



# Sensitivity Analysis and Optimization of Material Removal Rate and Surface Quality in Aluminum Matrix Composite

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Tahmasbi V.<sup>1\*</sup>,  
Baghi M.H.<sup>1</sup>,  
Aeinehbandy S.<sup>1</sup>,  
Farahani A.S.<sup>1</sup>,

### How to cite this article

Tahmasbi V, Baghi M H, Aeinehbandy S, Farahani A S. Sensitivity Analysis and Optimization of Material Removal Rate and Surface Quality in Aluminum Matrix Composite. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(07):395-404.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering Arak University Of Technology, Arak, Iran

### \*Correspondence

Address: Department Of Mechanical Engineering Arak University Of Technology, Arak, Iran  
tahmasbi@arakut.ac.ir

### Article History

Received: February 12, 2023  
Accepted: June 06, 2023  
ePublished: August 16, 2023

## ABSTRACT

Today, various military, aerospace, automotive, etc. industries need materials with a high strength-to-weight ratio. The use of metal-based composite materials, especially aluminum-based composites, has increased greatly. Machining is needed to achieve high dimensional accuracy in products made with aluminum-based composites. Due to the presence of reinforcing material such as silicon carbide, machining of this type of material is difficult. Therefore, it is important to study the parameters affecting the machining of aluminum-based composites. In this study, the effect of spindle speed, feed rate, depth of cut and percentage of reinforcing particles were discussed using experimental and statistical test methods. The responses of surface roughness and material removal rate were investigated. The behavior of the input parameters on the responses of the process has been carefully investigated quantitatively and qualitatively. Answers have also been optimized. According to the obtained results, the spindle speed has the greatest effect on the surface roughness. Also, feed rate 33%, spindle speed 28%, depth of cut 26% and the percentage of reinforcing particles 13% have an effect on the chipping rate.

**Keywords** Milling, Aluminium Matrix Composite, Sensitivity Analysis, Material Removal Rate, Surface Roughness

## CITATION LINKS

1- Machining of aluminium based metal matrix composites. 2- Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools. 3- Investigation on the optimal machining of Mg-based composites considering surface roughness, ... 4- Grey-fuzzy algorithm to optimise machining parameters in drilling of hybrid metal matrix composites. 5- Study of tool wear and surface roughness in machining of ... 6- Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters ... 7- Surface roughness prediction for CNC End milling, materials and processes quality control manufacturing. 8- Electrical discharge machining of metal matrix composite AZ91 magnesium alloy and investigation and optimization ... 9- Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in turning by using grey relational analysis. 10- Experimental investigation and multi-objective optimization of Nd: YAG laser micro-turning process of ... 11- Optimizing single point diamond turning for mono-crystalline germanium using grey relational analysis. 12- Multi-objective process optimization to improve surface integrity on turned surface of Al/SiCp metal matrix composites using grey relational analysis. 13- Experimental study of surface integrity during end milling of Al/SiC particulate metal-matrix composites. 14- Analytical model of workpiece temperature in end milling in-situ TiB<sub>2</sub>/7050Al metal matrix composites. 15- Study of cutting force and surface roughness in Ball nose end milling of ... 16- Experimental investigation of surface integrity and multi-objective optimization .... 17- Study on tool wear and surface roughness in machining of particulate aluminum metal matrix composite-response surface methodology approach. 18- Experimental investigation of machinability characteristics and multi-response optimization of end milling in aluminium composites using RSM based grey relational analysis. 19- Empirical model-building and response surfaces. 20- Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. 21- Sensitivity analysis of nano-contact mechanics models in manipulation of biological cell. 22- Fundamentals of metal machining and machine tools. [23- Principles of machining and tools

## آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی نرخ براده برداری و کیفیت سطح در فرزکاری کامپوزیت پایه آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده Sic

وحید طهماسبی<sup>۱\*</sup>، محمدحافظ باقی<sup>۲</sup>، سپهر آئینه بندی<sup>۳</sup>، امین سوسن آبادی فراهانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

<sup>۴</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

### چکیده

امروزه به علت نیاز روزافزون صنایع مختلف نظامی، هوافضا، خودروسازی و... به مواد با نسبت استحکام به وزن بالا، استفاده از مواد کامپوزیت پایه فلزی، به خصوص کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. ماشین‌کاری جهت نیل به دقت ابعادی بالا جزء جدایی‌ناپذیر فرآیند تولید محصولات ساخته شده با کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی می‌باشد. به دلیل وجود ماده تقویت‌کننده همچون کاربید سیلیسیوم و سایر ذرات ساینده با سختی بالا، ماشین‌کاری این دسته از مواد همواره با چالش‌های فراوانی روبه‌رو می‌گردد. لذا مطالعه پارامترهای مؤثر بر ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی امری ضروری است. در این مطالعه به اثر سرعت دوران اسپیندل، سرعت پیشروی، عمق برش و درصد ذرات تقویت‌کننده با استفاده از روش‌های آزمایش تجربی و آماری پرداخته شده است و پاسخ‌های زبری سطح و نرخ براده برداری موردبررسی دقیق قرار گرفته است. در این مقاله با بهره‌گیری از یک مطالعه روشمند شامل مدلسازی آماری به روش سطح پاسخ و استخراج معادلات رگرسیون، روش تحلیل حساسیت آماری سوبل و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم درینگر، رفتار متغیرهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی به صورت کمی و کیفی مورد مطالعه قرار گرفته است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده سرعت دوران اسپیندل بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح را دارد. همچنین پیشروی ۳۳٪، سرعت دوران اسپیندل ۲۸٪، عمق برش ۲۶٪ و درصد ذرات تقویت‌کننده ۱۳٪ بر روی نرخ براده برداری تأثیرگذار هستند.

**کلیدواژه‌ها:** فرزنی کاری، کامپوزیت پایه آلومینیومی، آنالیز حساسیت، نرخ براده برداری، زبری سطح

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

\* نویسنده مسئول: tahmasbi@arakut.ac.ir

### ۱- مقدمه

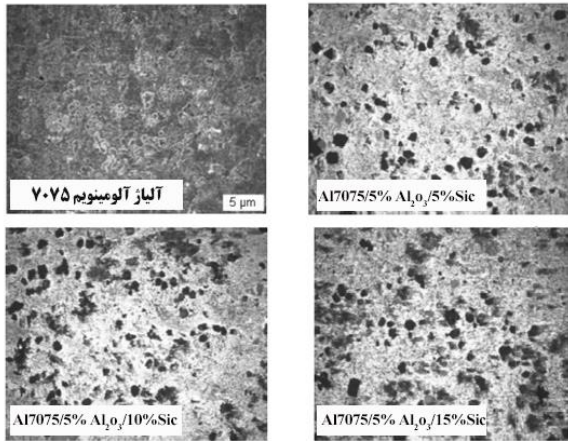
استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنعت به‌ویژه صنایع خودروسازی، هوابیماسازی و نظامی کاربرد گسترده‌تری پیدا کرده است و به‌عنوان جایگزینی برای آلیاژهای فلزی متداول عمل می‌کنند. از دیرباز تمام کشورهای صنعتی به دنبال موادی با نسبت استحکام به وزن بالا بوده‌اند که بتوانند علاوه بر کاهش هزینه مواد اولیه، باعث کاهش انرژی مصرفی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی شوند [1, 2]. کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی به دلیل نسبت

استحکام به وزن بالا بسیار موردتوجه صنایع مختلف می‌باشند [3]. هنگامی که تولید محصولات با دقت و کیفیت بالا مدنظر باشد، ماشین‌کاری یک بخش جدایی‌ناپذیر فرآیند تولید قطعات فلزی است. تبدیل شکل نهایی این کامپوزیت‌ها به محصولات نهایی با تلورانس‌های مدنظر معمولاً با فرآیند ماشین‌کاری انجام می‌شود. لذا، شناخت دقیق پارامترهای مؤثر بر ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) بسیار مهم است [4]. محققان نشان دادند که کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل ماهیت سخت و ساینده ذرات تقویت‌کننده، داری قابلیت ماشین‌کاری خوبی نیستند [5]. واژه قابلیت ماشین‌کاری به معنای عملکرد مناسب فرآیند در مورد توان مصرفی برش، نرخ براده برداری (MRR)، پرداخت سطح و غیره است [6].

ماشین‌کاری با ابزار فرز انگشتی به‌طور گسترده در صنایع مختلف تولیدی از جمله بخش‌های هوافضا و خودرو استفاده می‌شود، جایی که دقت و کیفیت عوامل مهمی در تولید شیارها، سطوح و قالب‌های دقیق است [7, 8]. به‌طورمعمول، پارامترهای فرزکاری با ابزار فرز انگشتی بر اساس آزمایش‌های تجربی تعیین می‌شوند که هم زمان‌بر و هم پرهزینه هستند؛ بنابراین، نیاز به توسعه روش بهینه‌سازی برای کاهش تعداد آزمایش‌های تجربی وجود دارد.

زبری سطح و نرخ براده برداری عوامل مهمی در ارزیابی قابلیت ماشین‌کاری است. بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر زبری سطح قطعه کار و نرخ براده برداری مانند سرعت برش، سرعت پیشروی، شعاع نوک ابزار و... توسط محققان انجام شده است [9-12]. مطابق با مطالعات صورت پذیرفته توسط محققان با افزایش پیشروی نرخ براده برداری و زبری سطح افزایش می‌یابد [13]. همچنین تحقیقات دیگر نشان داد با زیاد شدن عمق برش ضخامت براده تغییر شکل یافته بیشتر شده و در نتیجه نرخ براده برداری افزایش پیدا می‌کند [14]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات با افزایش سرعت برشی کیفیت سطح نهایی بدتر شده است [15]. این گزارش با مطالعات دیگری که در این حوزه صورت پذیرفته است متناقض است [16, 17].

تلاش‌های متنوعی زمینه فرآیند فرزکاری با ابزار فرز انگشتی صورت پذیرفته است، اما با این‌حال مطالعات نسبتاً محدودی در خصوص ماشین‌کاری و علی‌الخصوص فرزکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی انجام شده است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری مانند سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش و درصد ذرات تقویت‌کننده بر رفتار زبری سطح و نرخ براده برداری در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های Al7075-SiC-Al203 موردبررسی قرار گرفته است. روش آماری سطح پاسخ قادر است یک معادله رگرسیون مرتبه دوم به منظور مدلسازی و پیش‌بینی کمی و کیفی رفتار پارامترهای ورودی بر روی رفتار پاسخ‌های خروجی ارائه نماید. به همچنین استفاده از روش الگوریتم درینگر به منظور بهینه‌سازی و استخراج مقادیر ورودی به منظور دستیابی به



شکل ۱) تصویر ریزساختار نمونه‌های اولیه با درصدهای مختلف

در این مطالعه، از روش سطح پاسخ برای DOE استفاده گردید. به‌جای انجام آزمایش‌های تصادفی، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با شرایط برش خاص انجام شد تا بتوان فرآیند را برای پارامترهای مختلف پاسخ به‌صورت جداگانه یا ترکیبی تجزیه و تحلیل کرد. عوامل متعددی مانند سرعت، پیشروی، عمق برش، هندسه ابزار، جنس قطعه کار/ابزار و شرایط برش بر ویژگی‌های ماشین‌کاری تأثیر می‌گذارند. چهار عامل کنترل‌کننده یعنی سرعت اسپیندل، پیشروی، عمق برش و درصد وزنی SiC انتخاب شدند. این عوامل بر اساس سایر مطالعات انجام شده توسط محققان در این حوزه و پیشنهاد‌های ایشان برای انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری انتخاب شده‌اند [6, 20]. جدول ۱ پارامترهای ماشین‌کاری مورد مطالعه و سطوح آن‌ها را فهرست می‌کند. مقادیر بر اساس تنظیمات ماشین‌کاری با ابزارهای پوشش‌داده شده کاربردی که معمولاً در صنایع برای Al7075 استفاده می‌شود انتخاب شد.

### ۳- روش‌های تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت ابزاری مناسب جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین میزان اثر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی سیستم‌ها در مسائل مهندسی می‌باشد. تحلیل حساسیت را می‌توان به چند بخش طبق بندی نمود که برحسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا برحسب شکل مدل، به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری طبقه‌بندی می‌شود.

روش ترسیمی: در این روش تحلیل حساسیت، حساسیت را در فرم‌هایی به‌صورت نمودار و جدول یا سطوح نمایش می‌دهند. از روش گرافیکی به‌طور کلی برای نشان دادن تغییرات پاسخ‌های خروجی تحت تأثیر متغیرهای ورودی‌ها استفاده می‌شود.

روش ریاضیاتی: در روش ریاضیاتی، حساسیت را از روی تغییرات پاسخ خروجی برحسب تغییرات فاکتورهای ورودی به دست می‌آورند. این روش‌ها شامل محاسباتی هستند که به بررسی پاسخ خروجی به ازای مقدار اندکی تغییر در ورودی می‌پردازند.

کمترین میزان زبری سطح و بیشترین میزان نرخ براده برداری ارائه گردیده است. همچنین با بهره‌گیری از روش تحلیل حساسیت سوپل میزان اثر تغییر کمی هر یک از پارامترهای ورودی بر روی پاسخ خروجی ارائه گردیده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

از آلیاژ آلومینیوم Al7075 به عنوان ماده زمینه مورد استفاده برای تهیه کامپوزیت‌ها استفاده شد. مواد تقویت‌کننده مورد استفاده آلومینا و کاربید سیلیکون بودند. ذرات کاربید سیلیکون مورد استفاده در اندازه ۶۳ میکرومتر و اندازه متوسط ذرات آلومینا ۴۵ میکرومتر است. چگالی ذرات Al2O3 بیشتر از SiC می‌باشد. نسبت Al2O3 به عنوان ۵٪ ثابت است، درصد وزنی SiC در سه سطح ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ تغییر می‌کند. سه نمونه از کامپوزیت با اندازه ۱۳۰ میلی‌متر × ۱۰۰ میلی‌متر × ۵۰ میلی‌متر با فرآیند ریخته‌گری به هم زدنی ساخته شد. توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در ماده زمینه را مطابق با شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد [18].

### ۲-۲- ابزار

عملیات فرزکاری در یک دستگاه فرز یونیورسال BHARAT FRITZ WERNER BF-1 با ظرفیت موتور ۲/۲ کیلووات انجام شد. نمونه‌ها بر روی دینامومتر KISTLER بر پایه مبدل پیزوالکتریک قرار گرفتند. برای انجام تست‌های ماشین‌کاری از اینسرت‌های کاربیدی روکش‌دار (AXMT 0903 PER-EML TT8020 Make: Taegu Tec) استفاده شد. همچنین از ابزار گیر با نام TE90AX 220-09-L با طول و قطر نگه‌دارنده ابزار به ترتیب ۱۷۰ میلی‌متر و ۲۰ میلی‌متر استفاده گردید. شکل ۲ نمای کلی فرآیند انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری و نمونه ابزار گیر و اینسرت مورد استفاده را نشان می‌دهد.

### ۲-۳- اندازه‌گیری زبری سطح

برای اندازه‌گیری متوسط زبری سطح (Ra) از دستگاه زبری سنج قابل حمل MITUTOYO SJ210 استفاده گردید. اندازه‌گیری‌ها سه بار در سه مکان مختلف روی سطح نهایی تکرار شد و میانگین این سه مقدار Ra در نظر گرفته شد.

### ۲-۴- محاسبه نرخ براده برداری

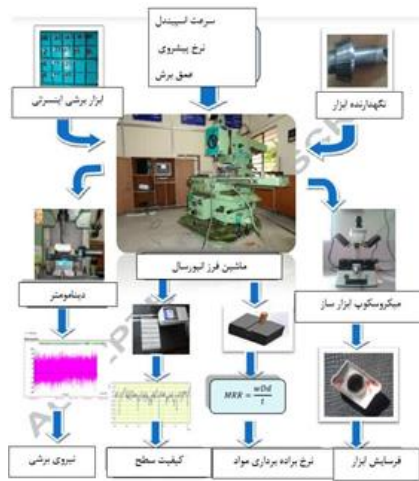
نرخ براده برداری مواد با معادله (۱) محاسبه شد.

$$MRR = \frac{wDd}{t} \quad (1)$$

w عرض نمونه (۱۰۰ میلی‌متر)، D قطر ابزار (۲۰ میلی‌متر)، d عمق برش، (میلی‌متر)، t زمان برداشتن مواد (دقیقه) می‌باشد.

### ۲-۵- طراحی آزمایش

استفاده از طراحی آزمایش‌ها (DOE) می‌تواند برای کاهش تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای به دست آوردن پاسخ مناسب به یک پرسش، استفاده شود. روش سطح پاسخ (RSM) یک ابزار خوب به دلیل دقت در مدل‌سازی و اعتبارسنجی تجربی می‌باشد [19].



شکل ۲) نمای کلی فرآیند انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری و اینسرت و ابزارگیر مورد استفاده

دست می‌آیند ( $S_i = \frac{V_i}{V}$ ) شاخص حساسیت مرتبه‌ی اول،  $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$  شاخص حساسیت مرتبه‌ی دوم و ...). شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه‌ی مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید [21].

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (3)$$

#### ۴- نتایج و بحث

آزمایش‌ها در ۲۷ سطح به دست آمده از طراحی آزمایش انجام شده است که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. جهت افزایش دقت نتایج آزمایش، هرکدام از آزمایش‌ها را ۳ مرتبه تکرار کرده و میانگین به دست آمده به عنوان زبری سطح و نرخ براده برداری ثبت شده است [18]. همچنین جهت جلوگیری و حذف خطاهای پیش‌بینی نشده، انجام آزمایش‌ها به صورت تصادفی صورت پذیرفته است. از نرم‌افزار مینی تب نسخه ۲۰ برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین به دست آوردن ضرایب معادله ریاضی رگرسیون حاکم بر آزمایش استفاده شده است. نتایج حاصل از آنالیز واریانس در جدول ۳ و ۴ به ترتیب برای زبری سطح و نرخ براده برداری آمده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر پارامترهای معادله رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش به‌سزایی دارد. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها میزان اثر فاکتورهای ورودی و برهمکنش‌های آن‌ها را بر روی پاسخ خروجی مشخص می‌نماید. مقدار خطای مجموع مربعات (press) مدل منطبق شده بر داده‌ها میزان دقت نوع معادله رگرسیون حاکم بر مدل را مشخص نموده و در مبحث طراحی آزمایش‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است.

جدول ۱) پارامترهای آزمایش

فاکتورهای ورودی آزمایش	۱	۰	-۱
A: سرعت اسپیندل (rpm)	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰
B: نرخ پیشروی (mm/rev)	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲
C: عمق برش (mm)	۲	۱/۵	۱
D: درصد SIC	۱۵	۱۰	۵

روش آماری: در این روش تحلیل حساسیت به صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی متغیرهای ورودی سیستم می‌پردازد، سپس تأثیر این فاکتورهای ورودی را بر پاسخ سیستم ارزیابی می‌کند. در این روش‌ها می‌توان اثر متقابل بین چندین فاکتور مختلف ورودی را بر روی پاسخ سیستم مشخص نمود. تحلیل حساسیت آماری سوپل یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد.

#### ۳-۱- روش تحلیل حساسیت سوپل

در این روش برای مدل تعریف شده با تابع  $Y = f(X)$  خروجی مدل و واریانس  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  بردار پارامترهای ورودی می‌باشد و واریانس خروجی مدل  $(V)$  به صورت مجموع واریانس‌های هر جمله تجزیه شده به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1, \dots, n} \quad (2)$$

که در آن،  $V_i$  تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی  $V_{ij} (= V_{ij})$  و  $V_{1, \dots, n}$  تا  $x_i (V_i = V[E(Y|x_i)])$  و  $V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i -$  برهم‌کنش بین  $n$  فاکتور را نشان می‌دهند. شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به

جدول ۲) بررسی اثر فاکتورهای ورودی بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری

شماره آزمایش	سرعت اسپیندل A= (دور بر دقیقه)	نرخ پیشروی B= (میلی‌متر بر دور)	عمق برش C= (میلی‌متر)	درصد وزنی D= (درصد)	زبری سطح (میکرومتر)	نرخ براده برداری (میلی‌متر مکعب بر دقیقه)
۱	۱۰۰۰	۰/۰۳	۱	۱۰	۰/۵۰۱	۷۵۹/۴۹
۲	۱۵۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۵	۰/۴۲۰	۸۰۵/۹۷
۳	۲۰۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۵	۰/۵۰۲	۱۲۵۸/۸
۴	۱۵۰۰	۰/۰۳	۲	۱۵	۰/۵۹۹	۸۱۲/۶۱
۵	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱	۵	۰/۵۲۳	۷۵۶/۳۰
۶	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۰	۰/۵۶۲	۲۱۴۸/۹
۷	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۰	۰/۵۶۲	۲۱۴۸/۹
۸	۲۰۰۰	۰/۰۳	۱	۱۰	۰/۵۰۲	۹۵۶/۳۰
۹	۱۵۰۰	۰/۰۴	۱	۱۰	۰/۵۸۶	۱۴۰۶/۳
۱۰	۱۰۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۵	۰/۵۶۲	۸۳۴/۴۵
۱۱	۱۵۰۰	۰/۰۳	۲	۵	۰/۵۳۴	۱۵۰۶/۳
۱۲	۱۵۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۱۵	۰/۵۶۲	۸۰۵/۹۷
۱۳	۲۰۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۵	۰/۶۰۵	۲۱۱۱/۱
۱۴	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۰	۰/۶۰۰	۲۱۴۸/۹
۱۵	۱۵۰۰	۰/۰۲	۲	۱۰	۰/۵۴۲	۱۰۴۳/۵
۱۶	۱۵۰۰	۰/۰۴	۱/۵	۱۵	۰/۶۳۸	۱۱۲۶/۰
۱۷	۱۵۰۰	۰/۰۴	۲	۱۰	۰/۶۵۴	۲۷۹۰/۷
۱۸	۲۰۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۱۰	۰/۵۸۷	۱۳۰۳/۶
۱۹	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱	۱۵	۰/۵۱۴	۷۶۲/۷۱
۲۰	۲۰۰۰	۰/۰۳	۲	۱۰	۰/۶۱۰	۱۴۶۳/۴
۲۱	۱۵۰۰	۰/۰۴	۱/۵	۵	۰/۵۲۱	۲۱۰۹/۴
۲۲	۱۰۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۱۰	۰/۵۲۱	۶۹۸/۸۲
۲۳	۲۰۰۰	۰/۰۴	۱/۵	۱۰	۰/۶۵۴	۲۱۶۰/۰
۲۴	۱۰۰۰	۰/۰۴	۱/۵	۱۰	۰/۵۷۵	۹۲۵/۹۸
۲۵	۱۰۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۵	۰/۴۱۲	۱۰۸۸/۷
۲۶	۱۵۰۰	۰/۰۲	۱	۱۰	۰/۵۳۴	۷۳۴/۱۳
۲۷	۱۰۰۰	۰/۰۳	۲	۱۰	۰/۵۰۱	۸۱۲/۶۱

جدول ۴) آنالیز واریانس مدل اصلاح‌شده نرخ براده برداری در ماشین‌کاری کامپوزیت آلومینیومی

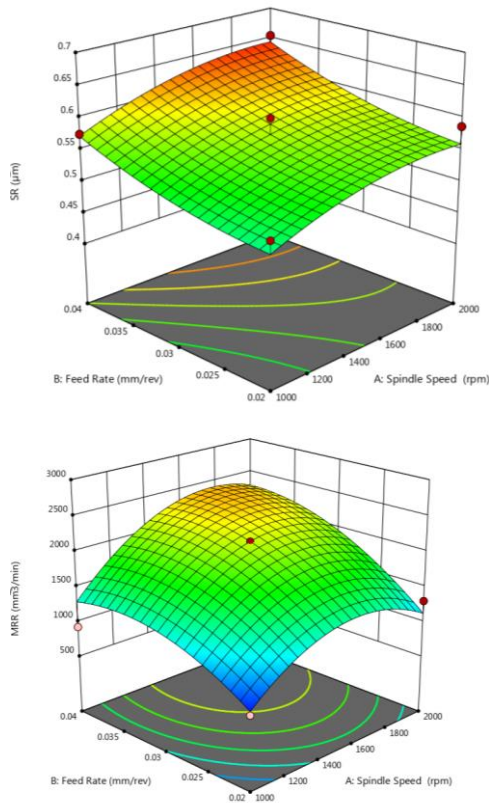
ترم ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۱۱	۸۳۸۳۹۶۳	۸۳۸۳۹۶۳	۹/۰۳	۰/۰۰۰
A=سرعت اسپیندل	۱	۱۴۲۳۵۷۷	۱۴۲۳۵۷۷	۱۶/۸۶	۰/۰۰۱
B=نرخ پیشروی	۱	۲۱۸۹۹۹۰	۲۱۸۹۹۹۰	۲۵/۹۴	۰/۰۰۰
C=عمق برش	۱	۷۷۷۱۸۷	۷۷۷۱۸۷	۹/۲۱	۰/۰۰۸
D=درصد وزنی	۱	۶۴۲۷۵۱	۶۴۲۷۵۱	۷/۶۱	۰/۰۱۵
A2	۱	۲۹۲۱۴۱	۱۲۶۷۵۴۱	۱۵/۰۱	۰/۰۰۱
B2	۱	۲۹۵۷	۴۶۵۲۹۲	۵/۵۱	۰/۰۳۳
C2	۱	۸۶۴۸۵۹	۱۶۶۴۳۰۳	۱۹/۷۱	۰/۰۰۰
D2	۱	۱۵۳۷۲۵۴	۱۵۳۷۲۵۴	۱۸/۲۱	۰/۰۰۱
C × B	۱	۲۸۸۹۲۲	۲۸۸۹۲۲	۳/۴۲	۰/۰۸۴
D × B	۱	۲۴۱۷۶۹	۲۴۱۷۶۹	۲/۸۶	۰/۱۱۱
D × C	۱	۱۲۲۵۳۵	۱۲۲۵۳۵	۱/۴۵	۰/۲۴۷

همچنین معادله (۴) و (۵) نشان‌دهنده معادله رگرسیون اصلاح‌شده مدل می‌باشد. 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

جدول ۳) آنالیز واریانس مدل اصطلاح شده زبری سطح در ماشین‌کاری کامپوزیت آلومینیومی

ترم ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	6	0.071225	0.011871	10.26	0.000
A=سرعت اسپیندل	1	0.012545	0.012545	10.84	0.004
B=نرخ پیشروی	1	0.017787	0.017787	15.37	0.001
C=عمق برش	1	0.006533	0.006533	5.65	0.028
D=درصد وزنی	1	0.010920	0.010920	9.44	0.006
D × D	1	0.007437	0.007437	6.43	0.020
D × A	1	0.016002	0.016002	13.83	0.001

هرچه این مقدار در مدل‌های قابل انطباق بر داده‌ها کمتر باشد مدل مربوطه دارای خطای پیش‌بینی کمتری است و در این تحقیق کمترین عدد این مؤلفه برای مدل رگرسیون مرتبه دوم کامل به دست آمد. به‌منظور اصلاح مدل فوق، پارامترهای غیر مؤثر حذف شده است و آنالیز واریانس آن در جدول ۳ و ۴ قابل مشاهده می‌باشد؛



شکل ۳) نمودار سه بعدی زبری سطح و نرخ براده برداری بر حسب سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی

بیشتر ابزار باعث به وجود آمدن ارتعاش و ازدیاد نیروهای ماشین کاری خواهد شد. البته در کامپوزیت با ۱۵ درصد ذرات تقویت کننده ما شاهد کاهش مقدار نیروی ماشین کاری بودیم که می تواند به علت عدم توزیع یکنواخت ذرات در زمینه آلومینیومی اتفاق افتاده باشد.

**۴-۱-۲- تأثیر نرخ پیشروی بر کیفیت سطح و نرخ براده برداری**  
با افزایش نرخ پیشروی با توجه به شکل ۳ به دلیل افزایش اصطکاک بین ابزار و سطح براده و همچنین افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته زبری سطح ماشین کاری شده افزایش پیدا کرده و کیفیت سطح نهایی پایین می آید ولی از طرفی با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و تبدیل نوع ماشین کاری از پرداخت کاری به خشن تراشی حجم براده برداری افزایش یافته و راندمان تولید بیشتر خواهد شد.

**۴-۱-۳- تأثیر عمق براده برداری بر کیفیت سطح و نرخ براده برداری**

در صورتی که عمق ماشین کاری بیشتر شود نیروهای ماشین کاری افزایش یافته و بالطبع ارتعاشات ابزار بیشتر می شود. ارتعاش زیاد ابزار باعث سایش و تغییر هندسه ابزار و در نتیجه افزایش زبری و کاهش کیفیت سطح می شود.

بر روی زبری سطح از دقت بالایی برخوردار بوده و مطمئن می باشد. مقدار قابلیت اطمینان برای مدل پیشنهادی زبری سطح ۸۵/۵٪ و برای مدل پیشنهادی نرخ براده برداری ۸۶/۸۹٪ است.

$$\begin{aligned} \text{Surface roughness}(\mu\text{m}) = & -0.290 \\ & + 0.000318 A + 3.850B + 0.0467C + 0.0707 \\ & D - 0.001336 D^2 \\ & - 0.000025 A^2 \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} \text{MRR}(\text{mm}^3/\text{min}) = & -14794 + 6.54 A + 188483 B + 6300 C \\ & + 636 D - 0.001950 A^2 + 2953679 B^2 \\ & - 2234 C^2 - 21.48 D^2 + 53751 B^3 \\ & - 4917 B^2 D - 70.0 C^3 \end{aligned} \quad (۵)$$

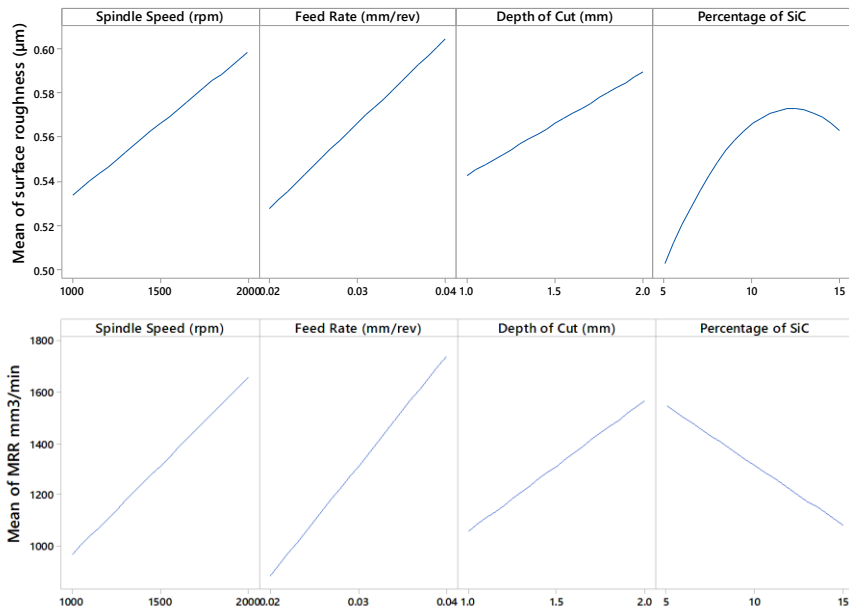
**۴-۱-۱- تحلیل حساسیت پارامترها و بررسی اثر متغیرهای ورودی در رفتار زبری سطح و نرخ براده برداری**

در این بخش با توجه به مدل سازی صورت گرفته و انطباق آن بر داده های آزمایش ها و با در نظر گرفتن مؤثر در مدل، سعی بر آن است تا نقش سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش و درصد Sic در رفتار زبری سطح و نرخ براده برداری تبیین گردد. بدین منظور ضمن بررسی میزان حساسیت هر یک از پارامترهای ورودی در پاسخ سیستم، به بررسی و تحلیل پارامترهای اصلی بر روی رفتار زبری سطح و نرخ براده برداری شده است. نمودارهای شکل ۳ و ۴ رفتار زبری سطح و نرخ براده برداری را بر اساس متغیرهای ورودی فرآیند طبق مدل سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ را ارائه می دهند.

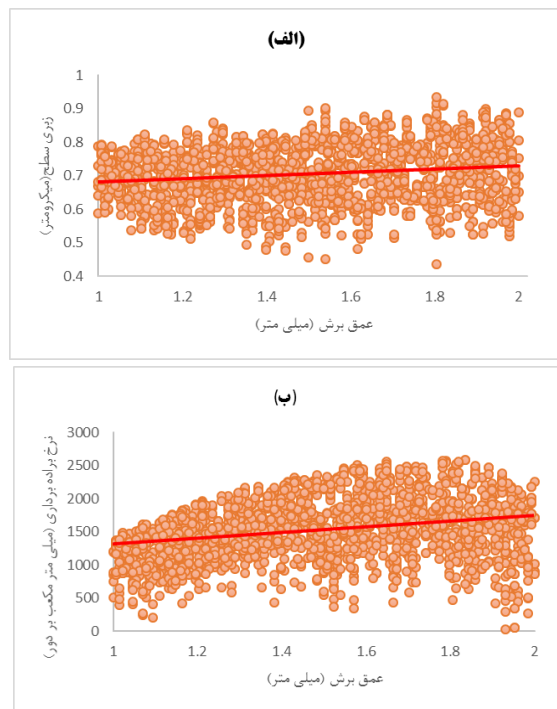
**۴-۱-۱-۱- تأثیر سرعت برشی بر کیفیت سطح و نرخ براده برداری**  
مطابق با شکل ۵ با افزایش سرعت برشی زبری سطح افزایش پیدا می کند. در حین فرآیند ماشین کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی با افزایش سرعت برشی، دمای بسیار زیادی در منطقه برشی ایجاد می گردد که سبب سایش سریع ابزار و در نتیجه کند شدن لبه برش و تغییر کردن هندسه ابزار می شود. ساییده شدن لبه ابزار و به هم خوردن زوایای هندسی اینسرت، باعث افزایش زبری و کاهش کیفیت سطح نهایی خواهد شد. مطابق معادله (۶)، تغییرات نرخ براده برداری با پارامترهای تعداد دوران اسپیندل، پیشروی و عمق برش رابطه مستقیم دارد.

$$\text{MRR} = N \times Z \times f_z \times a_p \times a_e \quad (۶)$$

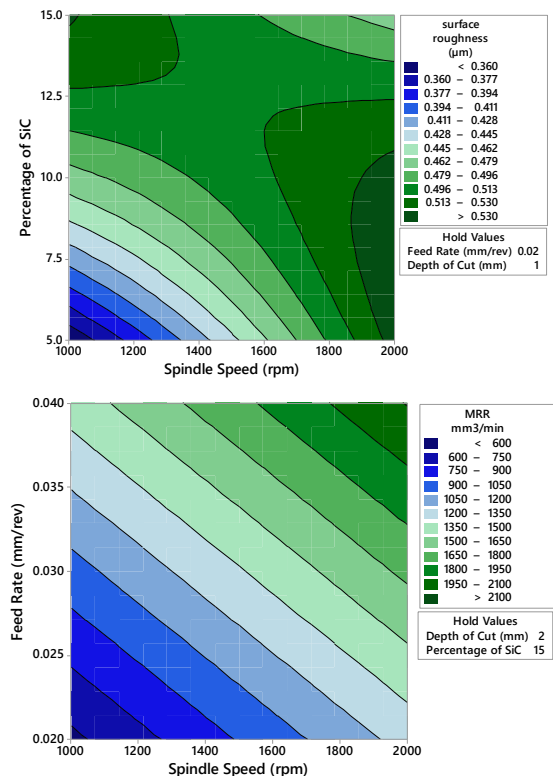
در این معادله، MRR نرخ براده برداری، N سرعت دوران اسپیندل بر حسب دور بر دقیقه،  $f_z$  نرخ پیشروی به ازای یک لبه برنده، Z تعداد لبه برنده تیغچه،  $a_p$  عمق برش شعاعی و  $a_e$  عمق برش محوری است [22]. از رابطه ۶ و نمودارهای شکل های ۳ و ۴ با افزایش سرعت دوران اسپیندل نرخ براده برداری نیز افزایش خواهد یافت.



شکل ۴) اثر پارامترهای اصلی الف) بر روی رفتار زبری سطح ب) بر روی رفتار نرخ براده برداری



شکل ۶) نمودار چگونگی رفتار نرخ عمق برش الف) بر روی رفتار زبری سطح ب) بر روی رفتار نرخ براده برداری



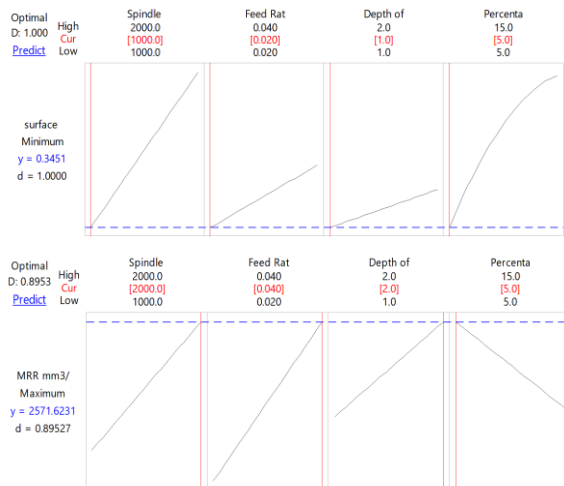
شکل ۵) نمودار چگونگی رفتار نرخ سرعت اسپیندل الف) بر روی رفتار زبری سطح ب) بر روی رفتار نرخ براده برداری

#### ۴-۱-۴- تأثیر درصد وزنی بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری

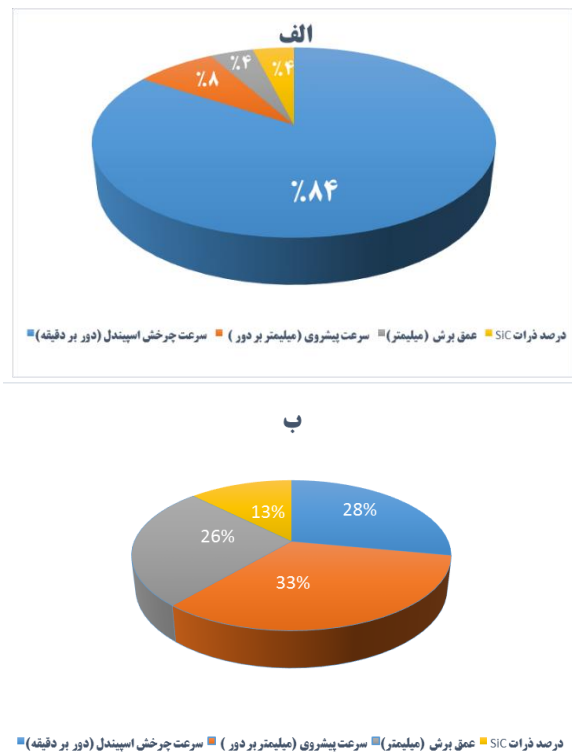
مطابق با شکل ۷ با افزایش درصد وزنی ذرات Sic کیفیت زبری سطح افزایش پیدا می‌کند. ذرات تقویت‌کننده Sic بسیار سخت و ساینده هستند. در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی ابزار برشی با این ذرات برخورد کرده و در اثر این برخورد بر روی سطح ابزار خراش ایجاد شده و ابزار دچار سایش خواهد شد.

به‌صورت معمول تأثیر عمق برش بر کیفیت سطح پایین است لذا می‌توان برای افزایش نرخ براده برداری عمق برش را تا چندین برابر سرعت پیشروی انتخاب کرد [23]. افزایش زبری سطح و نرخ براده برداری با زیاد شدن عمق برش را می‌توان در نمودارهای شکل ۶ مشاهده نمود.

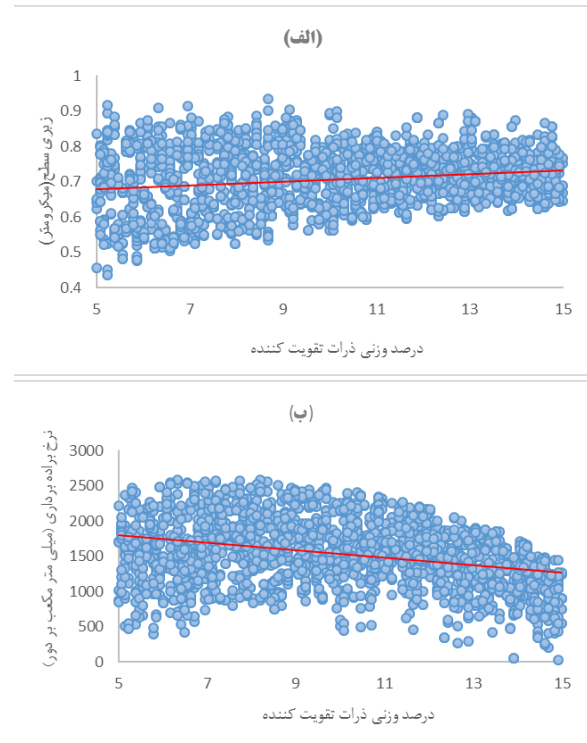
درصدی و پس از آن نرخ پیشروی با ۸ درصد و عمق برش با ۴ درصد و درصد ذرات تقویت کننده SIC با ۴ درصد تأثیرگذار هستند. همچنین به طور کلی در بررسی حساسیت رفتار نرخ براده برداری در فرآیند فرزکاری کامپوزیت آلومینیوم سرعت اسپیندل دارای اثر ۳۳ درصدی و پس از آن نرخ پیشروی با ۲۸ درصد، عمق برش با ۲۶ درصد و ذرات تقویت کننده با ۱۳ درصد تأثیرگذار می باشند.



شکل ۸) بهینه سازی صورت گرفته به منظور الف) کمترین مقدار زبری سطح ب) بیشترین نرخ براده برداری



شکل ۹) نمودار درصد تأثیر پارامترهای فرآیند الف) بر روی رفتار زبری سطح ب) بر روی رفتار نرخ براده برداری



شکل ۷) نمودار چگونگی رفتار درصد ذرات تقویت کننده الف) بر روی رفتار زبری سطح ب) بر روی رفتار نرخ براده برداری

با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده تعداد برخوردهای ذرات تقویت کننده و ابزار بیشتر شده و در نهایت باعث کاهش کیفیت سطح می شود. همچنین به علت خروج ذرات تقویت کننده از روی سطح قطعه کار خلل و فرجی بر روی سطح ایجاد می شود که این امر هم مزید بر کاهش کیفیت سطح قطعه کار خواهد شد.

#### ۴-۱-۵- بهینه سازی فرآیند به منظور رسیدن به حداقل زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری

با توجه به مطالعاتی که در خصوص رفتار زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری در هنگام ماشین کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی انجام شده است. در این بخش بهینه سازی فرآیند به منظور رسیدن به زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری صورت گرفته است. با در نظر گرفتن حد کمینه سایش ابزار در مدل منطبق شده بر آزمایش ها و لحاظ نمودن حد مطلوبیت، بهینه سازی صورت گرفته در شکل ۸ ارائه شده است.

#### ۴-۲- جمع بندی آنالیز سوبل در بررسی حساسیت پارامترهای مؤثر در رفتار زبری سطح

روش آماری آنالیز حساسیت سوبل، نسبت به آنالیز واریانس این برتری را دارد که علاوه بر مشاهده تأثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی، می توان تأثیر کمی و دقیق این پارامترها را به طور هم زمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تأثیرگذاری بالا و پارامترهای کم اثر را به طور دقیق شناسایی نمود. مطابق با شکل ۹ در بررسی حساسیت رفتار زبری سطح در فرزکاری کامپوزیت آلومینیوم سرعت اسپیندل دارای اثر ۸۴



## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا با روش طراحی آزمایش‌ها و استفاده از روش سطح پاسخ یک مدل رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش بینی و تحلیل کمی فرآیند مورد استفاده قرار گرفت. سپس با بهره گیری از روش آنالیز حساسیت میزان اثرگذاری هر یک از متغیرهای ورودی به صورت کمی و کیفی بر روی فاکتورهای خروجی مشخص شده است، استفاده از این دو ابزار میزان بهره‌وری در دقت و صحت و افزایش هرچه بیشتر کیفیت در فرایند افزایش می‌دهد. در این پژوهش میزان تأثیر هر یک از پارامترهای سرعت دوران اسپیندل، عمق برش، سرعت پیشروی و درصد ذرات تقویت‌کننده بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری به روش آزمایش تجربی و آنالیز حساسیت سوبل مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج به دست آمده به شرح ذیل است.

- ۱- سرعت دوران اسپیندل با ۸۴٪ اثرگذارترین عامل بر روی زبری سطح در حین ماشین‌کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده Sic است. بعد از آن پیشروی با ۸٪ و عمق برش و درصد ذرات تقویت‌کننده با هر کدام با ۴٪ از عوامل مؤثر بر زبری سطح هستند.
- ۲- با افزایش دوران اسپیندل، عمق برش و سرعت پیشروی زبری سطح قطعه کار افزایش پیدا می‌کند.
- ۳- پیشروی ۳۳٪، سرعت دوران اسپیندل ۲۸٪، عمق برش ۲۶٪ و درصد ذرات تقویت‌کننده ۱۳٪ بر روی نرخ براده برداری تأثیرگذار هستند.
- ۴- از تجزیه و تحلیل، بهترین ترکیب از مقادیر برای به حداقل رساندن هم زمان زبری سطح و به حداکثر رساندن نرخ براده برداری پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارت‌اند از سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه، تغذیه ۰/۰۳ میلی‌متر در دور، عمق برش ۱ میلی‌متر و درصد وزنی ۵ درصد SiC.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله در هیچ نشریه ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** این مقاله تعارض منافی با سایر محققان ندارد.

**منابع مالی:** منابع مالی در این پژوهش استفاده نشده است.

## منابع

- 1- Barnes S, Pashby IR. Machining of aluminium based metal matrix composites. Applied composite materials. 1995 Jan;2:31-42.
- 2- Durante S, Rutelli G, Rabezana F. Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools. Surface and Coatings Technology. 1997 Oct 1;94:632-40.
- 3- Asgari A, Sedighi M. Investigation on the optimal machining of Mg-based composites considering surface roughness, tool life, cutting forces, and productivity. Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2023 Mar;237(5):1139-52.

4- Rajmohan T, Palanikumar K, Prakash S. Grey-fuzzy algorithm to optimise machining parameters in drilling of hybrid metal matrix composites. Composites Part B: Engineering. 2013 Jul 1;50:297-308.

5- Kilickap E, Cakir O, Aksoy M, Inan A. Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite. Journal of Materials Processing Technology. 2005 May 15;164:862-7.

6- Chabbi A, Yaltese MA, Meddour I, Nouioua M, Mabrouki T, Girardin F. Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters in turning of Polyoxymethylene polymer (POM C) using RSM and desirability function. Measurement. 2017 Jan 1;95:99-115.

7- Mike SL, Joseph C, Chen LM. Surface roughness prediction for CNC End milling, materials and processes quality control manufacturing. J. Ind. Technol. 1998;15(1):1999.

8- Safarabadi 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 Aug 23;9(6):59-69.

9- Abhang LB, Hameedullah M. Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in turning by using grey relational analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012 Nov;63:13-24.

10- Kibria G, Doloi B, Bhattacharyya B. Experimental investigation and multi-objective optimization of Nd: YAG laser micro-turning process of alumina ceramic using orthogonal array and grey relational analysis. Optics & Laser Technology. 2013 Jun 1;48:16-27.

11- Goel B, Singh S, Sarepaka RV. Optimizing single point diamond turning for mono-crystalline germanium using grey relational analysis. Materials and Manufacturing Processes. 2015 Aug 3;30(8):1018-25.

12- Dabade UA. Multi-objective process optimization to improve surface integrity on turned surface of Al/SiCp metal matrix composites using grey relational analysis. Procedia CIRP. 2013 Jan 1;7:299-304.

13- Reddy NS, Kwang-Sup S, Yang M. Experimental study of surface integrity during end milling of Al/SiC particulate metal-matrix composites. Journal of materials processing technology. 2008 May 26;201(1-3):574-9.

14- Xiong Y, Wang W, Jiang R, Lin K. Analytical model of workpiece temperature in end milling in-situ TiB2/7050Al metal matrix composites. International Journal of Mechanical Sciences. 2018 Dec 1;149:285-97.

15- Jayakumar K. Study of cutting force and surface roughness in Ball nose end milling of vacuum hot pressed A356 alloy/SiCp metal matrix composite.

Materials Today: Proceedings. 2018 Jan 1;5(2):6526-33.

16- Shihab SK, Gattmah J, Kadhim HM. Experimental investigation of surface integrity and multi-objective optimization of end milling for hybrid Al7075 matrix composites. Silicon. 2021 May;13(5):1403-19.

17- Seeman M, Ganesan G, Karthikeyan R, Velayudham A. Study on tool wear and surface roughness in machining of particulate aluminum metal matrix composite-response surface methodology approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010 May;48:613-24.

18- Rajeswari B, Amirthagadeswaran KS. Experimental investigation of machinability characteristics and multi-response optimization of end milling in aluminium composites using RSM based grey relational analysis. Measurement. 2017 Jul 1;105:78-86.

19- Box GE, Draper NR. Empirical model-building and response surfaces. John Wiley & Sons; 1987.

20- Ozben T, Kilickap E, Cakır O. Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. Journal of materials processing technology. 2008 Mar 3;198(1-3):220-5.

21- Korayem MH, Rastegar Z, Taheri M. Sensitivity analysis of nano-contact mechanics models in manipulation of biological cell. Nanoscience and Nanotechnology. 2012;2(3):49-56.

22- Boothroyd G. Fundamentals of metal machining and machine tools. Crc Press; 1988 Nov 15.

23- دانشگاه صنعتی (no. 0). ر. محمدرضا، اصول ماشین‌کاری و ابزارشناسی - ۱۳۹۷ امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، مرکز نشر.