



# Statistical Modeling and Optimization of Thrust Force and Surface Roughness in Drilling Hybrid Aluminum Matrix Composites



## ARTICLE INFO

### Authors

Tahmasbi V<sup>1\*</sup>  
Sousanabadi Farahani A<sup>2</sup>,  
Baghi M H<sup>1</sup>,  
Ghazi khansari D<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, Baghi M H, Ghazi khansari D. Statistical Modeling and Optimization of Thrust Force and Surface Roughness in Drilling Hybrid Aluminum Matrix Composites. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT), 2023;23(10):149-154.

## ABSTRACT

Metal composites have received attention from various industries due to their excellent properties, such as a high strength-to-weight ratio and wear resistance. However, due to the presence of hard and abrasive particles, the challenges have always faced machining. Therefore, studying the effective parameters in the machining of these materials is very important. Drilling is one of the most common and widely used methods in the industry. In this study, the Response Surface Method (RSM) and Central Composite Design (CCD) were used to model, optimize, and analyze the effects of machining parameters. Aluminum composite with AL356 alloy reinforced with 25 micrometers of silicon carbide and 45 micrometers of mica mineral, as well as a 6 mm diameter carbide drill, were used for the experiments. According to the results, with an increase in the drilling speed, the drilling forces increased and the surface roughness decreased. Additionally, increasing the feed rate increased forces and surface roughness. With an increase in the volume fraction of SiC reinforcing particles, the drilling forces and surface roughness increased and decreased, respectively. By analyzing the data obtained from the experiments, the best combination of values was found to minimize the surface roughness and axial force at the same time. The best combination of parameters was found to be: a spindle speed of 1855 rpm, a feed rate of 50 mm/rev, and a weight percentage of 15% SiC

**Keywords** Metal Matrix Composite, Drilling, Thrust Force, Surface Roughness, Optimization

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۴۹-۱۵۴



## مدلسازی آماری و بهینه‌سازی نیرو و زبری سطح در سوراخ‌کاری کامپوزیت زمینه آلومینیومی هیبریدی



## چکیده

کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل دارا بودن ویژگی‌های ممتاز از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به سایش و... مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته‌اند. به دلیل وجود ذرات سخت و ساینده در زمینه این نوع از کامپوزیت‌های ماشین‌کاری آن‌ها همواره با چالش‌هایی رو برو بوده است. به همین دلیل مطالعه پارامترهای مؤثر در ماشین‌کاری این مواد بسیار مورد اهمیت می‌باشد. سوراخ‌کاری یک از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در صنعت می‌باشد. در این مطالعه، از روش سطح پاسخ (RSM) و طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای مدل‌سازی، بهینه‌سازی و تحلیل تأثیرات پارامترهای ماشین‌کاری استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها از کامپوزیت زمینه آلومینیومی با آلیاژ AL356 و تقویت‌شده با کاربید سیلیکون به ابعاد ۲۵ میکرومتر و ماده‌ی معدنی میکا به ابعاد ۴۵ میکرومتر و همچنین مت‌ی کاربید به قطر ۶ میلی‌متر استفاده شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده با افزایش سرعت دوران مت‌ی نیروهای سوراخ‌کاری افزایش و زبری سطح کاهش می‌یابد. همچنین افزایش نرخ پیشروی منجر به افزایش نیروها و زبری سطح خواهد شد. با افزایش درصد کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده SiC، نیروهای سوراخ‌کاری و زبری سطح به ترتیب افزایش و کاهش یافتند. با تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها بهترین ترکیب از مقادیر برای به حداقل رساندن هم‌زمان زبری سطح و نیروی محوری پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارت‌اند از: سرعت اسپیندل ۱۸۵۵ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دور، درصد وزنی ۱۵% SiC.

## مشخصات مقاله

### نویسنده‌ها

وحید طهماسبی<sup>\*۱</sup>  
امین سوسن‌آبادی فراهانی<sup>۲</sup>  
محمدحافظ باقی<sup>۱</sup>  
دانیال قاضی خوانساری<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** کامپوزیت زمینه فلزی، سوراخ‌کاری، نیرو، زبری سطح، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل دارا بودن خواص مهندسی عالی، از قبیل سبک وزن بودن و خواص حرارتی و مکانیکی بهبود یافته مورد توجه محققان و صنایع مختلف قرار گرفته است (۱). یکی از چالش‌هایی که مانع از استقبال بیشتر تولیدکنندگان از کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌شود، مشکل ماشین‌کاری این مواد است (۲) با توجه به افزایش کاربرد این نوع از کامپوزیت‌ها، نیاز به مطالعه دقیق و سیستماتیک عوامل مؤثر بر ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی بسیار ضروری می‌باشد (۳). فرآیند سوراخ‌کاری به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. با ساواراچاپا و چاندراموهان تأثیر ابزارهای و شرایط برش مختلف را برای سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های گرافیت Al2219/15%SiCp-3% و Al2219/15%SiCp بررسی کردند آن‌ها دریافت‌اند که زبری سطح با افزایش سرعت برشی کاهش و با افزایش نرخ پیشروی افزایش می‌باید (۴). دیویم و همکاران تأثیر پارامترهای برشی بر سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها گزارش کردند که کامپوزیت تقویت شده سرامیک-گرافیت نسبت به کامپوزیت‌هایی که با SiCp تقویت شده‌اند دارای خواص ماشین‌کاری بهتری است (۵). مطابق با مطالعه ریاض احمد و همکاران بر روی سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی Al-5%SiCp و B4Cp5% پیشروی و سرعت برشی کمتر، کیفیت سطح بهتری را با همراه با سایش کم ابزار تولید می‌کند (۶). همچنین محققان ویژگی‌های کیفیت سطح در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های هیبریدی (Al-SiC-B4C) را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها ادعا کرده‌اند که نرخ پیشروی و پس از آن سرعت برشی تأثیرگذارترین پارامتر بر روی زبری سطح هستند (۷). رامش و همکاران از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی زبری سطح استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که نرخ تغذیه مؤثرترین عاملی است که بر زبری سطح تأثیر می‌گذارد (۸). یحیی و همکاران مطالعه‌ای برای سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های Al/SiC/Gr انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که اضافه کردن گرافیت به عنوان یک تقویت‌کننده اضافی در کامپوزیت تقویت شده Al/SiCp باعث کاهش نیروی محوری می‌شود (۹). از مرور مطالعات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که تحقیقات محدودی در خصوص اضافه کردن ذرات میکا به کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی صورت پذیرفته است. بیشتر مطالعات از ذرات گرافیت به عنوان ماده تقویت و روان کننده کامپوزیت‌ها استفاده کرده‌اند. در این مطالعه سعی شده است به صورت روشمند و با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌سازی آماری فرآیند صورت پذیرفته و رفتار پارامترهای زبری سطح و نیروی برشی به عنوان دو پاسخ مهم در سوراخ‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی هیبریدی (Al/SiC + Mica) مورد بررسی قرار گرفته و ضمن ارائه معادلات

رگرسیون خطی مرتبه دوم و تحلیل آن‌ها، بهینه‌سازی آماری به منظور دستیابی به کمترین میزان نیرو و زبری سطح با استفاده از الگوریتم درینگر ارائه شود.

۲- روش تجربی

۲-۱- ساخت کامپوزیت

از آلیاژ AL356 به عنوان ماده زمینه مورد استفاده برای تهیه کامپوزیت‌ها استفاده شد. مواد تقویت‌کننده در کامپوزیت کاربرد سیلیکون (SiC) و میکا (MICA) بودند. ذرات کاربرد سیلیکون مورد استفاده در اندازه ۲۵ میکرومتر و اندازه متوسط ذرات میکا ۴۵ میکرومتر است. نسبت وزنی میکا به عنوان ۳٪ ثابت است، درصد وزنی SiC در سه سطح ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ تغییر می‌کند. کامپوزیت‌ها با فرآیند ریخته‌گری به هم زدنی ساخته شد. آلیاژ آلومینیوم ابتدا در یک کوره الکتریکی ذوب شد. در مرحله بعد میکا و کاربرد سیلیکون که از قبل تا دمای ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده‌اند، به فلز مذاب در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد اضافه شده و پیوسته هم زده می‌شود. هم زدن در دور ۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ تا ۷ دقیقه انجام می‌شود. در نهایت مذاب مخلوط شده با تقویت‌کننده در قالب فلزی دائمی ریخته شد. نمای کلی فرآیند ریخته‌گری در شکل ۱ مشاهده می‌شود (۱۰).

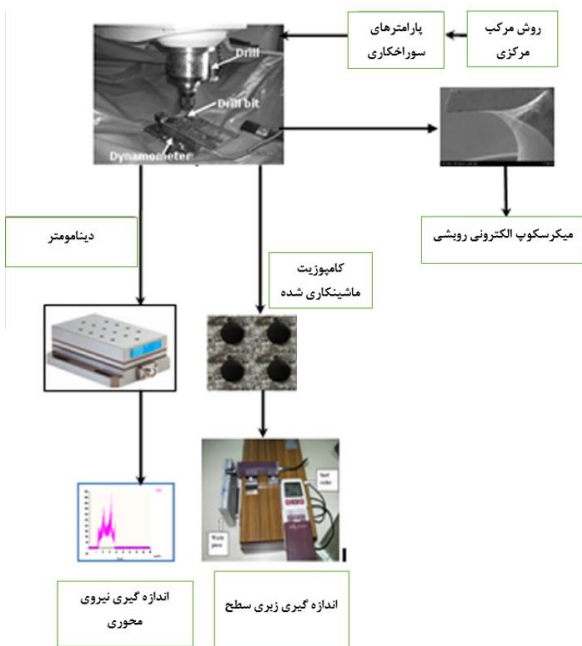


شکل ۱) تنظیمات ریخته‌گری

۲-۲- طراحی آزمایش

استفاده از طراحی آزمایش‌ها (DOE) می‌تواند برای کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز 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. از مطالعه تحقیقات صورت گرفته می‌توان به این نتیجه رسید که پارامترهای قابل مطالعه در فرآیند سوراخ‌کاری به ۴ دسته کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

روکش و دارای قطر ۶ میلی متر، زاویه رأس ۱۱۸ درجه و زاویه مارپیچ ۳۰ درجه ساخت شرکت SANDVIK می باشد. انجام تمام آزمایش در شرایط برش خشک انجام شده است. همچنین به منظور بالا بردن دقت و صحت نتایج آزمایش، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده و میانگین آن ها به عنوان خروجی آزمایش گزارش شده است. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای پیش بینی نشده، آزمایشات به صورت تصادفی انجام شده است. برای ایجاد هر سوراخ از متهی جدیدی استفاده شده تا اثر سایش ابزار بر نیروی محوری و زبری سطح به حداقل برسد. از دینامومتر کرسلر برای ثبت نیروی محوری استفاده شده است. در ماشین کاری، متداول ترین پارامتر در مورد مطالعه زبری سطح (Ra) است و در بسیاری از مطالعات مورد توجه قرار می گیرد. اندازه گیری زبری سطح داخلی سوراخ عمود بر محیط صورت پذیرفت.



شکل ۲) ترتیب شماتیک تنظیمات آزمایش

### ۳- مدل سازی به روش سطح پاسخ

در تحلیل مسائل مهندسی که پاسخ مسئله در آن ها متأثر از متغیرهای ورودی مختلف می باشد، استفاده از روش های آماری کمک قابل توجهی به طراحی، مدل سازی، تحلیل و بهینه سازی دقیق این فرآیندها می کند که روش سطح پاسخ یکی از بهترین روش های آماری، در این زمینه می باشد. طراحی آزمایش ها یکی از مناسب ترین روش ها برای محققین در اصلاح، بهبود و صرفه جویی در وقت و هزینه های آزمایش ها و تشخیص دقت و رفع عیوب آن ها می باشد. از مزایای مهم روش سطح پاسخ می توان به تبیین دقت آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر آزمایش، ارائه نمودارهای برهم کنش متغیرهای ورودی، بهینه سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش ها اشاره کرد (۱۱). همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین

### جدول ۱) پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند سوراخ کاری

۱- مؤلفه های سوراخ کاری:	سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی
۲- خواص ابزار سوراخ کاری:	شکل و هندسه ابزار، جنس ابزار، وضعیت ابزار
۳- محیط سوراخ کاری:	روانکاری خشک، مرطوب
۴- خواص قطعه کار:	ویژگی های مکانیکی، ضخامت متالوگرافی

در این مطالعه، از روش سطح پاسخ برای طراحی آزمایش ها استفاده گردید. به جای انجام آزمایش های تصادفی، مجموعه ای از آزمایش ها با رعایت الزامات سوراخ کاری 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 ویژگی های سوراخ کاری تأثیر می گذارند. سه عامل کنترل کننده یعنی سرعت اسپیندل، پیشروی و درصد وزنی Sic انتخاب شدند. این عوامل بر اساس سایر مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران در این حوزه و پیشنهادهای ایشان برای انتخاب پارامترهای ماشین کاری انتخاب شده اند.

جهت جلوگیری و حذف خطاهای پیش بینی نشده، انجام آزمایش ها به صورت تصادفی صورت پذیرفته است. از نرم افزار مینی تب نسخه ۲۰ برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین به دست آوردن ضرایب معادله ریاضی رگرسیون حاکم بر آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ می تواند یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای هر پاسخ خروجی بر حسب متغیرهای ورودی که از داده های آزمایش و نزدیک ترین نقاط به آن ها به دست آمده است، استخراج کند و بهینه سازی مؤثر بر روی نتایج را اعمال نماید. در جدول ۱ متغیرهای ورودی و بازه تغییرات آن با توجه به سه سطح کد شده آن ها نمایش داده شده است. علت استفاده از روش حاضر نسبت به سایر روش ها از جمله روش تاگوچی، طراحی آزمایش مناسب، تعداد آزمایش های جامع و همچنین ارائه نمودارها و گراف های برهم کنش فاکتورها، ارائه معادله ریاضی رگرسیون دقیق و معتبر خطی مرتبه دوم است.

### جدول ۲) پارامترهای ورودی فرآیند مورد استفاده و سطح طراحی آن ها

فاکتورهای ورودی آزمایش	۱-	۰	+
A: سرعت اسپیندل (rpm)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
B: نرخ پیشروی (mm/rev)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
C: درصد Sic	۵	۱۰	۱۵

### ۳-۲ روش آزمایش

سوراخ کاری توسط دریل سی ان سی ساخت شرکت ARIX CNC machine انجام شد. نمای کلی مراحل انجام آزمایش ها در شکل ۲ ارائه شده است. نمونه های سوراخ کاری در قالب بلوک های ۱۰۰ میلی متر در ۱۰۰ میلی متر در ۱۰ میلی متر برای انجام آزمایش تهیه شده است. سوراخ کاری با عمق ۱۰ میلی متر برای هر آزمایش انجام شده است. متهی استفاده شده در آزمایش از جنس کاربید بدون

جدول ۳) طراحی آزمایش سوراخ کاری CNC و پاسخ های خروجی (۱۰)

شماره آزمایش	سرعت اسپیندل (دور بر دقیقه)	نرخ پیشروی (میلی متر بر دور)	درصد وزنی sic	نیروی محوری (نیوتن)	زبری سطح (میکرومتر)
۱	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۶۲۷	۳/۱۲
۲	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۶۲۵	۳/۰۰
۳	۲۰۰۰	۵۰	۱۰	۵۶۰	۱/۸۰
۴	۳۰۰۰	۵۰	۱۵	۶۰۰	۱/۵۰
۵	۱۰۰۰	۵۰	۵	۵۱۰	۲/۴۰
۶	۳۰۰۰	۱۵۰	۱۵	۷۴۵	۲/۷۶
۷	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۶۲۳	۳/۱۳
۸	۳۰۰۰	۱۵۰	۵	۶۶۵	۳/۶۰
۹	۳۰۰۰	۵۰	۵	۵۳۵	۱/۷۰
۱۰	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۶۲۳	۳/۱۱
۱۱	۱۰۰۰	۵۰	۱۵	۵۶۸	۱/۸۰
۱۲	۲۰۰۰	۱۰۰	۵	۶۰۰	۳/۳۰
۱۳	۲۰۰۰	۱۵۰	۱۰	۶۹۵	۳/۷۰
۱۴	۱۰۰۰	۱۵۰	۱۵	۷۱۰	۴/۰۰
۱۵	۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۶۰۵	۳/۴۰
۱۶	۱۰۰۰	۱۵۰	۵	۶۴۰	۴/۸۰
۱۷	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۶۲۴	۳/۱۰

جدول ۴) تحلیل واریانس نیروی محوری

ترمها	P-Value	F-Value	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی
مدل	۰/۰۰۰	۱۶۰۰/۳۱	۸۳۵۳/۸	۵۸۴۷۶/۸	۷
A=سرعت اسپیندل	۰/۰۰۰	۳۲۹/۰۹	۱۷۱۷/۹	۱۹۷۴/۹	۱
B=نرخ پیشروی	۰/۰۰۰	۸۹۱/۱۹	۴۶۵۱۲/۴	۴۶۵۱۲/۴	۱
C=درصد وزنی	۰/۰۰۰	۱۸۴۰/۷۰	۹۶۰۸/۷	۹۷۱۷/۴	۱
A <sup>2</sup>	۰/۰۰۱	۲۵/۲۳	۱۳۱/۷	۹۸/۶	۱
C <sup>2</sup>	۰/۰۱۶	۸/۸۶	۴۶/۲	۴۶/۲	۱
A×C	۰/۰۲۷	۶/۹۲	۳۶/۱	۳۶/۱	۱
B×C	۰/۰۰۲	۱۷/۴۶	۹۱/۱	۹۱/۱	۱

جدول ۵) تحلیل واریانس زبری سطح

ترمها	P-Value	F-Value	میانگین مربعات	جمع مربعات	درجه آزادی
مدل	۰/۰۰۰	۲۷۴/۶۸	۲/۰۸۶۵۴	۱۲/۵۱۹۲	۶
A=سرعت اسپیندل	۰/۰۰۰	۲۰۵/۲۷	۱/۵۵۹۲۹	۱/۶۸۸۸	۱
B=نرخ پیشروی	۰/۰۰۰	۱۲۲۸/۴۴	۹/۳۳۱۵۶	۹/۳۳۱۶	۱
C=درصد وزنی	۰/۰۰۰	۱۰۳/۱۱	۰/۷۸۳۲۵	۰/۸۸۴۱	۱
B <sup>2</sup>	۰/۰۰۰	۳۵/۲۰	۰/۲۶۷۴۰	۰/۲۶۷۴	۱
A×B	۰/۰۰۰	۳۴/۱۲	۰/۲۵۹۲۰	۰/۲۵۹۲	۱
B×C	۰/۰۰۷	۱۱/۶۱	۰/۰۸۸۲۰	۰/۰۸۸۲	۱

با توجه به شکل های ۳ و ۴ که وضعیت باقیمانده ها نشان داده شده است، می توان گفت با توجه به عدم وجود ساختار و الگوی مشخص و همچنین نظم خاص در توزیع باقیمانده ها مدل ارائه شده صحیح است. در این بخش با توجه به مدل سازی صورت گرفته و انطباق آن بر داده های آزمایش ها و با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر مدل، سعی بر آن شده است تا نقش سرعت دورانی اسپیندل، نرخ پیشروی و درصد وزنی SIC بر رفتار نیروی محوری و زبری سطح تبیین گردد. نمودارهای شکل های رفتار

ورودی ها و خروجی های یک آزمایش را مدل سازی نموده و به صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم ارائه نماید. فرم کلی معادله با توجه به متغیرها و برهمکنش های مؤثر به صورت رابطه (۱) می باشد [۳۰].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

در این معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم،  $y$  به عنوان پاسخ خروجی بر حسب ورودی های آزمایش توصیف می گردد که در این معادله ثابت های  $\beta$  به عنوان ضرایب معادله رگرسیون،  $x_i$  فاکتور اصلی ورودی آزمایش،  $x_i^2$  توان دوم فاکتورهای ورودی آزمایش و  $x_i x_j$  اثر برهمکنش مرتبه دوم فاکتورهای ورودی آزمایش می باشد. مدل ارائه شده در صورت دقیق بودن می تواند رفتار خروجی را بر حسب پارامترهای ورودی در تمام بازه آزمایش ها پیش بینی نموده و نقاط بهینه را ارائه نماید (۱۱).

#### ۴- نتایج و بحث

با توجه به طراحی آزمایش های صورت گرفته، برای هر ۱۷ آزمایش، متغیرهای خروجی اندازه گیری شده و در جدول ۳ گزارش شده است. همچنین به منظور بالا بردن دقت و صحت نتایج آزمایش، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده است و میانگین آن ها به عنوان نیروی محوری و زبری سطح گزارش شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل نیروی محوری و زبری سطح، نتایج حاصل از آنالیز واریانس (ANOVA) برای مدل اصلاح شده پس از حذف عوامل غیر مؤثر در جدول ها آمده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر پارامترهای معادله ی رگرسیون را مشخص می نماید و در تحلیل و مدل سازی آزمایش ها نقش به سزایی دارد. مقدار قابلیت اطمینان نشان دهنده دقت مدل حاکم بر آزمایش است و هرچه مقدار این مؤلفه به ۱۰۰ نزدیک تر باشد، بیان کننده این است که مدل سازی صورت گرفته از دقت بالایی برخوردار بوده است. با توجه به اینکه قابلیت اطمینان  $R_{sq} 99/92\%$  در نیروی محوری و  $94/40\%$  برای زبری سطح در مدل اصلاح شده به دست آمده است، می توان از دقت مدل به دست آمده اطمینان حاصل کرد. همچنین با بررسی باقیمانده ها می توان مناسب بودن مدل را احراز کرد. مقدار خطای مجموع مربعات (press) مدل منطبق شده بر داده ها میزان دقت نوع معادله رگرسیون حاکم بر مدل را مشخص نمود. هرچه این

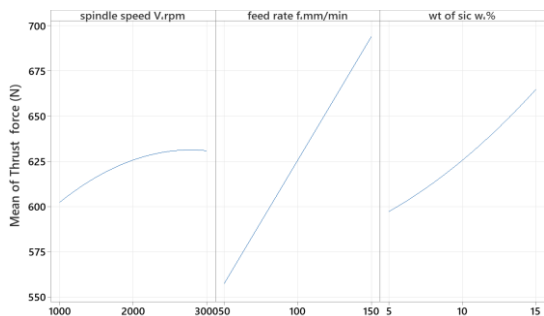
$$\text{Thrust force (N)} = 400.30 + 0.04645 A + 1.2290 B + 0.24 C - 0.000009 A^2 + 0.2158 C^2 + 0.000425 A^2 C + 0.01350 B^2 C \quad (2)$$

$$\text{Surface roughness (\mu m)} = 0.396 - 0.000060 A + 0.05130 B - 0.0175 C - 0.000103 B^2 B - 0.000004 A^2 B - 0.000420 B^2 C \quad (3)$$

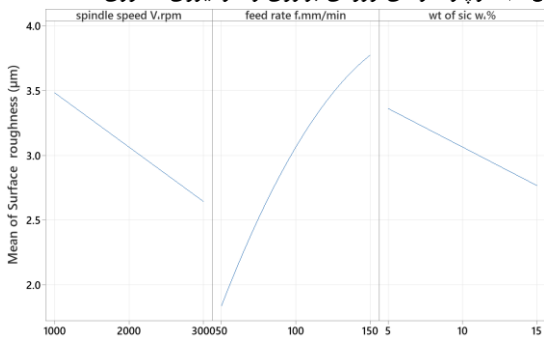
مقدار در مدل های قابل انطباق بر داده ها کمتر باشد مدل مربوطه دارای خطای پیش بینی کمتری است. روابط (۲) و (۳) معادله رگرسیون اصلاح شده ی مدل ها را نشان می دهد.

#### ۳-۴ تأثیر درصد ذرات تقویت کننده بر نیروی سوراخ کاری و زبری سطح

طبق نمودار شکل ۶ با افزایش درصد وزنی SIC، زبری سطح کاهش می یابد. این را می توان به افزایش ناپایداری و شکنندگی و متعاقب آن، از بین رفتن لبه انباشته در ماشین کاری کامپوزیت های هیبریدی نسبت داد. لبه انباشته به دلیل ایجاد تغییر در هندسه ابزار باعث کاهش کیفیت سطح خواهد شد. در صورتی که لبه انباشته حذف شود می تواند به افزایش کیفیت سطح منجر شود. همچنین افزودن ۳٪ میکا نیروی محوری را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. ذرات میکا به دلیل خاصیت روانکاری جامدی که دارند اصطکاک سطحی بین ابزار و قطعه کار و تنش برشی را کاهش می دهند.



شکل ۵) اثر پارامترهای ورودی بر روی رفتار نیروی محوری

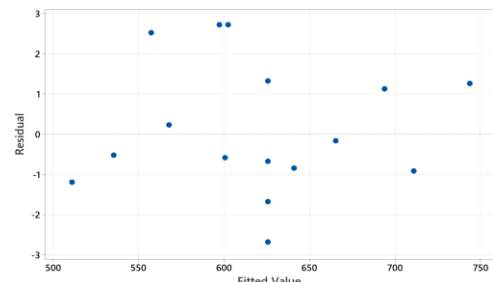


شکل ۶) اثر پارامترهای ورودی بر روی رفتار زبری سطح

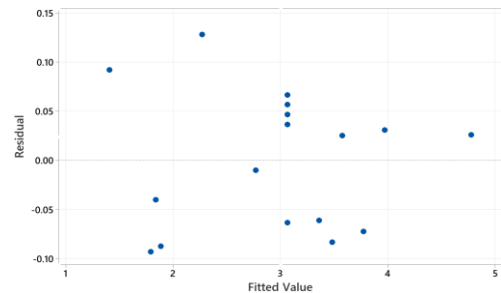
#### ۴- نتیجه گیری

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 برازش 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 اسپیندل، نرخ پیشروی، درصد وزنی SIC بر روی نیروی محوری، و زبری سطح به روش آزمایش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با نتایج به دست آمده با افزایش سرعت دوران مته نیروهای سوراخ کاری افزایش و زبری سطح کاهش می یابد. همچنین افزایش نرخ پیشروی منجر به افزایش نیروها و زبری سطح خواهد شد. با افزایش درصد کسر حجمی ذرات تقویت کننده Sic نیروهای سوراخ کاری و زبری سطح به ترتیب افزایش و کاهش یافتند.

زبری سطح را بر اساس هر یک از متغیرهای ورودی فرآیند طبق مدل سازی صورت پذیرفته را نشان می دهد.



شکل ۳) پراکندگی باقیمانده های نیروی محوری نسبت به مدل منطبق شده



شکل ۴) پراکندگی باقیمانده های زبری سطح نسبت به مدل منطبق شده

#### ۴-۱ تأثیر سرعت دورانی ابزار بر نیروی سوراخ کاری و زبری سطح

مطابق با شکل ۵ با افزایش سرعت دوران ابزار نیروی سوراخ کاری افزایش می یابد. به علت برخورد بیشتر ذرات تقویت کننده و همچنین وجود ماده زمینه چسبیده شده بر لبه برشی ابزار، ساییدگی ابزار رخ می دهد که این مسئله باعث به وجود آمدن ارتعاش و بالطبع افزایش نیروهای ماشین کاری می شود. همچنین با توجه به شکل ۶ افزایش سرعت اسپیندل موجب کاهش زبری سطح در سوراخ کاری کامپوزیت های هیبریدی می شود. به دلیل سرعت بالای اسپیندل، نیروی ایجاد شده در برش افزایش می یابد. این افزایش نیرو باعث بریده شدن راحت تر ماده کامپوزیتی شده و زبری سطح کمتری ایجاد می کند.

#### ۴-۲ تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر نیروی سوراخ کاری و زبری سطح

همان طور که از شکل های ۵ و ۶ قابل استنتاج است با افزایش نرخ پیشروی به علت افزایش ضخامت براده تغییر شکل یافته، نیروی وارد بر قطعه کار افزایش می یابد. هرچه نرخ پیشروی و سرعت نفوذ ابزار در قطعه کمتر باشد، خروج براده با سهولت بیشتر اتفاق خواهد افتاد. همچنین ضخامت براده تغییر شکل یافته کمتر شده و نهایتاً نیروهای سوراخ کاری کاهش می یابد. با افزایش نرخ پیشروی به دلیل افزایش اصطکاک بین مته و براده و همچنین کاهش قابل توجه عمر مته به دلیل ساییدگی، زبری سطح سوراخ کاری شده بیشتر شده و با شیب بسیار زیادی افزایش پیدا کند از طرفی افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش تولید حرارت و گرما در حین سوراخ کاری می شود که این امر زبری سطح را افزایش می دهد.

turning of aerospace titanium alloy (gr5). Measurement. 2012;45(5):1266-76.

9. Altunpak Y, Ay M, Aslan S. Drilling of a hybrid Al/SiC/Gr metal matrix composites. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012;60:513-7.

10. Rajmohan T, Palanikumar K. Application of the central composite design in optimization of machining parameters in drilling hybrid metal matrix composites. Measurement. 2013;46(4):1470-81.

11. Montgomery DC. Design and analysis of experiments: John wiley & sons; 2017.

با تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها بهترین ترکیب از مقادیر برای به حداقل رساندن هم‌زمان زبری سطح و نیروی محوری پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارت‌اند از: سرعت اسپیندل ۱۸۵۵ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دور، درصد وزنی ۱۵٪ SiC.



شکل ۱۲) بهینه‌سازی صورت گرفته به منظور الف) کمترین مقدار زبری سطح ب) کمترین مقدار نیروی محوری

#### ۵-مراجع

1. 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.
2. Tahmasbi V, Baghi MH, Aeinehbandy S, Sousanabadi Farahani A. Sensitivity analysis and optimization of material removal rate and surface quality in aluminum matrix composite. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(7):395-404.
3. 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.
4. Basavarajappa S, Chandramohan G, Prabu M, Mukund K, Ashwin M. Drilling of hybrid metal matrix composites—Workpiece surface integrity. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007;47(1):92-6.
5. Basavarajappa S, Chandramohan G, Davim JP. Some studies on drilling of hybrid metal matrix composites based on Taguchi techniques. Journal of materials processing technology. 2008;196(1-3):332-8.
6. Ahamed AR, Asokan P, Aravindan S, Prakash M. Drilling of hybrid Al-5% SiC p-5% B 4 C p metal matrix composites. The international journal of advanced manufacturing technology. 2010;49:871-7.
7. Babu TM, Sugun MA, Muthukrishnan N. Investigation on the characteristics of surface quality on machining of hybrid metal matrix composite (Al-SiC-B4C). Procedia Engineering. 2012;38:2617-24.
8. Ramesh S, Karunamoorthy L, Palanikumar K. Measurement and analysis of surface roughness in