان جرمی ذرات ساینده بر روی تعداد برخوردها و همچنین انرژی جنبشی ذرات این گونه تحلیل می شود که با افزایش نرخ جریان جرمی ذرات ساینده (یا ضریب بارگذاری) از ۳۵ تا ۴۵٪، تعداد برخوردها و لبه های برشی موجود بر واحد سطح افزایش می یابد. در نتیجه، ارتفاع زبری سطح کاهش یافته و کیفیت سطح برش بهبود می یابد. اما با عبور مقدار ضریب

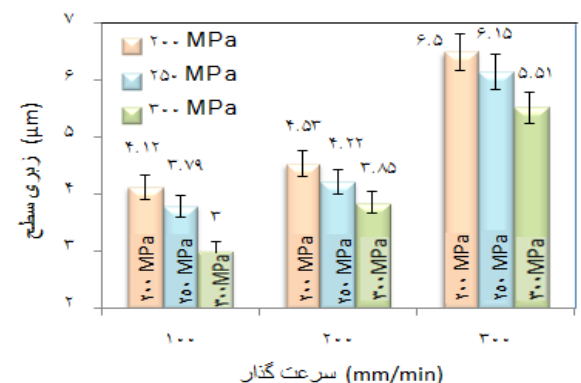


**نمودار ۳** تغییرات زبری سطح برحسب سرعت گذار به ازای فشار جت آب مختلف (ناحیه صاف- ضریب بارگذاری: ۴۵٪)



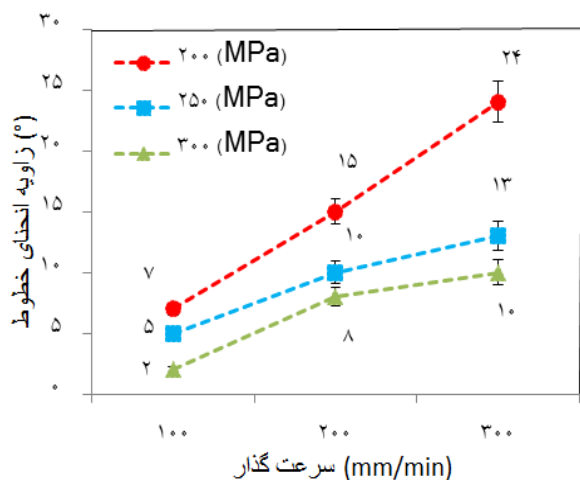
**نمودار ۴** تغییرات زبری سطح برحسب سرعت گذار به ازای فشار جت آب مختلف (ناحیه زیر- ضریب بارگذاری: ۴۵٪)

همچنین، در نمودارهای ۵ و ۶ نیز تغییرات زبری سطح نواحی صاف و زیر، برحسب سرعت گذار، به ازای ضریب بارگذاری ۵۵٪ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در این حالت نیز، کمترین مقدار برای زبری سطح در ناحیه صاف و به ازای فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه، حاصل شده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تغییرات زبری سطح با سرعت گذار رابطه مستقیم و با فشار جت آب رابطه معکوس داشته است.

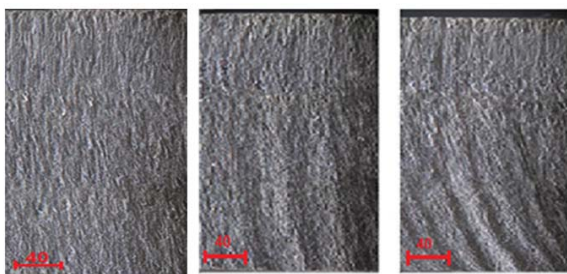


**نمودار ۵** تغییرات زبری سطح برحسب سرعت گذار به ازای فشار جت آب مختلف (ناحیه صاف- ضریب بارگذاری: ۵۵٪)

به ترتیب در قسمت های ب و ج، زاویه انحنای خطوط افزایش یافته است.



نمودار ۸) تغییرات زاویه انحنای خطوط برحسب سرعت گذار (ضریب بارگذاری: ۴۵٪)



شکل ۷) تاثیر تغییرات سرعت گذار بر زاویه انحنای خطوط به ازای فشار ثابت ۳۰۰ مگاپاسکال و ضریب بارگذاری ۴۵٪  
ج: سرعت گذار ۳۰۰ mm/min ب: سرعت گذار ۲۰۰ mm/min الف: سرعت گذار ۱۰۰ mm/min

همان طور که در نمودار ۸ مشاهده شد، کمترین زاویه انحنای خطوط به مقدار ۲ درجه و به ازای فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه ثبت شده است. کاهش فشار جت آب به ۲۵۰ مگاپاسکال، افزایش زاویه انحنای خطوط در حدود ۲/۵ برابر را به دنبال داشته و ادامه روند کاهش فشار جت آب از ۲۵۰ به ۲۰۰ مگاپاسکال، سبب افزایش زاویه انحنای خطوط در حدود ۴۰٪ شد. همچنین به طور مشابه، مقایسه روند تغییرات در نمودارهای ۸، ۹ و ۱۰ نشان داد که افزایش فشار آب به طور قابل توجهی از میزان زاویه انحنای خطوط کاسته و افزایش سرعت گذار، افزایش زاویه انحنای خطوط را در بر داشته است. نمایی از تاثیر تغییرات فشار جت آب بر زاویه انحنای خطوط به ازای سرعت گذار ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه و ضریب بارگذاری ۳۵٪، در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود کمترین زاویه انحنای خطوط مربوط به قسمت ج است که در آن فشار جت آب بیشترین مقدار را دارد، با کاهش فشار جت آب در قسمت های الف و ب، زاویه انحنای خطوط افزایش یافته است.

بارگذاری از ۴۵٪ و افزایش آن به ۵۵٪، به دلیل ازدیاد برخوردهای میان ذرات، افت انرژی جنبشی در آنها روی داده و زبری سطح افزایش یافته است [24]. به این ترتیب، کمترین مقدار برای زبری سطح در ناحیه صاف و زیر، به ازای فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال، سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه و ضریب بارگذاری ۴۵٪ حاصل شده است.

نکته حایز اهمیت آن است که سازوکارهای مختلف براده برداری، زبری سطح های متفاوتی را ایجاد می نمایند، در منطقه فوقانی (ناحیه صاف) به دلیل غالب بودن سازوکار برش، کیفیت سطح بهتری حاصل می شود. اما با عبور از منطقه فوق و ورود به منطقه تحتانی (ناحیه زیر)، به دلیل غلبه نمودن سازوکار تغییر شکل، کیفیت سطح تنزل می یابد که این پدیده، ناشی از افت انرژی جت آب است. طی عقب افتادگی و انحراف جت آب از محور اصلی برش و افزایش زاویه برخورد آن با قطعه کار، ارتفاع زبری در دیواره برش افزایش می یابد و هر چه عمق برش بیشتر باشد، تاثیرگذاری سازوکار تغییر شکل بیشتر بوده و ارتفاع زبری افزایش می یابد [29].

### بررسی تاثیر پارامترهای برش با جت آب به همراه ذرات ساینده بر زاویه انحنای خطوط در ناحیه برش

جهت بررسی تاثیر پارامترهای ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده بر زاویه انحنای خطوط، میزان انحراف خطوط ایجاد شده از محور اصلی برش، در قسمت انتهایی ناحیه زیر سطح برش خورده برای هر حالت فرآیندی، مورد اندازه گیری قرار گرفت و به منظور بررسی آسان تر، نتایج در قالب نمودار ارائه شده است. از آنجایی که دستیابی به کمترین مقدار برای زاویه انحنای خطوط از حالت های مطلوب برش مرده می شود، ابتدا به بررسی روند تغییرات در نمودار ۸ پرداخته شده است. همان طور که در این نمودار مشاهده می شود، کمترین زاویه انحنای خطوط، به ازای فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه، به مقدار ۲ درجه گزارش شده است. با افزایش سرعت گذار به ۲۰۰ میلی متر بر دقیقه، زاویه انحنای خطوط در حدود ۴ برابر افزایش یافت و ادامه روند افزایش سرعت گذار از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه نیز، افزایش زاویه انحنای خطوط در حدود ۲۵٪ را به دنبال داشته است. با افزایش سرعت گذار، تعداد ذرات ساینده عبورکننده از مقابل واحد سطح قطعه کار، تقلیل یافته و به این ترتیب، زاویه انحنای خطوط افزایش می یابد. همچنین، کاهش زمان تماس ذرات ساینده با نمونه و به این ترتیب، تنزل توان برشی جت آب، منجر به غلبه سریع سازوکار تغییر شکل بر سازوکار برش شده و افزایش شکل گیری خطوط و زاویه آنها را سبب می شود [26, 28].

نمایی از تاثیر تغییرات سرعت گذار بر زاویه انحنای خطوط به ازای فشار ثابت ۳۰۰ مگاپاسکال و ضریب بارگذاری ۴۵٪، در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود کمترین زاویه انحنای خطوط مربوط به قسمت الف این شکل است که در آن سرعت گذار کمترین مقدار را دارد، با افزایش سرعت گذار

۴۵٪ حاصل شده است و تغییرات ضریب بارگذاری تاثیر ناچیزی بر تغییرات زاویه انحنای خطوط داشته است.

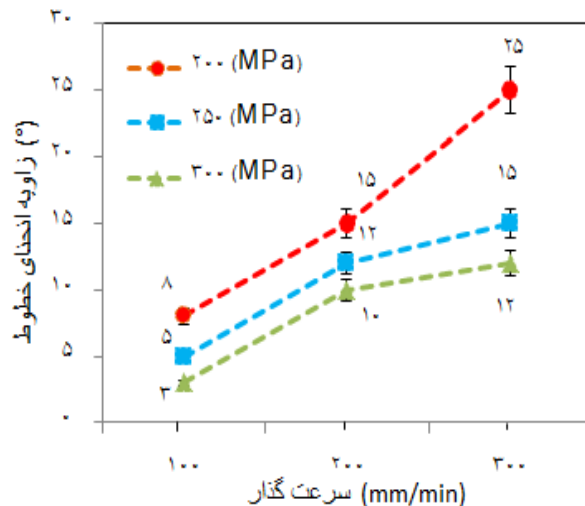


ج: ضریب بارگذاری ۵۵٪ ب: ضریب بارگذاری ۴۵٪ الف: ضریب بارگذاری ۳۵٪  
 شکل ۹) تاثیر تغییرات ضریب بارگذاری بر زاویه انحنای خطوط به ازای فشار جت آب ۲۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

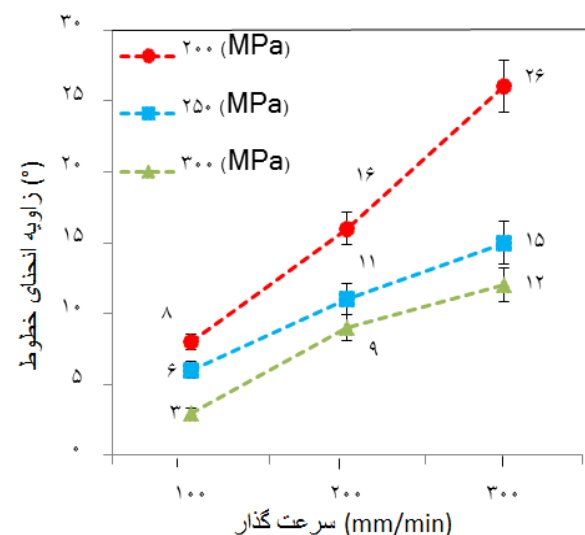
دلیل قابل ذکر برای نتایج فوق، این است که با افزایش فشار آب، انرژی جنبشی ذرات ساینده و توان برشی جت آب افزایش می‌یابد که این افزایش موجب غلبه سازوکار برش (برخورد ذرات ساینده تحت زوایای کوچک) بر سازوکار تغییر شکل شده و کاهش انحراف جت آب و در پی آن، کاهش زاویه انحنای خطوط را به دنبال داشته است. اُفت توان جت آب در قسمت انتهایی ناحیه زیر، منجر به عقب‌ماندگی جت آب از محور اصلی برش و ایجاد خطوط می‌شود. همچنین با افزایش فشار جت 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 براده‌برداری کمتر، عمل نموده و به این ترتیب با انجام براده‌برداری یکنواخت‌تر از سطح قطعه‌کار سطح صاف‌تری را ایجاد می‌نماید [26, 29].

#### بررسی تاثیر پارامترهای برش با جت آب به همراه ذرات ساینده بر شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش

جهت بررسی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری با جت آب و ذرات ساینده بر شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش، از قسمت انتهایی ناحیه زیر و یا محل خروج جت آب از نمونه تحت برش تصویر برداری شد. نمایی از شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به ازای سرعت گذار ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب بارگذاری ۴۵٪، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای ذکرشده، مقدار پلیسه ایجادشده در نمونه برش‌کاری‌شده با فشار ۳۰۰ مگاپاسکال (قسمت ب)، نسبت به نمونه برش‌کاری‌شده با فشار ۲۰۰ مگاپاسکال (قسمت الف)، کمتر است. براده‌برداری یکنواخت‌تر توأم با برخورداری جت از توان برشی بالاتر، کاهش میزان شکل‌گیری پلیسه را در پی دارد. علاوه بر موارد ذکرشده، طی افزایش فشار جت و به دنبال آن افزایش انرژی جنبشی آب و ذرات ساینده، برخورد ذرات با سطح نمونه تحت زوایای کوچک‌تری انجام می‌شود که کاهش میزان شکل‌گیری پلیسه در مقطع برش را در پی دارد. همچنین، افزایش فشار جت آب سبب می‌شود که ذرات ساینده ترد به ابعاد کوچک‌تری شکسته شوند که نتیجه آن براده‌برداری با عمق برش کمتر و ایجاد سطحی یکنواخت‌تر توأم با پلیسه کمتر است [31].



نمودار ۹) تغییرات زاویه انحنای خطوط برحسب سرعت گذار (ضریب بارگذاری: ۳۵٪)

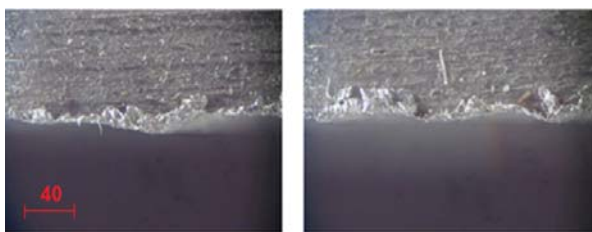


نمودار ۱۰) تغییرات زاویه انحنای خطوط برحسب سرعت گذار (ضریب بارگذاری: ۵۵٪)

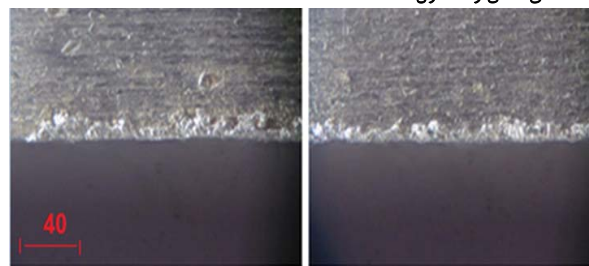


ج: فشار جت آب ۳۰۰ Mpa ب: فشار جت آب ۲۵۰ Mpa الف: فشار جت آب ۲۰۰ Mpa  
 شکل ۱۰) تاثیر تغییرات فشار جت آب بر زاویه انحنای خطوط به ازای سرعت گذار ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب بارگذاری ۳۵٪

جهت مشاهده بهتر انحنای ایجادشده در دیواره شکاف، در شکل ۹ نمایی از تاثیر تغییرات ضریب بارگذاری بر زاویه انحنای خطوط به ازای فشار جت آب ۲۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین زاویه انحنای خطوط، به ازای ضریب بارگذاری ۴۵٪ به دست آمده است. مقایسه روند تغییرات در نمودارهای ۸، ۹ و ۱۰ نشان داد که کمترین زاویه انحنای خطوط به ازای ضریب بارگذاری



شکل ۱۲) تاثیر ضریب بارگذاری بر شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به‌ازای فشار جت آب ۲۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۰) تاثیر فشار جت آب بر شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به‌ازای سرعت گذار ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب بارگذاری ۴۵٪

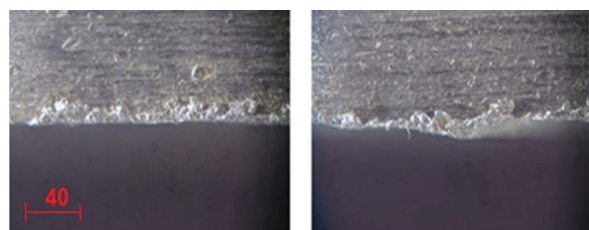
### تحلیل آماری تاثیر پارامترهای برش با جت آب به همراه ذرات ساینده بر زبری سطح و زاویه انحنای خطوط در ناحیه برش

به‌منظور تحلیل آماری نتایج، پس از واردنمودن مقادیر مربوط به زبری و زاویه انحنای خطوط در نرم‌افزار مینی‌تب، به انطباق یک مدل ریاضی بر طرح فاکتوریل پرداخته شد و سپس با استفاده از نمودارهای ترسیم‌شده، میزان تاثیر هر پارامتر بر متغیرهای خروجی، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه بیشترین زبری سطح و انحنای ایجادشده در خطوط برش، در ناحیه زیر ثبت شده، به تحلیل آماری نتایج در این ناحیه پرداخته شده است. به این ترتیب که، پس از بررسی کفایت مدل، با استفاده از جدول آنالیز واریانس، به بررسی اهمیت نسبی پارامترها و میزان تاثیر آنها روی خروجی‌ها پرداخته شد.

در این آنالیز، مقایسه انحراف کل نمونه‌ها با استفاده از آزمون F و تعیین سطوح معنادار نیز با استفاده از مقدار p انجام شده است. از آنجایی که پارامترها با سطح اطمینان ۹۵٪ مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از ۰/۰۵٪ برای p، به‌عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است. در جدول ۵، آنالیز واریانس برای زبری سطح نمونه‌ها ارائه شده است. همان طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقدار p برای جملات خطی و برخی از جملات تعاملی کوچک‌تر از سطح معنادار ۰/۰۵٪ است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی‌کننده‌ها، تاثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل  $R^2$  منطبق‌شده نیز، ۹۷/۸٪ به‌دست آمد که به این معنا است که در حدود ۹۸٪ از داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است.

در ادامه، جهت تعیین میزان تاثیرگذاری پارامترها بر زبری سطوح برش، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده برحسب زبری سطح نمونه‌ها نیز ترسیم شد. این نمودار تفاوت مقدار میانگین پاسخ را از سطوح بالایی و پایینی هر پارامتر نشان می‌دهد. همان طور که در نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود، بعد از سرعت گذار، فشار جت آب بیشترین تاثیر را بر کنترل زبری سطح نمونه‌ها داشته است. همچنین طی جدول ۶ و نمودار ۱۲، آنالیز واریانس و میزان تاثیرگذاری هر پارامتر بر زاویه انحنای خطوط ایجادشده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، مقدار p برای مدل و جملات خطی کوچک‌تر از سطح

نمایی از شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به‌ازای فشار جت آب ۲۰۰ مگاپاسکال و ضریب بارگذاری ۴۵٪، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای ذکرشده، مقدار پلیسه ایجادشده در نمونه برش‌کاری‌شده با سرعت گذار ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه (قسمت الف)، نسبت به نمونه برش‌کاری‌شده با سرعت ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه (قسمت ب)، کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سرعت گذار به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر میزان تشکیل پلیسه در مقطع خروجی شکاف اثرگذار بوده و کیفیت مقطع خروجی را تنزل داده است. این پدیده می‌تواند به کاهش تعداد ذرات ساینده عبوری از مقابل سطح برش، کاهش تعداد برخوردها و لبه‌های برشی در واحد سطح و تنزل توان برشی جت نسبت داد [24].



شکل ۱۱) تاثیر سرعت گذار بر شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به‌ازای فشار جت آب ۲۰۰ مگاپاسکال و ضریب بارگذاری ۴۵٪

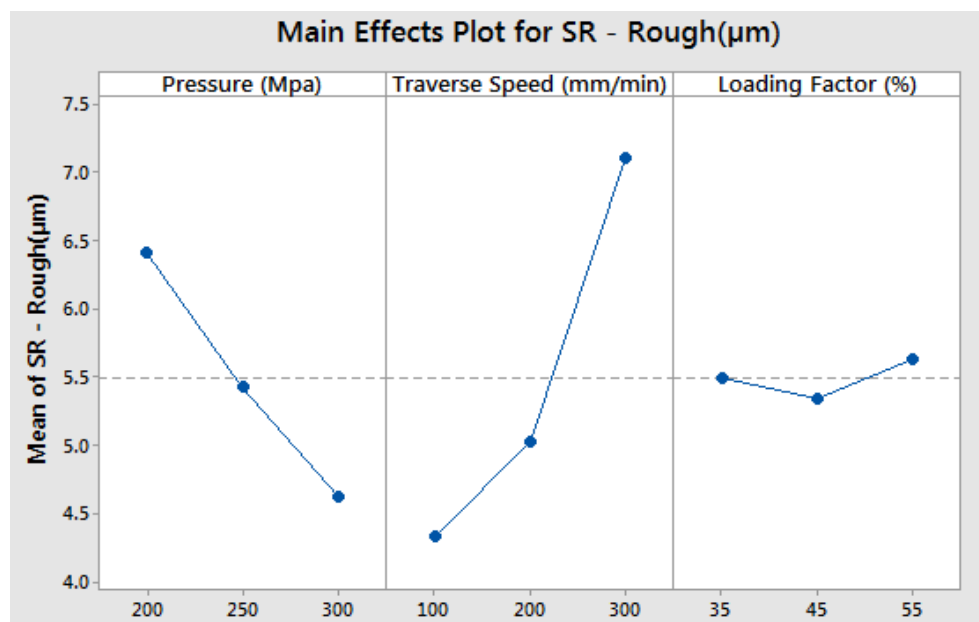
نمایی از شکل‌گیری پلیسه در ناحیه برش به‌ازای فشار جت آب ۲۰۰ مگاپاسکال و سرعت گذار ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای ذکرشده، مقدار پلیسه ایجادشده در نمونه برش‌کاری‌شده با ضریب بارگذاری ۴۵٪ (قسمت الف)، نسبت به نمونه برش‌کاری‌شده با ضریب بارگذاری ۵۵٪ (قسمت ب)، کمتر است. این پدیده با افزایش تعداد برخوردها و لبه‌های برشی ذرات ساینده در بازه ۳۵ تا ۴۵٪، و همچنین ازدیاد برخوردهای میان ذرات و اُفت انرژی جنبشی در بازه ۴۵ تا ۵۵٪ و تاثیرگذاری مجموعه آنها بر تغییر نوع سازوکار براده‌برداری قابل توجه است [27].

انحنای خطوط، مطابق نمودار ۱۲، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده برحسب زاویه انحنای خطوط نیز ترسیم شد. همان طور که در نمودار ۱۲ نیز مشاهده می شود، بعد از سرعت گذار، فشار جت بیشترین تاثیر را بر زاویه انحنای خطوط در ناحیه زیر داشته است.

معنادار ۵٪ است که نشان می دهد که این پیش بینی کننده ها، تاثیر قابل توجهی بر جواب داشته اند. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل  $R^2$  منطبق شده نیز، ۹۱/۱۶٪ به دست آمد که به این معنا است که در حدود ۹۱٪ از داده ها توسط مدل، پوشش داده شده است. جهت تعیین میزان تاثیرگذاری پارامترها بر زاویه

جدول ۵) آنالیز واریانس مربوط به زبری سطح نمونه ها در ناحیه زیر با سطح اطمینان: ۹۵٪ و  $R-sq(adj)$ : ۹۸٪

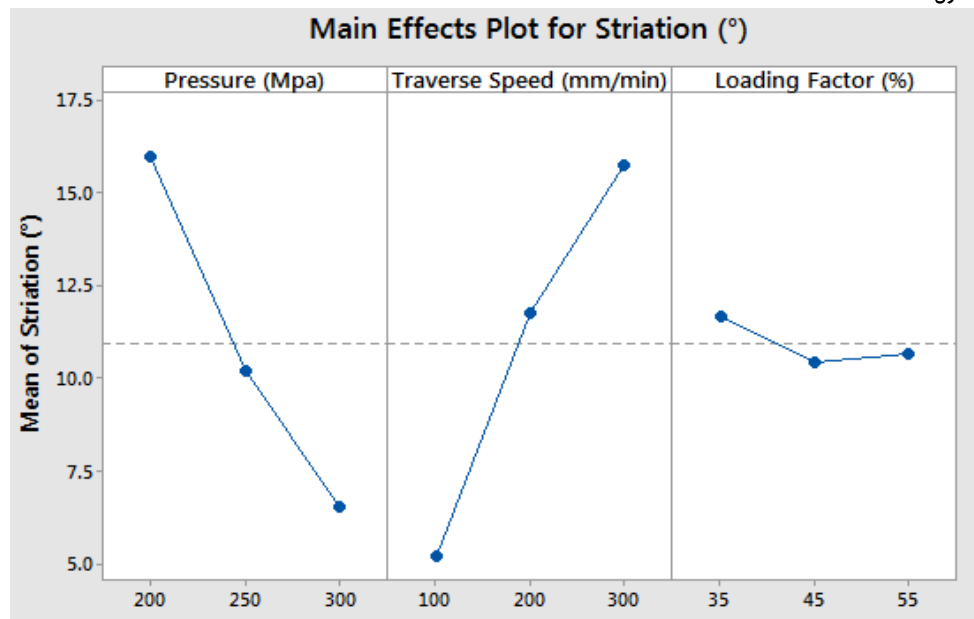
| منبع                      | درجه آزادی | جمع مربعات | جمع میانگین | F-Value | p-Value |
|---------------------------|------------|------------|-------------|---------|---------|
| مدل                       | ۱۸         | ۵۴/۶۱۲     | ۰/۰۳۴       | ۷۲۱/۷۵  | ۰/۰۰۰   |
| خطی                       | ۶          | ۵۲/۴۵۵     | ۸/۷۴۲       | ۲۰۷۹/۷۵ | ۰/۰۰۰   |
| فشار (Mpa)                | ۲          | ۱۴/۴۱۱     | ۷/۲۰۵       | ۱۷۱۴/۰۹ | ۰/۰۰۰   |
| سرعت گذار (mm/min)        | ۲          | ۳۷/۶۵۷     | ۱۸/۸۲۸      | ۴۴۷۹/۰۸ | ۰/۰۰۰   |
| ضریب بارگذاری (%)         | ۲          | ۰/۳۸۷      | ۰/۱۹۳       | ۴۶/۰۸   | ۰/۰۰۰   |
| اثر تقابل                 | ۱۲         | ۲/۱۵۶      | ۰/۱۷۹       | ۴۲/۷۵   | ۰/۰۰۰   |
| فشار × سرعت گذار          | ۴          | ۲/۱۳۲      | ۰/۵۳۳       | ۱۲۶/۸۵  | ۰/۰۰۰   |
| فشار × ضریب بارگذاری      | ۴          | ۰/۰۲۱      | ۰/۰۰۵       | ۱/۲۶    | ۰/۳۶۲   |
| سرعت گذار × ضریب بارگذاری | ۴          | ۰/۰۰۲      | ۰/۰۰۰۶      | ۰/۱۵    | ۰/۹۶۰   |



نمودار ۱۱) مقایسه میزان تاثیر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح نمونه ها در ناحیه زیر

جدول ۶) آنالیز واریانس مربوط به زاویه انحنای خطوط برش در ناحیه زیر با سطح اطمینان: ۹۵٪ و  $R-sq(adj)$ : ۹۸٪

| منبع                      | درجه آزادی | جمع مربعات | جمع میانگین | F-value | p-value |
|---------------------------|------------|------------|-------------|---------|---------|
| مدل                       | ۱۸         | ۱۰۹۱/۳۳    | ۶۰/۶۳۰      | ۱۵/۸۹   | ۰/۰۰۰   |
| خطی                       | ۶          | ۹۲۶/۸۹     | ۱۵۴/۴۸۱     | ۴۰/۵۰   | ۰/۰۰۰   |
| فشار (Mpa)                | ۲          | ۴۰۸/۰۷     | ۲۰۴/۰۳      | ۵۳/۴۹   | ۰/۰۰۰   |
| سرعت گذار (mm/min)        | ۲          | ۵۱۱/۱۹     | ۲۵۵/۵۹۳     | ۶۷/۰۰   | ۰/۰۰۰   |
| ضریب بارگذاری (%)         | ۲          | ۷/۶۳       | ۳/۸۱۵       | ۱/۰۰    | ۰/۴۱۰   |
| اثر تقابل                 | ۱۲         | ۱۶۴/۴۴     | ۱۳/۷۰       | ۳/۵۹    | ۰/۰۳۹   |
| فشار × سرعت گذار          | ۴          | ۱۲۵/۲۶     | ۳۳/۸۱۵      | ۸/۸۶    | ۰/۰۰۵   |
| فشار × ضریب بارگذاری      | ۴          | ۱۸/۸۱      | ۴/۷۰        | ۱/۲۳    | ۰/۳۷۰   |
| سرعت گذار × ضریب بارگذاری | ۴          | ۱۰/۳۷      | ۲/۵۹        | ۰/۶۸    | ۰/۶۲۵   |



نمودار (۱۲) مقایسه میزان تاثیر پارامترهای فرآیند بر زاویه انحنای خطوط در ناحیه زیر

### نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، جهت انجام عملیات برش کاری بدون ایجاد تنش حرارتی، روی آلیاژ آلومینیوم حساس به حرارت ۱۱۱H-0۷0۴ و به منظور حذف سیالات آلاینده خنک کار طی عملیات برش، از فرآیند ماشین کاری با جت آب و ذرات ساینده بهره گرفته شد و سپس میزان تاثیر هر پارامتر بر کیفیت سطوح برش کاری شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که اهم نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:

۱- سرعت گذار بیشترین تاثیر را بر زبری سطح، زاویه انحنای خطوط و میزان شکل گیری پلیسه در موضع تحت برش داشته است. به طوری که، به ازای ضریب بارگذاری ۴۵٪ و فشار جت ۳۰۰ مگاپاسکال، با افزایش سرعت گذار از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی متر بر دقیقه، مقدار زبری سطح در ناحیه صاف، در حدود ۲۴٪ افزایش یافت و ادامه روند افزایش سرعت گذار از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه، افزایش زبری سطح در حدود ۵۰٪ را در پی داشته است. همچنین، به ازای ضریب بارگذاری ۴۵٪ و فشار جت ۳۰۰ مگاپاسکال، با افزایش سرعت گذار از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی متر بر دقیقه، مقدار زاویه انحنای خطوط در ناحیه زیر، در حدود ۴ برابر افزایش نشان داد و با ادامه روند افزایش سرعت گذار از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه، زاویه انحنای خطوط در حدود ۲۵٪ افزایش یافته است. بنابراین، با افزایش سرعت گذار، به دلیل عقب ماندگی جت آب از محور اصلی برش و ایجاد خطوط و پلیسه در ناحیه برش، کیفیت سطح ناحیه برش تنزل می یابد.

۲- پس از سرعت گذار، فشار جت آب در رتبه بعدی به لحاظ میزان تاثیرگذاری بر مشخصه های کیفی سطح قرار می گیرد. با افزایش فشار جت آب و به دنبال افزایش انرژی جنبشی آن، تعداد ذرات ساینده بیشتری در واحد زمان به واحد سطح قطعه کار برخورد

داشته و به این ترتیب زبری سطح کمتری حاصل شده است. همچنین با افزایش فشار جت آب و غلبه سازوکار برش بر تغییر شکل، زاویه انحنای خطوط ایجاد شده و میزان شکل گیری پلیسه نیز کاهش یافته است. به طوری که، به ازای ضریب بارگذاری ۴۵٪ و سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه، با افزایش فشار جت آب از ۲۰۰ به ۳۰۰ مگاپاسکال، مقدار زبری سطح در ناحیه صاف، در حدود ۹٪ کاهش یافت و ادامه روند افزایش فشار جت آب از ۳۰۰ به ۴۵۰ مگاپاسکال، کاهش زبری سطح در حدود ۱۸٪ را در پی داشته است. همچنین، به ازای ضریب بارگذاری ۴۵٪ و سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه، با افزایش فشار جت آب از ۲۰۰ به ۳۰۰ مگاپاسکال، مقدار زاویه انحنای خطوط در ناحیه زیر، در حدود ۲۸٪ کاهش نشان داد و با ادامه روند افزایش فشار جت آب از ۳۰۰ به ۴۵۰ مگاپاسکال، زاویه انحنای خطوط در حدود ۶۰٪ کاهش یافته است.

۳- ضریب بارگذاری تاثیر قابل توجهی بر مشخصه کیفی سطح برش نداشته و نتایج حاصل از آزمایش ها نشان داد که به کارگیری ضریب بارگذاری بیش از ۴۵٪ برای ذرات ساینده، عملاً تاثیر چندانی در بهبود مشخصه های کیفی سطح نداشته است. بنابراین بهترین نتیجه برای مشخصه های کیفی بررسی شده به ازای سرعت گذار ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه، فشار جت آب ۳۰۰ مگاپاسکال و ضریب بارگذاری ۴۵٪ حاصل شده است. به طوری که در این حالت فرآیند، کمترین مقدار برای زبری سطح به مقدار ۲/۸۳ میکرومتر و کمترین زاویه انحراف خطوط نیز به مقدار ۲ درجه ثبت شده است.

۴- طی تحلیل آماری انجام شده با استفاده از نرم افزار مینیتب با سطح اطمینان ۹۵٪، نتایج نشان داد که بعد از سرعت گذار، فشار جت آب بیشترین تاثیر را بر زبری سطح و زاویه انحنای خطوط در ناحیه زیر داشته است.

Alloy. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2019;6(3):415-432.

11- 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. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2018;232(9):850-861.

12- Khan AA, Haque MM. Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass. Journal of Materials Processing Technology. 2007;191(1-3):404-407.

13- Begic-Hajdarevic D, Cekic A, Mehmedovic M, Djelmic A. Experimental study on surface roughness in abrasive water jet cutting. Procedia Engineering. 2015;100:394-399.

14- 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):574-582.

15- Shanmugam DK, Masood SH. An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites. Journal of Materials Processing Technology. 2009;209(8):3887-3893.

16- Sasikumar K, Arulshri KP, 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.

17- Srinivas S, Babu NR. Penetration ability of abrasive waterjets in cutting of aluminum-silicon carbide particulate metal matrix composites. Machining Science and Technology. 2012;16(3):337-354.

18- Chithirai M, Chithirai Pon Selvan M, Mohanasundararaju N, Mohanasundararaju Na. An Experimental investigation on depth of cut in abrasive waterjet cutting of aluminium. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). 2011;3(4):2950-2954.

19- Ahmed TM, El Mesalamy AS, Youssef A, El Midany TT. Improving surface roughness of abrasive waterjet cutting process by using statistical modeling. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2018;22:30-36.

20- Maneiah D, Shunmugasundaram M, Reddy AR, 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 Mar:1-6.

21- Mayuet Ares PF, Rodríguez-Parada L, Gómez-Parra A, 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):2-16.

22- Shahu PK, Maity RS. Machining performance evaluation of Al 6061 T6 using abrasive water jet process. Advances in Unconventional Machining and Composites. 2020 Nov:127-139.

23- aalco.co.uk [Internet]. Birmingham: The UK's largest independent multi-metals stockholder; 2019. [Unknown Cited]. Available from: <http://www.aalco.co.uk/>.

24- Chithirai Pon Selvan M, Mohana Sundara Raju N, Sachidananda HK. Effects of process parameters on surface roughness in abrasive waterjet cutting of

**تشکر و قدردانی:** با سپاس از خداوند یکتا و دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال که نویسندگان را در پیشبرد این پژوهش یاری نمودند.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان با اعلام موافقت خود مبنی بر ارسال این مقاله به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، تعهد می‌نمایند که این مقاله در زمان ارسال برای این مجله در هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی دیگری ارسال نخواهد شد و پیام سرپیایان را به‌عنوان نویسنده رابط معرفی نموده وایشان وکالت تام در کلیه امور مرتبط با این مقاله نزد مجله را دارند.

**تعارض منافع:** نویسندگان با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله (صرفاً انتشار مقاله و نه محتوای آن) را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، واگذار کرده و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است. این حق با رد انتشار این مقاله در نشریه و یا انصراف نویسندگان از ادامه همکاری تا قبل از تعیین تکلیف قطعی مقاله سلب خواهد شد.

**سهم نویسندگان:** هادی امامی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۳٪)؛ احسان شکوری (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۳٪)؛ پیام سرپیایان (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۴٪).

**منابع مالی:** به‌صورت شخصی پرداخته شده است.

## منابع

- 1- Mackenzie DS, Totten GE. Handbook of aluminum. Florida: CRC Press; 2003.
- 2- Brosi JK, Lewandowski JJ. Delamination of a sensitized commercial Al-Mg alloy during fatigue crack growth. Scripta Materialia. 2010;63(8):799-802.
- 3- Knight WA, Boothroyd G. Fundamentals of metal machining and machine tools. Florida: CRC Press; 2005.
- 4- Momber AW, Kovacevic R. Principles of abrasive water jet machining, Springer Science & Business Media. London: Springer; 2012.
- 5- Krajcarz D. Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting. Procedia Engineering. 2014;69:838-843.
- 6- Pervaiz S, Anwar S, Qureshi I, Ahmed N. Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (MQL) based techniques. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2019;6(1):133-145.
- 7- Azmir MA, Ahsan AK. Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining. Journal of Materials Processing Technology. 2008;198(1-3):122-128.
- 8- Tosun N, Dagtekin I, Ozler L, Deniz A. Abrasive waterjet cutting of aluminum alloys: Workpiece surface roughness. Applied Mechanics and Materials. 2013;404:3-9.
- 9- Gnanavelbabu A, Rajkumar K, Saravanan P. Investigation on the cutting quality characteristics of abrasive water jet machining of AA6061-B<sub>4</sub>C-hBN hybrid metal matrix composites. Materials and Manufacturing Processes. 2018;33(12):1313-1323.
- 10- Natarajan Y, Murugasen PK, Sundarajan LR, Arunachalam R. Experimental Investigation on Cryogenic Assisted Abrasive Water Jet Machining of Aluminium

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.

29- Dhanawade A, Kumar S. Study on carbon epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining. *Journal of Composite Materials*. 2019;53(20):2909-2924.

30- Xu QW, Qiang CH, Guo CW. Experimental Study on the Surface Roughness of 1060 Aluminum Alloy Cut by Abrasive Water Jet. *Materials Science Forum*. 2019;950:32-37.

31- Kumaran ST, Ko TJ, Uthayakumar M, Islam M. Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using regression analysis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;724:1037-1045.

aluminium. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2012;7(4):439-444.

25- Verma K, Anandakrishnan 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;21(1):652-657.

26- Balamurugan K, Uthayakumar M, Sankar S, Hareesh US, Warriar KGK. Abrasive waterjet cutting of lanthanum phosphate-yttria composite: a comparative approach, in: *micro and nano machining of engineering materials*. Basel: Springer International Publishing; 2019. pp. 101-119.

27- Ay M, Caydas U, Hascalik A. Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of age hardened Inconel 718 nickel-based superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010;25(10):1160-1165.

28- Yuvaraj N, Pradeep Kumar M. Study and evaluation