



## بررسی تجربی اثر پارامترهای ماشینکاری بر کیفیت سطح در تراشکاری کامپوزیت پایه آلومینیوم تقویت شده با ذرات $Mg_2Si$

محمد حسنی فرد<sup>۱</sup>، رضا آزارافزا<sup>۲\*</sup>، محمد حسین علایی<sup>۳</sup>، مسلم نجفی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: azarmut@mut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ تیر ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۲ مهر ۱۴۰۳

### چکیده

مواد کامپوزیتی با پایه آلومینیوم به دلیل خواص مهندسی برجسته‌ای که دارند، جایگاه مهمی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند، به خصوص کامپوزیت‌های آلومینیومی که با مواد سخت مانند ذرات سلیسید منیزیم تقویت شده‌اند. این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری مانند سرعت دورانی، عمق برش، نرخ پیشروی و روانکاری بر کیفیت سطح در فرایند تراشکاری کامپوزیت  $Al-Mg_2Si$  پرداخته است. طراحی آزمایشات بر اساس روش تاگوچی انجام شده و شامل شانزده آزمایش در دو نوع شرایط ماشینکاری، خشک و مرطوب، بوده است. کیفیت سطح با استفاده از دستگاه زبری‌سنج اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار مینی تب، تحلیل واریانس و نسبت SN برای مقایسه شرایط ماشینکاری و تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر کیفیت سطح کامپوزیت بررسی شده است و در انتها مدل رگرسیونی برای آن برازش شده است. نتایج تحلیل واریانس نشان داده که نرخ پیشروی و عمق برش به ترتیب بیشترین تأثیر را بر کیفیت سطح دارند و دارای آستانه بهینه‌ای هستند. همچنین، نتیجه گرفته شده که در پارامترهای ماشینکاری بهبود یافته، استفاده از سیال برشی برای رسیدن به کیفیت سطح ضرورت ندارد و فقط بر بهبود آن در اهداف ایده‌آل اثر گذار است.

### کلیدواژگان:

کیفیت سطح

تراشکاری

روانکاری

کامپوزیت

$Al-Mg_2Si$

## Experimental investigation of the effects of machining parameters on surface quality in turning aluminum matrix composites reinforced with $Mg_2Si$ particles

Mohammad Hasanifard<sup>1</sup>, Reza Azarafza<sup>2\*</sup>, Mohammad Hosein Alaei<sup>3</sup>, Moslem Najafi<sup>3</sup>

1- PhD Student, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: azarmut@mut.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 11 July 2024

Accepted: 13 October 2024

#### Keywords:

Surface Quality

Turning

Lubrication

Composite

$Al-Mg_2Si$

### Abstract

Composite materials based on aluminum, especially those reinforced with hard particles like magnesium silicide ( $Al-Mg_2Si$ ), gained significant importance in various industries due to their outstanding engineering properties. This article investigated the impact of machining parameters such as speed rate, depth of cut, feed rate, and lubrication on surface quality in the turning process of  $Al-Mg_2Si$  composite. The experimental design followed the Taguchi method and included sixteen tests under two machining conditions: dry and wet. Surface quality was measured using a roughness tester, and Minitab software was employed for analysis of variance (ANOVA) and SN ratio to compare machining conditions and assess the influence of each input parameter on composite surface quality. A regression model was also fitted to the data. The ANOVA results indicated that feed rate and depth of cut had the most significant impact on surface quality and exhibited optimal thresholds. Additionally, it was concluded that, in improved machining parameters, the use of cutting fluid was not necessary for achieving surface quality and only influenced its enhancement towards ideal objectives.

### Please cite this article using:

Hasanifard M, Azarafza R, Alaei MH, Najafi M. Experimental investigation of the effects of machining parameters on surface quality in turning aluminum matrix composites reinforced with  $Mg_2Si$  particles. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Nov 21;11(9):13-25. doi: 10.22034/ijme.2024.466572.1983 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پایه فلزی به علت وجود ترکیبی از خواص مطلوب، به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب در ساخت قطعات و سازه‌های فنی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. امروزه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به دلیل خواص عالی از جمله مقاومت به سایش، استحکام و استحکام ویژه بالا به طور وسیعی در صنایع پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرند، در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی بیشترین مقدار تولید را از نظر حجمی، وزنی و کاربرد را در صنایع دریایی و هوافضا از قبیل شفت، پروانه، میله‌های اتصال و ... دارا هستند. از مهمترین ویژگی‌های مثبت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی نسبت به دیگر کامپوزیت‌های زمینه فلزی امکان تولید آن‌ها به روش‌های سنتی ریخته‌گری و متالورژی پودر است [۲]. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به دلیل وجود ذرات سخت تقویت کننده مانند کاربید سیلیکون به سختی ماشینکاری می‌شوند [۳]. کاربید سیلیکون کاربید بور و آلومینا به عنوان محبوب‌ترین تقویت کننده‌ها شناخته شده‌اند. آلومینیوم، تیتانیوم و آلیاژهای منیزیم اغلب به عنوان زمینه کامپوزیت‌های فلزی استفاده می‌شوند. چگالی اکثر کامپوزیت‌های زمینه فلزی یک سوم فولاد می‌باشند [۳]. مطالعات بر روی ماشینکاری کامپوزیت زمینه فلزی تقویت شده با الیاف آلومینا و کاربید سیلیکون نشان می‌دهد که به دلیل وجود ذرات سخت تقویت کننده کیفیت سطح ماشینکاری وضعیت خوبی ندارد. مقالات منتشر شده در زمینه ماشینکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی نشان می‌دهد که تنها ابزار الماس پلی کریستال می‌تواند یک ماشینکاری مفید ارائه دهد، کامپوزیت‌ها با استفاده از این ابزار که سخت‌تر از آلومینا، کاربید سیلیکون و غیره می‌باشند به راحتی ماشینکاری می‌شوند همچنین این ابزارها گرایش شیمیایی برای واکنش با مواد قطعه کار ندارند. با این حال با توجه به هزینه بسیار بالا ابزار الماس پلی کریستال ابزار ارزان‌تر مثل کاربیدهای سمنتیت و سرامیک در ماشینکاری این مواد استفاده می‌شود [۴].

معمولاً استفاده از ذرات سرامیکی در ابعاد میکرومتری باعث بهبود در استحکام تسلیم و کششی فلز می‌شود ولی شکل‌پذیری کامپوزیت زمینه فلزی با افزایش درصد ذرات سرامیکی کاهش می‌یابد به همین دلیل از ذرات سرامیکی در ابعاد نانومتری به منظور جلوگیری از کاهش انعطاف پذیری به جای ذرات میکرومتری استفاده می‌شود، همچنین استفاده از نانو ذرات به طور قابل توجهی باعث بهبود خواص مکانیکی زمینه نسبت به ذرات میکرومتری می‌شود [۵].

پیش بینی کیفیت سطح در ماشینکاری این مواد، کمک شایانی را برای انتخاب مناسب ابزار و شرایط ماشینکاری می‌نماید، چرا که پیش بینی کیفیت سطح تعیین کننده قابلیت مواد در برابر تحمل تنش، درجه حرارت، اصطکاک، خوردگی و خستگی در طول عمر این مواد می‌باشد [۶]. افزایش در نرخ پیشروی، زبری سطح را افزایش می‌دهد و با نرخ پیشروی پایین‌تر پدیده لبه انباشته باعث افزایش زبری سطح می‌شود همچنین در سرعت برش کم نیز پدیده لبه انباشته باعث افزایش زبری سطح می‌شود. بنابراین بهترین کیفیت سطح با ترکیبی از پایین‌ترین نرخ پیشروی و بالاترین سرعت برش حاصل می‌شود [۷].

راج موهان و همکاران [۸] در فرایند سوراخکاری کامپوزیت آلومینیوم ۳۵۶ تقویت شده با کاربید سیلیکون و میکا از پارامترهای سرعت برش، نرخ پیشروی، نوع مته و درصد وزنی میکا برای بهینه سازی پارامترهای نیروی رانش در زبری سطح، سایش ابزار و ارتفاع بازگشت مته برای خروج براده استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که در بین پارامترهای ورودی پارامتر نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را برای به حداقل رساندن نیروی رانش زبری، سطح سایش ابزار و ارتفاع بازگشت مته برای خروج براده داشته است. آرون [۹] پس از تهیه سه نمونه کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ تقویت شده با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی آلومینا و ۵ درصد وزنی گرافیت با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی تأثیرات پارامترهای نرخ پیشروی، سرعت برش، عمق برش و درصد وزنی آلومینا را بر پارامترهای نیروهای برش، زبری سطح و سایش ابزار را در فرایند فرزکاری بررسی کرد و پس از تحلیل آزمایشات اینگونه بیان کرد که عوامل اصلی که نیروی برش، زبری سطح و سایش ابزار را تحت تأثیر می‌گذارند فاکتورهای سرعت برش و نرخ پیشروی هستند در حالی که فاکتورهای درصد وزنی تقویت کننده و عمق برش اثر ناچیز باقی می‌گذارند. کومار و همکاران [۱۰] با هدف بررسی زبری سطح یک نمونه کامپوزیت زمینه آلومینیوم ۷۰۷۵ تقویت شده با ۱۰ درصد وزنی کاربید سیلیکون و یک نمونه کامپوزیت ترکیبی زمینه آلومینیوم ۷۰۷۵ تقویت شده با ۷ درصد وزنی کاربید سیلیکون و ۳ درصد وزنی گرافیت را در فرایند تراشکاری، ماشینکاری کرده و به این نتیجه رسیدند که تقویت کننده گرافیت نقش یک روانکار جامد را بازی می‌کند و باعث کاهش حرارت اصطکاک و پدیده لبه انباشته می‌شود که نتیجه آن کاهش در زبری سطح می‌باشد.

به طور کلی با توجه به اینکه فرایند تراشکاری نمونه‌های کامپوزیتی در صنایع دریایی، هوافضا، الکترونیکی و غیره کاربرد فراوانی پیدا کرده است و همچنین پارامترهای سایش ابزار و زبری سطح به عنوان پارامترهای مهم مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند، پس از بررسی از بررسی مقالات مطالعه شده مشخص شد که در زمینه بررسی تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی یعنی نرخ پیشروی، سرعت دورانی، استراتژی‌های روانکاری و عمق برش بر پارامترهای خروجی ماشینکاری کامپوزیت‌های آلومینیوم تقویت شده با ذرات  $Mg_2Si$  نظیر کیفیت سطح و سایش ابزار تحقیقات زیادی انجام نشده است، در این مقاله به بررسی تأثیر نرخ پیشروی، سرعت دورانی، استراتژی‌های روانکاری و عمق برش بر کیفیت سطح نهایی محصول پرداخته شده است.

## ۲- مواد و تجهیزات

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی دارای خواصی همچون امکان دستیابی به استحکام بالاتر، بهبود خواص در کاربردهای دما بالا، کنترل ضریب انبساط حرارتی برای هدایت حرارتی عالی، افزایش کارایی الکتریکی، بهبود مقاومت سایشی، استحکام برشی بالا، چگالی پایین و مقاومت سایشی بالا می‌باشند. یکی از عوامل مؤثر در جذابیت بکارگیری این مواد سطح کارایی بالا، کاهش آلودگی محیط زیست و منفعت اقتصادی آن‌ها است. این کامپوزیت‌ها در بسیاری از کاربردها قابلیت جایگزینی با مواد مونولیتیک<sup>۱</sup> از قبیل آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای آهنی، آلیاژهای تیتانیومی و همچنین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری را دارند. امروزه جایگزین کردن کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی بجای مواد مونولیتیک در سیستم‌های مهندسی شدیداً توسعه یافته است به طوری که طراحی مجدد همه سیستم‌ها برای دستیابی به کاهش حجم و وزن، امری ضروری است. براساس نظر انجمن علم و تکنولوژی آمریکا، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به عنوان یک جایگزین مناسب برای مواد موجود (با کاربردهای عالی تر) و همچنین به عنوان موادی با قابلیت ایجاد تغییرات بنیادی در طراحی محصولات یا سیستم‌ها می‌توانند مورد توجه قرار گیرند [۱۱].

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات که یکی از پرکاربردترین کامپوزیت‌ها و مقرون به صرفه‌ترین آن‌ها می‌باشد، از ذرات سرامیکی با نسبت ابعاد<sup>۲</sup> کمتر از ۵ بهره می‌برد. تقویت کننده‌های سرامیکی اغلب اکسیدها، کاربیدها و بورایدها هستند و معمولاً با کسر حجمی کمتر از ۲۰ درصد، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۲].

برای ساخت کامپوزیت  $Al-15\%Mg_2Si$  به روش درجا و با کیفیت بالا از مواد اولیه آلومینیوم خالص، آمیزان  $Al-50\%Si$  (با حداقل ناخالصی خریداری شده تا فازهای مضر وارد کامپوزیت نگردد) و فلز منیزیم بسیار خالص بایستی استفاده نمود. استفاده از سیستم ذوب القایی الزامی و تعیین کننده است، چرا که درجه حرارت ذوب  $Mg_2Si$  بسیار بالا است (۱۱۰۰ درجه سانتیگراد) و انرژی بالایی برای ترکیب شبه فلز سیلیسیم (با نقطه ذوب ۱۴۱۴ درجه سانتیگراد) و منیزیم لازم است. شکل ۱ سیستم ذوب القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ سیستم ذوب القایی کامپوزیت درجا  $Al-15\%Mg_2Si$

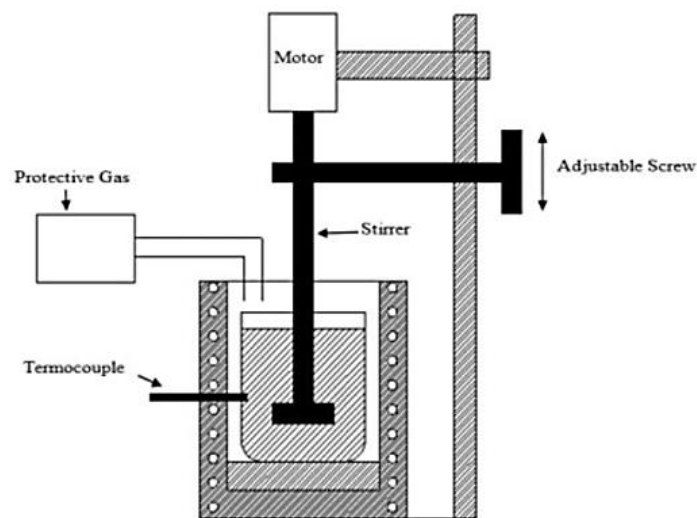
<sup>1</sup> Monolithic

<sup>2</sup> Aspect Ratio

برای جلوگیری از سوختن منیزیم لازم است که ذوب در اتمسفر کنترل شده انجام گیرد (استفاده از مخلوط گاز  $CO_2$  و  $SF_6$ ). برای ریختن مذاب در قالب چدنی بایستی قالب را با پوشان مناسب (مانند BN) آماده نمود. ریخته گری مذاب در قالب به صورت تیلت<sup>۱</sup> از ورود ناخاصی های فلزی (مانند اکسید مضاعف منیزیم-آلومینیوم) به درون کامپوزیت جلوگیری می کند. شکل ۲ قالب مورد استفاده برای ساخت نمونه ها را نشان می دهد و شکل ۳ شماتیک سیستم ریخته گری کامپوزیت درجا  $Al-15\%Mg_2Si$  را نشان می دهد.



شکل ۲ قالب ریخته گری کامپوزیت درجا  $Al-15\%Mg_2Si$



شکل ۳ شماتیک سیستم ریخته گری کامپوزیت درجا  $Al-15\%Mg_2Si$

در جدول ۱ مشخصات فیزیکی کامپوزیت های ساخته شده، نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی نمونه های ساخته شده

مقدار (میلی متر)	پارامتر
۱۵۰	طول قطعه کار
۳۰	قطر قطعه کار
۱۸	طول منطقه ماشینکاری شده در هر آزمایش
۳۰	طول درگیری قطعه با فک سه نظام

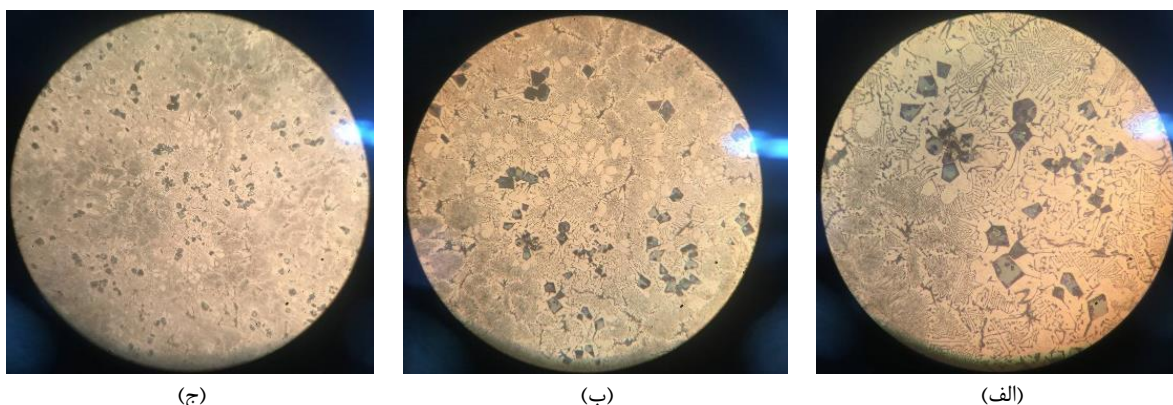
<sup>۱</sup> Tilt

در جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی کامپوزیت درجا Al-15%Mg<sub>2</sub>Si نشان داده شده است.

جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی کامپوزیت درجا Al-15%Mg<sub>2</sub>Si

عنصر	درصد وزنی (%)
آلومینیوم	پایه
منیزیم	۹،۵۳
سیلیسیم	۵،۶۱
آهن	۰،۲۱
مس	۰،۱۷
روی	۰،۱۳
منگنز	۰،۱۲
کروم	۰،۰۱

به منظور بررسی پراکندگی ذرات تقویت کننده به طور یکسان در سطح کامپوزیت، از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر از سطح اچ شده پرداخته شد، ملاحظه شد که ذرات دارای پراکندگی یکنواخت در سطح کامپوزیت بوده‌اند. در شکل ۴ تصویر با سه بزرگنمایی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ برابر از سطح اچ شده کامپوزیت نشان داده شده است.



شکل ۴ تصویر سطح اچ شده کامپوزیت Al-15%Mg<sub>2</sub>Si در سه بزرگنمایی (الف) ۴۰۰، (ب) ۲۰۰ و (ج) ۱۰۰ برابر

دستگاه تراش مورد استفاده در این آزمایشات، مدل SN71C توسط شرکت ماشین‌سازی توس<sup>۱</sup> در کشور چکسلواکی تولید شده است. ابزار برش استفاده شده در این مقاله از جنس کاربید سیمانی<sup>۲</sup> با روکش تنگستن کارباید<sup>۳</sup> است که از شرکت بوهرلریت<sup>۴</sup> اتریش و بر اساس استاندارد ISO3685:1993 انتخاب شده‌اند. هندسه این ابزارها به صورت چهار گوش بوده و بر اساس استاندارد ISO با نام تجاری CNMG-120408-MS نام‌گذاری شده‌اند و شماره سریال آن‌ها بر اساس کدبندی شرکت سازنده، (LC415Z(HC-S15) است. این گرید، از نوع ابزارهای روکش‌دار با پوشش تنگستن کارباید بوده، دارای براده شکن می‌باشد و مقاومت بالا در برابر سایش داشته است. ابزارگیر بر اساس استاندارد ISO با کد MCLNR2020K12 مورد استفاده قرار گرفت. در روش ماشینکاری مرطوب از سیال برشی پایه معدنی روغن‌های محلول (امولسیون)<sup>۵</sup> سولفونات سدیم<sup>۶</sup> که به قطرات روغن اجازه می‌دهد تا با کاهش کشش سطحی آب، با آن مخلوط شود، استفاده شده است [۷]. چیدمان انجام آزمایش در دو حالت خشک و مرطوب در شکل ۵ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Tos

<sup>2</sup> Cemented Carbide

<sup>3</sup> Tungsten Carbide

<sup>4</sup> Bohlerit

<sup>5</sup> Emulsion

<sup>6</sup> Sodium Sulfonate



(ب)



(الف)

شکل ۵ چیدمان انجام آزمایش‌ها در دو حالت (الف) خشک و (ب) مرطوب

به منظور اندازه‌گیری کیفیت سطح ماشینکاری شده بر کامپوزیت درجا  $Al-15\%Mg_2Si$  از دستگاه زبری سنج مدل SJ-201 ساخت شرکت میتوتویو<sup>۱</sup> ژاپن استفاده شده است. مقیاس اندازه‌گیری بر اساس استاندارد DIN EN ISO 1302 بوده است، که در آن از روش اندازه‌گیری زبری سطح با معیار  $R_a$  بهره گرفته شده است [۱۳].

### ۳- طراحی آزمایش

به منظور بررسی اثر پارامترهای ماشینکاری و شرایط روانکاری بر کیفیت سطح کامپوزیت درجا  $Al-15\%Mg_2Si$  سه فاکتور سرعت دورانی (N)، سرعت پیشروی (f)، عمق برش (d) در سه سطح و استراتژی‌های روانکاری در دو سطح، به‌عنوان اصلی‌ترین پارامترهای ماشینکاری در نظر گرفته شده‌اند [۱۴]. ماشینکاری با دو روش ماشینکاری حالت خشک و ماشینکاری حالت مرطوب صورت گرفته است. در این پژوهش از طرح آزمایش تاگوچی برای طرح‌ریزی آزمایش‌ها استفاده شده است. در این روش علاوه بر بررسی تأثیر هر پارامتر، اثرات متقابل بین هر پارامتر نیز در نظر گرفته شده است. طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش حداقل سازی تعداد آزمایش‌ها برای رسیدن به شرایط بهینه انجام شد. برای انجام آزمایش‌های ماشینکاری با چهار پارامتر اساسی و چهار سطح برای هر کدام، مجموعاً ۱۲۸ آزمایش به روش فاکتوریل وجود دارد که با استفاده از روش تاگوچی، ۱۶ آزمایش برای همین مقدار پارامترها و سطوح تعیین شده است که برای اطمینان از نتایج حاصل هر کدام از آزمایش‌ها سه بار تکرار شده است، در نهایت ۴۸ آزمایش صورت گرفته است. پارامترهای ماشینکاری و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ پارامترهای مورد آزمایش و سطوح هریک از آن‌ها

ردیف	فاکتورها	سطوح			
		سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
۱	روانکاری	خشک	مرطوب		
۲	سرعت دورانی (N) (rpm)	۳۶۰	۵۰۰	۷۱۰	۱۰۰۰
۳	سرعت پیشروی (f) (mm/rev)	۰,۰۸	۰,۱۲	۰,۲	۰,۲۸
۴	عمق برش (d) (mm)	۰,۵	۱	۱,۵	۲

### ۴- نتایج و بحث

با اندازه‌گیری کیفیت سطح بر حسب استاندارد DIN EN ISO 1302 مقدار پارامتر  $R_a$  به وسیله دستگاه زبری‌سنج پس از هر مرحله ماشینکاری ثبت گردیده است، برای اطمینان از نتایج موجود، از هر کدام از سطح‌های ماشینکاری شده ۶ تکرار آزمایش زبری سنج از

<sup>۱</sup> Mitutoyo

نواحی متفاوت سطح اندازه‌گیری شده است و در هر تکرار ۵ طول به اندازه ۰,۸ میلی‌متر (در مجموع ۴ میلی‌متر) مورد بررسی دقیق قرار گرفته و پارامترهای  $R_a$ ،  $R_z$  و  $R_q$  برای هرکدام از سطوح به صورت میانگین استخراج شده است. که در این مقاله بر حسب استاندارد DIN EN ISO 1302، معیار  $R_a$  به عنوان مقیاس بررسی کیفیت سطح، در نظر گرفته شده است. نتایج نهایی زبری سطح به همراه ماتریس طراحی آزمایش در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ ماتریس طراحی آزمایش به روش تاگوچی به همراه نتایج زبری سنج

نتایج	پارامترهای ماشینکاری				شماره آزمایش
( $\mu\text{m}$ ) $R_a$	سرعت دورانی (N) (rpm)	سرعت پیشروی (f) (mm/rev)	عمق برش (d) (mm)	روانکاری	
۲,۵۳	۳۶۰	۰,۰۸	۰,۵	مرطوب	۱
۲,۷۱	۳۶۰	۰,۱۲	۱	مرطوب	۲
۶,۶۳	۳۶۰	۰,۲	۱,۵	خشک	۳
۷,۶۱	۳۶۰	۰,۲۸	۲	خشک	۴
۲,۷۶	۵۰۰	۰,۰۸	۱	خشک	۵
۳	۵۰۰	۰,۱۲	۰,۵	خشک	۶
۶,۲۹	۵۰۰	۰,۲	۲	مرطوب	۷
۵,۵۵	۵۰۰	۰,۲۸	۱,۵	مرطوب	۸
۴,۳۴	۷۱۰	۰,۰۸	۱,۵	مرطوب	۹
۳,۸	۷۱۰	۰,۱۲	۲	مرطوب	۱۰
۵,۰۱	۷۱۰	۰,۲	۰,۵	خشک	۱۱
۴,۶۱	۷۱۰	۰,۲۸	۱	خشک	۱۲
۳,۶۷	۱۰۰۰	۰,۰۸	۲	خشک	۱۳
۳,۵۶	۱۰۰۰	۰,۱۲	۱,۵	خشک	۱۴
۳,۰۶	۱۰۰۰	۰,۲	۱	مرطوب	۱۵
۳,۷۴	۱۰۰۰	۰,۲۸	۰,۵	مرطوب	۱۶

روش آنالیز واریانس به منظور بررسی کفایت و مؤثر بودن مدل‌های برازش شده و متغیرهای مربوط به آن به کار گرفته شده است. در این مقاله آنالیز واریانس برای کیفیت سطح کامپوزیت درجا  $\text{Al-15\%Mg}_2\text{Si}$  مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در هر آزمایش چهار پارامتر ورودی به صورت توأمان و جداگانه بررسی شده تا به یک پاسخ خروجی برسیم در این راستا از نرم‌افزار آماری مینی‌تب<sup>۱</sup> استفاده شده است. در فرایند بهینه‌سازی هرچقدر پاسخ‌های ضریب تعیین به سمت ۱۰۰ درصد بروند، یعنی پاسخ‌ها به هدف نزدیک‌تر هستند و هراندازه اگر به صفر نزدیک‌تر شوند، مفهوم آن این است که پاسخ‌ها از هدف دورتر شده‌اند.

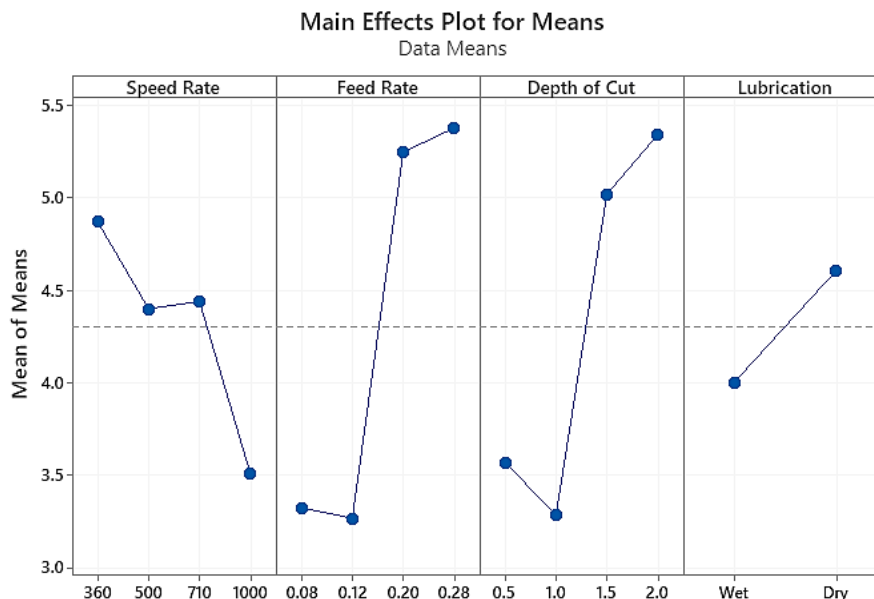
شکل ۶ نمودار میانگین زبری سطح به ازای پارامترهای ماشینکاری را نشان می‌دهد و جدول ۵ نتایج تحلیل تاگوچی برای میانگین زبری سطح در پارامترهای ماشینکاری را نشان می‌دهد.

در نخست با توجه به درصد ضریب تعیین<sup>۲</sup> بالا یعنی ۹۷,۴۱ درصد که تغییرات متغیر وابسته با متغیرهای مستقل را نشان داده است، استنباط شد متغیرهای مستقل که همان پارامترهای انتخابی همراه با سطوح آن می‌باشد، به خوبی تغییرات متغیر وابسته که کیفیت سطح می‌باشد را تبیین کرده‌اند، در گام بعد با بررسی درصد ضریب تعیین تعدیل شده<sup>۳</sup> با مقدار ۹۲,۲۲ درصد استنباط شد که متغیرهای مستقل به خوبی تغییرات متغیر وابسته را تبیین کرده است، حتی با پیچیدگی مدل، چرا که ضریب تعیین تعدیل شده این پیش فرض را دارد که با افزایش متغیر، مدل پیچیده‌تر شده و مدل را با فرض پیچیده بودن و سخت گیرانه بررسی می‌کند، به عبارتی تعداد بالای متغیرها از فیلتر برداشته شده است.

<sup>1</sup> Minitab

<sup>2</sup> R-square

<sup>3</sup> R-square Adjusted



شکل ۶ میانگین زبری سطح به ازای پارامترهای متفاوت ماشینکاری

جدول ۵ نتایج زبری سطح به همراه میزان اثرگذاری هر پارامتر

روانکاری	عمق برش	نرخ پیشروی	سرعت دورانی	سطح
۴,۰۰۳	۳,۵۷۰	۳,۳۲۵	۴,۸۷۰	۱
۴,۶۰۶	۳,۲۸۵	۳,۲۶۸	۴,۴۰۰	۲
	۵,۰۲۰	۵,۲۴۷	۴,۴۴۰	۳
	۵,۳۴۲	۵,۳۷۷	۳,۵۰۸	۴
۰,۶۰۴	۲,۰۵۷	۲,۱۱۰	۱,۳۶۲	دلنا
۴	۲	۱	۳	رتبه
	۹۷,۴۱٪			درصد ضریب تعیین
	۹۲,۲۲٪			درصد ضریب تعیین تعدیل شده

طبق تحلیل آماری بر داده‌های به دست آمده، مقدار دلنا، یعنی میزان تفاوت اثر گذار بر کیفیت سطح برای هر پارامتر محاسبه شده و به ترتیب رتبه در جدول آمده است، بیشترین اثر گذاری مربوط است به نرخ پیشروی که با دلتایی برابر با ۲,۱۱۰ بیشترین تأثیر را بر کیفیت سطح داشته است و همانطور که در شکل ۶ مشخص است، بالاترین شیب از نرخ پیشروی ۰,۱۲ تا ۰,۲۰ بوده است و کمترین زبری سطح برای نرخ پیشروی ۰,۱۲ است، این نتیجه نشان داد که کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si به شدت به نرخ پیشروی بالا حساس بوده و به دلیل عناصری مانند منیزیم با نرخ اشتعال پذیری بالا و آلومینیوم با رسانای گرمایی بالا توانسته مقاومت بسیار خوبی در نرخ پیشروی تا کمتر از ۰,۱۲ میلی‌متر بر دور داشته باشد تا فرصت برای انتقال حرارت از ناحیه برش به اطراف کامپوزیت و ابزار وجود داشته باشد. از طرفی این کامپوزیت با ذرات تقویت کننده سرامیکی که باعث افزایش سختی آن گشته زمان بهینه‌ای برای تراشکاری لازم دارد [۷] به همین دلیل نرخ پیشروی کمتر از ۰,۱۲ میلی‌متر بر دور هم به دلیل پرداخت بیش از حد باعث افزایش بی‌رویه دما در منطقه ماشینکاری شده و باعث تغییر شکل پلاستیک ذرات تشکیل دهنده کامپوزیت به خصوص ذرات تقویت کننده Mg<sub>2</sub>Si شده است.

در رتبه دوم تأثیر گذارترین پارامتر بر کیفیت سطح، عمق برش بوده که با دلتای ۲,۰۵۷ با اختلاف کمی نسبت به نرخ پیشروی در جایگاه دوم قرار دارد، با توجه به چهار سطح انتخابی برای این پارامتر، با تفسیر شکل ۶ استنباط شد که بیشترین شیب (تغییر) از ۱ تا ۱,۵ میلی‌متر بوده و عمق برش ۱ میلی‌متر کمترین زبری سطح را حاصل داده است. عمق برش بالا به دلیل تماس بیشتر نواحی ابزار با

کامپوزیت و ذرات تقویت کننده باعث افزایش ساییش و در نتیجه افزایش دمای منطقه برش شده است که نتیجه آن کاهش کیفیت سطح بوده است [۱۵]، از طرف دیگر عمق برش کمتر از ۱ میلی متر به دلیل تماس سطحی بیشتر ابزار با کامپوزیت تقویت شده با ذرات  $Mg_2Si$  باعث افزایش دمای ناحیه برش شده [۷] و با اختلاف کمتری نسبت به عمق برش های بیشتر قرار گرفته است.

در رتبه سوم سرعت دورانی قرار داشته که که با دلتای ۱,۳۶۲، با اختلاف بیشتری نسبت به دو پارامتر قبلی قرار گرفته است، و با شیب کمتر در شکل ۶ استنباط شد که میزان اثر گذاری آن به مراتب کمتر است، هر چند در چهار سطح بررسی شده، دارای دو تغییر اساسی در میزان کیفیت سطح است، یعنی سرعت دورانی از ۳۶۰ تا ۵۰۰ دور در دقیقه و از ۷۱۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه که رشد بسیار محسوس در کیفیت سطح مشاهده شد، این اصل که با افزایش سرعت برشی شاهد سطح تماس مفیدتری از ابزار بر قطعه کار (رابطه غالب و مغلوب جنس ابزار بر جنس قطعه کار) وجود دارد، یک امر اجتناب ناپذیر است، که نتیجه آن کاهش عمق نهایی برش به واسطه برش های یکنواخت، کاهش تنش های حرارتی به واسطه توزیع یکنواخت تر حرارت و کاهش اصطکاک به واسطه کاهش امکان ایجاد براده با لبه انباشته است [۱۶] که در این پژوهش مشاهده شد. اما مقدار بهینه برای این سرعت به تناسب رسیدن به کیفیت سطح مطلوب عدد ۱۰۰۰ دور در دقیقه استنباط شده است، چرا که با کاهش این مقدار شاهد مکانیسم های ذکر شده نبوده و نتیجه آن افزایش بی رویه دما در ناحیه برش است که سبب ایجاد براده با لبه انباشته، تغییر شکل های پلاستیک سطح کامپوزیت و در نتیجه افزایش زبری گشته است، از طرفی با افزایش بیش از حد سرعت دورانی از این میزان فرایند تراشکاری معمولی خارج شده و به سمت پراخت<sup>۱</sup> رفته که اصول و قواعد خاص خود را دارد و در این مقاله به آن پرداخته نشده است.

توجه به این نکته ضروری است که افزایش سرعت دورانی باید با دقت انجام شود، زیرا افزایش بسیار زیاد سرعت ممکن است منجر به مشکلاتی نظیر ساییش سریع تر ابزار، افزایش حرارت و حتی کیفیت پایین تر سطح شود [۱۷]. در این مقاله رفتاری مبنی بر کاهش کیفیت سطح در اثر افزایش سرعت برشی که نشانه ای از افزایش دما [۱۴] در منطقه برش هست مشاهده نشد، در نتیجه استنباط شد که در سرعت های دورانی انتخابی افزایش دمای بی رویه صورت نگرفته است.

در رتبه چهارم (آخر) استراتژی روانکاری قرار داشته که در آن دو سطح ماشینکاری در حالت خشک و مرطوب مورد مقایسه قرار داده شده است که با دلتایی برابر با ۰,۶۰۴ با اختلاف بیشتری نسبت به پارامترهای دیگر قرار گرفته است، با توجه به شکل ۶ و شیب میان این دو حالت، استنباط شد که استفاده از سیال برشی تأثیر به سزایی در افزایش کیفیت سطح داشته است، چرا که استفاده از آن باعث جلوگیری از افزایش حرارت به واسطه کاهش اصطکاک بین ابزار و کامپوزیت، کاهش فشار، ساییش، خوردگی و بهبود حرکت ابزار به واسطه عامل روان کننده بین ابزار و کامپوزیت، جلوگیری از تشکیل ضایعات اضافی بر روی سطح کامپوزیت به واسطه قابلیت پاکسازی و حذف براده ها در منطقه برش و تنظیم دمای ناحیه برش به واسطه قابلیت انتقال حرارت سیالات برشی شده است [۱۵]. از طرفی با شیب کم تغییرات کیفیت سطح در این دو حالت، استنباط شد که روش خشک هم به دلیل مزایایی چون ماشینکاری پایدار و سبز که سالیان اخیر بسیار مورد توجه ویژه قرار گرفته است، در این کامپوزیت قابل دستیابی می باشد.

در ماشینکاری کامپوزیت های تقویت شده با ذرات  $Mg_2Si$  زبری سطح بالایی مشاهده شد. از دلایل مهم می توان به سختی بالا و مقاومت در برابر ساییش ذرات تقویت کننده مانند  $Mg_2Si$  اشاره کرد. این سختی بالا باعث شد که این ذرات هنگام ماشینکاری مقاومت زیادی در برابر برش داشته و موجب ساییش ابزار و ایجاد زبری در سطح قطعه شده است [۱۸]. دلیل دیگر اثر حرارت و پدیده های برشی هنگام ماشینکاری کامپوزیت های تقویت شده بوده است، حرارت تولید شده توانست باعث تغییر خواص مواد و رفتار برشی شود. افزایش حرارت منجر به ذوب یا نرم شدن موقت ماتریس و ذرات تقویت کننده شده که این مسئله توانست منجر به افزایش زبری سطح شود [۱۹]. در آخر ذرات تقویت کننده که در هنگام ماشینکاری شکسته یا خرد شده اند باعث ایجاد حفرات و ناصافی های اضافی بر روی سطح قطعه شده، که منجر به افزایش زبری سطح شده است [۲۰].

در ادامه با قدرت پیش بینی مقدار<sup>۲</sup> نتایج تاگوچی در نرم افزار مینی تب، سطوح بهینه در هر کدام از پارامترها انتخاب شده و مقدار زبری سطح میانگین و سیگنال به نویز<sup>۳</sup>، مورد پیش بینی قرار گرفته است، که نتایج آن به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Finishing

<sup>2</sup> Predicted Values

<sup>3</sup> S/N Ratio

جدول ۶ سطوح بهینه به ازای هر کدام از پارامترهای ماشینکاری

رخ پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	سرعت دورانی (rpm)	روانکاری
۰,۱۲	۱	۱۰۰۰	مرطوب

جدول ۷ نتایج پیش‌بینی شده برای میانگین زبری سطح و سیگنال به نویز

سیگنال به نویز	میانگین زبری سطح (μm)
-۶,۲۵۰۸۶	۱,۱۴۹۳۸

همانطور که انتظار می‌رفت با انتخاب مقادیر بهینه از پارامترهای ماشینکاری استخراج شده از بخش قبل، باعث افزایش چشمگیر کیفیت سطح در کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si بوده، به طوری که شاخص میانگین زبری سطح به ۱,۱۴۹۳۸ میکرومتر رسیده، که کیفیت سطح قابل قبول و حتی نزدیک به پرداخت محسوب می‌شود. در جدول ۸ نتایج تحلیل واریانس نشان داده شده است.

جدول ۸ نتایج تحلیل واریانس برای میانگین زبری سطح

منبع	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
سرعت دورانی	۳	۳,۹۲۹۹	۳,۹۲۹۹	۱,۳۱۰۰	۷,۱۶	۰,۰۲۹
رخ پیشروی	۳	۱۶,۳۰۱۵	۱۶,۳۰۱۵	۵,۴۳۳۸	۲۹,۷۰	۰,۰۰۱
عمق برش	۳	۱۲,۶۷۳۰	۱۲,۶۷۳۰	۴,۲۲۴۳	۲۳,۰۹	۰,۰۰۲
روانکاری	۱	۱,۴۵۸۱	۱,۴۵۸۱	۱,۴۵۸۱	۷,۹۷	۰,۰۳۷
خطای باقیمانده	۵	۰,۹۱۴۹	۰,۹۱۴۹	۰,۱۸۳۰		
جمع	۱۵	۳۵,۲۷۷۴				

با توجه به جدول ۸ با داشتن حداکثر درجه آزادی<sup>۱</sup> که معیاری از داشتن بیشترین اطلاعات ممکن برای تخمین دقیق‌تر کیفیت سطح است، تحلیل واریانس صورت گرفته است. از طرفی جمع مربعات<sup>۲</sup> که نشان دهنده معیاری از اهمیت هر کدام از پارامترها بر کیفیت سطح می‌باشد نتایج حاصل ما را توجیه کرده است. مجموع مربعات تنظیم شده<sup>۳</sup> که با در نظر گیری سایر پارامترها معیاری برای تأثیر بر کیفیت سطح می‌باشد که به تناسب سایر نتایج بر تحلیل آماری نتایج صحت گذاشته است. میانگین مربعات تنظیم شده<sup>۴</sup> که علاوه بر تأثیر دیگر پارامترها با اعمال درجات آزادی، میزان وابستگی به کیفیت سطح نهایی را نشان داده است. آماره F<sup>۵</sup> که از تقسیم واریانس بین گروهی بر واریانس درون گروهی به دست آمده، مقدار بالای آن نسبت به آستانه معین در علوم مهندسی مکانیک (بین ۰,۰۱ تا ۰,۰۵) بوده نشان دهنده معنا دار بودن تأثیر هر کدام از پارامترها بر کیفیت سطح از نظر آماری بوده است. در نهایت مقدار احتمال<sup>۶</sup> که با مقایسه میانگین چند گروه واریانس به دست آمده، مقدار کمتر آن نسبت به آستانه معین در علوم مهندسی مکانیک (بین ۰,۰۱ تا ۰,۰۵) بوده نشان دهنده این است که نتایج به دست آمده از نظر آماری معنا دار بوده و نشأت گرفته از عواملی غیر از اتفاقات تصادفی است [۲۱].

در شکل ۷ نسبت سیگنال به نویز با هدف کاهش زبری سطح نشان داده شده است. با مقایسه شکل ۶ و شکل ۷ اتباط شد که تحلیل واریانس مهر تأییدی بر نتایج حاصله از روش آزمایش تاگوچی زده و با مقدار کمی تفاوت، تقریباً همان شیبها و میزان اثرگذاری سطوح در هر پارامتر تکرار شده است که در آن به ضریب تعیین ۹۷,۶۹ درصد رسیده است. با این نتایج توانسته به مدل رگرسیون<sup>۷</sup> برای اندازه‌گیری کیفیت سطح با دارا بودن مقادیر سرعت پیشروی، عمق برش و سرعت دورانی دست یافت.

<sup>1</sup> Degree of Freedom (DF)

<sup>2</sup> Sum of Squares (Seq SS)

<sup>3</sup> Adjusted Sum of Squares (Adj SS)

<sup>4</sup> Adjusted Mean Square (Adj MS)

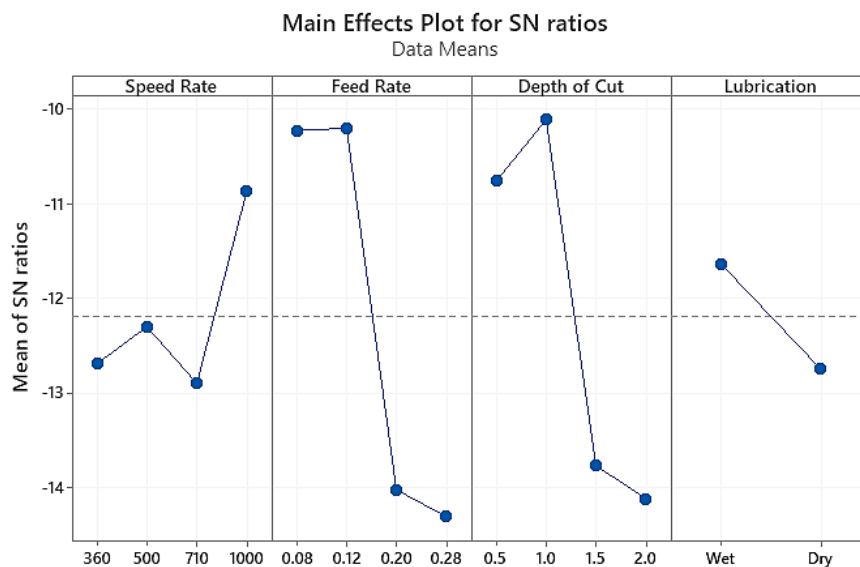
<sup>5</sup> F Value (F)

<sup>6</sup> P Value (P)

<sup>7</sup> Regression

در معادله ۱ مدل رگرسیون برای اندازه گیری شاخص کیفیت سطح کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si برآزش شده است.

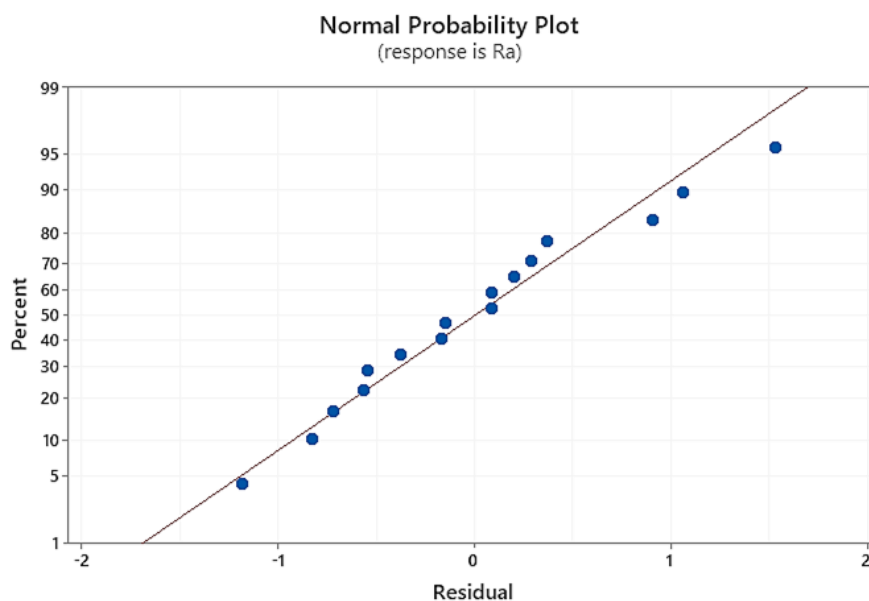
$$Ra = 1.720 - 0.001932(\text{Speed Rate}) + 12.13(\text{Feed Rate}) + 1.410(\text{Depth of Cut}) \quad (1)$$



Signal-to-noise: Smaller is better

شکل ۷ نسبت سیگنال به نویز در جهت کاهش زبری سطح در پارامترهای مختلف ماشینکاری با ضریب تعیین ۹۷٫۶۹٪

شکل ۸ نمودار احتمال عادی<sup>۱</sup> در مدل برآزش شده را نشان می‌دهد.



شکل ۸ نمودار احتمال عادی برای مدل رگرسیون برآزش شده

با توجه به شکل ۸ در ارزیابی توزیع عادی داده‌ها، استنباط شد که نقاط به خط راست نزدیک بوده و داده‌ها از توزیع عادی پیروی کرده‌اند. که با توجه به آن، مدل برآزش شده در معادله ۱ از اهمیت آماری بالایی در پیش‌بینی شاخص کیفیت سطح در کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si برخوردار است.

<sup>۱</sup> Normal Probability Plot

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش کامپوزیت پایه آلومینیوم با ذرات تقویت کننده  $Mg_2Si$  با استفاده از روش درجا ساخته شد، سپس ماشینکاری آن با هدف بررسی اثر هر یک از پارامترها مانند سرعت دورانی، نرخ پیشروی، عمق برش و استراتژی‌های روانکاری برای رسیدن به کیفیت سطح مطلوب مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته نتایج زیر به دست آمد:

- تحلیل واریانس اینگونه بیان کرد که فاکتورهای نرخ پیشروی و عمق برش به ترتیب تأثیر بیشتری نسبت به فاکتورهای دیگر بر کیفیت سطح کامپوزیت  $Al-Mg_2Si$  دارند.
- مقدار بهینه و مناسب برای نرخ پیشروی و عمق برش در کامپوزیت  $Al-Mg_2Si$  یک بازه تعیین شده است که برای عملیات تراشکاری در حالت عادی مقدار کمتر یا بیشتر از آن برای رسیدن به کیفیت سطح مطلوب توصیه نمی‌گردد.
- افزایش سرعت دورانی تا میزانی که از حالت تراشکاری معمولی به سمت پرداخت رفته نشود، باعث افزایش کیفیت سطح شده و مقدار کم آن برای رسیدن به کیفیت سطح مطلوب به هیچ وجه توصیه نمی‌گردد.
- در صورت بهره‌گیری از پارامترهای ماشینکاری بهبود یافته در جدول ۶، استفاده از سیال برشی برای رسیدن به کیفیت سطح خوب ضرورت ندارد و می‌توان از روش‌های ماشینکاری پایدار و سبز استفاده کرد.
- مدل رگرسیونی برزاش شده در معادله ۱ برای رسیدن به شاخص کیفیت سطح مطلوب در کامپوزیت  $Al-Mg_2Si$  پیشنهاد می‌گردد.

## فهرست علائم

$Al$	آلومینیوم
$Mg_2Si$	سیلیسید منیزیم
$SF_6$	گوگرد هگزا فلئورید
$CO_2$	دی اکسید کربن
$BN$	نیتريد بور
$DF$	درجه آزادی
$Seq SS$	مجموع مربعات
$Adj SS$	مجموع مربعات تنظیم شده
$Adj MS$	میانگین مربعات تنظیم شده
$F$	آماره F
$P$	مقدار احتمال

## علائم معادله

$Speed Rate$	نرخ سرعت (سرعت دورانی) (rpm)
$Feed Rate$	نرخ پیشروی (mm/rev)
$Depth of Cut$	عمق برش (mm)
$Ra$	شاخص زبری سنج ( $\mu m$ )

## References

- [1] Ishida T, Noma K, Kakinuma Y, Aoyama T, Hamada S, Ogawa H, Higaino T. Helical milling of carbon fiber reinforced plastics using ultrasonic vibration and liquid nitrogen. *Procedia Cirp*. 2014 Jan 1;24:13-8. doi: 10.1016/j.procir.2014.07.139
- [2] Lattanzi L, Awe SA. Thermophysical properties of Al-based metal matrix composites suitable for automotive brake discs. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. 2024 Mar 1;5:100059. doi: 10.1016/j.jalms.2024.100059

- [3] Prathap Singh S, Ananthapadmanaban D. Effect of Silicon Nitride Particles on the Sliding Wear Characteristics of Functionally Graded Aluminium Composite. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024 Mar;33(6):2875-96. doi: [10.1007/s11665-023-09011-z](https://doi.org/10.1007/s11665-023-09011-z)
- [4] Gutema EM, Lemu HG. Conventional Machining of Metal Matrix Composites towards Sustainable Manufacturing—Present Scenario and Future Prospects. *Journal of Composites Science*. 2024 Sep 12;8(9):356. doi: [10.3390/jcs8090356](https://doi.org/10.3390/jcs8090356)
- [5] Biswas P, Mondal MK. Evaluation of a cast Al-Mg<sub>2</sub>Si composite for automobile disk-brake rotor application. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024 Oct;33(20):11188-213. doi: [10.1007/s11665-023-08760-1](https://doi.org/10.1007/s11665-023-08760-1)
- [6] Ruban SR, Dev Wins KL, Raja Selvam JD, S Rai R. Influence of turning parameters on the machinability of Al6061/ZrB<sub>2</sub> & ZrC hybrid in-situ Aluminium Matrix Composite. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2023 Aug 8;21(4):1218-29. doi: [10.1080/14484846.2021.1963081](https://doi.org/10.1080/14484846.2021.1963081)
- [7] Sougavabar MA, Niknam SA, Davoodi B. Experimental characterization of tool wear morphology in milling of Al520-MMC reinforced with SiC particles and additive elements Bi and Sn. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023 May 1;24:571-85. doi: [10.1016/j.jmrt.2023.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.006)
- [8] Rajmohan T, Palanikumar K, Kathirvel M. Optimization of machining parameters in drilling hybrid aluminium metal matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012 Jun 1;22(6):1286-97. doi: [10.1016/S1003-6326\(11\)61317-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61317-4)
- [9] Premnath AA. Studies on machining parameters while milling particle reinforced hybrid (Al6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Gr) MMC. *Particulate Science and Technology*. 2015 Nov 2;33(6):682-92. doi: [10.1080/02726351.2015.1025457](https://doi.org/10.1080/02726351.2015.1025457)
- [10] Kumar R, Chauhan S. Study on surface roughness measurement for turning of Al 7075/10/SiCp and Al 7075 hybrid composites by using response surface methodology (RSM) and artificial neural networking (ANN). *Measurement*. 2015 Apr 1;65:166-80. doi: [10.1016/j.measurement.2015.01.003](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.003)
- [11] Honarbakhsh Raouf A, Khorshidi R. *Aluminum Matrix Composite Processing Methods*. Semnan: Semnan University Press; 2013. [In Persian]
- [12] Moradzadeh V, Danesh M, Arabgol F. Investigating the effect of fiber angle on the quality of the surface and delamination in the turning of epoxy composite reinforced with glass fiber. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Apr 21;10(2):14-21. doi: [10.22034/ijme.2023.418064.1848](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.418064.1848)
- [13] 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 Aug 23;9(6):59-69. doi: [10.22034/ijme.2022.160942](https://doi.org/10.22034/ijme.2022.160942) [In Persian]
- [14] Hasanifard M, Niknam SA. Study of surface wear in coated carbide tools during turning of MO40 steel. In: *The 17th National Conference and the 6th International Conference on Manufacturing Engineering*; 2021; Tehran. [In Persian]
- [15] Davoodi B, Tazehkandi AH. Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid. *Journal of Cleaner Production*. 2014 Apr 1;68:234-42. doi: [10.1016/j.jclepro.2013.12.056](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.056)
- [16] Molla Ramezani N, Davoodi B, Aberoumand M, Rezaee Hajideh M. Assessment of tool wear and mechanical properties of Al 7075 nanocomposite in friction stir processing (FSP). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019 Apr;41:1-4. doi: [10.1007/s40430-019-1683-1](https://doi.org/10.1007/s40430-019-1683-1)
- [17] Bansal P, Upadhyay L. Effect of turning parameters on tool wear, surface roughness and metal removal rate of alumina reinforced aluminum composite. *Procedia Technology*. 2016 Jan 1;23:304-10. doi: [10.1016/j.protcy.2016.03.031](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.031)
- [18] Das M, Mishra D, Mahapatra TR. Machinability of metal matrix composites: a review. *Materials Today: Proceedings*. 2019 Jan 1;18:5373-81. doi: [10.1016/j.matpr.2019.07.564](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.564)
- [19] Bhardwaj AR, Vaidya AM, Meshram PD, Bandhu D. Machining behavior investigation of aluminium metal matrix composite reinforced with TiC particulates. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024 Jul;18(5):2911-25. doi: [10.1007/s12008-023-01378-6](https://doi.org/10.1007/s12008-023-01378-6)
- [20] Chen S, Lu M, Lin J, Liu Q, Du Y, Zhao S. Finite element and experimental analysis of surface integrity and surface roughness of precision machining SiCp/Al. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2024 Apr 22:07316844241248511. doi: [10.1177/07316844241248511](https://doi.org/10.1177/07316844241248511)
- [21] Fard RK, Afza RA, Teimouri R. Experimental investigation, intelligent modeling and multi-characteristics optimization of dry WEDM process of Al-SiC metal matrix composite. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013 Oct 1;15(4):483-94. doi: [10.1016/j.jmapro.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.09.002)