



Sensitivity Analysis Modeling and Optimization of Cutting Forces and Stool Wear in Milling of Aluminum Matrix Composite

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Tahmasbi V.^{1*},
Aeinehbandy S.¹,
Hafez Baghi M¹,
Sousanabadi Farahani A.²,

How to cite this article

Tahmasbi V, Aeinehbandy S, Hafez Baghi M, Sousanabadi Farahani A. Sensitivity Analysis Modeling and Optimization of Cutting Forces and Stool Wear in Milling of Aluminum Matrix Composite. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(08):475-483.

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

² Faculty of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

*Correspondence

Address: Arak University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Arak, Iran.

Tahmasbi@arakut.ac.ir

Article History

Received: February 12, 2023

Accepted: June 20, 2023

ePublished: October 6, 2023

ABSTRACT

Advances in many engineering fields depend on materials with appropriate properties. The use of metal-matrix composites is rapidly growing as a suitable alternative to conventional materials due to their strength-to-weight ratio, resistance to wear and creep, etc. Machining of metal-based composites is a difficult task due to the presence of very abrasive reinforcing particles in its based metal. Therefore, it is necessary to investigate the factors affecting these materials. In this research, a methodical study has been conducted to investigate the effect of the parameters of spindle speed, feed rate, depth of cut and the percentage of reinforcing particles on the behavior of cutting force and tool wear using experimental design methods, modeling and statistical sensitivity analysis methods. Detailed analysis of behaviors has been done by providing statistical regression equations and optimization by Deringer's method and E-Fast-Sensitivity Analysis. According to the obtained results, the cutting depth had the greatest effect on the machining force. Also, cutting speed with 77%, advance rate with 9% percent and cutting depth and weight percent of reinforcing particles with 7% percent are other parameters affecting tool wear in the milling process of this composite.

Keywords Sensitivity Analysis, Milling, Al Matrix Composite, Tool Wear, Cutting Forces

CITATION LINKS

1- Surface roughness prediction for CNC End milling, materials and processes quality control manufacturing. 2- Study on surface damages caused by turning NiCr20TiAl nickel-based alloy. 3- Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis. 4- 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. 5- A review on conventional and nonconventional machining of SiC particle-reinforced aluminium matrix composites. 6- Grinding of alumina/aluminum composites. 7- Effect of reinforcement in ultra-precision machining of Al6061/SiC metal matrix composites. 8- Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools. 9- Machining parameter optimisation of an aluminium hybrid metal matrix composite by statistical modelling. 10- Machinability of LM6/SiCp metal matrix composites with tungsten carbide cutting tool inserts. 11- Tool wear, surface integrity and dimensional accuracy in turning Al2124SiCp (45% wt) metal matrix composite using CBN and PCD tools. 12- Effect of clustering on the mechanical properties of SiC particulate-reinforced aluminum alloy 2024 metal matrix composites. 13- Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles. 14- Machining of graphitic SiC-reinforced aluminium metal matrix composites with diamond tools. 15- Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminium alloy composites. 16- Machining performance study on metal matrix ... 17- Effect of cutting speed on tool ... 18- Investigation of cutting force, ... 19- Experimental investigation of machinability ... 20- Empirical model-building and response surfaces. 21- Comparison between Taguchi ... 22- Investigation of mechanical and machinability ... 23- Predictive modeling and multi-response ... 24- Experimental investigation and multi-objective ... 25- Multi response optimization...

تحلیل حساسیت، مدل‌سازی و بهینه‌سازی رفتار نیروی برشی و سایش ابزار در فرزکاری کامپوزیت پایه آلومینیومی با درصد‌های مختلف SIC

وحید طهماسبی^{۱*}، سپهر آئینه‌بندی^۱، محمدحافظ باقی^۱، امین سوسن آبادی^۲ فراهانی^۲

^۱ گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

پیشرفت‌های صورت گرفته در بسیاری از زمینه‌های مهندسی مرهون دستیابی به مواد اولیه با ویژگی‌های مطلوب است. استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل دارا بودن نسبت استحکام به وزن مناسب، مقاومت به سایش و خزش و... به‌عنوان یک جایگزین برای مواد اولیه رایج در صنعت از جمله آلیاژهای آهنی در حال گسترش است. ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی به دلیل وجود ذرات تقویت‌کننده بسیار ساینده در زمینه فلزی آن، کاری دشوار و همراه با چالش‌های فراوان است. از این‌رو بررسی عوامل اثرگذار بر روی ماشین‌کاری این مواد امری لازم و اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه سعی بر این شده است مطالعه‌ای روشمند به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای سرعت دوران اسپیندل، سرعت پیشروی، عمق برش و درصد ذرات تقویت‌کننده بر روی رفتار نیروی برشی و سایش ابزار با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش، مدل‌سازی و روش‌های تحلیل حساسیت آماری صورت گیرد. تحلیل دقیق رفتارها با ارائه معادلات رگرسیون آماری و بهینه‌سازی به روش درینگر و تحلیل حساسیت ای - فست انجام شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده عمق برش بیشترین تأثیر را بر نیروی ماشین‌کاری را داد. همچنین سرعت برشی با ۷۷٪، نرخ پیشروی با ۹٪ درصد و عمق برش و درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده هرکدام با ۷٪ درصد سایر پارامترهای اثرگذار بر روی سایش ابزار در فرآیند فرزکاری این کامپوزیت هستند. **کلیدواژه‌ها:** آنالیز حساسیت، فرزی کاری، کامپوزیت پایه آلومینیومی، سایش ابزار، نیروی ماشین‌کاری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

*نویسنده مسئول: Tahmasbi@arakut.ac.ir

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل دارا بودن مجموعه‌ای از خواص مطلوب از جمله نسبت استحکام به وزن مناسب، مقاومت به سایش و... به‌عنوان یک گزینه‌ی مناسب در ساخت قطعات مکانیکی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند^[۱]. سال‌هاست که تحقیقات گسترده برای دستیابی به مواد جدید با خواص مکانیکی بهتر انجام گرفته و هنوز هم همگام با پیشرفت‌های سریع صنعتی دنبال می‌شود^[۲]. غالباً تولید موادی با نسبت مناسب استحکام به چگالی و خواص ویژه سطحی (مانند مقاومت سایشی بالا) مدنظر است. در سال‌های اخیر، نسل جدید مواد کامپوزیتی به‌عنوان کامپوزیت‌های پایه فلزی معرفی شده‌اند

تا به‌طور هم‌زمان نسبت استحکام به وزن و سختی بیشتری را ارائه دهند^[۳،۴]. آلومینیوم مرسوم‌ترین فلز پایه در کامپوزیت‌های پایه فلزی است^[۵]. ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها پایه فلزی به خاطر وجود دو یا چند فاز مشخص که یکی از آن‌ها بسیار ساینده بوده و همچنین به خاطر اختلاف قابل‌ملاحظه بین دو ماده تشکیل‌دهنده یعنی ماده تقویت‌کننده سرامیکی سخت و زمینه فلزی، کار بسیار مشکلی خواهد بود. به همین دلیل، تلاش می‌شود کامپوزیت‌های زمینه فلزی نزدیک به شکل نهایی ساخته شوند تا نیاز به ماشین‌کاری به حداقل رسد. به‌رحال بیشتر قطعات ساخته شده به شکل نهایی نیز می‌بایست تحت فرآیند ماشین‌کاری قرار گیرند^[۶]. طبق تحقیقات لین^[۷] ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی کار سختی بوده و به این حقیقت وابسته است که ذرات یا رشته‌های موجود در سطح، تخریب شده یا به خارج از شبکه حرکت می‌کنند که منجر به افزایش حفره‌ها و ترک‌ها می‌شود. تقویت فلز پایه با افزودن ذرات سخت به آن باعث افزایش سایش ابزار، کاهش قابلیت ماشین‌کاری، کاهش کیفیت سطح و افزایش هزینه‌های کلی تولید می‌گردد؛ بنابراین محققان و دانشمندان این عرصه بر آن شدند تا با روش‌های جدید و ذرات متفاوت افزودنی و نسبت ترکیبات گوناگون مواد کامپوزیتی مرغوب‌تری را تولید کنند که علاوه بر سختی و استحکام بالا، قابلیت ماشین‌کاری را افزایش، سایش ابزار را کاهش و همچنین کیفیت سطح را بهبود بخشند^[۸]. از پژوهش‌های رادیکا و همکارانش^[۹] مشخص شد عمق برش بیشترین تأثیر را بر نیروی ماشین‌کاری در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت زمینه فلزی دارد. مطالعاتی که توسط رابین درا و سوتره^[۱۰] و جوگانا و همکاران^[۱۱] انجام شده است نشان می‌دهد که افزایش عمق برش حاصل کل نیروی برش را افزایش می‌دهد. این مطالعه نشان داد که تأثیر منفی عمق برش زیاد با افزایش نرخ براده برداری (MRR) به‌عنوان یک مزیت، جبران می‌شود. هانگ سون و همکاران^[۱۲] مشاهده کردند که نیروی برش با نرخ تغذیه و عمق برش افزایش و با افزایش سرعت برش کاهش می‌یابد. کیفیت سطح با افزایش عمق برش و نرخ تغذیه دچار کاهش خواهد شد. باین‌حال، کیفیت سطح مناسب با افزایش سرعت برش به دست می‌آید. همچنین توسط چندین محقق گزارش شده است که نرخ پیشروی به‌طور جدی بر سایش ابزار در فرزکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی تأثیر می‌گذارد^[۱۳،۱۴]. ساهین^[۱۵] گزارش کرد که سایش ابزار سریعاً با افزایش در سرعت برش افزایش خواهد یافت. بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که کاهش سرعت برش سایش ابزار را کمتر خواهد کرد^[۱۵-۱۷]. در مطالعه دیگری که توسط کیشور و همکاران انجام شده هم نشان داده شده است که عمق برش تأثیر قابل‌توجهی بر سایش ابزار دارد^[۱۸].

بنابر مطالعات صورت گرفته در حوزه ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دست آوردن درک صحیحی از میزان اثرگذاری پارامترهای ماشین‌کاری امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در

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 کاربردی روکش‌دار (AXMT 0903 PER-EML TT8020 Make: Taegu Tec) استفاده شد. همچنین از ابزار گیر مدل 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 سایش ابزار

سایش جانبی مهم‌ترین عامل برای اندازه‌گیری عمر ابزار است. میکروسکوپ ابزارساز (METZER) (مدل: Metz-1395) برای اندازه‌گیری سایش سطح جانبی ابزار پس از پایان عملیات فرزکاری استفاده شد. سایش ابزار با توجه به سطح نمونه فرز شده متفاوت است [19]. به منظور درک بهتر خوانندگان محترم تصویر یک نمونه از لبه برش ساییده شده توسط کامپوزیت‌های زمینه فلزی در شکل ۲ درج گردید.

۲-۴- اندازه‌گیری نیروی برش

نیروی برش با استفاده از سیستم جمع‌آوری داده‌های کامپیوتری در زمان واقعی و با کمک دینامومتر (KISTLER) اندازه‌گیری شد. در طول عملیات ماشین‌کاری، نیرو در سنسورهای پیزوالکتریک اندازه‌گیری می‌شود. از نرم‌افزار (KISTLER DynoWare) برای جمع‌آوری داده‌ها به صورت نمودار استفاده شد.

۲-۵- طراحی آزمایش

استفاده از طراحی آزمایش‌ها (DOE) می‌تواند برای کاهش تعداد آزمایش‌هایی که برای به دست آوردن یک پاسخ مناسب به یک پرسش مورد نیاز است، استفاده شود. روش سطح پاسخ (RSM) یک ابزار خوب به دلیل دقت در مدل‌سازی و اعتبارسنجی تجربی می‌باشد [20]. اهمیت برهمکنش‌ها و ترم مربع پارامترها به وضوح در RSM پیش‌بینی می‌شود، درحالی‌که تکنیک تاگوچی معمولاً برای برهمکنش‌های خطی استفاده می‌گردد.



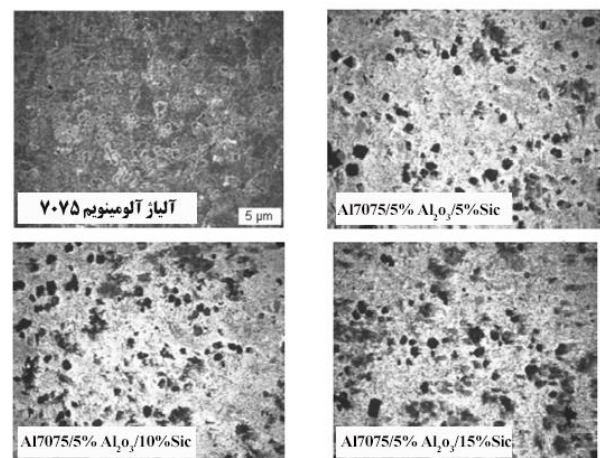
شکل ۲) لبه برشی ساییده شده و نمونه اینسرت و ابزارگیر مورد استفاده

این مقاله به صورت روشمند و با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌سازی آماری فرآیند صورت پذیرفته و رفتار پارامترهای سایش ابزار و نیروی برشی به عنوان دو پاسخ مهم در ماشین‌کاری این نوع کامپوزیت 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 فرسایش ابزار با استفاده از الگوریتم درینگر ارائه شده است. همچنین در این مقاله برای نخستین بار به آنالیز حساسیت پارامترهای اصلی ماشین‌کاری بر روی نیروهای ماشین‌کاری و فرسایش ابزار و نیروی برشی با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای فست پرداخته شده است و میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای ورودی بر سایش ابزار و نیروی برشی مشخص گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به عنوان ماده زمینه و ذرات آلومینا و کاربید سیلیکون به عنوان ذرات تقویت‌کننده کامپوزیت مورد مطالعه انتخاب شدند. از ذرات کاربید سیلیکون در اندازه ۶۳ میکرومتر و اندازه متوسط ذرات آلومینا ۴۵ میکرومتر مورد استفاده قرار گرفت. چگالی ذرات Al_2O_3 بیشتر از Sic است. نسبت Al_2O_3 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 \times ۱۰۰ میلی‌متر \times ۵۰ میلی‌متر با فرآیند ریخته‌گری به هم زدن ساخته شد. توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در ماده زمینه را مطابق با شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد. آلیاژ آلومینیوم در یک کوره الکتریکی در یک بوته ذوب شد. مخلوط آلومینا و Sic تا دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم گردیده و به فلز مذاب آلومینیوم در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد اضافه و پیوسته هم زده شد [19].



شکل ۱) تصویر ریزساختار نمونه‌های اولیه با درصد‌های مختلف درصد‌های مختلف

بین ورودی‌ها و خروجی‌ها (ها) می‌باشد. این روش برخلاف روش سوبل که برای به دست آوردن واریانس کلی و واریانس‌های جزئی از انتگرال‌های چندبعدی استفاده می‌کند، با تعریف تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی را به انتگرال‌های تک‌بعدی تبدیل کرده و موجب ساده‌سازی روند محاسبه شاخص‌های حساسیت می‌گردد. روش ای فست فضای n بعدی فاکتورهای ورودی (K^n) را با استفاده از منحنی جست‌وجو تعریف شده با مجموعه‌ای از معادلات پارامتریک، کاوش می‌کند:

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(\omega_i s + \phi_i)) \quad (1)$$

ω_i ($i = 1, 2, \dots, n$) فرکانس مربوط به فاکتور x_i و s متغیری است که در بازه $-\pi$ تا π تغییر می‌کند و ϕ_i نقطه شروع منحنی را مشخص می‌کند. واریانس خروجی مدل با استفاده از آنالیز فوریه تقریب زده می‌شود:

$$V(Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \right]^2 \quad (2)$$

$$\approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2)$$

$G f(s) = f(G_1(\sin(\omega_1 s)), G_2(\sin(\omega_2 s)), \dots, G_n(\sin(\omega_n s)))$
توابع انتقال، A_j و B_j ضرایب فوریه می‌باشند که در روابط ۳ و ۴ نشان داده شده است.

$$A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos(js) ds \quad (3)$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin(js) ds \quad (4)$$

با محاسبه ضرایب فوریه برای فرکانس پایه ω_i و هارمونیک‌های بالاتر آن $p\omega_i$ می‌توان واریانس جزئی مرتبه اول ورودی x_i را به دست آورد.

$$V_i = \sum_{p \in \mathbb{Z}^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (5)$$

همچنین برای محاسبه شاخص حساسیت اصلی مانند روش سوبل از نسبت واریانس جزئی مرتبه اول به واریانس کلی استفاده می‌کنیم. شاخص حساسیت کلی نیز از معادله ۶ به دست می‌آید:

$$ST_i = 1 - \frac{V_{-i}}{V} \quad (6)$$

واریانس V_{-i} از تغییر همه پارامترها به جز تغییر پارامتر x_i به دست می‌آید.

مراحل آنالیز حساسیت به کار گرفته شده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

(۱) انتخاب مجموعه‌ای از n فرکانس $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ ، که n

تعداد پارامترهای ورودی مدل می‌باشد.

(۲) نسبت دادن به دلخواه یک فرکانس از مجموعه

فرکانس‌ها برای هر پارامتر ورودی.

(۳) معرفی منحنی جست‌وجو، که فضای همه پارامترهای

ورودی را کاوش می‌کند.

سطح دوبعدی و سه‌بعدی تولید شده توسط RSM می‌تواند به تجسم اثر پارامترها بر پاسخ در کل محدوده مشخص شده کمک کند.^[21] عوامل متعددی مانند سرعت، پیشروی، عمق برش، هندسه ابزار، جنس قطعه کار و شرایط برش بر ویژگی‌های ماشین‌کاری تأثیر می‌گذارند. در این مطالعه چهار عامل کنترل‌کننده یعنی سرعت دوران اسپیندل، پیشروی، عمق برش و درصد وزنی SiC مورد بررسی قرار گرفت. این عوامل بر اساس سایر مطالعات انجام شده توسط محققان در این حوزه و پیشنهادات ایشان برای انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری انتخاب شده‌اند^[22,23]. جدول ۱ پارامترهای ماشین‌کاری مورد استفاده به عنوان عوامل کنترل و سطوح آن‌ها را فهرست می‌کند.

۲-۵-۱- روش‌های تحلیل حساسیت ای فست

آنالیز حساسیت برای ساده کردن مدل و افزایش اعتمادپذیری به مدل و ارائه ارتباط بین اطلاعات ورودی و خروجی مدل استفاده می‌شود. همچنین پیش‌بینی می‌کند مدل چگونه پاسخی به متغیرهای ورودی و تغییرات آن‌ها می‌دهد و کالیبراسیونی برای داده‌ها می‌باشد. حوزه‌ای از روش‌های آنالیز حساسیت عمومی که بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است، روش‌های بر پایه‌ی واریانس می‌باشد. در این روش‌ها شاخص حساسیت به صورت سهم هر یک از پارامترهای ورودی در واریانس کلی خروجی مدل محاسبه می‌گردد. روش‌های آنالیز حساسیت عمومی در چهار مرحله انجام می‌گیرد:

- تعریف ورودی و نوع توزیع هر یک از ورودی‌ها
- تولید نمونه برای مقادیر ورودی
- محاسبه‌ی خروجی مدل برای هر یک از مجموعه نمونه‌های ورودی
- محاسبه‌ی تأثیر هر فاکتور ورودی در خروجی

روش‌های آنالیز حساسیت عمومی بر پایه‌ی واریانس می‌توانند برای محاسبه‌ی تأثیر مرتبه‌ی اول و تأثیر مرتبه‌ی دوم (که شامل برهم‌کنش بین پارامترهای دیگر می‌باشد) مورد استفاده قرار گیرند. روش ای فست توسط کوکیر و همکارانش^[24] ارائه شد و سالتلی و همکارانش^[25] این روش را بهبود دادند. روش ای فست 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. کاربرد روش ای فست در چند مرحله ارائه می‌شود. این روش همانند روش سوبل برپایه واریانس است و مستقل از هرگونه فرض (خطی و یک‌نواخت)

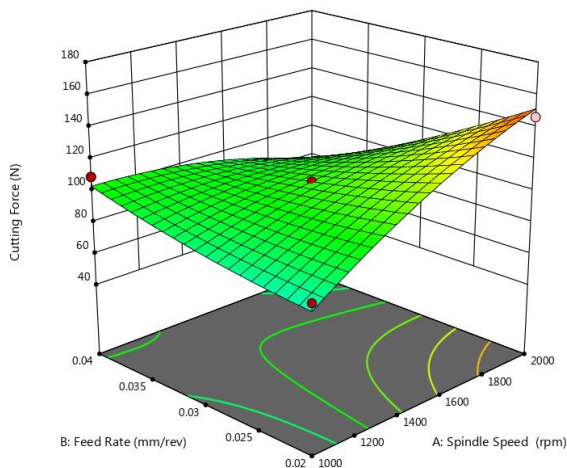
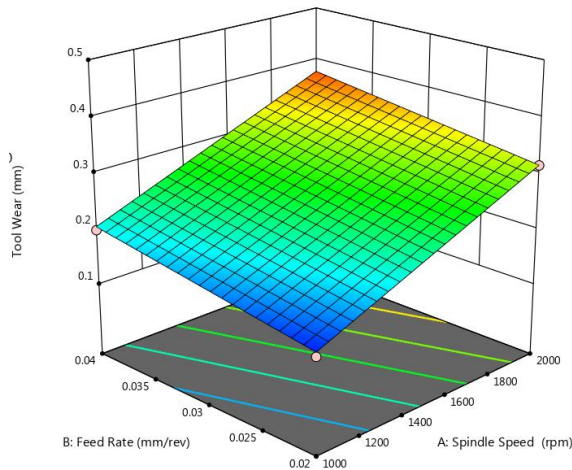
جدول ۱) عوامل کنترل و سطوح برای فرز انگشتی

پارامترهای ورودی	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 وزنی (SiC)	۱۵	۱۰	۵

ورودی و برهمکنش‌های میان آن‌ها را بر روی فاکتور خروجی تعیین می‌کند.

۳-۱- تحلیل و بهینه‌سازی نیروی برشی

معادله ۷ نشان‌دهنده معادله رگرسیون اصلاح‌شده مدل می‌باشد در این معادله پارامترهای غیر مؤثر حذف شده است. همچنین آنالیز واریانس آن در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد:



شکل ۳ نمودار سه‌بعدی نیروی ماشین‌کاری و سایش ابزار بر حسب سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی

جدول ۳ آنالیز واریانس مدل اصلاح‌شده در ماشین‌کاری کامپوزیت آلومینیوم

Source	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۹	۰/۱۸۹۰۷	۱۸۹۰۷/۰	۱۴/۳۰	۰/۰۰۰
A=سرعت اسپیندل	۱	۹/۱۵۹۰	۱۵۹۰/۹	۱۰/۸۳	۰/۰۰۴
B=نرخ پیشروی	۱	۴/۱۹۱۳	۱۹۱۳/۴	۱۳/۰۳	۰/۰۰۲
C=عمق برش	۱	۲/۸۷۷۰	۸۷۷۰/۲	۵۹/۷۰	۰/۰۰۰
D=درصد وزنی	۱	۷۵۵/۷	۷۵۵/۷	۵/۱۴	۰/۰۳۷
D2	۱	۱۴۲۷/۳	۱۴۲۷/۳	۹/۷۲	۰/۰۰۶
A×B	۱	۲۴۵۴/۷	۲۴۵۴/۷	۱۶/۷۱	۰/۰۰۱
B×C	۱	۵۸۴/۲	۵۸۴/۲	۳/۹۸	۰/۰۶۲
D×B	۱	۵۷۰/۷	۵۷۰/۷	۳/۸۹	۰/۰۶۵
D×C	۱	۸۳۹/۸	۸۳۹/۸	۵/۷۲	۰/۰۲۹

۴) محاسبه اندیس‌های حساسیت مرتبه اول و مرتبه کلی به وسیله تحلیل فوریه برای خروجی

۳- 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 نیروی برشی و سایش ابزار ثبت شده است [19]. همچنین جهت جلوگیری و حذف خطاهای پیش‌بینی نشده، انجام آزمایش‌ها به صورت تصادفی صورت پذیرفته است.

نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس (ANOVA) که از آنالیز نیروی برشی و سایش ابزار ماشین‌کاری شده حاصل گشته است، در جدول ۲ نشان داده شده است.

آنالیز واریانس بیان‌کننده میزان تأثیرگذاری ترم‌های معادله رگرسیون می‌باشد و در طراحی آزمایش‌ها میزان تأثیر فاکتورهای

جدول ۲ انجام آزمایش‌های بررسی اثر فاکتورهای ورودی بر روی نیروی برشی و سایش ابزار

شماره آزمایش	A=سرعت اسپیندل (دور بر دقیقه)	B=نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دور)	C=عمق برش (میلی‌متر)	D=درصد وزنی (درصد)	نیروی برشی (نیوتن)	سایش ابزار (میلی‌متر)
۱	۱۰۰۰	۰/۰۳	۱/۰	۱۰	۵۰/۷۵	۰/۱۳۵
۲	۱۵۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۵	۹۴/۴۸	۰/۱۸۸
۳	۲۰۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۵	۵۹/۸۷	۰/۴۰۱
۴	۱۵۰۰	۰/۰۳	۲/۰	۱۵	۱۲۲/۵	۰/۳۹۵
۵	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱/۰	۵	۸۹/۰۴	۰/۱۸۴
۶	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۰	۱۰۶/۵۹	۰/۲۴۹
۷	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۰	۱۰۶/۲۹	۰/۲۴۹
۸	۲۰۰۰	۰/۰۳	۱/۰	۱۰	۱۰۱/۴۱	۰/۳۴۷
۹	۱۵۰۰	۰/۰۴	۱/۰	۱۰	۷۴/۶۲	۰/۲۶۶
۱۰	۱۰۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۵	۶۸/۰۸	۰/۲۳۱
۱۱	۱۵۰۰	۰/۰۳	۲/۰	۵	۱۱۲/۳۴	۰/۲۵
۱۲	۱۵۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۱۵	۱۲۲/۴۴	۰/۲۴۹
۱۳	۲۰۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۵	۱۱۲/۲۴	۰/۲۸۸
۱۴	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۱۰	۱۰۶/۲۹	۰/۲۴۹
۱۵	۱۵۰۰	۰/۰۲	۲/۰	۱۰	۱۶۱/۵	۰/۲۴۷
۱۶	۱۵۰۰	۰/۰۴	۱/۵	۱۵	۷۶/۵۴	۰/۳۵۱
۱۷	۱۵۰۰	۰/۰۴	۲/۰	۱۰	۱۰۷/۶۷	۰/۲۹۸
۱۸	۲۰۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۱۰	۱۴۶/۵۸	۰/۳۱۶
۱۹	۱۵۰۰	۰/۰۳	۱/۰	۱۵	۴۱/۲۴	۰/۲۸۹
۲۰	۲۰۰۰	۰/۰۳	۲/۰	۱۰	۱۴۸/۰۷	۰/۳۷۹
۲۱	۱۵۰۰	۰/۰۴	۱/۵	۵	۹۶/۳۶	۰/۲۳۳
۲۲	۱۰۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۱۰	۸۳/۸۶	۰/۱۳۶
۲۳	۲۰۰۰	۰/۰۴	۱/۵	۱۰	۷۲/۹۴	۰/۳۵۹
۲۴	۱۰۰۰	۰/۰۴	۱/۵	۱۰	۱۰۹/۳۱	۰/۱۹۹
۲۵	۱۰۰۰	۰/۰۳	۱/۵	۵	۸۱/۴۴	۰/۱۶۶
۲۶	۱۵۰۰	۰/۰۲	۱/۰	۱۰	۸۰/۱۱	۰/۲۰۲
۲۷	۱۰۰۰	۰/۰۳	۲/۰	۱۰	۱۰۹/۵	۰/۱۸۸

۲-۲-۳- تأثیر نرخ پیشروی بر نیروی ماشین‌کاری

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌گردد با افزایش نرخ پیشروی، میزان نیروی برشی به صورت خطی کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده این است که دلیل وجود ذرات بسیار سخت و ساینده در ماده قطعه کار، در نرخ‌های پیشروی بالاتر، تماس کمتر بین ابزار و ذرات تقویت‌کننده وجود خواهد داشت، لذا سایش به نسبت کمتری بر روی ابزار اتفاق خواهد افتاد.

۲-۳-۳- تأثیر عمق برش بر نیروی ماشین‌کاری

همان‌طور که از شکل ۶ قابل استنتاج است با افزایش عمق برش به دلیل افزایش سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته و نیاز به برداشت حجم بیشتری از ماده، نسبت به عمق برش‌های کمتر نیروهای وارد بر ابزار در هنگام ماشین‌کاری این کامپوزیت افزایش می‌یابد.

۲-۴-۳- تأثیر درصد ذرات تقویت‌کننده بر سایش ابزار

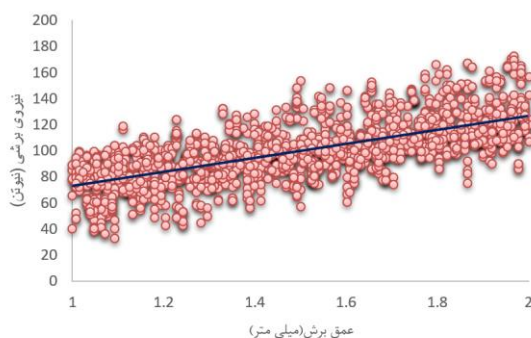
مطابق با شکل ۴ افزایش درصد ذرات تقویت‌کننده از ۵ به ۱۰ درصد نیروهای ماشین‌کاری افزایش می‌یابد. علت این پدیده می‌تواند افزایش سایش ابزار به دلیل تماس بیشتر ذرات تقویت‌کننده موجود در ماده مورد مطالعه باشد. همچنین سایش بیشتر ابزار باعث به وجود آمدن ارتعاش و ازدیاد نیروهای ماشین‌کاری خواهد شد. البته در کامپوزیت با ۱۵ درصد ذرات تقویت‌کننده ما شاهد کاهش مقدار نیروی ماشین‌کاری بودیم که می‌تواند به علت عدم توزیع یکنواخت ذرات در زمینه آلومینیومی اتفاق افتاده باشد.

۲-۵-۳- بهینه‌سازی فرآیند به منظور رسیدن به حداقل نیروی برشی

با توجه به مطالعاتی که در خصوص رفتار نیروی برشی در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی انجام شده است در این بخش بهینه‌سازی فرآیند به منظور رسیدن به حداقل نیروی ماشین‌کاری صورت گرفته است. با در نظر گرفتن حد کمینه نیروی ماشین‌کاری در مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها و لحاظ نمودن حد مطلوبیت، بهینه‌سازی صورت گرفته در جدول ۴ ارائه شده است.

۳-۳- تحلیل و بهینه‌سازی سایش ابزار

معادله ۸ نشان‌دهنده معادله رگرسیون اصلاح شده مدل می‌باشد. به منظور اصلاح مدل فوق، پارامترهای غیر مؤثر حذف شده است. آنالیز واریانس آن در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۶) نمودار تأثیر عمق برش بر نیروی برشی

$$\text{Cutting Force} = -332.5 + 0.1717 A + 12184 B + 68/6 C + 8.59 D - 0/585 D * D - 4/95 A * B - 2417 B * C - 239 B * D + 5/8 C * D \quad (7)$$

مقدار قابلیت اطمینان ۸۸/۳۳٪ نشان‌دهنده دقت مدل حاکم بر آزمایش است و هرچه مقدار این مؤلفه به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، بیان‌کننده این است که مدل‌سازی صورت گرفته بر روی نیروی برشی از دقت بالایی برخوردار بوده و قابل اطمینان می‌باشد.

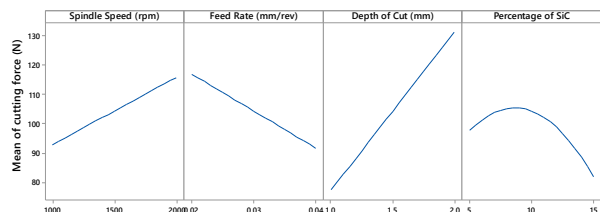
۲-۳-۳- تحلیل و بهینه‌سازی رفتار نیروی برشی

با در نظر گرفتن مدل‌سازی صورت گرفته و حذف ترم‌های غیر مؤثر در مدل، سعی بر آن شده است تا تأثیر سرعت دورانی، عمق برش و نرخ پیشروی بر روی رفتار نیروی برش مشخص گردد.

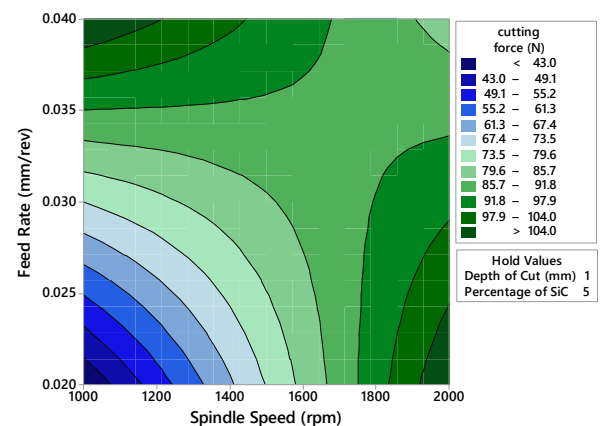
شکل ۴، که بر اساس مدل‌سازی صورت گرفته با استفاده از روش سطح پاسخ به دست آمده است، رفتار نیروی برشی را تحت تأثیر فاکتورهای ورودی مختلف به روش سطح پاسخ، ارائه می‌نماید.

۲-۱-۳- تأثیر سرعت برشی بر نیروی ماشین‌کاری

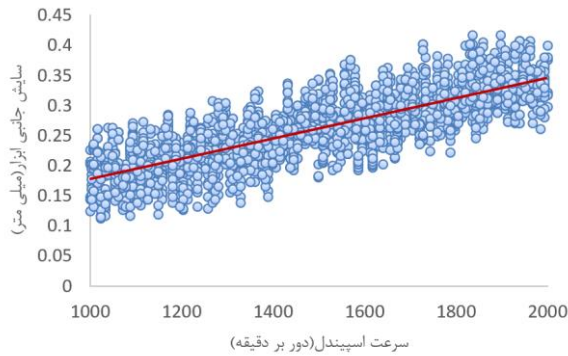
مطابق با شکل ۵ با افزایش سرعت دوران اسپیندل، نیروی برشی افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت برشی به دلیل برخورد بیشتر ذرات تقویت‌کننده و همچنین ماده زمینه چسبیده شده بر لبه برشی ابزار، سایش شدید ابزار رخ خواهد که این مسئله باعث به وجود آمدن ارتعاش و بالطبع افزایش نیروهای ماشین‌کاری می‌شود. همچنین افزایش سرعت برشی منجر به افزایش اصطکاک و بالا رفتن دمای ناحیه ماشین‌کاری خواهد شد. این افزایش دما منجر به مساعد شدن شرایط برای سایش بیشتر ابزار و ازدیاد نیروهای ماشین‌کاری خواهد شد.



شکل ۴) اثر پارامترهای اصلی بر روی رفتار نیروی برش



شکل ۵) تأثیر سرعت دوران اسپیندل بر نیروی برشی



شکل ۸) تأثیر سرعت اسپیندل بر سایش ابزار

سایش ابزار را بیشتر می‌کند. علاوه بر این با افزایش سرعت برشی تمایل تشکیل لبه انباشته بر روی لبه‌ی ابزار کاهش می‌یابد. اگرچه لبه‌ی انباشته باعث افت کیفیت سطح نهایی قطعه کار شده ولی در بحث عمر ابزار کمک قابل‌توجهی به افزایش عمر ابزار می‌کند. با افزایش سرعت برشی مواد قطعه کار چسبیده شده بر روی لبه‌ی ابزار به‌طور مداوم از لبه ابزار جدا شده و مجدداً می‌چسبند که این امر باعث سایش ابزار و یا حتی لب پر شدن بخشی از ابزار شود.

۳-۳-۳- تأثیر نرخ پیشروی بر سایش ابزار

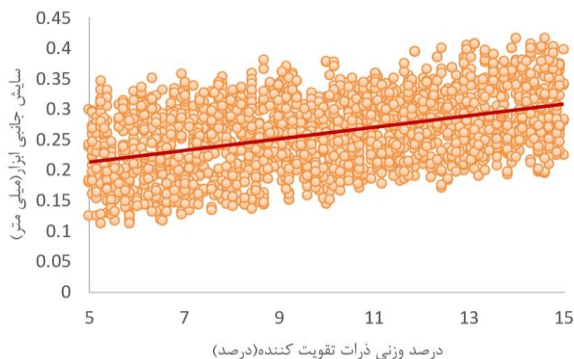
همان‌طور که از شکل ۷ قابل استنتاج است، افزایش نرخ پیشروی منجر به سایش بیشتر ابزار خواهد شد. با افزایش پیشروی به ازای یک لبه به همان نسبت ضخامت براده زیاد می‌شود. این افزایش ضخامت باعث افزایش مقدار دما و نیروهای ماشین‌کاری شده و موجب سایش بیشتر ابزار می‌شود.

۳-۳-۴- تأثیر عمق برش بر سایش ابزار

با توجه به شکل ۷ با افزایش عمق برش، سایش جانبی ابزار نیز بیشتر می‌شود. در اثر افزایش عمق برش، درجه حرارت روی سطح براده و آزاد ابزار افزایش یافته و در نتیجه باعث کاهش عمر ابزار می‌شود.

۳-۳-۵- تأثیر درصد ذرات تقویت‌کننده بر سایش ابزار

شکل ۹ تأثیر درصد ذرات تقویت‌کننده بر میزان نیروی برشی را نشان می‌دهد.



شکل ۹) تأثیر درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده بر سایش جانبی ابزار

جدول ۴) ترکیب بهینه بین آزمایش تجربی و مدل برآورد شده

نبروی (N)	سرعت اسپیندل (rpm)	نرخ پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	درصد وزنی (SIC)	بهینه‌سازی
۱۴/۵۰	۲۰۰۰	۰/۰۴	۱	۱۵	مدل‌سازی
	۲۰۰۰	۰/۰۴	۱	۱۵	آزمایش
	-	-	-	-	درصد خطا

جدول ۵) آنالیز واریانس مدل اصلاح‌شده سایش ابزار برحسب پارامترهای مؤثر در ماشین‌کاری کامپوزیت آلومینیوم

ترم‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۴	۰/۱۴۰۵۵۵	۰/۱۴۰۵۵۵	۸۶/۱۶	۰/۰۰۰
A=سرعت اسپیندل	۱	۰/۰۸۹۲۶۹	۰/۰۸۹۲۶۹	۲۱۸/۸۹	۰/۰۰۰
B=نرخ پیشروی	۱	۰/۰۱۱۲۸۵	۰/۰۱۱۲۸۵	۲۷/۶۷	۰/۰۰۰
C=عمق برش	۱	۰/۰۰۹۲۹۶	۰/۰۰۹۲۹۶	۲۲/۷۹	۰/۰۰۰
D=درصد وزنی	۱	۰/۰۳۰۷۰۴	۰/۰۳۰۷۰۴	۷۵/۲۹	۰/۰۰۰

$$\text{Tool wear mm} = -0.2745 + 0.000173 A + 3.067 B + 0.0557 C + 0.01012 D \quad (۸)$$

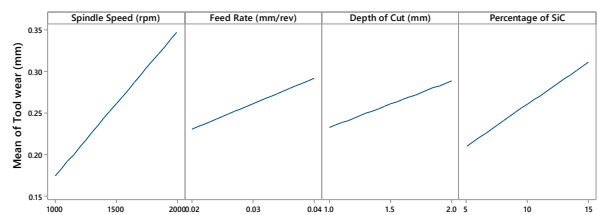
مقدار قابلیت اطمینان ۹۶/۰۰٪ نشان‌دهنده دقت مدل حاکم بر آزمایش است.

۳-۳-۱- تحلیل حساسیت پارامترها و بررسی اثر متغیرهای ورودی در رفتار سایش ابزار

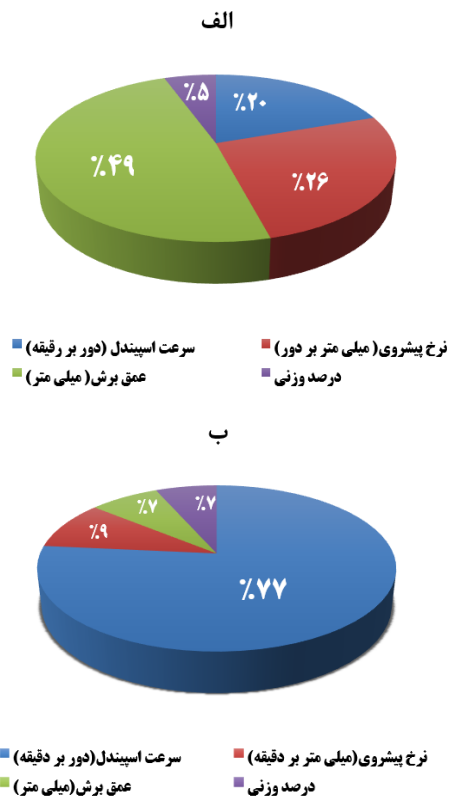
شکل ۷ تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند فرزکاری بر سایش ابزار را نشان می‌دهد. بدیهی است محققان همواره در تلاش هستند با کاهش میزان سایش ابزار و به طبع آن افزایش عمر ابزار هزینه‌های فرآیند ماشین‌کاری و مشکلات ناشی از خراب شدن یا تعویض ابزار را کاهش دهند. از این‌رو مطالعه پارامترهای مؤثر بر سایش ابزار امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

۳-۳-۲- تأثیر سرعت برشی بر سایش ابزار

مطابق با شکل ۸ با افزایش سرعت دوران اسپیندل، سایش ابزار افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت برشی اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و همچنین دمای ناحیه برش بیشتر شده که امکان افزایش



شکل ۷) اثر پارامترهای اصلی بر روی رفتار فرسایش ابزار



شکل ۱۰) درصد تأثیر پارامترهای فرآیند الف) در نیروی برشی ب) در سایش ابزار

سرعت پیشروی و درصد ذرات تقویت‌کننده بر روی نیروی ماشین‌کاری و سایش ابزار به روش آزمایش تجربی و آنالیز حساسیت سویل مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج به دست آمده به شرح ذیل است.

- ۱- عمق برش با ۴۹٪ درصد بیشترین میزان اثرگذاری را بر نیروی برشی دارد، پس از آن نرخ پیشروی با ۲۶ درصد و سرعت اسپیندل با ۲۰٪ درصد و درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده ۵٪ درصد سایر پارامترهای اثرگذار در فرآیند فرزکاری این کامپوزیت هستند.
- ۲- با افزایش دوران اسپیندل و عمق برش و نیروی برشی افزایش پیدا می‌کند.
- ۳- سرعت برشی با ۷۷٪ درصد بیشترین میزان اثرگذاری را بر سایش ابزار دارد، پس از آن نرخ پیشروی با ۹٪ درصد و عمق برش و درصد وزنی با ۷٪ درصد سایر پارامترهای اثرگذار در فرآیند فرزکاری این کامپوزیت هستند.

- ۴- از تجزیه و تحلیل، بهترین ترکیب از مقادیر برای به حداقل رساندن هم‌زمان زبری سطح و به حداکثر رساندن نرخ براده برداری پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارت‌اند از سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در

با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، میزان سایش ابزار به صورت نسبتاً خطی افزایش می‌یابد. با توجه به خاصیت سایشی شدید ذرات Sic، با افزایش ذرات تقویت‌کننده در ماده زمینه سایش بسیار شدیدی بین ذرات تقویت‌کننده و سطح جانبی ابزار رخ خواهد داد که سبب کاهش عمر ابزار خواهد گردید.

۳-۳-۶- بهینه‌سازی فرآیند به منظور رسیدن به حداقل سایش ابزار با توجه به مطالعاتی که در خصوص رفتار سایش ابزار در هنگام ماشین‌کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی انجام شده است. در این بخش بهینه‌سازی فرآیند به منظور رسیدن به حداقل نیروی ماشین‌کاری صورت گرفته است. با در نظر گرفتن حد کمینه سایش ابزار در مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها و لحاظ نمودن حد مطلوبیت، بهینه‌سازی صورت گرفته در جدول شماره ۶ ارائه شده است.

۳-۳-۷- جمع‌بندی آنالیز سویل در بررسی حساسیت پارامترهای مؤثر در رفتار زبری سطح

شکل ۱۰ آنالیز حساسیت صورت گرفته شده به روش ای فست را نشان می‌دهد. مطابق با آنالیز انجام شده سرعت برشی با ۷۷٪ درصد بیشترین میزان اثرگذاری را بر سایش ابزار دارد، پس از آن نرخ پیشروی با ۹٪ درصد و عمق برش و درصد وزنی با ۷٪ درصد سایر پارامترهای اثرگذار بر روی سایش ابزار در فرآیند فرزکاری این کامپوزیت هستند. همچنین عمق برش با ۴۹٪ درصد اثرگذارترین پارامتر بر روی رفتار نیروی برشی است. پس از آن نرخ پیشروی با ۲۶ درصد و سرعت اسپیندل با ۲۰٪ درصد و درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده ۵٪ درصد سایر پارامترهای اثرگذار بر نیروی برشی در فرآیند فرزکاری این کامپوزیت هستند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به صورت روشمند و با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌سازی آماری فرآیند صورت پذیرفته و رفتار پارامترهای سایش ابزار و نیروی برشی به عنوان دو پاسخ مهم در ماشین‌کاری این نوع کامپوزیت 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 فرسایش ابزار با استفاده از الگوریتم درینگر ارائه شده است.

میزان تأثیر هر یک از پارامترهای سرعت دوران اسپیندل، عمق برش،

جدول ۶) ترکیب بهینه بین آزمایش تجربی و مدل برآورد شده

پارامتر	سرعت اسپیندل (rpm)	نرخ پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	درصد وزنی (SIC)	بهبود سایش
مدل‌سازی	۲۰۰۰	۰/۰۴	۱	۱۵	۰/۰۶۵۶
آزمایش	۲۰۰۰	۰/۰۴	۱	۱۵	-
درصد خطا	-	-	-	-	-

matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*. 2003;347(1-2):198-204.

13- Alipour Sougavabar M, Niknam SA, Davoodi B. Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2022;9(2):1970-5.

14- Songmene V, Balazinski M. Machining of graphitic SiC-reinforced aluminium metal matrix composites with diamond tools.

15- Sahin Y. Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminium alloy composites. *Materials & design*. 2003;24(8):671-9.

16- Srinivasan A, Arunachalam RM, Ramesh S, Senthilkumaar JS. Machining performance study on metal matrix composites-a response surface methodology approach. *American Journal of Applied Sciences*. 2012;9(4):478-83.

17- Karakaş MS, Acır A, Übeyli M, Ögel B. Effect of cutting speed on tool performance in milling of B4Cp reinforced aluminum metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;178(1-3):241-6.

18- Kishore DS, 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.

19- 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;105:78-86.

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

21- Milkey KR, Samsudin AR, Dubey AK, Kidd P. Comparison between Taguchi Method and Response Surface Methodology (RSM) in Modelling CO 2 Laser Machining. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. 2014;8(1).

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

23- 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;95:99-115.

24- Taşkesen A, Kütükde K. Experimental investigation and multi-objective analysis on drilling of boron carbide reinforced metal matrix composites using grey relational analysis. *Measurement*. 2014;47:321-30.

25- Haq AN, Marimuthu P, Jeyapaul R. Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;37:250-5.

دقیقه، تغذیه ۰/۰۳ میلی‌متر در دور، عمق برش ۱ میلی‌متر و درصد وزنی ۵ درصد SiC.

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

تعارض منافع: این مقاله تعارض منافعی با سایر محققان ندارد.

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

منابع

- 1- Mike, S. L., C. Joseph, and Li M. Chen. "Surface roughness prediction for CNC End milling, materials and processes quality control manufacturing." *J. Ind. Technol* 15.1 (1998): 1999.
- 2- Zou B, Chen M, Huang C, An Q. Study on surface damages caused by turning NiCr20TiAl nickel-based alloy. *Journal of materials processing technology*. 2009;209(17):5802-9.
- 3- Muthukrishnan N, Davim JP. Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis. *Journal of materials processing technology*. 2009;209(1):225-32.
- 4- 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;9(6):59-69.
- 5- Chen JP, Gu L, He GJ. A review on conventional and nonconventional machining of SiC particle-reinforced aluminium matrix composites. *Advances in Manufacturing*. 2020;8:279-315.
- 6- Zhong Z, Hung NP. Grinding of alumina/aluminum composites. *Journal of materials processing technology*. 2002;123(1):13-7.
- 7- Cheung CF, Chan KC, To S, Lee WB. Effect of reinforcement in ultra-precision machining of Al6061/SiC metal matrix composites. *Scripta materialia*. 2002;47(2):77-82.
- 8- Durante S, Rutelli G, Rabezzana F. Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools. *Surface and Coatings Technology*. 1997;94:632-40.
- 9- Radhika N, Subramaniam R, Babudeva Senapathi S. Machining parameter optimisation of an aluminium hybrid metal matrix composite by statistical modelling. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2013;65(6):425-35.
- 10- Behera R, Sutradhar G. Machinability of LM6/SiCp metal matrix composites with tungsten carbide cutting tool inserts. *ARP journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012;7(2):216-21.
- 11- Njuguna MJ, Gao D, Hao Z. Tool wear, surface integrity and dimensional accuracy in turning Al2124SiCp (45% wt) metal matrix composite using CBN and PCD tools. *Res J Appl Sci Eng Technol*. 2013;6(22):4138-44.
- 12- Hong SJ, Kim HM, Huh D, Suryanarayana C, Chun BS. Effect of clustering on the mechanical properties of SiC particulate-reinforced aluminum alloy 2024 metal