



# Investigating the Parameters Affecting Surface Quality, Metal Removal Rate, and Tool Wear in Machining of Hybrid Metal Matrix Composites



## ARTICLE INFO

### Authors

Tahmasbi V<sup>1\*</sup>  
Sousanabadi Farahani A<sup>2</sup>,  
Ghazi khansari D<sup>1</sup>,  
Baghi M H<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.  
<sup>2</sup> Department of Faculty Engineering, Arak University, Arak, Iran.

### \* Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.  
Tahmasbi@arakut.ac.ir

### How to cite this article

Tahmasbi V, Sousanabadi Farahani A, Ghazi khansari D, Baghi M H. Investigating the Parameters Affecting Surface Quality, Metal Removal Rate, and Tool Wear in Machining of Hybrid Metal Matrix Composites. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):155-161.

## ABSTRACT

Due to the significant increase in demand for materials with new capabilities, the use of composite materials is increasing. These materials have unique properties such as high wear resistance and a high strength-to-weight ratio, and are used by engineers in various industries, particularly in the aerospace and automotive sectors. Due to the metallic nature of these materials, the machining process is an integral part in achieving the shape and properties of the final product. Among composite materials, aluminum-based composites are the most widely used in industry. In this study, a methodical was conducted, study including statistical modeling using the response surface method and deriving regression equations of the effect of spindle rotation speed, feed rate, and depth of cut on surface roughness, metal removal rate, and tool wear during machining of A359/B4C/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrix aluminum composite. It was found that an increase in spindle rotation speed, feed rate, and cutting depth increased metal removal. The best combination of parameters that was found to simultaneously minimize the surface roughness and maximize the metal removal rate and minimize flank wear was a spindle speed of 600 rpm, a feed rate of 0.075 mm/rev, and a cutting depth of 0.20 mm.

**Keywords** Metal Matrix Composites, Tool Wear, Metal Removal Rate, Surface Quality

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۵۵-۱۷۱



## بررسی پارامترهای مؤثر بر کیفیت سطح، نرخ براده برداری و سایش ابزار در ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی هیبریدی



### چکیده

با توجه به افزایش چشمگیر تقاضا برای استفاده از مواد با قابلیت‌های جدید، استفاده از مواد کامپوزیتی به شدت در حال افزایش است. مواد کامپوزیتی با زمینه فلزی به علت دارا بودن خواص منحصربه‌فردی از جمله مقاومت به سایش بالا، نسبت استحکام به وزن زیاد و... از جمله مواد نوین مورد استفاده توسط مهندسين در صنایع مختلف، خصوصاً در صنایع هوافضا، خودروسازی و... می‌باشند. با توجه به ماهیت فلزی این مواد، فرآیند ماشین‌کاری جزء جدایی‌ناپذیر جهت رسیدن این دست از مواد به شکل و خواص نهایی محصول است. در بین مواد کامپوزیتی، کامپوزیت زمینه آلومینیومی بیشتر از هر نوع کامپوزیت دیگری در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه با بهره‌گیری از یک مطالعه روشمند شامل مدل‌سازی آماری به روش سطح پاسخ و استخراج معادلات رگرسیون اثر سرعت دوران اسپیندل، نرخ تغذیه و عمق برش بر روی زبری سطح، نرخ براده برداری و سایش جانی در هنگام تراش‌کاری کامپوزیت هیبریدی آلومینیومی A359/B4C/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. بر اساس مطالعات صورت پذیرفته می‌توان ادعان نمود با افزایش سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش سایش ابزار و همچنین نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. همچنین بهترین ترکیب از مقادیر برای به حداقل رساندن هم‌زمان زبری سطح و به حداکثر رساندن نرخ براده برداری و حداقل رساندن سایش جانی پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارت‌اند از: سرعت اسپیندل ۶۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۷۵ میلی‌متر بر دور، عمق برش ۰/۲۰ میلی‌متر.

### مشخصات مقاله

#### نویسنده‌ها

وحید طهماسبی<sup>۱\*</sup>  
امین سوسن آبادی فراهانی<sup>۲</sup>  
دانیال قاضی خوانساری<sup>۱</sup>  
محمدحافظ باقی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.  
Tahmasbi@arakut.ac.ir

**کلیدواژه‌ها:** کامپوزیت‌های زمینه فلزی، سایش ابزار، نرخ براده برداری، کیفیت سطح

## ۱- مقدمه

به علت افزایش روزافزون نیاز مهندسين به مواد باقابليت‌های ویژه استفاده از مواد کامپوزیتی به‌طور چشمگیری در حال افزایش است (۱). امروزه استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به سایش و... موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است (۲). ویژگی‌هایی از قبیل سبک وزن بودن و خواص حرارتی و مکانیکی بهبود یافته آن را نسبت به بسیاری از مواد موجود برتری می‌دهد (۳). محققان نشان دادند که کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل ماهیت سخت و ساینده ذرات تقویت‌کننده، داری قابلیت ماشین‌کاری خوبی نیستند (۴). واژه قابلیت ماشین‌کاری به معنای عملکرد مناسب فرآیند در مورد توان مصرفی برش، نرخ براده برداری (MRR)، پرداخت سطح و غیره است. درحالی‌که مطالعات فراوانی در این خصوص انجام شده است اما هنوز تحقیقات در این زمینه ادامه دارد (۵). زبری سطح و نرخ براده برداری عوامل مهمی در ارزیابی قابلیت ماشین‌کاری است. مطالعات گوناگونی در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر زبری سطح قطعه کار و نرخ براده برداری مانند سرعت دوران اسپیندل، نرخ پیشروی، شعاع نوک ابزار و... توسط پژوهشگران انجام شده است (۶). مطابق با پژوهش‌های صورت پذیرفته توسط کومار و همکاران، با افزایش نرخ پیشروی، نرخ براده برداری و زبری سطح افزایش می‌یابد (۷). مانا و باتانچاریا (۸) تراشکاری آلایژ Al را با ۱۵٪ از ذرات SiC و با استفاده از ابزار کاربید تنگستن انجام دادند. آن‌ها دریافتند که زبری سطح با افزایش سرعت برش از ۵۰ m/min تا ۱۸۰ m/min به نصف کاهش می‌یابد. محققان دیگر گزارش دادند که طول عمر ابزار با افزایش سرعت برش کاهش می‌یابد. لین (۹) در هنگام ماشین‌کاری آلایژ آلومینیم با ۲۰٪ ماده تقویت‌کننده با استفاده از ابزار PCD، بیان کرد که سایش به‌سرعت با افزایش در سرعت برش افزایش خواهد یافت. زبری سطح در پیشروی‌ها و سرعت‌های برش متعدد مشاهده شده توسط کارموهیلان و همکارانش نشان می‌دهد که استفاده از سرعت‌های برش متوسط برای به دست آوردن زبری سطح مناسب‌تر است (۱۰). مطابق با تحقیقات انجام شده توسط بانسل عمق برش تأثیر بیشتری را بر سایش ابزار و صافی سطح نسبت به پیشروی دارد (۱۱). در مطالعه دیگری که توسط کیشور و همکاران انجام شده هم نشان داده شده است که عمق برش تأثیر قابل‌توجهی بر سایش ابزار دارد نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که اگر استفاده اقتصادی از ابزار مطلوب ماست عمق برش باید به حداکثر برسد. اگر صافی سطح دغدغه اصلی است عمق برش باید به‌منظور کاهش یافتن زبری سطح کاهش یابد (۱۲).

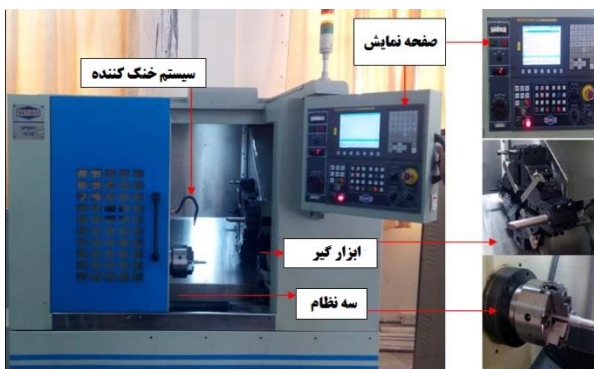
با توجه به پژوهش‌های انجام شده در زمینه ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی کسب شناخت صحیحی از میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای ماشین‌کاری بسیار لازم و موردنیاز

صنعت می‌باشد. در این مقاله به‌صورت روشمند و با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌سازی آماری فرآیند صورت پذیرفته و رفتار پارامترهای سایش ابزار، زبری سطح و نرخ براده برداری به‌عنوان سه پاسخ مهم در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی A359/B4C/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> موردبررسی قرار گرفته و ضمن ارائه معادلات رگرسیون خطی مرتبه دوم و تحلیل آن‌ها، بهینه‌سازی آماری به‌منظور دستیابی به کمترین میزان فرسایش ابزار و زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری با استفاده از الگوریتم درینگر ارائه شده است.

## ۲- روش آزمایش

در این مطالعه از تراش سی ان سی SPRINT 16TC ساخت شرکت BATLIBOI برای آزمایش تجربی استفاده شد. شکل ۱ این دستگاه را نشان می‌دهد. ابزار اینسرتی مورد استفاده از جنس کاربید Kyocera پیروی می‌کند. مشخصات استاندارد ابزار و خواص مکانیکی آن در جدول ۱ بیان گردیده است. سه پارامتر عمق برش، سرعت دوران اسپیندل و سرعت پیشروی به‌عنوان پارامترهای مورد مطالعه انتخاب شده‌اند. شایان به ذکر است تمامی پارامترهای دیگر، ثابت در نظر گرفته شده است. سه خروجی مهم با هدف مطالعه و همچنین برای تجزیه و تحلیل فرایند تراشکاری برای ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی هیبریدی اندازه‌گیری شده است. این خروجی‌ها عبارت است از: الف) زبری سطح (ب) نرخ براده برداری (ج) سایش جانبی.

برای اندازه‌گیری زبری سطح از یک دستگاه زبری سنج به نام (Mitutoyomake SJ-210) که در شکل ۲ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌ها مطابق استاندارد (ISO 1997) انجام شده است (۱۳).



شکل ۱) دستگاه تراش CNC SPRINT 16-TC

جدول (۱) مشخصات ابزار

| شماره | مشخصات ابزار        | محدوده/مقدار            |
|-------|---------------------|-------------------------|
| ۱     | زاویه نوک ابزار     | ۶۰°سانتی‌گراد           |
| ۲     | شعاع نوک            | ۰/۸۰ میلی‌متر           |
| ۳     | عرض (S)             | ۴/۷۶ میلی‌متر           |
| ۴     | جانب (I)            | ۱۶/۵۰ میلی‌متر          |
| ۵     | قطر (DI)            | ۹/۵۲ میلی‌متر           |
| ۶     | نقطه ذوب            | ۲/۸۳۰-۲/۷۸۵° سانتی‌گراد |
| ۷     | مدول پیانگ          | ۵۳-۷۰۰ گیگاپاسکال       |
| ۸     | مدول برشی           | ۲۷۴ گیگاپاسکال          |
| ۹     | استحکام فشاری نهائی | ۲/۷ گیگاپاسکال          |
| ۱۰    | استحکام کششی نهائی  | ۳۴۴ مگاپاسکال           |
| ۱۱    | ضریب حجمی           | ۶۳-۶۵۵ گیگاپاسکال       |
| ۱۲    | ضریب پواسون         | ۰/۳۱                    |

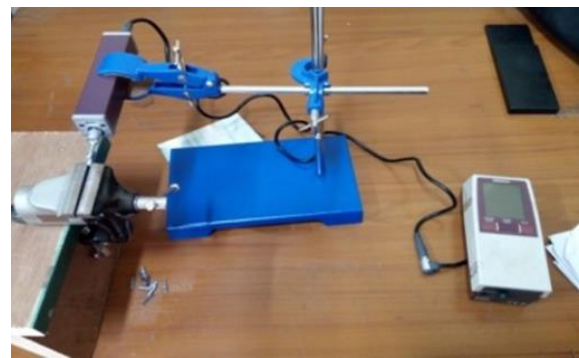
جدول (۲) پارامترهای تراشکاری CNC

| مقادیر                            | مولفه ها                |
|-----------------------------------|-------------------------|
| ۲۰                                | قطر قطعه کار (میلی‌متر) |
| بیژولگرنوو(روان کننده های آلمانی) | نوع خنک کننده           |
| کاربید                            | جنس ابزار               |
| تی ان ام جی(کیوسرا)               | نوع ابزار               |

جدول (۳) پارامترهای ورودی فرآیند مورد استفاده و سطح طراحی آن‌ها

| فاکتورهای ورودی آزمایش      | -۱    | ۰    | +۱    |
|-----------------------------|-------|------|-------|
| A: سرعت دوران اسپیندل (rpm) | ۲۰۰   | ۴۰۰  | ۶۰۰   |
| B: نرخ پیشروی (mm/rev)      | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۷۵ |
| C: عمق برش (mm)             | ۰/۲   | ۰/۴  | ۰/۶   |

در این پژوهش با در نظر داشتن سرعت دوران اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش به‌عنوان متغیرهای ورودی تعداد ۳۳ آزمایش فول فاکتوریال صورت گرفته و به روش سطح پاسخ و با استفاده از طرح باکس بنکن (BBD) مدل‌سازی شده است. در جدول ۳ متغیرهای ورودی و بازه تغییرات آن با توجه به سه سطح کد شده آن‌ها نمایش داده شده است. علت استفاده از روش حاضر نسبت به سایر روش‌ها از جمله روش تاگوچی، طراحی آزمایش مناسب، تعداد آزمایش‌های جامع و همچنین ارائه نمودارها و گراف‌های برهم‌کنش فاکتورها، ارائه معادله ریاضی رگرسیون دقیق و معتبر خطی مرتبه دوم است. از نرم‌افزار مینی تب نسخه ۲۰ برای تحلیل پاسخ و به دست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم استفاده شده است. در واقع مهندسان از طرح آزمایش در توسعه و افزایش راندمان طرح و از طرفی جهت صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و رفع عیوب آن‌ها کمک می‌گیرند؛ بنابراین روشی دقیق و مطمئن برای کاهش زمان تولید و هزینه‌ها است.



شکل (۲) زبری سنج Mitutoyomake (SJ-210)

در فرآیند تراشکاری، نرخ براده برداری توسط معادلات زیر محاسبه شده است (معادلات ۱ و ۲):

$$MRR = \frac{\pi \times (D^2 - d^2) \times l}{4 \times t} \text{ mm}^2/\text{min} \quad (1)$$

$$MRR = \frac{\text{Initial weight} - \text{Final weight}}{\text{machining time}} \text{ gm/mln} \quad (2)$$

در معادله شماره (۱)، MRR برحسب میلی‌متر مربع، d قطر نهائی برحسب میلی‌متر، D قطر اولیه برحسب میلی‌متر، l طول ماشین برحسب میلی‌متر و t زمان ماشین‌کاری برحسب دقیقه می‌باشد. نرخ براده برداری با ثبت زمان ماشین‌کاری در طول هر آزمایش و سپس قرار دادن در معادلات (۱ و ۲) در نظر گرفته شده است. سایش ابزار یک پدیده نامطلوب است. در این آزمایش از یک میکروسکوپ نوری برای اندازه‌گیری سایش جانبی ابزار پس از هر آزمایش استفاده شده است. جدول ۳ محدوده پارامترهای فرآیند و سطح طراحی آن‌ها را در حین عملیات تراشکاری نشان می‌دهد. از یک قطعه کار استوانه‌ای کامپوزیت زمینه فلزی هیبریدی با ترکیب (A359+2%B4C+2%AL2O3) استفاده شد. فاصله‌ی ۲ میلی‌متر بین هر ماشین‌کاری برای اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است.

جدول ۴) طراحی آزمایش در تراشکاری CNC و پاسخ‌های خروجی (۱۳)

| شماره آزمایش | سرعت دوران اسپیندل (دور بر دقیقه) | نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دور) | عمق برش (میلی‌متر) | زبری سطح (میکروسترن) | دقیقه   | نرخ براده برداری (میلی‌متر مکعب بر دقیقه) | سایش جانبی (میکروسترن) |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|---------|---|------------------------|
| ۱            | ۴۰۰                               | ۰/۰۵                         | ۰/۴                | ۱/۵۴۸                | ۴۷۶/۷۱  | ۳۱۸/۲۵                                    |                        |
| ۲            | ۶۰۰                               | ۰/۰۲۵                        | ۰/۴                | ۱/۱۵۸                | ۱۶۴/۸۸  | ۳۱۲/۲۵                                    |                        |
| ۳            | ۲۰۰                               | ۰/۰۵                         | ۰/۲                | ۲/۱۲۵                | ۱۲۲/۳۷  | ۱۰۵/۴۲                                    |                        |
| ۴            | ۴۰۰                               | ۰/۰۷۵                        | ۰/۶                | ۱/۹۴۶                | ۸۴۳/۸۸  | ۴۶۵/۳۶                                    |                        |
| ۵            | ۲۰۰                               | ۰/۰۲۵                        | ۰/۴                | ۲/۳۷۴                | ۱۲۲/۱۳  | ۲۸۵/۷۴                                    |                        |
| ۶            | ۶۰۰                               | ۰/۰۵                         | ۰/۲                | ۱/۱۸۱                | ۳۱۱/۰۲  | ۱۰۸/۲۵                                    |                        |
| ۷            | ۴۰۰                               | ۰/۰۵                         | ۰/۴                | ۱/۵۵۴                | ۴۶۱/۸۱  | ۳۱۶/۴۲                                    |                        |
| ۸            | ۴۰۰                               | ۰/۰۷۵                        | ۰/۲                | ۱/۶۱۲                | ۳۷۳/۲۲  | ۱۰۲/۲۴                                    |                        |
| ۹            | ۶۰۰                               | ۰/۰۷۵                        | ۰/۴                | ۱/۲۲۳                | ۹۸۵/۲۰  | ۳۳۷/۶۴                                    |                        |
| ۱۰           | ۴۰۰                               | ۰/۰۲۵                        | ۰/۲                | ۱/۴۸۷                | ۱۱۸/۴۸  | ۱۰۸/۲۵                                    |                        |
| ۱۱           | ۴۰۰                               | ۰/۰۵                         | ۰/۴                | ۱/۵۴۲                | ۴۳۴/۶۵  | ۲۹۸/۸۳                                    |                        |
| ۱۲           | ۴۰۰                               | ۰/۰۲۵                        | ۰/۶                | ۱/۷۵۴                | ۲۱۹/۶۰  | ۴۲۲/۲۵                                    |                        |
| ۱۳           | ۶۰۰                               | ۰/۰۵                         | ۰/۶                | ۱/۲۲۹                | ۱۰۴۴/۸۰ | ۴۶۶/۲۲                                    |                        |
| ۱۴           | ۲۰۰                               | ۰/۰۷۵                        | ۰/۴                | ۲/۴۲۴                | ۳۴۳/۶۸  | ۲۹۷/۲۱                                    |                        |
| ۱۵           | ۲۰۰                               | ۰/۰۵                         | ۰/۶                | ۲/۵۷۹                | ۳۳۷/۵۵  | ۴۱۲/۵۴                                    |                        |

۳- نتیجه و بحث

با توجه به طراحی آزمایش‌های صورت گرفته، برای هر ۱۵ آزمایش، متغیرهای خروجی اندازه‌گیری شده و در جدول ۴ گزارش شده است. همچنین به‌منظور بالا بردن دقت و صحت نتایج آزمایش، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده است و میانگین آن‌ها به‌عنوان زبری سطح، نرخ براده برداری و سایش جانبی گزارش شده است. لازم به ذکر است به‌منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای پیش‌بینی‌نشده، آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی انجام شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل زبری سطح، نرخ براده برداری و سایش جانبی ماشین‌کاری شده، نتایج حاصل از آنالیز واریانس (ANOVA) برای مدل اصلاح‌شده پس از حذف عوامل غیر مؤثر در جدول‌ها آمده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر پارامترهای معادله‌ی رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش به‌سزایی دارد. مقدار قابلیت اطمینان نشان‌دهنده دقت مدل حاکم بر آزمایش است و هرچه مقدار این مؤلفه به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، بیان‌کننده این است که مدل‌سازی صورت گرفته از دقت بالایی برخوردار بوده. با توجه به اینکه قابلیت اطمینان  $R^2$  ۹۹/۷۰٪ در زبری سطح، ۹۴/۱۸٪ در نرخ براده برداری و همچنین ۹۹/۸۶٪ برای سایش جانبی در مدل اصلاح‌شده به‌دست‌آمده است. می‌توان از دقت مدل به‌دست‌آمده اطمینان حاصل کرد. همچنین با بررسی باقیمانده‌ها می‌توان مناسب بودن مدل را احراز کرد. مقدار خطای مجموع مربعات (press) مدل منطبق شده بر داده‌ها میزان دقت نوع معادله رگرسیون حاکم بر مدل را مشخص نمود. هرچه این مقدار در مدل‌های قابل انطباق بر داده‌ها کمتر باشد مدل مربوطه دارای خطای پیش‌بینی کمتری

است. روابط (۳)، (۴)، (۵) معادله رگرسیون اصلاح‌شده‌ی مدل‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵) تحلیل واریانس زبری سطح اصطلاح شده

| ترم‌ها               | درجه آزادی | جمع مربعات | میانگین مربعات | F-Value | P-Value |
|----------------------|------------|------------|----------------|---------|---------|
| مدل                  | ۷          | ۳/۱۱۶۹۶    | ۰/۴۴۵۲۸        | ۳۲۹/۲۴  | ۰/۰۰۰   |
| A=سرعت دوران اسپیندل | ۱          | ۲/۷۷۴۱۹    | ۲/۷۷۴۱۹        | ۲۰۵۱/۲۱ | ۰/۰۰۰   |
| B=نرخ پیشروی         | ۱          | ۰/۰۲۳۳۳    | ۰/۰۲۳۳۳        | ۱۷/۲۵   | ۰/۰۰۴   |
| C=عمق برش            | ۱          | ۰/۱۵۲۰۸    | ۰/۱۵۲۰۸        | ۱۱۲/۴۴  | ۰/۰۰۰   |
| A <sup>2</sup>       | ۱          | ۰/۰۸۶۱۵    | ۰/۰۸۶۱۵        | ۷۲/۳۱   | ۰/۰۰۰   |
| B <sup>2</sup>       | ۱          | ۰/۰۲۳۰۶    | ۰/۰۲۳۰۶        | ۱۹/۲۶   | ۰/۰۰۳   |
| C <sup>2</sup>       | ۱          | ۰/۰۱۶۹۵    | ۰/۰۱۶۹۵        | ۱۲/۵۳   | ۰/۰۰۹   |
| A×C                  | ۱          | ۰/۰۴۱۲۱    | ۰/۰۴۱۲۱        | ۳۰/۴۷   | ۰/۰۰۱   |

جدول ۶) تحلیل واریانس نرخ براده برداری

| ترم‌ها               | درجه آزادی | جمع مربعات | میانگین مربعات | F-Value | P-Value |
|----------------------|------------|------------|----------------|---------|---------|
| مدل                  | ۵          | ۱۲۱۹۲۹۴    | ۲۴۳۸۵۹         | ۲۹/۱۴   | ۰/۰۰۰   |
| A=سرعت دوران اسپیندل | ۱          | ۳۱۲۱۱۷     | ۳۱۲۱۱۷         | ۳۷/۳۰   | ۰/۰۰۰   |
| B=نرخ پیشروی         | ۱          | ۴۶۱۲۲۷     | ۴۶۱۲۲۷         | ۵۵/۱۲   | ۰/۰۰۰   |
| C=عمق برش            | ۱          | ۲۸۹۰۸۱     | ۲۸۹۰۸۱         | ۳۴/۵۵   | ۰/۰۰۰   |
| A×B                  | ۱          | ۸۹۶۳۱      | ۸۹۶۳۱          | ۱۰/۷۱   | ۰/۰۱۰   |
| A×C                  | ۱          | ۶۷۲۳۶      | ۶۷۲۳۶          | ۸/۰۴    | ۰/۰۲۰   |

جدول ۷) تحلیل واریانس سایش جانبی

| ترم‌ها               | درجه آزادی | جمع مربعات | میانگین مربعات | F-Value | P-Value |
|----------------------|------------|------------|----------------|---------|---------|
| مدل                  | ۶          | ۲۳۳۷۷۷     | ۳۸۹۶۳          | ۹۴۷/۱۲  | ۰/۰۰۰   |
| A=سرعت دوران اسپیندل | ۱          | ۱۹۰۵       | ۱۹۰۵           | ۴۶/۳۱   | ۰/۰۰۰   |
| B=نرخ پیشروی         | ۱          | ۶۸۴        | ۶۸۴            | ۱۶/۶۲   | ۰/۰۰۴   |
| C=عمق برش            | ۱          | ۲۲۵۱۹۱     | ۲۲۵۱۹۱         | ۵۴۷۴/۰۰ | ۰/۰۰۰   |
| C <sup>2</sup>       | ۱          | ۴۷۴۸       | ۴۷۴۸           | ۱۱۵/۴۱  | ۰/۰۰۰   |
| A×C                  | ۱          | ۶۴۶        | ۶۴۶            | ۱۵/۷۱   | ۰/۰۰۴   |
| B×C                  | ۱          | ۶۰۳        | ۶۰۳            | ۱۴/۶۶   | ۰/۰۰۵   |

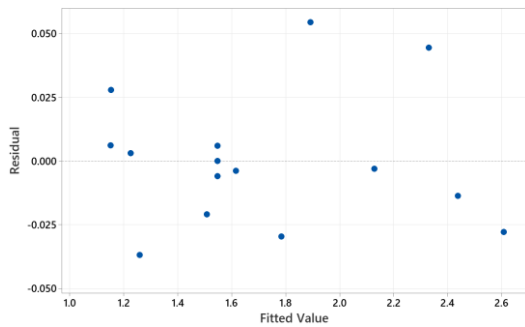
$$Ra (\mu m) = 3.194 - 0.005184 A - 11.28 B + 0.349 C + 0.000004 A^2 + 134.4 B^2 + 1.694 C^2 - 0.002537 A^*C \quad (۳)$$

$$MRR (mm^3/min) = 286 - 1.806 A - 2371 B - 346 C + 29.94 A^*B + 3.24 A^*C \quad (۴)$$

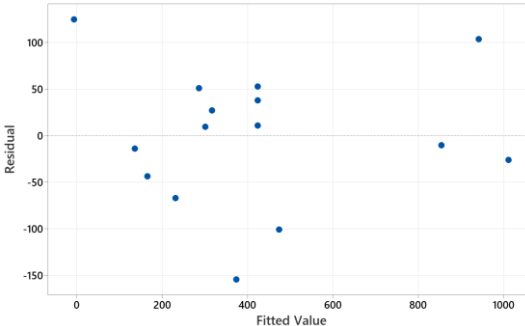
$$Tool flank wear (\mu m) = -118.1 - 0.0500 A - 613 B + 1302.2 C - 891.5 C^2 + 0.3178 A^*C + 2456 B^*C \quad (۵)$$

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ و ۵ که وضعیت باقیمانده‌ها نشان داده شده است، می‌توان گفت با توجه به عدم وجود ساختار و الگوی مشخص و همچنین نظم خاص در توزیع باقیمانده‌ها مدل ارائه‌شده صحیح است. در این بخش با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته و انطباق آن بر داده‌های آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن ترم‌های مؤثر در مدل، سعی بر آن است تا نقش سرعت دوران اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش بر رفتار زبری سطح، نرخ براده

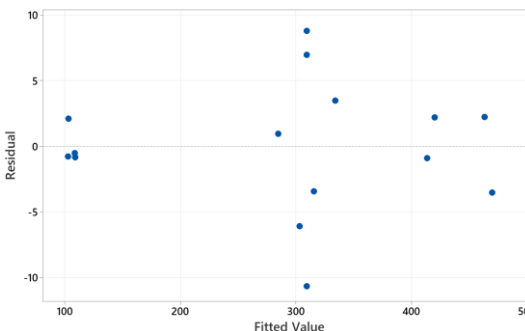
تراشکاری نشان می‌دهد. با توجه به مطالعاتی که در خصوص رفتار کمترین زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی هیبریدی انجام شده است. در این بخش بهینه‌سازی فرآیند به منظور رسیدن به کمترین مقدار زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری صورت گرفته است. با در نظر گرفتن حد کمینه برای سایش جانبی در مدل منطبق شده بر آزمایش و لحاظ نمودن حد مطلوب، بهینه‌سازی صورت گرفته در شکل ۱۲ ارائه شده است.



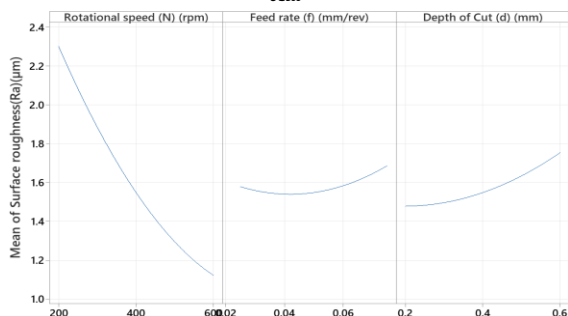
شکل ۱۳) پراکندگی باقیمانده های زبری سطح نسبت به مدل منطبق شده



شکل ۱۴) پراکندگی باقیمانده های نرخ براده برداری نسبت به مدل منطبق شده



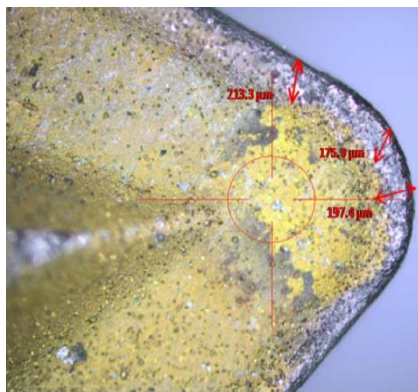
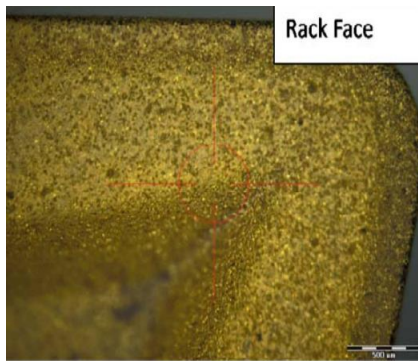
شکل ۱۵) پراکندگی باقیمانده های سایش جانبی نسبت به مدل منطبق شده



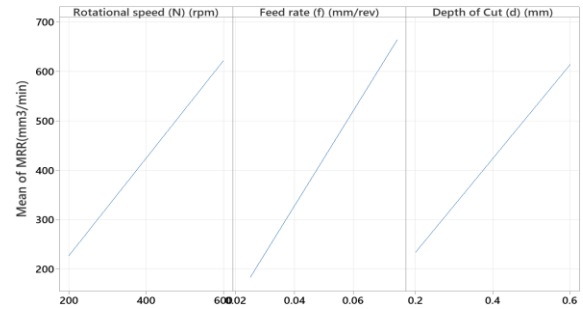
شکل ۱۶) اثر پارامترهای ورودی بر روی رفتار زبری سطح

برداري و سایش جانبی تبیین گردد. نمودارهای شکل ۶ رفتار زبری سطح را بر اساس هر یک از متغیرهای ورودی فرآیند طبق مدل‌سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ ارائه می‌دهند. مطابق با مدل‌سازی صورت گرفته با افزایش سرعت دوران اسپیندل زبری سطح کاهش می‌یابد. معمولاً افزایش سرعت دوران اسپیندل تا یک مقدار بحرانی منجر به پرداخت بهتر سطح می‌شود این پدیده به دلیل کاهش اندازه لبه‌ی انباشته ابزار در سرعت دوران بالا است. عمق برش بیشتر منجر به افزایش سطح مقطع براده و افزایش نیروهای برشی بر روی سطح ماشین‌کاری شده و باعث افزایش زبری سطح می‌شود. نرخ پیشروی نیز یک پارامتر مهم است و افزایش آن باعث ایجاد سطح ماریچی روی سطح ماشین‌کاری شده و در نتیجه افزایش مقدار زبری سطح می‌شود. افزایش کوچکی در نرخ پیشروی تا یک مقدار بحرانی، زبری سطح را کاهش می‌دهد. با این حال روند افزایشی زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی اما با سرعت کمتر مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد که سرعت دوران اسپیندل مقدار زبری سطح را در مقایسه با عمق برش به شدت تغییر می‌دهد. نمودار شکل ۷ رفتار نرخ براده برداری را بر اساس هر یک از متغیرهای ورودی فرآیند نشان می‌دهد. با افزایش هر سه پارامتر ورودی نرخ براده برداری افزایش یافته است. می‌توان به این نتیجه رسید که طبق شکل ۸ سرعت دوران اسپیندل بالاتر، زمان ماشین‌کاری را کاهش می‌دهد. با افزایش نرخ پیشروی با توجه به شکل ۶ و ۷ به دلیل افزایش اصطکاک بین ابزار و سطح براده و همچنین افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته زبری سطح ماشین‌کاری شده افزایش پیدا کرده و کیفیت سطح نهایی پایین می‌آید ولی از طرفی با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و تبدیل نوع ماشین‌کاری از پرداخت‌کاری به خشن تراشی حجم براده برداری افزایش یافته و راندمان تولید بیشتر خواهد شد. در صورتی که عمق ماشین‌کاری بیشتر شود نیروهای ماشین‌کاری افزایش یافته و ارتعاشات ابزار بیشتر می‌شود. ارتعاش زیاد ابزار باعث سایش و تغییر هندسه ابزار و در نتیجه افزایش زبری و کاهش کیفیت سطح می‌شود. افزایش زبری سطح و نرخ براده برداری با زیاد شدن عمق برش را می‌توان در نمودارهای شکل ۶ و ۷ و ۸ مشاهده نمود. نمودارهای شکل ۹ رفتار سایش ابزار را بر اساس هر یک از متغیرهای ورودی فرآیند نشان می‌دهد. با افزایش سرعت دوران اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش، سایش جانبی ابزار نیز افزایش می‌یابد. در سرعت دوران بالا، ابزار تحت فشار و دمای بالا قرار می‌گیرد. یکی دیگر از دلایل سایش جانبی ابزار وجود ذرات تقویت‌کننده سخت در قطعه کار است که سایش جانبی ابزار را افزایش می‌دهد. از نمودارهای شکل ۹ و ۱۰ می‌توان بیان کرد که سرعت دوران اسپیندل و نرخ پیشروی هر دو دارای روند افزایشی برای سایش جانبی هستند. با این حال می‌توان بیان کرد که سهم سرعت دوران اسپیندل بیشتر از نرخ پیشروی است. شکل ۱۱ تصاویر سایش جانبی ابزار را قبل و بعد از عملیات

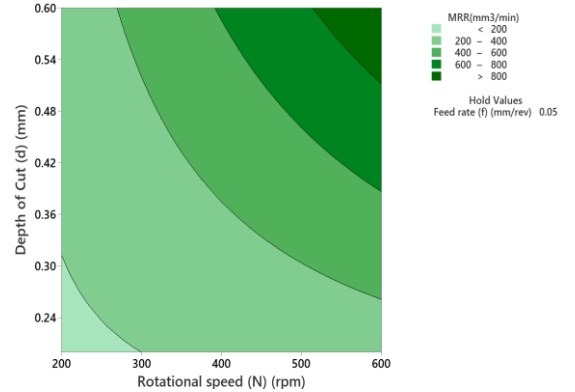




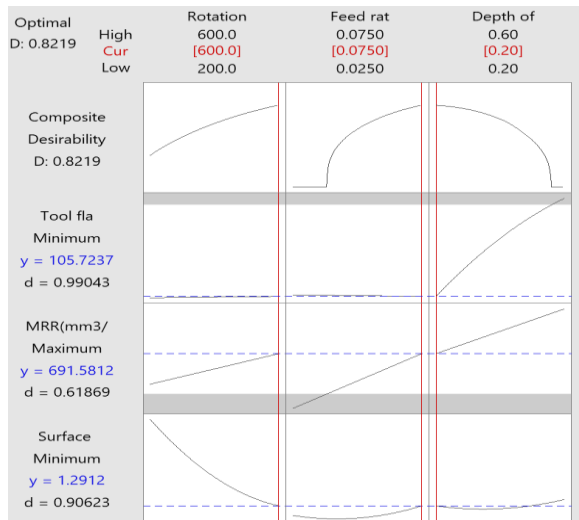
شکل ۱۱) ابزار قبل و بعد از عملیات تراشکاری



شکل ۷) اثر پارامترهای ورودی بر روی رفتار نرخ براده برداری



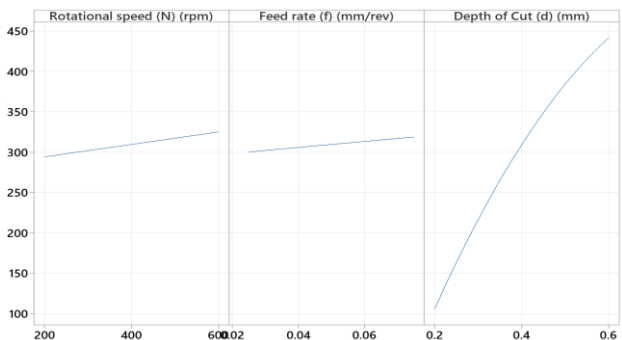
شکل ۸) نمودار برهم کنش سرعت دوران اسپیندل و عمق برشی بر روی رفتار نرخ براده برداری



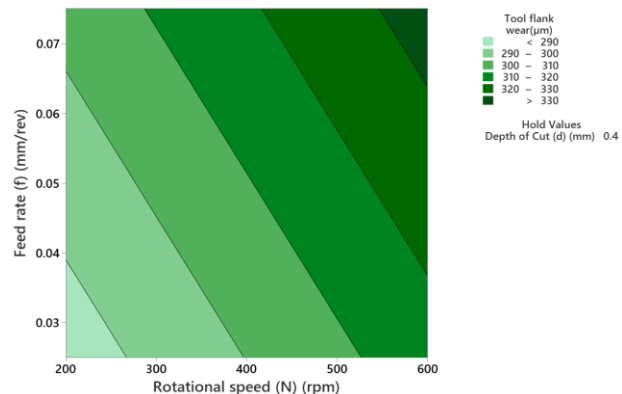
شکل ۱۲) بهینه سازی صورت گرفته به منظور الف) کمترین مقدار زبری سطح ب) بیشترین مقدار نرخ براده برداری ج) کمترین مقدار سایش جانبی

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا با روش طراحی آزمایش و استفاده از روش سطح پاسخ یک مدل رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش بینی و تحلیل کمی فرآیند بر روی داده های آزمایش های تجربی برآزش شد. استفاده از این ابزار میزان بهره وری در دقت و صحت و افزایش هرچه بیشتر کیفیت در فرآیند را افزایش می دهد. در این مطالعه میزان تأثیر هر یک از پارامترهای سرعت دوران



شکل ۹) اثر پارامترهای ورودی بر روی رفتار سایش جانبی



شکل ۱۰) نمودار برهم کنش سرعت دوران اسپیندل و نرخ پیشروی بر روی رفتار سایش جانبی

9. Lin J, Bhattacharyya D, Lane C. Machinability of a silicon carbide reinforced aluminium metal matrix composite. *Wear*. 1995;181:883-8.
10. Kaarmuhilan K, Karthika S, Muthukrishnan N. Performance evaluation of PCD 1300 and 1500 grade inserts on turning A356 alloy with 20% reinforcement of SiC particles. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;110:1855-61.
11. Bansal P, Upadhyay L. Experimental investigations to study tool wear during turning of alumina reinforced aluminium composite. *Procedia Engineering*. 2013;51:818-27.
12. Kishore DSC, Rao KP, Mahamani A. Investigation of cutting force, surface roughness and flank wear in turning of In-situ Al6061-TiC metal matrix composite. *Procedia materials science*. 2014;6:1040-50.
13. Srivastava AK, Maurya M, Saxena A, Kumar N, Dwivedi SP. Statistical optimization by response surface methodology of process parameters during the CNC turning operation of hybrid metal matrix composite. 2021.

اسپیندل، عمق برش، نرخ پیشروی بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری به روش آزمایش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در عمق برش بالا (تقریباً ۱ میلی‌متر)، ابزار در معرض نیروهای برشی بالا با بارگذاری حرارتی و مکانیکی بالا قرار داشت که منجر به شکستگی یا سایش جانبی ابزار می‌شود. در تراشکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی با افزایش نرخ پیشروی با توجه به دلیل افزایش اصطکاک بین ابزار و سطح براده و همچنین افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته زبری سطح ماشین‌کاری شده افزایش پیدا کرده و کیفیت سطح نهایی پایین می‌آید ولی از طرفی با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و تبدیل نوع ماشین‌کاری از پرداخت‌کاری به خشن تراشی حجم براده برداری افزایش یافته و راندمان تولید بیشتر خواهد شد. از تجزیه و تحلیل، بهترین ترکیب از مقادیر برای به حداقل رساندن هم‌زمان زبری سطح و به حداکثر رساندن نرخ براده برداری و حداقل رساندن سایش جانبی پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارت‌اند از: سرعت اسپیندل ۶۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۷۵ میلی‌متر بر دور، عمق برش ۰/۲۰ میلی‌متر.

#### ۵-مراجع

1. Dwivedi SP, Sharma S, Mishra RK. RETRACTED ARTICLE: Microstructure and mechanical behavior of A356/SiC/Fly-ash hybrid composites produced by electromagnetic stir casting. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2015;37:۵۷-۶۷.
2. Maurya NK, Maurya M, Srivastava AK, Dwivedi SP, Chauhan S. Investigation of mechanical properties of Al 6061/SiC composite prepared through stir casting technique. *Materials Today: Proceedings*. 2020;25:755-8.
3. Davim JP. *Machining composites materials*: John Wiley & Sons; 2013.
4. Safarabady A, Tahmasbi V, sousanabadi farahani A, zolfaghari m. Electrical discharge machining of metal matrix composite AZ91 magnesium alloy and investigation and optimization of the effect of input parameters on material removal rate and workpiece surface roughness. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022;9(6):59-69.
5. Meher A, Mahapatra MM, Samal P, Vundavilli PR, Shankar KV. Statistical Modeling of the Machinability of an In-Situ Synthesized RZ5/TiB2 Magnesium Matrix Composite in Dry Turning Condition. *Crystals*. 2022;12(10):1353.
6. Songmene V, Balazinski M. Machinability of graphitic metal matrix composites as a function of reinforcing particles. *CIRP Annals*. 1999;48(1):77-80.
7. Srinivasan A, Arunachalam R, Ramesh S, Senthilkumaar J. Machining performance study on metal matrix composites-a response surface methodology approach. *American Journal of Applied Sciences*. 2012;9(4):478-83.
8. Manna A, Bhattacharayya B. A study on machinability of Al/SiC-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;140(1):711-6.