



## A Template for Preparing Papers in the Advanced Machining and Machine Tools Conference



### ARTICLE INFO

#### Authors

Taheri M.<sup>1\*</sup>,  
Arabzadeh AR.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

#### \* Correspondence

Address: Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.  
m-taheri@araku.ac.ir

#### How to cite this article

Taheri M, Arabzadeh AR. A Template for Preparing Papers in the Advanced Machining and Machine Tools Conference. Proceedings of 3<sup>rd</sup> Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools. 2023;23(10):9-13.

### ABSTRACT

Today, the machining and milling of composites is of great importance; Because composites are used in various sectors and have found great efficiency in various industries. Considering this, in this article, in order to save the cost of milling composites, the effectiveness of various parameters that affect the cutting force and tool wear, including spindle speed (rpm), feed rate (mm/rev), cutting depth (mm) and percentage of sic, has been discussed; To minimize tool wear and cutting force by creating optimal conditions. Performing a sensitivity analysis according to the regression equations of cutting force and tool wear has shown that spindle speed with 63% and the percentage of composite silicon carbide with 22% have the greatest effect on tool wear and depth of cut with 47% and advance with 23% have the greatest effect on cutting force.

**Keywords** Milling, Aluminum Composite, Effective Parameters, Cutting Force, Tool wear

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۹-۱۳



## بررسی پارامترهای مؤثر بر نیروی برشی و فرسایش ابزار در فرزکاری کامپوزیت آلومینیوم



### چکیده

### مشخصات مقاله

#### نویسنده‌ها

معین طاهری<sup>۱\*</sup>  
احمدرضا عربزاده<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده فنی مهندسی،  
دانشگاه اراک، اراک، ایران  
m-taheri@araku.ac.ir

امروزه ماشین‌کاری و فرزکاری کامپوزیت‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا کامپوزیت‌ها در بخش‌های گوناگونی استفاده می‌شوند و کارایی زیادی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. با توجه به این امر، در این مقاله، برای صرفه‌جویی در هزینه‌ی فرزکاری کامپوزیت‌ها به بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای مختلفی که بر روی نیروی برشی و فرسایش ابزار تأثیر گذارند، شامل سرعت اسپیندل (rpm)، نرخ پیشروی (mm/rev)، عمق برش (mm) و درصد sic، پرداخته شده است؛ تا با ایجاد شرایط بهینه، فرسایش ابزار و نیروی برشی به حداقل رسانده شود. انجام تحلیل حساسیت با توجه به معادله‌های رگرسیون نیروی برشی و فرسایش ابزار نشان داده است که سرعت اسپیندل با ۶۳٪ و میزان درصد کاربید سیلیکون کامپوزیت با ۲۲٪ بیشترین تأثیر را بر روی فرسایش ابزار دارند و عمق برش با ۴۷٪ و پیشروی با ۲۳٪ بیشترین تأثیر را بر روی نیروی برشی دارند.

**کلیدواژه‌ها** فرزکاری، کامپوزیت آلومینیوم، پارامترهای مؤثر، نیروی برشی، فرسایش ابزار

## ۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون علم و صنعت، مواد نسل دوم روی کارآمدند که کامپوزیت‌های زمینه فلزی ترکیبی از این دسته مواد هستند. کامپوزیت‌ها مواد ترکیبی با حداقل دو ماده هستند که یک ماده به‌عنوان زمینه و ماده دیگر به‌منظور افزایش خواص استفاده می‌شود. کامپوزیت‌ها در صنایع خودروسازی، لوکوموتیو و هواپیما جایگزین مناسبی برای مواد آهنی هستند؛ زیرا هم سبک‌تر و هم از استحکام بالایی برخوردارند [1].

داوودی و همکارانش در تحقیقی تولید آلیاژ نانوساختار آلومینیوم ۷۰۱۴ و همچنین کامپوزیت نانوساختار به روش آلیاژسازی مکانیکی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که میزان سختی کامپوزیت با افزایش زمان آسیاکاری و افزایش درصد مقاوم ساز آلومینا افزایش پیدا می‌کند [2].

علی‌پور و همکارانش به بررسی تحلیل آماری اثر پارامترهای برشی بر سایش ابزار و کیفیت سطح بعد از ماشین‌کاری پرداختند. آن‌ها با بررسی میزان سایش ابزار حین ماشین‌کاری کامپوزیت‌های به همراه ذرات تقویت‌کننده Sn.Sic به این نتیجه رسیدند که سرعت برشی بیشترین اثر و سرعت پیشروی و روش روان‌کاری و همچنین میزان عمق برش کمترین اهمیت را بر سایش ابزار دارد [3].

علیزاده و همکارانش در پژوهشی به بررسی ریزساختار و رفتار مکانیکی کامپوزیت سطحی  $Al/Sic/CNT$  تولید شده به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته‌اند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که نمونه‌های حاوی ذرات Sic ریزتر و توزیع یکنواخت نسب به نمونه بدون تقویت‌کننده دارند. نتایج سختی آن‌ها نیز نشان داد که نمونه حاوی ذرات Sic باعث افزایش سختی تا حدود ۱۸۵ درصد بیشتر از نمونه بدون تقویت‌کننده می‌گردد و بیشترین مقاومت به سایش و کمترین ضریب اصطکاک برای نمونه حاوی نانوذرات Sic، CNT می‌باشد که نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده ۸۱ درصد کاهش وزن کمتری دارد [4].

یوسفی و همکارانش به بررسی تجربی قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت Al-15%sic که با فرآیند متالوژی پودر ساخته شده پرداخته‌اند. آن‌ها تراشکاری میله‌های ماده کامپوزیت را با استفاده از ابزارهای تراش کاربیدی در شرایط خشک به‌عنوان روش انجام آزمایش انتخاب نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سرعت ماشین‌کاری و عمق تراش نسبت به نرخ تغذیه اثر بیشتری بر قابلیت ماشین‌کاری دارد. همچنین سایش ابزار، کیفیت سطح تمام شده و نیروی ماشین‌کاری در این نوع ماده کامپوزیتی از ماده کامپوزیتی مشابه که به روش ریخته‌گری ساخته شده بیشتر است به‌طورکلی نتیجه آزمایش آن‌ها نشان می‌دهد که شرایط بهینه ماشین‌کاری در این نوع کامپوزیت با

سرعت متوسط و نرخ پیشروی و عمق برش کم حاصل شده است [5].

طهماسبی و همکارانش در پژوهشی که با استفاده از مدل‌سازی و بهینه‌سازی نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح در ماشین‌کاری کامپوزیت آلومینیوم در درصدهای مختلف sic انجام دادند و با تغییر پارامترهای سرعت اسپیندل، تغذیه و عمق برش، با تجزیه و تحلیل رابطه رگرسیون، برای حل مسأله، بهینه‌سازی انجام داده و به این نتیجه رسیدند که سرعت اسپیندل و درصد وزنی sic مهمترین عواملی هستند که بر ویژگی ماشین‌کاری کامپوزیت‌های هیبریدی تأثیر می‌گذارند [6].

رضی‌فر و همکارانش با انجام فرآیند ماشین‌کاری سرعت بالا بر روی کامپوزیت‌های جداره نازک و بررسی پارامترهای زبری سطح، نرخ براده‌برداری و میزان انحراف را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که مقادیر بهینه‌ی میزان زبری سطح  $2/12$  میکرومتر و نرخ براده‌برداری  $0/99$  میلی‌متر مکعب بر دقیقه و میزان انحراف  $0/082$  میلی‌متر، مربوط به نمونه ۶ میلی‌متری که صلبیت بالاتری دارد بوده و برای این نمونه نتایج مطلوب‌تری به دست آمده است [7].

انصاری و همکارانش با هدف بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند فرزکاری مواد کامپوزیتی کربن به منظور کاهش زبری سطح و بررسی پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش به این نتیجه رسیده‌اند که سرعت اسپیندل بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح می‌گذارد و حالت بهینه با حداقل زبری  $1/9$  میکرومتر با سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برشی ۱ میلی‌متر به دست خواهد آمد [8].

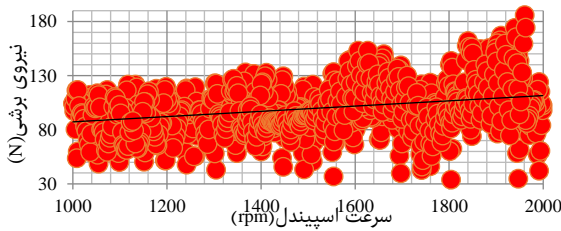
مسعودی و دانشمند با بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی ماده مرکب پایه آلومینیوم با استفاده از تحلیل مقدار کل نرمال شده پارامترها (TNQL) و نسبت سیگنال به نویز به این نتیجه رسیدند که شدت جریان بیشترین تأثیر و بعد از آن زمان روشنی و خاموشی پالس و در آخر ولتاژ مهمترین اثر را بر پارامترهای خروجی ماشین‌کاری دارند [9].

امینی و همکاران مطالعه آماری تأثیر شرایط مختلف ماشین‌کاری بر میزان لایه لایه شدگی در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن را ارائه داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که عملیات پیش‌مته‌زنی، افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی، موجب آسیب لایه لایه شدگی شده و کیفیت سوراخ را بهبود می‌بخشد. همچنین استفاده از مته با قطر کمتر و به‌کارگیری کامپوزیت نازک‌تر منجر به کاهش لایه لایه شدگی می‌شود که از بین پارامترهای بررسی شده، ضخامت قطعه کار بیشترین تأثیر را داشته است [10].

داشته است. برای این منظور از نرم افزار SimLab استفاده شده است. محدوده‌ی پارامترها با استفاده از تحقیقات تجربی گذشته انتخاب شده‌اند.

### ۳-۱- بررسی تأثیر سرعت اسپیندل بر نیروی برشی

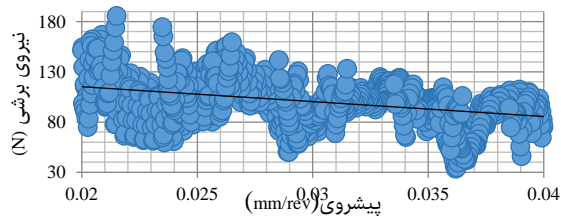
با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده روی معادله رگرسیون و بررسی تأثیر پارامتر سرعت اسپیندل بر روی نیروی برشی و نمودار به دست آمده از آن (شکل ۱) روند تأثیر پارامتر سرعت اسپیندل بر روی نیروی برشی بررسی شده است. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌گردد که با بیشتر شدن سرعت اسپیندل مقدار نیروی برشی نیز افزایش خواهد یافت.



شکل ۱) نمودار تأثیر سرعت اسپیندل بر نیروی برشی

### ۳-۲- بررسی تأثیر پیشروی بر نیروی برشی

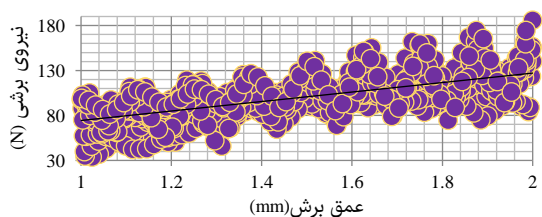
پارامتر بعدی که در معادله رگرسیون نیروی برشی مورد بررسی قرار گرفته و آنالیز حساسیت و نمودار آن رسم شده، پیشروی است. با توجه به نمودار (شکل ۲) روند تأثیر پارامتر پیشروی بر نیروی برشی نشان داده شده است. با توجه به نمودار میزان تأثیر پیشروی بر نیروی برشی به صورت عکس است؛ یعنی هر چه قدر پیشروی افزایش پیدا کند، نیروی برشی کمتر می‌شود.



شکل ۲) نمودار میزان تأثیر پیشروی بر نیروی برشی

### ۳-۳- بررسی تأثیر عمق برش بر نیروی برشی

پارامتر سومی که مورد بررسی قرار گرفته است عمق برش ابزار می‌باشد. در نمودار (شکل ۳) مشاهده می‌شود که عمق برش تأثیر به‌سزایی بر نیروی برشی دارد، به طوری که هر چه میزان عمق برش بیشتر باش، نیروی برشی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۳) نمودار تأثیر عمق برش بر نیروی برشی

در این مقاله با استفاده از معادله رگرسیون استخراج شده در مرجع [۱] و وارد کردن آن در نرم افزار سیم‌لب، تحلیل آماری و آنالیز حساسیت اثر پارامترهای مختلف شامل سرعت اسپیندل، پیشروی، عمق برش و درصد کاربرد سیلیکون بر نیروی برشی و فرسایش ابزار مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- مدل‌سازی

آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها نشان‌دهنده این است که پارامترهای ورودی معادله رگرسیون، چگونه و به چه میزان بر یک‌دیگر تأثیر می‌گذارند.

طهماسبی و همکارانش [۱] در طراحی آزمایشی که با حذف پارامترهای غیرمؤثر در عملیات فرزکاری همراه بوده است، به تحلیل و بهینه‌سازی نیروی برشی و فرسایش ابزار در کامپوزیت آلومینیوم پرداخته‌اند. در این پژوهش پارامترهای ورودی معادله رگرسیون شامل سرعت اسپیندل (rpm)، نرخ پیشروی (mm/rev)، عمق برش (mm) و درصد sic در نظر گرفته شده و معادله رگرسیون آن به صورت معادلات ۱ و ۲ به دست آمده است. نیروی برشی:

$$\text{cutting force } N = -332.5 + 0.1717 \text{ Spindle Speed}(\text{rpm}) + 12184 \text{ Feed}(\text{mm}/\text{rev}) + 68/6$$

$$\text{Depth of Cut}(\text{mm}) + 8.59 \text{ Percentage of SiC} - 0/585 \text{ Percentage of SiC} * \text{Percentage of SiC} - 4/95 \text{ Spindle Speed}(\text{rpm}) * \text{Feed}(\text{mm}/\text{rev}) - 2417 \text{ Feed}(\text{mm}/\text{rev}) * \text{Depth of Cut}(\text{mm}) - 239 \text{ Feed}(\text{mm}/\text{rev}) * \text{Percentage of SiC} + 5/80 \text{ Depth of Cut}(\text{mm}) * \text{Percentage of SiC}$$

$$\text{Tool wear} = -0.2745 + 0.000173 \text{ spindle speed}(\text{rpm}) + 3.067 \text{ feed}(\text{mm}/\text{rev}) + 0.0557$$

$$\text{depth of cut}(\text{mm}) + 0.01012 \text{ percentage of sic}$$

در این مقاله با انجام آنالیز حساسیت به بررسی و تحلیل پارامترها پرداخته شده است. به زبان ساده تر بررسی شده است که هر یک از پارامترهای ورودی شامل سرعت اسپیندل (rpm)، نرخ پیشروی (mm/rev)، عمق برش (mm) و درصد sic تا چه میزان بر نیروی برشی و فرسایش ابزار در عملیات فرزکاری تأثیر داشته است.

در جدول ۱ محدوده‌ی پارامترهای مورد بررسی مشخص شده است.

جدول ۱) محدوده‌ی پارامترهای ورودی

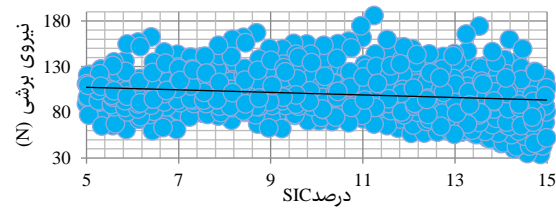
نام پارامتر	کمترین مقدار	بیشترین مقدار
سرعت اسپیندل (rpm)	۱۰۰۰	۲۰۰۰
پیشروی (mm/rev)	۰/۰۲	۰/۰۴
عمق برش (mm)	۱	۲
درصد SiC	۵	۱۵

### ۳- شبیه‌سازی و نمایش داده‌ها

آنالیز حساسیت انجام شده به روش تحلیل آماری معادله رگرسیون صورت گرفته است. به این شکل که با استفاده از نرم افزارهای سیم‌لب و متلب و معادله رگرسیون به دست آمده، تأثیر هر پارامتر به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که هر پارامتر به صورت مجزا چه میزان تأثیر بر نیروی برشی و فرسایش ابزار بر فرزکاری کامپوزیت

## ۳-۴- بررسی تأثیرگذاری درصد sic بر نیروی برشی

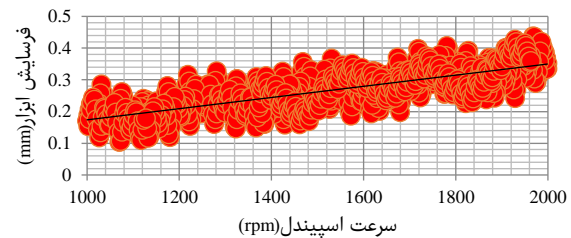
پارامتر آخر در معادله رگرسیون میزان درصد sic است؛ که آنالیز حساسیت آن انجام شده و میزان اثرگذاری آن بر نیروی برشی با توجه به نمودار (شکل ۴) مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴) نمودار تأثیر درصد sic بر نیروی برشی

## ۳-۵- بررسی تأثیر سرعت اسپیندل بر فرسایش ابزار

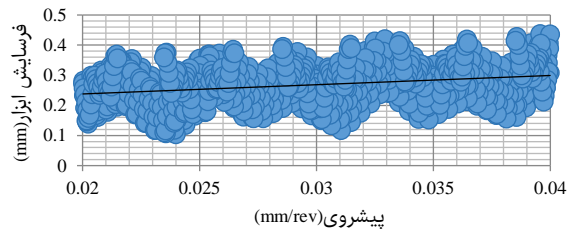
شکل ۵ میزان اثرگذاری سرعت اسپیندل بر فرسایش ابزار را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت اسپیندل، فرسایش ابزار نیز افزایش خواهد یافت.



شکل ۵) نمودار تأثیر سرعت اسپیندل بر فرسایش ابزار

## ۳-۶- بررسی تأثیر پیشروی بر فرسایش ابزار

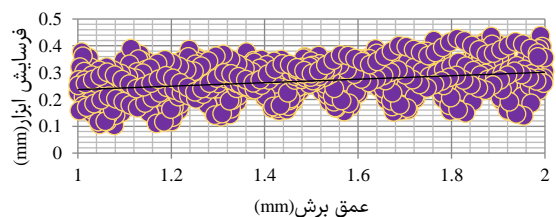
شکل ۶ میزان اثرگذاری پیشروی بر فرسایش ابزار را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش پیشروی نیز فرسایش ابزار افزایش خواهد یافت.



شکل ۶) نمودار تأثیر پیشروی بر فرسایش ابزار

## ۳-۷- بررسی تأثیرگذاری عمق برش بر فرسایش ابزار

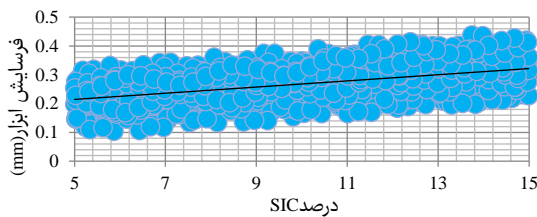
در شکل ۷ نیز میزان اثرگذاری عمق برش بر فرسایش ابزار نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق برش، افزایش فرسایش ابزار را خواهیم داشت.



شکل ۷) نمودار تأثیرگذاری عمق برش بر فرسایش ابزار

## ۳-۸- بررسی تأثیر درصد sic بر فرسایش ابزار

آخرین پارامتر در معادله رگرسیون، میزان درصد کاربرد سیلیکون کامپوزیت است که در این پارامتر هم آنالیز حساسیت انجام گرفته و نمودار (شکل ۸) از آنالیز آن استخراج شده است.

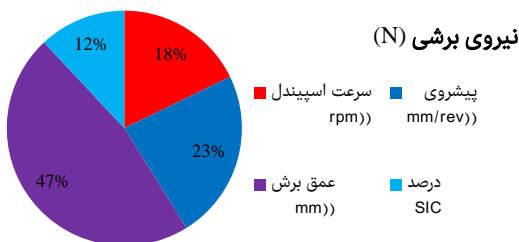


شکل ۸) نمودار تأثیر درصد sic بر فرسایش ابزار

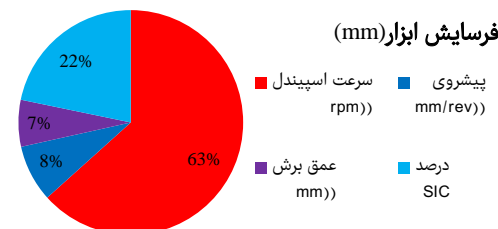
## ۴- مقایسه کمی اثر پارامترها

در این قسمت پارامترهای تأثیرگذار بر نیروی برشی و میزان فرسایش ابزار به صورت کمی با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل ۹ مشاهده می‌گردد که پارامترهای تأثیرگذار بر نیروی برشی به ترتیب عمق برش با تأثیر ۴۷٪ و پیشروی ابزار با تأثیر ۲۳٪ و سرعت اسپیندل با تأثیر ۱۸٪ و در آخر میزان درصد کاربرد سیلیکون موجود در کامپوزیت با تأثیر ۱۲٪ می‌باشند.

با توجه به نمودار شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌گردد که سرعت اسپیندل با تأثیر ۶۳٪ بیشترین تأثیرگذاری بر فرسایش ابزار را داشته و سپس میزان درصد کاربرد سیلیکون موجود در کامپوزیت با تأثیر ۲۲٪ و پیشروی با تأثیر ۸٪ و در آخر عمق برش با تأثیر ۷٪ سایر پارامترهای تأثیرگذار بر فرسایش ابزار می‌باشند.



شکل ۹) مقایسه کمی پارامترهای تأثیرگذار بر نیروی برشی



شکل ۱۰) مقایسه کمی پارامترهای تأثیرگذار بر فرسایش ابزار

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله پارامترهای مؤثر در رفتار نیروی برشی و فرسایش ابزار در فرزکاری کامپوزیت آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام آنالیز حساسیت بر روی معادله رگرسیون نیروی

- [5]Yousefi R, RahimiNasab J, Kouchakzadeh MA. Investigating the machinability of Al-15% SiC composite material made by powder extrusion method. *Aerospace Mechanics Quarterly*. 2012; 8(4): 51-63. (in persian)
- [6]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 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT)*. 2022; 22(10): 7 -12. (in persian)
- [7] Razifar M, Saraeian P, Shakouri E, MaghsoudPour A. Study of the surface roughness, material removal rate and deflection in thin-walled composite structures during the high speed machining process. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2020; 7(3): 1083-1094. (in persian)
- [8] Ansari R, Eskandari Jam J, Alaei MH, Heidari Bani M, Eskandari Shahraki M. Optimization of milling process parameters of carbon/epoxy composite materials with the aim of reducing surface roughness. *Technology in Aerospace Engineering*. 2022; 5(4): 35-59. (in persian)
- [9]Masoodi B, Daneshmand S. Investigation of the effect of electrical discharge machining parameters on 2024 aluminum base compound using the analysis of the total normalized value of parameters (TNQL) and signal-to-noise ratio (S/N). *New Processes in Materials Engineering*. 2017; 11(1): 91-110. (in persian)
- [10] Amini S, Baraheni M, Moeini Afzal M. Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites. *Journal of Science and Technology of Composites*, 2018; 5(1): 41-50. (in persian)

برشی و فرسایش ابزار، میزان تأثیرگذاری هریک از پارامترهای تأثیرگذار به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که هریک چه تأثیری دارند.

در بررسی رفتار نیروی برشی در فرزکاری کامپوزیت آلومینیوم به این نتیجه رسیده شد که از پارامترهای تأثیرگذار بر آن به ترتیب عمق برش، پیشروی، سرعت اسپیندل و در آخر میزان درصد کاربید سیلیکون موجود در کامپوزیت می‌باشند و در فرسایش ابزار نیز از پارامترهای تأثیرگذار به ترتیب سرعت اسپیندل، میزان درصد کاربید سیلیکون موجود در کامپوزیت، پیشروی و عمق برش می‌باشند. هدف این مقاله بررسی مجزای پارامترها بوده و اثرات متقابل آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است.

## مراجع

- [1] Tahmasbi V, Aeinehbandi S, Baghi MH. Investigation of cutting force and tool wear in aluminum matrix composite milling at different percentages of SiC. *Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT)*. 2022; 22(10):59 -64. (in persian)
- [2] Davodi D, Emami AH, Saeedi A. Production and investigation of mechanical properties of aluminum 7014/alumina nanocomposite powder by mechanical alloying method. *New Processes in Materials Engineering*. 2016; 9(4): 93-106. (in persian)
- [3]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*. 2023; 9(2): 1970-1975. (in persian)
- [4] Alizadeh A, Abdolahi M, Abedi H. Investigating the microstructure and mechanical behavior of Al/SiC/CNT surface composite produced by friction stir processing method. *Mechanics of Structures and Fluids*, 2022; 11(6): 219-233. (in persian)