



## بررسی پارامترهای مؤثر بر کیفیت سطح و نرخ براده برداری در فرزکاری کامپوزیت زمینه آلومینیومی هیبریدی

وحید طهماسبی\*، امیر حسین غریب، محمد حافظ باقی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

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

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>امروزه به علت نیاز روزافزون صنایع مختلف نظامی، هوافضا، خودروسازی و... به مواد با نسبت استحکام به وزن بالا، استفاده از مواد کامپوزیت پایه فلزی، به خصوص کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. ماشین کاری جهت نیل به دقت ابعادی بالا جزء جدایی‌ناپذیر فرآیند تولید محصولات ساخته شده با کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی می‌باشد. به دلیل وجود ماده تقویت کننده همچون کاربید سیلیسیم و... ماشین کاری این دسته از مواد همواره با چالش‌های فراوانی روبه‌رو می‌گردد. لذا مطالعه پارامترهای مؤثر بر ماشین کاری کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی امری ضروری می‌باشد. در این مطالعه با بهره‌گیری از یک مطالعه روشمند شامل مدل‌سازی آماری و آزمایش تجربی به روش سطح پاسخ و استخراج معادلات رگرسیون اثر سرعت دوران اسپیندل، نرخ تغذیه، عمق برش و درصد ذرات تقویت کننده بر روی زبری سطح، نرخ براده برداری در هنگام فرزکاری کامپوزیت هیبریدی با پایه آلومینیوم ۷۰۷۵ و ذرات تقویت کننده سیلیسیم کارباید و گرافیت مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. بر اساس مطالعات صورت پذیرفته می‌توان اذعان نمود نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ تغذیه، نرخ براده برداری و کیفیت سطح بهبود می‌یابد. همچنین افزایش سرعت برشی منجر به کاهش زبری سطح به دلیل حضور ذرات گرافیت و افزایش نرخ براده برداری می‌شود. همچنین بهترین ترکیب از مقادیر برای به حداقل رساندن هم‌زمان زبری سطح و به حداکثر رساندن نرخ براده برداری و پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارتند از: سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۵۳۹ میلی‌متر بر دور، عمق برش ۱/۲۶۷ میلی‌متر و ۱۰٪ ذرات تقویت کننده ی کاربید سیلیسیم و گرافیت است.</p>	<p><b>مقاله پژوهشی</b> دریافت: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۴ پذیرش: ۳۱ مرداد ۱۴۰۴</p> <p><b>کلیدواژگان:</b> کامپوزیت‌های زمینه فلزی کیفیت سطح روش سطح پاسخ نرخ براده برداری فرزکاری</p>

## Investigating the effective parameters on surface roughness and material removal rate in milling of hybrid aluminum matrix composites

Vahid Tahmasbi\*, Amir Hosein Gharib, Mohammad Hafez Baghi

Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran

\* Corresponding Author's Email: tahmasbi@arakut.ac.ir

Article Information	Abstract
<p><b>Original Research Paper</b> Received: 14 May 2025 Accepted: 22 August 2025</p> <p><b>Keywords:</b> Metal Matrix Composites Surface Roughness Response Surface Methodology Material Removal Rate (MRR) Milling</p>	<p>In recent years, due to the increasing demand from various industries such as military, aerospace, and automotive for materials with high strength-to-weight ratios, the use of metal matrix composites, particularly aluminum matrix composites, has significantly increased. Machining to achieve high dimensional accuracy is an integral part of the production process for products made with aluminum matrix composites. Due to the presence of reinforcing materials such as silicon carbide, machining these materials always faces many challenges. Therefore, studying the effective parameters on machining aluminum matrix composites is essential. In this study, using a systematic approach including statistical modeling and experimental testing by response surface methodology and extracting regression equations, the effect of spindle speed, feed rate, depth of cut, and percentage of reinforcing particles on surface roughness and material removal rate during milling of AL7075/SiC/Gr hybrid aluminum composite has been thoroughly investigated. Based on the studies conducted, it can be acknowledged that the results show that by increasing the feed rate, the material removal rate and surface quality improve. Also, increasing the cutting speed leads to a decrease in surface roughness due to the presence of graphite particles and an increase in the material removal rate. Also, the best combination of values was found to simultaneously minimize surface roughness and maximize material removal rate. The best combination of parameters is: spindle speed of 1000 rpm, feed rate of 0.0539 mm/rev, depth of cut of 1.267 mm, and 10% reinforcing particles of silicon carbide and graphite.</p>

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Tahmasbi V, Gharib AH, Baghi MH. Investigating the effective parameters on surface roughness and material removal rate in milling of hybrid aluminum matrix composites. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Nov 22;12(9):1-12. doi: 10.22034/ijme.2025.523438.2084 [In Persian]

## ۱- مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی<sup>۱</sup> در بسیاری صنایع به‌ویژه صنایع خودروسازی، هواپیماسازی و لوکوموتیو کاربرد گسترده‌تری پیدا کرده است و به‌عنوان جایگزینی برای مواد مختلف عمل می‌کنند. طی دهه‌های گذشته، کشورهای صنعتی به دنبال موادی با نسبت استحکام به وزن بالا بوده‌اند که بتوانند علاوه بر کاهش هزینه مواد اولیه، باعث کاهش انرژی مصرفی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی شوند [۱، ۲].

کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا بسیار مورد توجه صنایع مختلف می‌باشند [۳]. هنگامی که تولید محصولات با دقت و کیفیت بالا مدنظر باشد، ماشین‌کاری یک بخش جدایی‌ناپذیر فرایند تولید قطعات فلزی است [۴، ۵]. تبدیل شکل نهایی این کامپوزیت‌ها به محصولات مهندسی معمولاً با فرایند ماشین‌کاری انجام می‌شود. لذا، شناخت دقیق پارامترهای مؤثر بر ماشین‌کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی بسیار مهم می‌شود [۶].

در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های هیبریدی که شامل ترکیبی از دو یا چند ماده تقویت‌کننده هستند، توجه قابل توجهی در پژوهش‌های مواد پیشرفته به خود جلب کرده‌اند. این کامپوزیت‌ها به دلیل داشتن خواص مکانیکی و حرارتی برتر نسبت به کامپوزیت‌های معمولی، برای کاربردهایی در بخش‌های پزشکی، صنعت خودروهای سنگین و سیستم‌های انرژی هسته‌ای بسیار مناسب هستند [۷]. ماشین‌کاری کامپوزیت‌های هیبریدی به دلیل ماهیت غیر همگن و ناهمسانگرد آن‌ها، چالش‌برانگیز است. این خصوصیات می‌توانند موجب عیوب سطحی و کاهش کیفیت قطعات ماشین‌کاری شده شوند [۸].

تحقیقات زیادی بر روی تأثیر ذرات تقویت‌کننده نظیر سیلیسیم کارباید (SiC)<sup>۲</sup> و گرافیت (Gr)<sup>۳</sup> بر ویژگی‌های سطحی و نرخ تولید در ماشین‌کاری این کامپوزیت‌ها انجام شده است. این ذرات باعث بهبود رسانایی حرارتی، کاهش انبساط حرارتی و بهبود خواص مکانیکی می‌شوند. همچنین گرافیت به عنوان یک روان‌کننده عمل می‌کند و اصطکاک را کاهش می‌دهد [۹].

طهماسبی و همکاران [۱۰] تأثیر پارامترهای فرزکاری بر کامپوزیت پایه آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده SiC را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها گزارش کردند که سرعت دوران اسپیندل با ۸۴٪ اثرگذارترین عامل بر روی زبری سطح است و بعد از آن پیشروی با ۸٪ و عمق برش و درصد ذرات تقویت‌کننده با ۴٪ از عوامل مؤثر بر زبری سطح هستند.

کارابولوت و همکاران [۱۱] شرایط بهینه فرزکاری AA7039 تقویت‌شده با ذرات تقویت‌کننده‌ی کارباید بور<sup>۴</sup> و کارباید سیلیکون را معرفی کردند. آن‌ها نشان دادند که نرخ پیشروی و سرعت برش بیشترین تأثیر را بر کیفیت سطح دارند.

راجشوری و امیرتاگادسواران [۱۲] از روش الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به عمق برش بهینه، نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و درصد‌های وزنی SiC و تأثیر آن‌ها بر پاسخ‌های نیروی برش، سایش ابزار، زبری سطح و نرخ براده برداری استفاده کردند. هماهنگ‌ترین و رایج‌ترین نوع مواد تقویت‌کننده در زمینه فلزی به ویژه آلیاژ آلومینیوم، ذرات کارباید سیلیکون به دلیل هزینه کم آن‌ها در کنار سایر ویژگی‌های خاص و کاربردهای رایج این کامپوزیت‌ها هستند. با این حال، وجود این ذرات سخت SiC، ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها را دشوار می‌کند و بر یکپارچگی سطح ماشین‌کاری شده این کامپوزیت‌ها تأثیر می‌گذارد و این به‌نوبه خود بر عملکرد قطعات تأثیر می‌گذارد [۱۳].

از مرور مطالعات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که تحقیقات محدودی در خصوص اضافه کردن ذرات گرافیت و کارباید سیلیکون به کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی صورت پذیرفته است. بیشتر مطالعات از ذرات گرافیت به‌عنوان ماده تقویت و روان‌کننده کامپوزیت‌ها استفاده کرده‌اند. در این مطالعه سعی شده است به‌صورت روشمند و با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌سازی آماری فرایند صورت پذیرفته و رفتار پارامترهای زبری سطح و نرخ براده برداری به‌عنوان دو پاسخ مهم در فرزکاری کامپوزیت زمینه فلزی هیبریدی با پایه آلومینیوم ۷۰۷۵ و ذرات SiC و Gr مورد بررسی قرار گرفته و ضمن ارائه معادلات رگرسیون خطی مرتبه دوم و تحلیل آن‌ها، بهینه‌سازی آماری به‌منظور دستیابی به کمترین میزان زبری سطح<sup>۵</sup> و حداکثر مقدار نرخ براده برداری<sup>۶</sup> با استفاده از الگوریتم درینگر ارائه شود.

<sup>1</sup> Metal Matrix Composite

<sup>2</sup> Silicon Carbide

<sup>3</sup> Graphite

<sup>4</sup> Boron Carbide

<sup>5</sup> Surface Roughness

<sup>6</sup> Metal Removal Rate

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- ساخت کامپوزیت

برای تهیه کامپوزیت‌های هیبریدی از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به عنوان ماده زمینه استفاده شد. مواد تقویت‌کننده شامل ذرات کاربید سیلیکون (SiC) و گرافیت (Gr) بودند. اندازه متوسط ذرات SiC برابر با ۴۵ میکرومتر و اندازه ذرات گرافیت ۹۰ میکرومتر بود. درصد وزنی گرافیت به صورت ثابت ۳٪ در نظر گرفته شد و درصد وزنی SiC در سه سطح ۶٪، ۹٪ و ۱۲٪ تغییر کرد.

کامپوزیت‌ها با استفاده از فرایند ریخته‌گری همزنی تولید شدند. ابتدا آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در کوره الکتریکی تا دمای ۷۵۰-۷۸۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شد. سپس ذرات تقویت‌کننده، که پیش‌تر تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرم شده بودند، به مذاب آلومینیوم اضافه شدند. این ترکیب به طور مداوم با استفاده از همزن مکانیکی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شد تا ذرات تقویت‌کننده به طور یکنواخت در زمینه توزیع شوند. در نهایت، مذاب آماده‌شده در قالب ماسه‌ای با ابعاد مشخص ریخته شد و پس از انجماد، نمونه‌ها تهیه شدند. نمایی از قطعات تولیدشده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمای کلی دستگاه و ابزار انجام آزمایش

### ۲-۲- دستگاه و ابزار

فرزکاری توسط دستگاه فرز کنترل عددی<sup>۱</sup> با اسپیندل عمودی مدل UM-85 انجام شد. نمای کلی دستگاه و ابزار انجام آزمایش‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. نمونه‌های فرزکاری در قالب بلوک‌هایی با ابعاد ۲۰ میلی‌متر در ۱۳ میلی‌متر در ۱۰ میلی‌متر از کامپوزیت‌های هیبریدی با پایه آلومینیوم ۷۰۷۵ و ذرات SiC و Gr برای انجام آزمایش تهیه شده است. ابزار فرز مورد استفاده از نوع HSS E-end mill از جنس فولاد تندبر با قطر ۸ میلی‌متر و چهار لبه برشی بود که ساخت شرکت Kunshan است. تمامی آزمایش‌ها در شرایط ماشین‌کاری خشک انجام شدند. لازم به ذکر است برای هر پارامتر ورودی و شرایط آزمایشی، از ابزار جدیدی استفاده گردید تا اثر فرسایش ابزار بر نتایج به حداقل برسد.

<sup>۱</sup> Computer Numerical Control (CNC)

## ۲-۳- اندازه‌گیری زبری سطح

برای اندازه‌گیری زبری سطح، از دستگاه Profilometer Surfcoeder Surface استفاده گردید. طول برش در این دستگاه ۲/۵ میلی‌متر و طول نمونه برداری ۰/۸ میلی‌متر تعیین شد. اندازه‌گیری زبری سطح در راستای عمود بر سطح برش انجام گرفت تا داده‌ها دقیق‌تر باشد. هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده و میانگین آن‌ها به عنوان خروجی آزمایش گزارش شده است. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای پیش‌بینی نشده، آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شده است.

## ۲-۴- محاسبه نرخ براده برداری

نرخ براده برداری مواد با معادله ۱ محاسبه شد [۱۴].

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

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

## ۲-۵- طراحی آزمایش

استفاده از طراحی آزمایش‌ها (DOE)<sup>۱</sup> می‌تواند برای کاهش تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای به دست آوردن پاسخ مناسب به یک پرسش، استفاده شود. روش سطح پاسخ (RSM)<sup>۲</sup> یک ابزار خوب به دلیل دقت در مدل‌سازی و اعتبارسنجی تجربی به‌ویژه در مطالعه تجربی فرایندهای ماشین‌کاری است [۱۵، ۱۶]. در این مطالعه، از روش سطح پاسخ برای طراحی آزمایش‌ها استفاده گردید. به جای انجام آزمایش‌های تصادفی، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با رعایت الزامات فرزکاری انجام شد تا بتوان فرایند را برای پارامترهای مختلف پاسخ به صورت جداگانه یا ترکیبی تجزیه و تحلیل کرد. چهار عامل کنترل‌کننده یعنی سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش و درصد وزنی ذرات کاربرد سیلیکون و گرافیت انتخاب شدند. این عوامل بر اساس سایر مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران در این حوزه و پیشنهادهای ایشان برای انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری انتخاب شده‌اند. جهت جلوگیری و حذف خطاهای پیش‌بینی نشده، انجام آزمایش‌ها به صورت تصادفی صورت پذیرفته است. از نرم‌افزار مینی تب نسخه ۲۱ برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین به دست آوردن ضرایب معادله ریاضی رگرسیون حاکم بر آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ می‌تواند یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای هر پاسخ خروجی بر حسب متغیرهای ورودی که از داده‌های آزمایش و نزدیک‌ترین نقاط به آن‌ها به دست آمده است، استخراج کند و بهینه‌سازی مؤثر بر روی نتایج را اعمال نماید. در جدول ۱ متغیرهای ورودی و بازه تغییرات آن با توجه به سه سطح کد شده آن‌ها نمایش داده شده است. علت استفاده از روش حاضر نسبت به سایر روش‌ها از جمله روش تاگوچی، طراحی آزمایش مناسب، تعداد آزمایش‌های جامع و همچنین ارائه نمودارها و گراف‌های برهم‌کنش فاکتورها، ارائه معادله ریاضی رگرسیون دقیق و معتبر خطی مرتبه دوم است.

جدول ۱ پارامترهای ورودی فرایند مورد استفاده و سطح طراحی آن‌ها

۱	۰	-۱	فاکتورهای ورودی آزمایش
۱۰۰۰	۷۵۰	۵۰۰	A: سرعت دوران اسپیندل (دور بر دقیقه)
۰/۱	۰/۰۶	۰/۰۲	B: نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دور)
۱/۵	۱	۰/۵	C: عمق برش (میلی‌متر)
۱۵	۱۲	۹	D: درصد وزنی SiC/Gr (درصد)

<sup>1</sup> Design Of Experiments

<sup>2</sup> Response Surface Methodology

## ۲-۵-۱- مدل سازی به روش سطح پاسخ

در تحلیل مسائل مهندسی که پاسخ مسئله در آن‌ها متأثر از متغیرهای ورودی مختلف است، استفاده از روش‌های آماری کمک قابل توجهی به طراحی، مدل سازی، تحلیل و بهینه سازی دقیق این فرایندها می کند که روش سطح پاسخ یکی از بهترین روش‌های آماری، در این زمینه است. طراحی آزمایش‌ها یکی از مناسب ترین روش‌ها برای محققین در اصلاح، بهبود و صرفه جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و تشخیص دقت و رفع عیوب آن‌ها است. 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 آزمایش‌ها اشاره کرد [۱۷، ۱۸]. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های 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 برهم کنش‌های مؤثر به صورت رابطه ۲ است [۱۹، ۲۰].

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

در این معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم،  $y$  به عنوان پاسخ خروجی بر حسب ورودی‌های آزمایش توصیف می گردد که در این معادله ثابت‌های  $\beta$  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 برهم کنش مرتبه دوم فاکتورهای ورودی آزمایش است. مدل ارائه شده در صورت دقیق بودن می تواند رفتار خروجی را بر حسب پارامترهای ورودی در تمام بازه آزمایش‌ها پیش بینی نموده و نقاط بهینه را ارائه نماید [۲۱].

## ۳- نتایج و بحث

با توجه به طراحی آزمایش‌های صورت گرفته، برای هر ۲۷ آزمایش، متغیرهای خروجی اندازه گیری شده و در جدول ۲ گزارش شده است. همچنین به منظور بالا بردن دقت و صحت نتایج آزمایش، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده است و میانگین آن‌ها به عنوان زبری سطح و نرخ براده برداری گزارش شده است. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای پیش بینی نشده، آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل زبری سطح و نرخ براده برداری ماشین کاری شده، نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای مدل اصلاح شده پس از حذف عوامل غیر مؤثر در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر پارامترهای معادله‌ی رگرسیون را مشخص می نماید و در تحلیل و مدل سازی آزمایش‌ها 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  $93/24\%$  در زبری سطح و  $93/49\%$  در نرخ براده برداری در مدل اصلاح شده به دست آمده است. می توان از دقت مدل به دست آمده اطمینان حاصل کرد. همچنین با بررسی باقیمانده‌ها می توان مناسب بودن مدل را احراز کرد. مقدار خطای مجموع مربعات مدل منطبق شده بر داده‌ها میزان دقت نوع معادله رگرسیون حاکم بر مدل را مشخص نمود. هرچه این مقدار در مدل‌های قابل انطباق بر داده‌ها کمتر باشد مدل مربوطه دارای خطای پیش بینی کمتری است. روابط ۳ و ۴ معادله رگرسیون اصلاح شده‌ی مدل‌ها را نشان می دهد.

$$\begin{aligned} \text{surface roughness } \mu\text{m} \\ = -0.558 - 0.000521 A + 37.74 B - 2.214 C + 0.1746 D + 1.217 C \times C \\ - 1.46 B \times C - 1.559 B \times D \end{aligned} \quad (3)$$

$$MRR = -703 + 1.096 A + 5758 B + 233 C - 11.5 D + 12635 B * C \quad (4)$$

جدول ۲ طراحی آزمایش فرزکاری ماشین‌های کنترل عددی و پاسخ‌های خروجی

شماره آزمایش	A (دور بر دقیقه)	B (میلی‌متر بر دور)	C (میلی‌متر)	D (درصد)	زبری سطح (میکرومتر)	نرخ براده برداری (میلی‌متر مکعب بر دقیقه)
۱	۷۵۰	۰/۰۶	۰/۵	۱۲	۱/۴۵	۷۲۰
۲	۷۵۰	۰/۰۲	۱	۱۲	۰/۴۱	۴۸۰
۳	۱۰۰۰	۰/۰۶	۱	۱۲	۱/۲۳	۱۹۲۰
۴	۷۵۰	۰/۱	۱	۱۲	۱/۸۷	۲۴۰۰
۵	۷۵۰	۰/۰۶	۱/۵	۱۲	۱/۶۵	۲۱۶۰
۶	۷۵۰	۰/۰۶	۱	۱۵	۱/۷۷	۱۴۴۰
۷	۷۵۰	۰/۰۶	۱	۱۲	۱/۵	۱۴۴۰
۸	۷۵۰	۰/۰۶	۱	۹	۰/۹	۱۴۴۰
۹	۷۵۰	۰/۰۶	۱	۱۲	۱/۳۵	۱۴۴۰
۱۰	۵۰۰	۰/۰۶	۱	۱۲	۱/۱	۹۶۰
۱۱	۷۵۰	۰/۰۶	۱	۱۲	۱/۲۵	۱۴۴۰
۱۲	۵۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۹	۰/۸۱	۴۸۰
۱۳	۱۰۰۰	۰/۱	۰/۵	۹	۲/۲۲	۱۶۰۰
۱۴	۷۵۰	۰/۰۶	۱	۱۲	۱/۱۶	۱۴۴۰
۱۵	۱۰۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۹	۰/۲۱	۹۶۰
۱۶	۱۰۰۰	۰/۰۲	۰/۵	۱۵	۱/۰۱	۳۲۰
۱۷	۱۰۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۱۵	۰/۹۹	۹۶۰
۱۸	۱۰۰۰	۰/۱	۱/۵	۱۵	۲/۰۷	۲۸۰۰
۱۹	۵۰۰	۰/۰۲	۱/۵	۱۵	۱/۵۷	۴۸۰
۲۰	۵۰۰	۰/۱	۱/۵	۱۵	۲/۵۲	۲۴۰۰
۲۱	۵۰۰	۰/۱	۰/۵	۱۵	۲/۲۴	۸۰۰
۲۲	۵۰۰	۰/۱	۰/۵	۹	۲/۱۱	۸۰۰
۲۳	۷۵۰	۰/۰۶	۱	۱۲	۰/۹۶	۱۴۴۰
۲۴	۷۵۰	۰/۰۶	۱	۱۲	۰/۹۵	۱۴۴۰
۲۵	۱۰۰۰	۰/۱	۰/۵	۱۵	۲/۱۱	۱۶۰۰
۲۶	۱۰۰۰	۰/۱	۱/۵	۹	۲/۰۳	۲۸۰۰
۲۷	۵۰۰	۰/۰۲	۰/۵	۹	۰/۴۲	۱۶۰

جدول ۳ آنالیز واریانس مدل اصلاح شده زبری سطح در ماشین کاری کامپوزیت آلومینیومی

ترمها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۷	۹/۱۵۶۹۰	۱/۳۰۸۱۳	۳۷/۴۶	۰/۰۰۰
خطی	۴	۸/۱۸۷۳۳	۲/۰۴۶۸۳	۵۸/۶۱	۰/۰۰۰
A	۱	۰/۲۳۳۸۱	۰/۲۳۳۸۱	۶/۶۹	۰/۰۱۸
B	۱	۶/۸۶۵۸۲	۶/۸۶۵۸۲	۱۹۶/۵۹	۰/۰۰۰
C	۱	۰/۰۶۰۹۶	۰/۰۶۰۹۶	۱/۷۵	۰/۲۰۲
D	۱	۰/۸۶۴۳۷	۰/۸۶۴۳۷	۲۴/۷۵	۰/۰۰۰
مربع	۱	۰/۵۹۴۲۹	۰/۵۹۴۲۹	۱۷/۰۲	۰/۰۰۱
C × C	۱	۰/۵۹۴۲۹	۰/۵۹۴۲۹	۱۷/۰۲	۰/۰۰۱
برهم کنش دو پارامتر ورودی	۲	۰/۴۴۴۰۰	۰/۲۲۲۰۰	۶/۳۶	۰/۰۰۸
B × C	۱	۰/۰۱۰۱۶	۰/۰۱۰۱۶	۰/۲۹	۰/۵۹۶
B × D	۱	۰/۴۱۷۰۰	۰/۴۱۷۰۰	۱۱/۹۴	۰/۰۰۳
خطا	۱۹	۰/۶۶۳۵۶	۰/۰۳۴۹۲		
خطای عدم برازش	۱۴	۰/۴۲۷۰۱	۰/۰۳۰۵۰	۰/۶۴	۰/۷۶۳
خطای خالص	۵	۰/۲۳۶۵۵	۰/۰۴۷۳۱		
کل	۲۶				

جدول ۴ آنالیز واریانس مدل اصلاح شده نرخ براده برداری در ماشین کاری کامپوزیت آلومینیومی

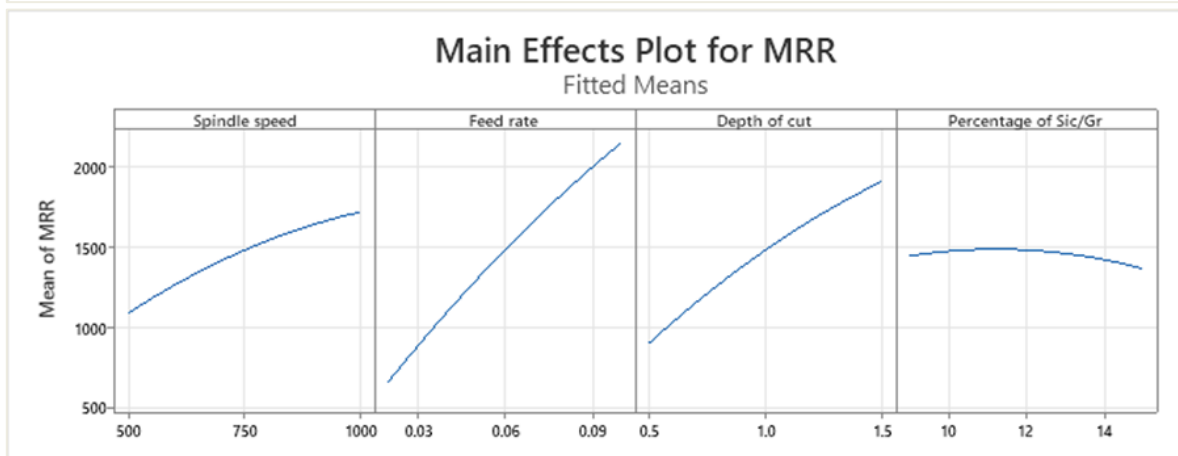
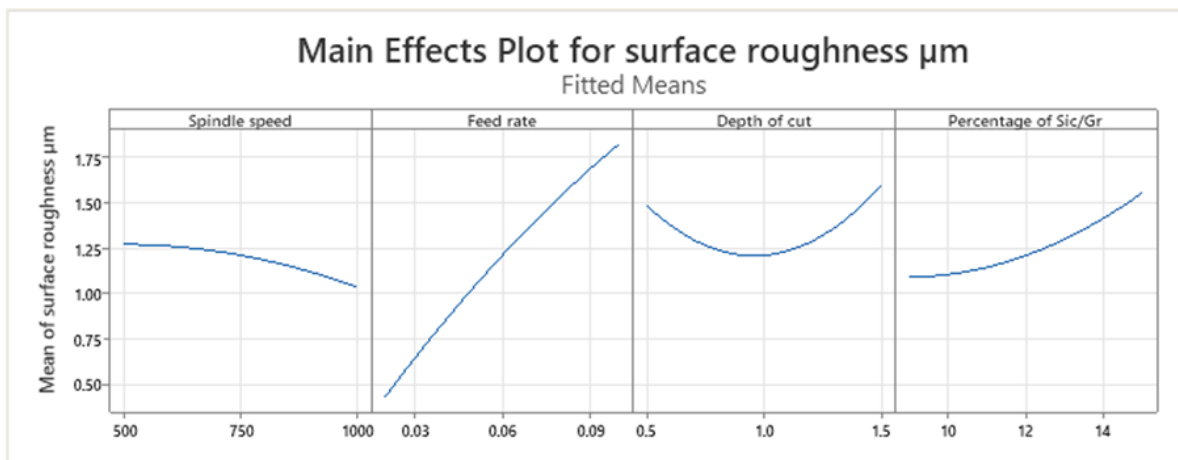
ترمها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value
مدل	۵	۱۲۸۸۸۶۶۰	۲۵۷۷۷۳۲	۶۰/۳۲	۰/۰۰۰
خطی	۴	۱۱۰۴۲۶۶۶	۲۷۶۰۶۶۶	۶۴/۶۰	۰/۰۰۰
A	۱	۱۱۰۴۴۸۸	۱۱۰۴۴۸۸	۲۵/۸۵	۰/۰۰۰
B	۱	۷۶۱۳۰۵۲	۷۶۱۳۰۵۲	۱۷۸/۱۵	۰/۰۰۰
C	۱	۳۴۵۶۳۵۳	۳۴۵۶۳۵۳	۸۰/۸۸	۰/۰۰۰
D	۱	۱۷۴۶۹	۱۷۴۶۹	۰/۴۱	۰/۵۳۰
برهم کنش دو پارامتر ورودی	۱	۷۸۸۵۹۹	۷۸۸۵۹۹	۱۸/۴۵	۰/۰۰۰
B × C	۱	۷۸۸۵۹۹	۷۸۸۵۹۹	۱۸/۴۵	۰/۰۰۰
خطا	۲۱	۸۹۷۴۱۴	۴۲۷۳۴		
خطای عدم برازش	۱۶	۸۹۷۴۱۴	۵۶۰۸۸	*	*
خطای خالص	۵	۰	۰		
کل	۲۶				

### ۳-۱- تأثیر سرعت برشی بر کیفیت سطح و نرخ براده برداری

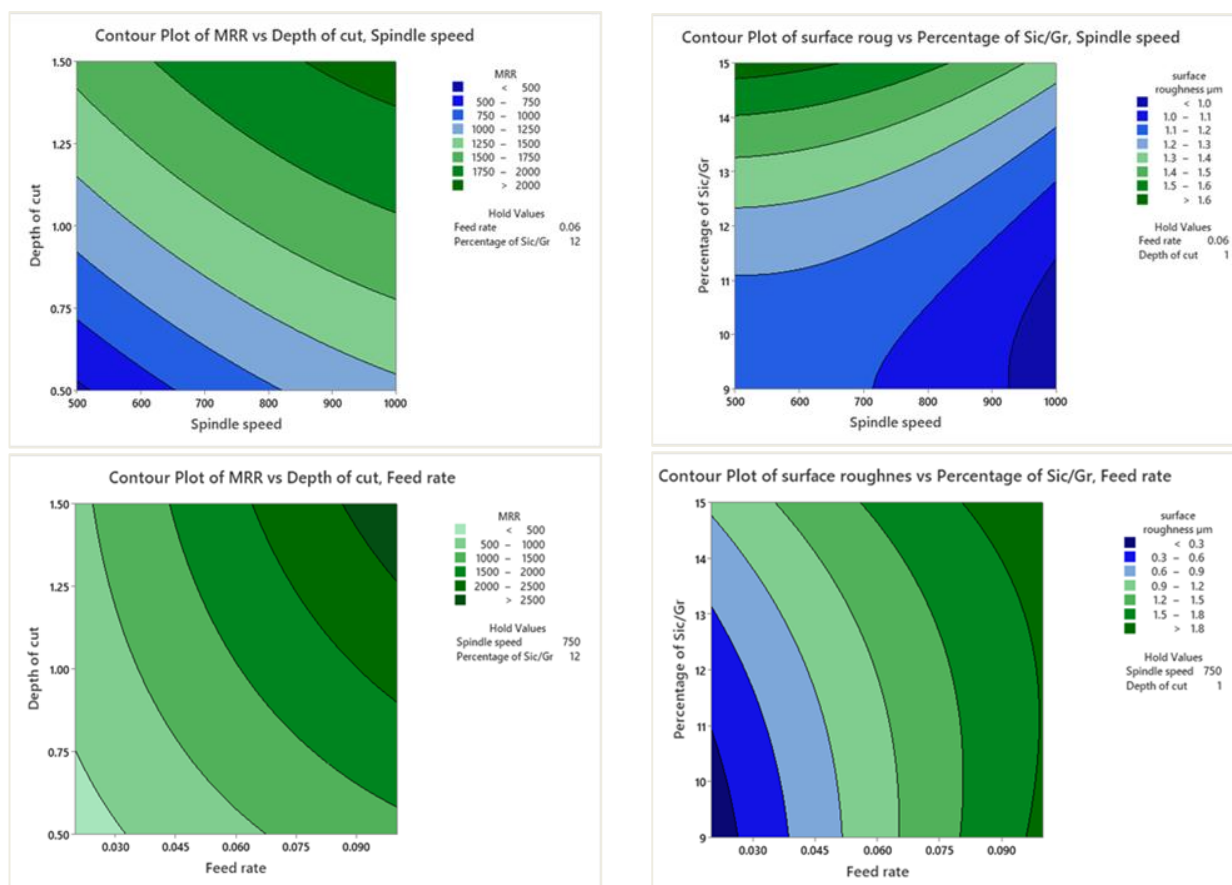
مطابق با شکل ۲ با افزایش سرعت برشی زبری سطح با نرخ کم کاهش پیدا می‌کند. در حین فرایند ماشین‌کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی با افزایش سرعت برشی، دمای بسیار زیادی در منطقه برشی ایجاد می‌گردد که سبب چسبندگی مواد به ابزار می‌شود. در این کامپوزیت پایه آلومینیومی هیبرید به دلیل وجود گرافیت که ویژگی روان کاری دارد، اثر چسبندگی مواد به ابزار کم می‌شود و افزایش سرعت برشی، همچنین سبب کاهش نیروهای برشی نامنظم می‌شود. کم شدن اثرات منفی افزایش دما و نیروهای برشی نامنظم، باعث کاهش زبری سطح و افزایش کیفیت نهایی سطح می‌شود. مطابق معادله ۵، تغییرات نرخ براده برداری با پارامترهای تعداد دوران اسپیندل، پیشروی و عمق برش رابطه مستقیم دارد.

$$MRR = N \times Z \times f_z \times a_p \times a_e \quad (5)$$

در این معادله، MRR نرخ براده برداری، N سرعت دوران اسپیندل برحسب دور بر دقیقه،  $f_z$  نرخ پیشروی به ازای یک لبه برنده، Z تعداد لبه برنده تیغچه،  $a_p$  عمق برش شعاعی و  $a_e$  عمق برش محوری است. از رابطه ۵ و نمودارهای شکل ۲ با افزایش سرعت دوران اسپیندل نرخ براده برداری نیز افزایش خواهد یافت؛ اما در سرعت‌های خیلی بالاتر به دلیل افزایش دمای منطقه برش، سایش ابزار و به دنبال آن باعث کند شدن لبه برش و تغییر کردن هندسه ابزار می‌شود و سبب کاهش نرخ براده برداری می‌شود. به دلیل وجود گرافیت و خاصیت روان کنندگی آن باعث می‌شود که نرخ براده برداری کاهش زیادی پیدا نکند و فقط نرخ افزایش آن و یا شیب نمودار در سرعت‌های بالاتر کمتر شود. همچنین با توجه به شکل ۳ می‌توان دریافت که برای رسیدن به حد کمینه زبری سطح باید سرعت دورانی افزایش و درصد ذرات سیلیسیم کارباید را کاهش داد و برای رسیدن به حد بیشینه نرخ براده برداری و راندمان تولید باید سرعت دورانی و عمق برش را افزایش داد. در بخش آخر مقادیر بهینه برای پارامترهای ورودی برای رسیدن به حد مطلوب پارامترهای خروجی به‌دست آمده است.



شکل ۲ اثر پارامترهای ورودی بر روی رفتار زبری سطح و نرخ براده برداری



شکل ۳ نمودار برهم کنش اثر پارامترهای ورودی بر روی رفتار زبری سطح و نرخ براده برداری

### ۳-۲- تأثیر نرخ پیشروی بر کیفیت سطح و نرخ براده برداری

با توجه به شکل ۲ با افزایش نرخ پیشروی به دلیل افزایش اصطکاک بین ابزار و سطح براده و همچنین افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته زبری سطح ماشین کاری شده افزایش پیدا کرده و کیفیت سطح نهایی پایین می آید [۲۲]؛ ولی از طرفی با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و تبدیل نوع ماشین کاری از پرداخت کاری به خشن تراشی حجم و راندمان تولید افزایش یافته و نرخ براده برداری بیشتر خواهد شد. همچنین با توجه به شکل ۳ می توان دریافت که برای رسیدن به حد کمینه زبری سطح باید نرخ پیشروی و درصد ذرات سیلیسیم کاربرد را کاهش داد و برای رسیدن به حد بیشینه نرخ براده برداری و راندمان تولید باید نرخ پیشروی و عمق برش را افزایش داد.

### ۳-۳- تأثیر عمق براده برداری بر کیفیت سطح و نرخ براده برداری

با افزایش عمق ماشین کاری، نیروهای ماشین کاری افزایش یافته و باعث ایجاد ارتعاشات بیشتر ابزار می شود. ارتعاش زیاد ابزار باعث سایش و تغییر هندسه ابزار می شود. در این کامپوزیت پایه آلومینیومی هیبرید به علت وجود ویژگی روان کاری که در اثر وجود گرافیت است، تا مقداری بحرانی این ارتعاش را کاهش داده و سبب کاهش زبری سطح و افزایش کیفیت سطح می شود. با رسیدن عمق برش ماشین کاری به مقادیر بالاتر اثر گرافیت کم شده و اثر ارتعاش ابزار افزایش می یابد و باعث افزایش زبری سطح و کاهش کیفیت نهایی سطح می شود [۲۳].

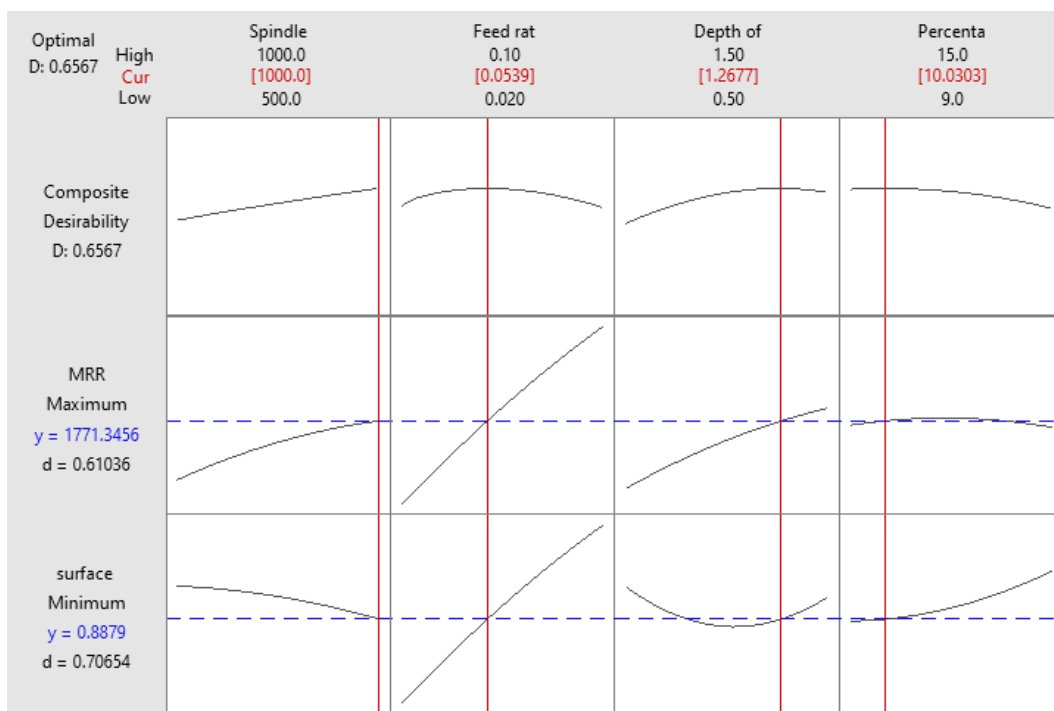
### ۳-۴- تأثیر درصد وزنی بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری

ذرات تقویت کننده Sic بسیار سخت و ساینده هستند. با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده تعداد برخوردهای ذرات تقویت کننده و ابزار بیشتر شده و در اثر این برخورد بر روی سطح ابزار خراش ایجاد شده و ابزار دچار سایش خواهد شد. سایش ابزار سبب تغییر در

هندسه ابزار و به دنبال آن افزایش زبری و کاهش کیفیت نهایی سطح می‌شود. وجود ذرات تقویت کننده گرافیت سبب کاهش زبری سطح می‌شود اما به علت ثابت بودن درصد گرافیت و افزایش درصد ذرات سیلیسیم کارباید، با توجه به شکل ۲ فقط نرخ این افزایش را به مقدار اندک کاهش داده است و در درصدهای پایین سیلیسیم کارباید به علت وجود اثر ذرات گرافیت سبب می‌شود سایش ابزار کاهش پیدا کند و در نتیجه نرخ براده برداری افزایش پیدا می‌کند؛ اما با افزایش درصد ذرات سیلیسیم کارباید و ناچیز شدن اثر ذرات گرافیت برخورد ذرات سخت سیلیسیم کارباید سبب سایش ابزار و در نهایت کاهش نرخ براده برداری می‌شود.

### ۳-۵- بهینه‌سازی فرایند به منظور رسیدن به حداقل زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری

با توجه به مطالعاتی که در خصوص رفتار زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری در هنگام ماشین کاری کامپوزیت پایه آلومینیومی هیبرید انجام شده است. بهینه‌سازی فرایند به منظور رسیدن به کمترین زبری سطح و بیشترین نرخ براده برداری صورت گرفته و در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴ بهینه‌سازی صورت گرفته به منظور الف) کمترین مقدار زبری سطح ب) بیشترین مقدار نرخ براده برداری

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا با روش طراحی آزمایش و استفاده از روش سطح پاسخ یک مدل رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش‌بینی و تحلیل کمی فرایند بر روی داده‌های آزمایش‌های تجربی برازش شد. استفاده از این ابزار میزان بهره‌وری در دقت و صحت و افزایش هرچه بیشتر کیفیت در فرایند را افزایش می‌دهد. در این مطالعه میزان تأثیر هر یک از پارامترهای سرعت دوران اسپیندل، عمق برش، نرخ پیشروی و درصد وزنی ذرات سیلیسیم کارباید و گرافیت بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری به روش آزمایش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج به دست آمده به صورت زیر است:

در ماشین کاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی با افزایش سرعت دورانی اسپیندل و کاهش درصد وزنی ذرات و همچنین کاهش پارامترهای نرخ پیشروی و درصد وزنی ذرات می‌توان به کمترین زبری سطح و بالاترین پرداخت سطح رسید. در صورتی که نرخ پیشروی و عمق ماشین کاری بیشتر شود نیروهای ماشین کاری افزایش یافته و ارتعاشات ابزار بیشتر می‌شود. ارتعاش زیاد ابزار باعث سایش و تغییر هندسه ابزار و در نتیجه افزایش زبری سطح و کاهش کیفیت سطح می‌شود اما سبب افزایش نرخ براده برداری و افزایش راندمان تولید می‌شود.

همچنین با افزایش سرعت دورانی اسپیندل و همچنین افزایش عمق برش نیز می‌توان به راندمان تولید بالاتر و نرخ براده برداری بالاتر دست یافت.

از تجزیه و تحلیل، بهترین ترکیب از مقادیر برای به حد کمینه رساندن زبری سطح و به حد بیشینه رساندن نرخ براده برداری پیدا شد. بهترین ترکیب پارامترها عبارت‌اند از: سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۵۳۹ میلی‌متر بر دقیقه، عمق برش ۱/۲۶۷۷ میلی‌متر و درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده سیلیسیم کارباید و گرافیت ۱۰/۰۳۰۳ درصد.

## فهرست علائم

$a_e$	عمق برش محوری (میل متر)
$a_p$	عمق برش شعاعی (میلی متر)
$D$	قطر ابزار (میلی متر)
$d$	عمق برش (میلی متر)
$f_z$	نرخ پیشروی به ازای یک لبه برنده (میلی متر بر دندانه)
$MRR$	نرخ براده برداری
$N$	سرعت دورانی اسپیندل (دور بر دقیقه)
$t$	زمان برداشتن مواد (دقیقه)
$w$	عرض برش (میلی متر)
$Z$	تعداد لبه برنده ابزار

## References

- [1] Barnes S, Pashby IR. Machining of aluminium based metal matrix composites. Applied composite materials. 1995 Jan;2(1):31-42. doi: 10.1007/BF00567375
- [2] Durante S, Rutelli G, Rabezzana F. Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools. Surface and coatings technology. 1997 Oct 1;94:632-40. doi: 10.1016/S0257-8972(97)00521-5
- [3] Asgari A, Sedighi M. Investigation on the optimal machining of Mg-based composites considering surface roughness, tool life, cutting forces, and productivity. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2023 Mar;237(5):1139-52. doi: 10.1177/09544062221128693
- [4] Hassanpour H, Shajari S, Rasti A, Hossein Sadeghi M. Investigation of milling strategies effect on microhardness of a typical curved surface. Modares Mechanical Engineering. 2015 Apr 16;15(2). [In Persian]
- [5] Rasti A, Tarshizi M, Zeinolabedin-Beygi A. Study of surface roughness, texture, and dimensional accuracy in thread whirling of Ti6Al4V screw. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jun 21;11(4):1-2. doi: 10.22034/ijme.2024.460623.1966 [In Persian]
- [6] Rajmohan T, Palanikumar K, Prakash S. Grey-fuzzy algorithm to optimise machining parameters in drilling of hybrid metal matrix composites. Composites Part B: Engineering. 2013 Jul 1;50:297-308. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.02.030
- [7] Yadav RS, Yadava V. Experimental investigations on electrical discharge diamond peripheral surface grinding (EDDPSG) of hybrid metal matrix composite. Journal of Manufacturing Processes. 2017 Jun 1;27:241-51. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.004
- [8] Shetty N, Shahabaz SM, Sharma SS, Shetty SD. A review on finite element method for machining of composite materials. Composite Structures. 2017 Sep 15;176:790-802. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.06.012
- [9] Rajeswari B, Amirthagadeswaran KS. Experimental investigation of machinability characteristics and multi-response optimization of end milling in aluminium composites using RSM based grey relational analysis. Measurement. 2017 Jul 1;105:78-86. doi: 10.1016/j.measurement.2017.04.014
- [10] 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 Jul 10;23(7):395-404. doi: 10.22034/mme.23.7.395 [In Persian]
- [11] Karabulut Ş, Gökmen U, Çinici H. Optimization of machining conditions for surface quality in milling AA7039-based metal matrix composites. Arabian Journal for Science and Engineering. 2018 Mar;43(3):1071-82. doi: 10.1007/s13369-017-2691-z

- [12] Rajeswari B, Amirthagadeswaran KS. Study of machinability and parametric optimization of end milling on aluminium hybrid composites using multi-objective genetic algorithm. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018 Aug;40(8):377. doi: [10.1007/s40430-018-1293-3](https://doi.org/10.1007/s40430-018-1293-3)
- [13] Bai W, Roy A, Sun R, Silberschmidt VV. Enhanced machinability of SiC-reinforced metal-matrix composite with hybrid turning. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019 Jun 1;268:149-61. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2019.01.017](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.017)
- [14] Boothroyd G. *Fundamentals of metal machining and machine tools*. Crc Press; 1988 Nov 15.
- [15] Hassanpour H, Sadeghi MH, Rasti A. Investigation of microhardness and white layer in milling of hardened steel using response surface methodology. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Feb 10;15(12):175-82. [In Persian]
- [16] Qasemi M, Tahmasbi V, Karkhane P, Eslami MH. Temperature and surface quality investigation in orthogonal machining of cortical bone using response surface method and sensitivity analysis. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Feb 19;11(12):64-78. doi: [10.22034/ijme.2025.477672.2007](https://doi.org/10.22034/ijme.2025.477672.2007) [In Persian]
- [17] Tahmasbi V, Pak A, Zeinolabedin Beygi A, HassanPour P. Experimental Analysis and Optimization of Thrust Force in the Orthopedic Drilling Process Using the Tool Coated with Titanium Nitride Nano Coating by the Physical Vapor Deposition Method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Jul 23;9(5):49-59. doi: [10.22034/ijme.2022.160059](https://doi.org/10.22034/ijme.2022.160059) [In Persian]
- [18] Tahmasbi V, Zeinolabedin-Beygi A, Elahi SH, Ashtiani MA. Statistical modeling, optimization and sensitivity analysis of dried turning of aluminum bronze alloy. *Sādhanā*. 2022 Nov 9;47(4):232. doi: [10.1007/s12046-022-01955-7](https://doi.org/10.1007/s12046-022-01955-7) [In Persian]
- [19] Salamat-Talab M, Tahmasbi V, Safari M, Zeinolabedin Beygi A. Mathematical modeling, sobol sensitivity analysis and optimization of main parameters in drilling of E-glass/epoxy laminated composites. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Feb 19;8(11):43-53. [In Persian]
- [20] Tahmasbi V, Zeinolabedin Beygi A, Moslemi Naeini H. Experimental study and sobol sensitivity analysis in optimizing the effective parameters of dry turning process of aluminum alloy 6061-T6. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Oct 23;8(8):12-23. [In Persian]
- [21] Montgomery DC. *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons; 2017.
- [22] Yazdani Khameneh M, Sadr M, Rasti A, Sadeghi MH. Study of Surface Roughness, Topography, and Cutting Forces in Finish Turning of 1.1191 Hardened Steel Using Textured Cutting Tool. *Modares Mechanical Engineering*. 2023 Dec 10;24(1):31-40. doi: [10.22034/MME.24.1.31](https://doi.org/10.22034/MME.24.1.31)
- [23] Sadr M, Rasti A, Sadeghi MH. Analytical Study of the Effect of Tool Texture on Lubrication Performance in Turning Process. *Modares Mechanical Engineering*. 2022 Oct 10;22(10):209-13. [In Persian]