



# Statistical Modeling and Optimization of MRR And Surface Quality in Milling Aluminum Matrix Composite with Different Percentages of SiC



## ARTICLE INFO

### Authors

Tahmasbi V.<sup>1\*</sup>,  
Baghi MH.<sup>1</sup>,  
Aeinehbandi S.<sup>1</sup>

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

### \* Correspondence

Address:  
Tahmasbi@arakut.ac.ir

### How to cite this article

Tahmasbi V, Baghi MH, Aeinehbandi S. Statistical Modeling and Optimization of MRR and Surface Quality in Milling Aluminum Matrix Composite with Different Percentages of SiC. Modares Mechanical Engineering, Proceedings of 2<sup>nd</sup> Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):7-12.

## ABSTRACT

The use of aluminum with a reinforced coefficient to increase this material compared to aluminum is used in the automotive, aircraft, and locomotive industries. This article examines the parameters of the material removal rate (MRR) rate and surface quality in the machining process of composite aluminum in different percentages of SiC. It examines the machining characteristics of end milling operations to obtain minimum surface quality, cutting force, and chip removal rate with maximum material removal rate using gray relational analysis based on the response surface design method (RSM). Twenty-seven experimental runs were carried out based on the response surface design method (RSM) by changing the parameters of spindle speed, feed, and depth of cut in different weight percentages of reinforcements such as silicon carbide (SiC-5%, 10%, 15%). And alumina (5-5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in the aluminum metal base 7075. Gray relation analysis was used to solve the multi-response optimization problem by changing the weights for different responses based on quality or productivity process requirements. The results show that spindle speed and SiC weight percentage are the most important factors that affect the machining properties of hybrid composites.

**Keywords** End Milling, Machining, Aluminum Matrix Composite, Optimization, Surface Quality

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته. مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۷-۱۲.



## مدلسازی آماری و بهینه‌سازی نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح در ماشینکاری کامپوزیت آلومینیوم در درصدهای مختلف SiC



## چکیده

استفاده از آلومینیوم با ضریب تقویت شده جهت بالا بردن این ماده نسبت به آلومینیوم در صنایع صنایع خودروسازی، هواپیما سازی و لوکوموتیو کاربرد دارد، در این مقاله ضمن بررسی پارامترهای نرخ براده برداری و کیفیت سطح بر فرایند ماشین کاری آلومینیوم کامپوزیت در درصد های مختلف SiC به بررسی ویژگی‌های ماشین کاری عملیات فرز پایانی می پردازد تا حداقل کیفیت سطح، نیروی برش، نرخ براده برداری با حداکثر نرخ حذف مواد را با استفاده از تحلیل رابطه‌ای خاکستری مبتنی بر روش طراحی سطح پاسخ (RSM) به دست آورد. بیست و هفت اجرای آزمایشی بر اساس روش طراحی سطح پاسخ (RSM) با تغییر پارامترهای سرعت اسپیندل، تغذیه و عمق برش در درصد وزنی مختلف تقویت‌کننده‌ها مانند کاربید سیلیکون (SiC-5، ۱۰، ۱۵٪) انجام شد. و آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-5%) در زمینه فلزی آلومینیوم ۷۰۷۵. تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری برای حل مسئله بهینه سازی چند پاسخ با تغییر وزن برای پاسخ های مختلف بر اساس الزامات فرآیند کیفیت یا بهره وری استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت اسپیندل و درصد وزنی SiC مهم‌ترین عواملی هستند که بر ویژگی‌های ماشین کاری کامپوزیت‌های هیبریدی تأثیر می‌گذارند.

## مشخصات مقاله

### نویسنده‌ها

وحید طهماسبی<sup>۱\*</sup>  
محمدحافظ باقی<sup>۱</sup>  
سپهر آئینه بندی<sup>۱</sup>

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

### \* نویسنده مسئول

آدرس:

Tahmasbi@arakut.ac.ir

**کلیدواژه‌ها** ماشینکاری فرزکاری، تیغچه فرز انگشتی، کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با ذرات سیلیسیم کارباید، بهینه سازی، کیفیت سطح

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها در بسیاری از بخش‌های صنعتی پیشرو کاربرد گسترده‌تری پیدا می‌کنند. وقتی نوبت به تولید قطعات با تلورانس نزدیکتر می‌رسد، ماشینکاری انتخاب پیش فرض است. کامپوزیت‌های زمینه فلزی ترکیبی، مواد نسل دوم، کاربردهای متنوعی در بسیاری از زمینه‌های مهندسی پیدا می‌کنند و به عنوان جایگزینی برای مواد متعدد عمل می‌کنند. به ویژه صنایع خودروسازی، هواپیماسازی و لوکوموتیو نیاز به جایگزینی مواد آهنی در اجزای مکانیکی با کامپوزیت‌های سبک‌تر آلومینیوم (Al) ماتریس با استحکام بالا دارند. تبدیل نهایی این کامپوزیت‌ها به محصولات مهندسی همیشه با ماشین‌کاری انجام می‌شود. در نتیجه این روند، ماشینکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) بسیار مهم می‌شود<sup>[1]</sup>. کیلیکاپ و همکاران<sup>[2]</sup> نشان داد که MMCها به دلیل سختی و ماهیت ساینده ذرات تقویت‌کننده، ماشینکاری آسان نیستند. از این رو مطالعات ماشین‌کاری اهمیت بیشتری در زمینه کامپوزیت‌ها پیدا کرده است. واژه ماشینکاری به معنای عملکرد خوب در مورد مصرف برق برش، نرخ براده برداری (MRR)، پرداخت سطح و غیره است<sup>[3]</sup>.

فرز پایانی به طور گسترده در صنایع مختلف تولیدی از جمله بخش‌های هوافضا و خودرو استفاده می‌شود، جایی که کیفیت عامل مهمی در تولید شکاف‌ها، پاکت‌ها، قالب‌های دقیق و قالب‌ها است<sup>[4]</sup>. به طور معمول، پارامترهای عملیات فرز پایانی معمولاً بر اساس بسیاری از آزمایش‌های آزمایشی تعیین می‌شوند که هم زمان‌بر و هم پرهزینه هستند. بنابراین، نیاز به توسعه روش بهینه‌سازی چند واکنشی وجود دارد که قادر به پیش‌بینی ویژگی‌های ماشین‌کاری مانند پرداخت سطح، سایش ابزار، نیروی برش و سرعت حذف مواد یک قطعه کار باشد. چند پاسخ را می‌توان به طور همزمان با تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری (GRA) بهینه کرد.

بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری مانند سرعت برش، سرعت پیشروی، شعاع دماغه ابزار، و غلظت روان‌کننده‌های جامد-مایع در نظر گرفته شده در تراشکاری برای زبری سطح قطعه کار و ضخامت براده با استفاده از GRA<sup>[5]</sup> بهینه‌سازی چند پاسخ در عملیات تراشکاری با استفاده از تحلیل رابطه خاکستری<sup>[6-9]</sup> انجام شد.

تلاش‌هایی با فرز پایانی انجام شده است. با تنظیم وزن‌های مناسب، ترکیبی از مقادیر اندازه‌گیری عملکرد که برای اجزای مختلف مورد نیاز است، ممکن است به دست آید. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری مانند سرعت، پیشروی، عمق برش و درصد وزن آرماتورها بر ماشین‌کاری کامپوزیت‌های Al7075-SiC- Al203 مورد بررسی قرار گرفت. این کار بر روی یک راه حل جامع برای بدست آوردن خروجی بهینه از زبری سطح کم، سایش ابزار

کمتر، نیروی برش کمتر و سرعت بالای نرخ براده برداری با تغییر وزن‌ها با استفاده از تحلیل رابطه خاکستری مبتنی بر RSM در عملیات فرز پایانی تمرکز دارد. وابستگی متقابل بین متغیرهای پاسخ، انتخاب پارامترهای فرآیند را برای رسیدن به سطح مورد نیاز در همه پاسخ‌ها دشوار می‌سازد. بنابراین بهینه‌سازی همزمان پاسخ‌ها مورد نیاز است.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- مواد

ماده ماتریسی مورد استفاده برای تهیه کامپوزیت‌ها آلایژ آلومینیوم Al7075 بود. 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 بود. چگالی ذرات Al2O3 بیشتر از SiC است. نسبت Al2O3 به عنوان ۵٪ ثابت است، درصد وزنی SiC را به عنوان ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ تغییر می‌دهد. سه نمونه از کامپوزیت با اندازه ۱۳۰ میلی‌متر × ۱۰۰ میلی‌متر × ۵۰ میلی‌متر با فرآیند ریخته‌گری به هم زدن ساخته شد و توزیع یکنواخت آرماتورها را تضمین کرد.

## ۲-۲- طراحی تجربی

استفاده از طراحی آزمایش‌ها (DOE) می‌تواند برای کاهش موفقیت‌آمیز تعداد اجراهایی که برای یک مشکل طراحی بزرگ‌تر و واقعی‌تر مورد نیاز است، استفاده شود. این روش‌ها با موفقیت بسیار با مدل‌های سطح پاسخ (RSM) در بهینه‌سازی مسائل واقعی (برخلاف شبیه‌سازی شده) ترکیب شده‌اند<sup>[۱۰]</sup>. اهمیت برهمکنش‌ها و ترم مربع پارامترها به وضوح در RSM پیش‌بینی می‌شود، در حالی که تکنیک تاگوچی معمولاً برای برهمکنش‌های خطی استفاده می‌شود. از این رو در این کار، روش سطح پاسخ برای DOE اتخاذ شد زیرا شامل تعداد کمتری آزمایش می‌شود. به جای انجام آزمایش‌های تصادفی، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با شرایط برش خاص انجام شد تا بتوان فرآیند را برای پارامترهای مختلف پاسخ به صورت 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 عوامل کنترل‌کننده یعنی سرعت اسپیندل، پیشروی، عمق برش و درصد وزنی SiC انتخاب شدند. این عوامل از مطالعه ادبیات مسائل بهینه‌سازی ماشینکاری و مطالعات ماشینکاری<sup>[۱۱-۱۲]</sup> انتخاب شدند. جدول ۱ پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده به عنوان عوامل کنترل و سطوح آنها را فهرست می‌کند. مقادیر بر اساس تنظیمات ماشین‌کاری که معمولاً در صنایع برای Al7075 با درج‌های پوشش‌دهنده شده کاربید دنبال می‌شوند، گرفته شد.

$$x_i^*(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (2)$$

مفهوم عملی ماشینکاری از نظر حداقل هزینه برای هر قطعه ماشینکاری شده به نرخ براده برداری مواد مربوط می شود. بنابراین، MRR که به عنوان بالاتر از بهتر مشخص می شود، به صورت معادله (۳) مشخص شد:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (3)$$

که در آن،  $x_i^0(k)$  دنباله واقعی است.  $x_i^*(k)$  توالی پس از پیش پردازش داده ها است.  $x_i^0(k=1)$  اولین مقدار دنباله است.  $\max(x_i^0(k))$  بزرگترین مقدار  $x_i^0(k)$  است.  $\min(x_i^0(k))$  کوچکترین مقدار  $x_i^0(k)$  است.

### ۳- نتایج و بحث

متغیر خروجی برای هر کدام از ۲۷ آزمایش انجام شده، در جدول ۲ نشان داده شده است که جهت افزایش دقت نتایج آزمایش، هر کدام از آزمایشها را ۳ مرتبه تکرار کرده و میانگین بدست آمده به عنوان کیفیت سطح و نرخ براده برداری ثبت شده است؛ همچنین جهت جلوگیری و حذف خطاهای پیشبینی نشده، انجام آزمایشها بصورت تصادفی صورت پذیرفته است.

با به کارگیری روش سطح پاسخ یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای کیفیت سطح و نرخ براده برداری بر حسب فاکتورهای ورودی بدست آمده است که از داده های آزمایش و یا از نزدیکترین نقاط به داده ها که در مدلسازی بدست آمده است عبور میکند؛ همچنین تفسیر نتایج و بهینه سازی بر روی مدل صورت پذیرفته است.

نتایج بدست آمده از آنالیز واریانس (ANOVA) که از آنالیز کیفیت سطح و نرخ براده برداری ماشینکاری شده حاصل گشته، در جدول ۳ نشان داده شده است.

### ۳-۱- تحلیل و بهینه سازی کیفیت سطح

قابلیت اطمینان ۸۶/۳۷٪ بیانگر کیفیت سطح است که مقدار Pvalue کوچکتر از ۰/۰۵، جهت تعیین اثر مولفه های مدل به کار رود.

به منظور اصلاح مدل فوق، پارامترهای غیر موثر حذف شده است و آنالیز واریانس آن در جدول ۴ قابل مشاهده میباشد؛ همچنین معادله (۴) نشان دهنده معادله رگرسیون اصلاح شده مدل می باشد.

مقدار قابلیت اطمینان ۸۵/۵۳٪ نشان دهنده دقت مدل حاکم بر آزمایش است و هرچه مقدار این مولفه به ۱۰۰ نزدیکتر باشد، بیان کننده این است که مدلسازی صورت گرفته بر روی کیفیت سطح از دقت بالایی برخوردار بوده و قابل اطمینان می باشد.

جدول ۱) عوامل کنترل و سطوح برای فرز پایانی

پارامترهای ورودی	سطح		
	۱	۲	۳
سرعت اسپیندل (rpm)	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰
پیشروی (mm/rev)	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴
عمق برش (mm)	۱	۱/۵	۲
درصد SIC	۵	۱۰	۱۵

### ۳-۲- روش آزمایشی

#### ۳-۲-۱- اندازه گیری کیفیت سطح

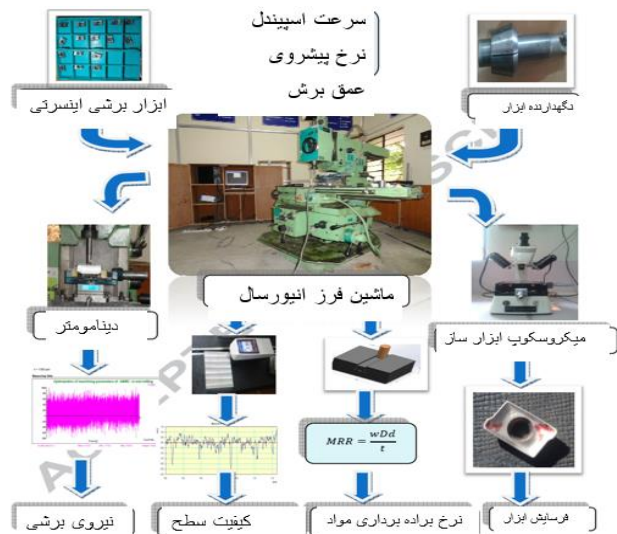
برای اندازه گیری متوسط زبری سطح (Ra) از دستگاه زبری سطح قابل حمل MITUTOYO SJ210 استفاده شد. طول برش ۲/۵ میلی متر در نظر گرفته شد. اندازه گیری ها سه بار در سه مکان مختلف روی سطح فرز انتهایی تکرار شد و میانگین این سه مقدار Ra در نظر گرفته شد.

#### ۳-۲-۲- محاسبه نرخ براده برداری مواد

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

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

جایی که w عرض نمونه (۱۰۰ میلی متر)، D قطر ابزار (۲۰ میلی متر)، d عمق برش، (میلی متر)، t زمان برداشتن مواد (دقیقه). تنظیم و اندازه گیری ماشینکاری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) راه اندازی و اندازه گیری ماشینکاری

### ۴-۲- تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری

کیفیت و بهره وری هم برای مشتریان و هم برای تولیدکنندگان مهم است. اهداف انتخاب شده به حداقل رساندن کیفیت سطح، و به حداکثر رساندن نرخ براده برداری بود. افزودن آرماتورها منجر به افزایش استحکام کامپوزیت شده و قابلیت ماشینکاری آنها تحت تأثیر وجود آرماتورهای سخت تر است. مشخص شده است که پرداخت سطح، عمر ابزار و مصرف برق تأثیر قابل توجهی بر اقدامات ماشینکاری دارد. کیفیت سطح، که به عنوان "کتر-بهتر" مشخص می شود، به صورت معادله (۲) مشخص شد.

جدول ۲) انجام آزمایش‌های بررسی اثر فاکتورهای ورودی بر روی کیفیت سطح و نرخ براده برداری

شماره آزمایش	سرعت اسپیندل (rpm)	پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	درصد SiC	کیفیت سطح (µm)	نرخ براده برداری (mm <sup>3</sup> /min)
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	۱۴۶/۳
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	۰/۶۰	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	۲۱۶/۰
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

همچنین پراکندگی تصادفی داده‌ها در توزیع باقیمانده‌ها (شکل ۱) و عدم وجود نظم مشخص در آنها، گویای این واقعیت است که مدلسازی انجام شده و نتایج حاصل از آن، از دقت بالایی برخوردار است.

### ۳-۲- اثر پارامترها بر روی کیفیت سطح

با در نظر گرفتن مدلسازی صورت گرفته و حذف ترم‌های غیر موثر در مدل، سعی بر آن است تا تاثیر سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش، درصد SiC بر روی رفتار کیفیت سطح مشخص گردد. به همین منظور به تحلیل و بررسی منحنی‌های اثر فاکتورهای اصلی که از تحلیل به روش سطح پاسخ بدست آمده است و شکل‌های برهمکنش و کانتورپلات‌های اثر برهمکنش پارامترهای موثر پرداخته شده است. شکل‌های ۲ که با استفاده از روش سطح پاسخ بدست آمده‌اند، بر اساس مدلسازی صورت گرفته رفتار کیفیت سطح را تحت تاثیر فاکتورهای ورودی مختلف و به روش سطح پاسخ، ارائه می‌نمایند.

جدول ۳) آنالیز واریانس کیفیت سطح بر حسب پارامترهای موثر در ماشین‌کاری کامپوزیت آلومینیوم

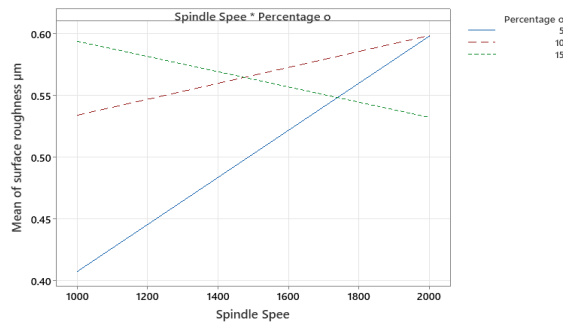
ترم‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۱۴	۰/۰۸۱۵۰۷	۰/۰۸۱۵۰۷	۵/۴۳	۰/۰۰۳
خطی	۴	۰/۰۴۷۷۸۶	۰/۰۴۷۷۸۶	۱۱/۱۵	۰/۰۰۱
سرعت اسپیندل (rpm)	۱	۰/۰۱۲۵۴۵	۰/۰۱۲۵۴۵	۱۱/۷۱	۰/۰۰۵
نرخ پیشروی (mm/rev)	۱	۰/۰۱۷۷۸۷	۰/۰۱۷۷۸۷	۱۶/۶۰	۰/۰۰۲
عمق برش (mm)	۱	۰/۰۰۶۵۳۳	۰/۰۰۶۵۳۳	۶/۱۰	۰/۰۳۰
درصد SiC	۱	۰/۰۱۰۹۲۰	۰/۰۱۰۹۲۰	۱۰/۱۹	۰/۰۰۸
(سرعت اسپیندل) <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۰۱۰۲۵	۰/۰۰۱۰۲۵	۱/۸۲	۰/۲۰۲
(نرخ پیشروی) <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۰۴۱۴۱	۰/۰۰۴۱۴۱	۰/۹۲	۰/۳۵۵
(عمق برش) <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۵۶	۰/۴۶۸
(درصد SiC) <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۰۰۷۱۵۴	۰/۰۰۰۷۱۵۴	۶/۶۸	۰/۰۲۴
سرعت اسپیندل * نرخ پیشروی	۱	۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۰۴	۰/۸۴۶
سرعت اسپیندل * عمق برش	۱	۰/۰۰۰۲۹۱۶	۰/۰۰۰۲۹۱۶	۲/۷۲	۰/۱۲۵
سرعت اسپیندل * درصد SiC	۱	۰/۰۱۶۰۰۲	۰/۰۱۶۰۰۲	۱۴/۹۴	۰/۰۰۲
نرخ پیشروی * عمق برش	۱	۰/۰۰۰۹۰۰	۰/۰۰۰۹۰۰	۰/۸۴	۰/۳۷۷
نرخ پیشروی * درصد SiC	۱	۰/۰۰۰۱۵۶	۰/۰۰۰۱۵۶	۰/۱۵	۰/۷۰۹
عمق برش * درصد SiC	۱	۰/۰۰۱۳۶۹	۰/۰۰۱۳۶۹	۱/۲۸	۰/۲۸۰

جدول ۴) آنالیز واریانس مدل اصطلاح شده در ماشین‌کاری کامپوزیت آلومینیوم

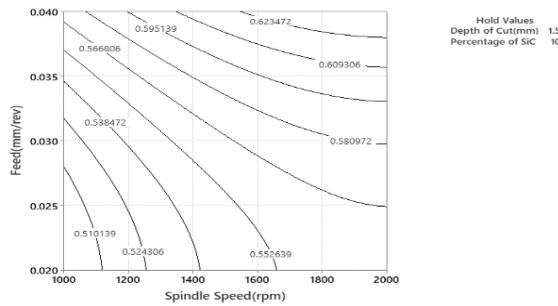
ترم‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۱۱	۰/۰۸۰۷۰۷	۰/۰۸۰۷۰۷	۸/۰۶	۰/۰۰۰
خطی	۴	۰/۰۴۷۷۸۶	۰/۰۴۷۷۸۶	۱۳/۱۲	۰/۰۰۰
سرعت اسپیندل (rpm)	۱	۰/۰۱۲۵۴۵	۰/۰۱۲۵۴۵	۱۳/۷۸	۰/۰۰۲
نرخ پیشروی (mm/rev)	۱	۰/۰۱۷۷۸۷	۰/۰۱۷۷۸۷	۱۹/۵۳	۰/۰۰۰
عمق برش (mm)	۱	۰/۰۰۶۵۳۳	۰/۰۰۶۵۳۳	۷/۱۸	۰/۰۱۷
درصد SiC	۱	۰/۰۱۰۹۲۰	۰/۰۱۰۹۲۰	۱۱/۹۹	۰/۰۰۳
(سرعت اسپیندل) <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۰۱۰۲۵	۰/۰۰۱۰۲۵	۱/۶۰	۰/۲۲۵
(نرخ پیشروی) <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۰۴۱۴۱	۰/۰۰۴۱۴۱	۱/۹۴	۰/۱۸۴
(درصد SiC) <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۰۰۶۵۶۷	۰/۰۰۰۶۵۶۷	۷/۲۱	۰/۰۱۷
سرعت اسپیندل * عمق برش	۱	۰/۰۰۰۲۹۱۶	۰/۰۰۰۲۹۱۶	۳/۲۰	۰/۰۹۴
سرعت اسپیندل * درصد SiC	۱	۰/۰۱۶۰۰۲	۰/۰۱۶۰۰۲	۱۷/۵۷	۰/۰۰۱
نرخ پیشروی * عمق برش	۱	۰/۰۰۰۹۰۰	۰/۰۰۰۹۰۰	۰/۹۹	۰/۳۳۶
عمق برش * درصد SiC	۱	۰/۰۰۱۳۶۹	۰/۰۰۱۳۶۹	۱/۵۰	۰/۲۳۹

$$\begin{aligned} \text{surface roughness } (\mu\text{m}) &= 0.214 + 0.000343 \text{ Spindle Speed (rpm)} \\ &- 10.95 \text{ Feed (mm/rev)} - 0.279 \text{ Depth of Cut (mm)} \\ &+ 0.0594 \text{ Percentage of SiC} \\ &- 0.000000 \text{ Spindle Speed (rpm)} * \text{Spindle Speed (rpm)} \\ &+ 172 \text{ Feed (mm/rev)} * \text{Feed (mm/rev)} \\ &- 0.001323 \text{ Percentage of SiC} * \text{Percentage of SiC} \\ &+ 0.000108 \text{ Spindle Speed (rpm)} * \text{Depth of Cut (mm)} \\ &- 0.000025 \text{ Spindle Speed (rpm)} * \text{Percentage of SiC} \\ &+ 3.00 \text{ Feed (mm/rev)} * \text{Depth of Cut (mm)} \\ &+ 0.00740 \text{ Depth of Cut (mm)} * \text{Percentage of SiC} \end{aligned} \quad (۴)$$

وجود نظم مشخص در آنها، گویای این واقعیت است که مدلسازی انجام شده و نتایج حاصل از آن، از دقت بالایی برخوردار است.



(الف)

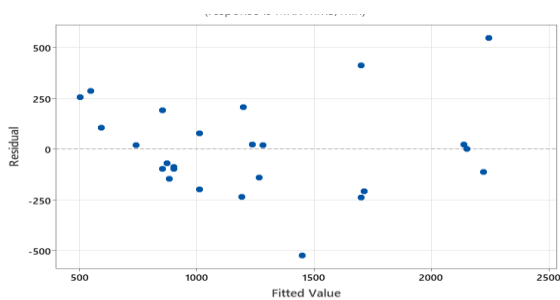


(ب)

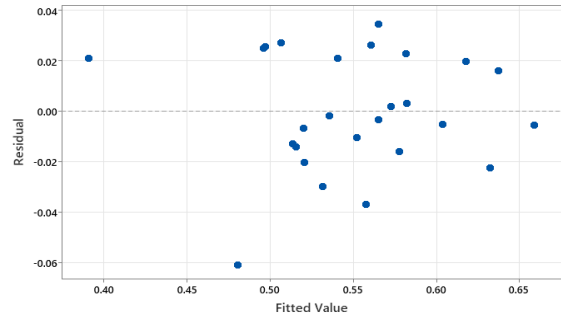
شکل ۳) تصویر برهم کنش نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل

جدول ۵) آنالیز واریانس مدل اصلاح شده نرخ براده برداری بر حسب پارامترهای موثر در ماشین کاری کامپوزیت آلومینیوم

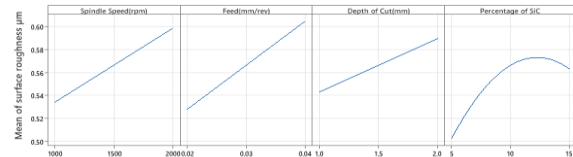
ترم ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۱۱	۸۳۸۳۹۴۳	۸۳۸۳۹۴۳	۹/۰۳	۰/۰۰۰
خطی	۴	۵۰۳۳۵۰۴	۵۰۳۳۵۰۴	۱۴/۹۰	۰/۰۰۰
سرعت اسپیندل (rpm)	۱	۱۴۲۳۵۷۷	۱۴۲۳۵۷۷	۱۶/۸۶	۰/۰۰۱
نرخ پیشروی (mm/rev)	۱	۲۱۸۹۹۹۰	۲۱۸۹۹۹۰	۲۵/۹۴	۰/۰۰۰
عمق برش (mm)	۱	۷۷۷۱۸۷	۷۷۷۱۸۷	۹/۲۱	۰/۰۰۸
درصد SiC	۱	۶۴۲۷۵۱	۶۴۲۷۵۱	۷/۶۱	۰/۰۱۵
(سرعت اسپیندل) <sup>۲</sup>	۱	۲۹۲۱۴۱	۱۲۶۷۵۴۱	۱۵/۰۱	۰/۰۰۱
(نرخ پیشروی) <sup>۲</sup>	۱	۲۹۵۷	۲۶۵۲۹۲	۵/۵۱	۰/۰۰۳
(عمق برش) <sup>۲</sup>	۱	۸۶۴۸۵۹	۱۶۶۴۳۰۳	۱۹/۷۱	۰/۰۰۰
(درصد SiC) <sup>۲</sup>	۱	۱۵۳۷۲۵۴	۱۵۳۷۲۵۴	۱۸/۲۱	۰/۰۰۱
عمق برش * نرخ پیشروی	۱	۲۸۸۹۲۲	۲۸۸۹۲۲	۳/۴۲	۰/۰۰۴
درصد SiC * نرخ پیشروی	۱	۲۴۱۷۶۹	۲۴۱۷۶۹	۲/۸۶	۰/۱۱۱
درصد SiC * عمق برش	۱	۱۲۲۵۳۵	۱۲۲۵۳۵	۱/۴۵	۰/۲۴۷



شکل ۴) پراکندگی باقیمانده‌ها بر روی مدلسازی انجام شده



شکل ۱) پراکندگی باقیمانده‌ها بر روی مدلسازی انجام شده



شکل ۲) اثر پارامترهای اصلی بر روی رفتار کیفیت سطح

در شکل ۲ برای حالت صافی سطح (کیفیت سطح)، هرچه سرعت اسپیندل افزایش پیدا کند، صافی سطح بهتر می شود. هرچه نرخ پیشروی (Feed) افزایش پیدا کند صافی سطح، بهبود می یابد. مقدار درصد SiC طبق شکل تا یک اندازه‌ای افزایش می‌یابد، و بعد از آن کیفیت سطح کاهش خواهد یافت.

در شکل ۳ الف شاهد برخورد (Interaction) سرعت اسپیندل و درصد SiC در کیفیت سطح هستیم. در شکل ۳ ب با افزایش هر دو پارامتر به نسبت یکسان، میزان صافی سطح نیز افزایش یافته است.

### ۳-۳- تحلیل و بهینه سازی نرخ براده برداری

قابلیت اطمینان ۸۹/۳۶٪ بیانگر نرخ براده برداری است که مقدار Pvalue کوچکتر از ۰/۰۵ جهت تعیین اثر مولفه‌های مدل به کار رود. به منظور اصلاح مدل فوق، پارامترهای غیر موثر حذف شده است و آنالیز واریانس آن در جدول ۵ قابل مشاهده میباشد؛ همچنین معادله (۵) نشان دهنده معادله رگرسیون اصلاح شده مدل می باشد.

$$\begin{aligned}
 \text{MRR (mm}^3/\text{min)} = & -14794 \\
 & + 6.54 \text{ Spindle Speed(rpm)} + 188483 \text{ Feed(mm/rev)} \\
 & + 6300 \text{ Depth of Cut(mm)} + 636 \text{ Percentage of SiC} \\
 & - 0.001950 \text{ Spindle Speed(rpm)} * \text{Spindle Speed(rpm)} \\
 & - 2953679 \text{ Feed(mm/rev)} * \text{Feed(mm/rev)} \\
 & - 2234 \text{ Depth of Cut(mm)} * \text{Depth of Cut(mm)} \\
 & - 21.48 \text{ Percentage of SiC} * \text{Percentage of SiC} \\
 & + 53751 \text{ Feed(mm/rev)} * \text{Depth of Cut(mm)} \\
 & - 4917 \text{ Feed(mm/rev)} * \text{Percentage of SiC} \\
 & - 70.0 \text{ Depth of Cut(mm)} * \text{Percentage of SiC}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

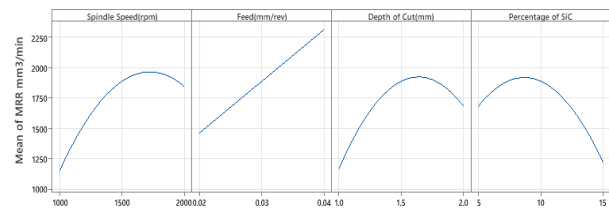
مقدار قابلیت اطمینان ۸۶/۸۸٪ نشان دهنده دقت مدل حاکم بر آزمایش است و هرچه مقدار این مولفه به ۱۰۰ نزدیکتر باشد، بیان کننده این است که مدلسازی صورت گرفته بر روی کیفیت سطح از دقت بالایی برخوردار بوده و قابل اطمینان می‌باشد؛ همچنین پراکندگی تصادفی داده‌ها در توزیع باقیمانده‌ها (شکل ۴) و عدم

## مراجع

- 1- 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; 50:297-308.
- 2- 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 15;164:862-7.
- 3- Chabbi A, Yallese 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 1;95:99-115.
- 4- Lou MS, Chen JC, Li CM. Surface roughness prediction technique for CNC end-milling.
- 5- 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;63(1):13-24.
- 6- 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;48:16-27.
- 7- Lin CL. Use of the Taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics. *Materials and manufacturing processes*. 2004 28;19(2):209-20.
- 8- 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 1;7:299-304.
- 9- Goel B, Singh S, Sarepaka RV. Optimizing single point diamond turning for mono-crystalline germanium using grey relational analysis. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015;30(8):1018-25.
- 10- Box GE, Draper NR. *Empirical model-building and response surfaces*. John Wiley & Sons; 1987.
- 11- Ozben T, Kilickap E, Cakir O. Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. *Journal of materials processing technology*. 2008 3;198(1-3):220-5.
- 12- Aouici H, Bouchelaghem H, Yallese MA, Elbah M, Fnides B. Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;73(9):1775-88.

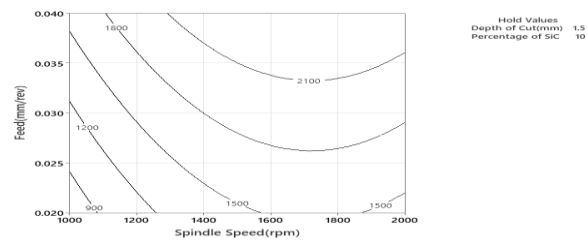
## ۳-۴- اثر پارامترها بر روی نرخ براده برداری

شکل های ۵ که با استفاده از روش سطح پاسخ بدست آمده اند، بر اساس مدل سازی صورت گرفته رفتار کیفیت سطح را تحت تاثیر فاکتورهای ورودی مختلف و به روش سطح پاسخ، ارائه می نمایند. از شکل های سرعت اسپیندل و عمق برشی دریافته شده است که بعد از رسیدن به حداکثر میزان نرخ براده برداری، به صورت نزولی کاهش می یابد اما در شکل درصد SiC در ابتدا افزایش نرخ براده برداری را داریم ولی بعد از رسیدن به میزان حداکثر خود با افت نرخ براده برداری مواجه شده است.



شکل ۵) اثر پارامترهای اصلی بر روی رفتار نرخ براده برداری

در شکل ۶ با افزایش سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی (Feed)، نرخ براده برداری به نسبت معین تغییر کرده است.



شکل ۶) شکل برهم کنش نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل

## ۴- نتیجه گیری

سرعت اسپیندل و نسبت تقویت کننده (SiC) مهم ترین عوامل مؤثر بر ماشین کاری هستند. از تجزیه و تحلیل، بهترین ترکیب از مقادیر برای به حداقل رساندن همزمان کیفیت سطح، سایش ابزار، نیروی برش و به حداکثر رساندن نرخ براده برداری پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارتند از سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه، تغذیه ۰/۰۳ میلی متر در دور، عمق برش ۱ میلی متر و وزن ۵ درصد SiC. تست های انجام شده بهبود عملکرد را تایید می نمایند. آنالیز واریانس (ANOVA)، اشاره شد که سرعت اسپیندل و درصد وزنی SiC مهم ترین عوامل مؤثر بر ماشین کاری کامپوزیت های هیبریدی هستند. افزایش نرخ پیشروی نیروی پیشرانه و گشتاور را افزایش می دهد و منجر به مصرف انرژی بیشتر می شود. امکان بهینه سازی هر معیار عملکرد خاص به گونه ای وجود دارد که سایر معیارهای عملکرد حداقل نیاز را برآورده کنند. بهینه سازی هر پارامتر عملکرد خاصی که حداقل نیاز را در سایر پارامترها برآورده می کند، امکان پذیر است.