



## بررسی تجربی تأثیر قلع بر کنترل سایش ابزار و بهینه‌سازی شرایط برشی در ماشینکاری کامپوزیت زمینه آلومینیوم

محمد حسنی فرد<sup>1</sup>، رضا آذرافزا<sup>2\*</sup>، محمدحسین علائی<sup>3</sup>، مسلم نجفی<sup>3</sup>

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

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

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

\* تهران، صندوق پستی 1774-15875، azarmut@mut.ac.ir

## اطلاعات مقاله:

دریافت: 1404/04/17

پذیرش: 1404/08/08

## چکیده

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات  $Mg_2Si$  به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی مطلوب، از جمله استحکام ویژه و سختی بالا، در زمره‌ی مواد مهندسی پیشرفته قرار می‌گیرند؛ اما ماشینکاری این کامپوزیت‌ها به دلیل حضور فازهای سخت و ترد، همواره با چالش‌هایی مانند سایش شدید ابزار مواجه است. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ماشینکاری و افزودنی قلع بر رفتار سایش ابزار در فرایند تراشکاری کامپوزیت  $Al-Mg_2Si$  به صورت تجربی و آماری مورد بررسی قرار گرفت. دو نوع کامپوزیت، یکی بدون افزودنی و دیگری حاوی 1 درصد وزنی قلع، با استفاده از روش ریخته‌گری درجا تولید شدند. آزمایش‌های ماشینکاری در چهار سطح از سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش و در دو حالت خشک و مرطوب، بر اساس طرح آزمایش تاگوچی با آرایه  $L_{16}$  اجرا گردید. ارزیابی سایش ابزار با تمرکز بر مورفولوژی و مساحت ناحیه سایش، به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و نرم‌افزار ایمیج‌جی انجام شد. نتایج نشان داد که سایش چسبنده مکانیزم غالب در هر دو نوع کامپوزیت است و افزودن قلع منجر به کاهش قابل توجه سایش ابزار می‌شود. تحلیل تاگوچی و مدل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که عمق برش بیشترین تأثیر را بر سایش ابزار دارد. شرایط بهینه شامل عمق برش 0.5 میلی‌متر، نرخ پیشروی  $0.08 \text{ mm/rev}$ ، سرعت  $710 \text{ rpm}$  و برش مرطوب تعیین شد. همچنین پیشنهاد شد که برای افزایش راندمان، می‌توان از شرایط جایگزین با عمق برش 1 میلی‌متر و نرخ پیشروی  $0.12 \text{ mm/rev}$  نیز استفاده کرد.

## کلیدواژگان

سایش ابزار، کامپوزیت زمینه آلومینیوم، تراشکاری، قلع،  $Mg_2Si$

## An experimental study on the effect of tin on tool wear control and machining parameter optimization in turning of aluminum composite

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

\* P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, azarmut@mut.ac.ir

## Keywords

Tool wear,  
Aluminum Matrix Composite,  
Turning,  
Tin,  
 $Mg_2Si$

## Abstract

Aluminum matrix composites reinforced with  $Mg_2Si$  particles are considered advanced engineering materials due to their desirable mechanical and thermal properties, such as high specific strength and hardness. However, machining these composites is often accompanied by challenges such as severe tool wear, mainly due to the presence of hard and brittle phases. In this study, the effects of machining parameters and tin (Sn) additive on tool wear behavior during the turning of  $Al-Mg_2Si$  composites were experimentally and statistically investigated. Two types of composites—one without additive and the other containing 1 wt.% Sn—were fabricated using the in-situ casting method. Machining tests were performed under four levels of cutting speed, feed rate, and depth of cut, and in both dry and wet conditions, based on the Taguchi design with an  $L_{16}$  orthogonal array. Tool wear was evaluated in terms of wear morphology and wear area using a scanning electron microscope (SEM) and ImageJ software. The results indicated that adhesive wear was the dominant mechanism in both composites, and the addition of Sn significantly reduced tool wear. Taguchi analysis and multiple regression modeling revealed that depth of cut had the most significant effect on tool wear. The optimal machining condition was identified as a 0.5 mm depth of cut, 0.08 mm/rev feed rate, 710 rpm spindle speed, and wet cutting. Additionally, an alternative condition with 1 mm depth of cut and 0.12 mm/rev feed rate was suggested for improved productivity.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Hasanifard, M., Azarafza, R., Alaei, M. H., Najafi, M., "An experimental study on the effect of tin on tool wear control and machining parameter optimization in turning of aluminum composite," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 1, pp. 2717-2727, 2025. <https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2065172.1925>

## 1- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی از جمله مواد مهندسی پیشرفته به شمار می‌روند که به دلیل خواص مکانیکی مطلوب و قابلیت‌های مهندسی بالا، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا و تجهیزات الکترونیکی یافته‌اند. این کامپوزیت‌ها به‌ویژه در قطعاتی نظیر اجزای موتور، میل‌گردان، سیستم‌های ترمز، پوسته پمپ و کمپرسورهای فشار بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [1, 2].

با توجه به توسعه روزافزون صنایع پیشرفته، علاقه‌مندی به استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی در کاربردهای صنعتی افزایش یافته است. با این حال، تقویت زمینه فلزی با ذرات سخت، به‌ویژه فازهای سرامیکی، فرایند ماشینکاری این مواد را با چالش‌هایی از جمله سایس شدید ابزار، کیفیت سطح پایین و افزایش هزینه‌های تولید همراه ساخته است. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که عمدتاً از ابزارهای کاربیدی و الماس چندبلوری<sup>1</sup> برای ماشینکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده شده است [3-5].

وجود ذرات سخت سرامیکی در ساختار این مواد، فرایند ماشینکاری را دشوار ساخته و عمر ابزار را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اغلب تحقیقات در زمینه عملیات فرزکاری متمرکز بوده‌اند و در برخی از آن‌ها، ابزارهای کاربیدی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای ابزارهای گران‌قیمت‌تری نظیر CBN و PCD در شرایط مشخص معرفی شده‌اند [6, 7]. در این راستا، انتخاب بهینه پارامترهای ماشینکاری نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش کارایی، پایداری فرایند و کنترل سایس ابزار ایفا می‌کند. هرچند مطالعات محدودی به بررسی فرایند تراشکاری در این حوزه پرداخته‌اند، اما نتایج موجود نشان می‌دهد که تنظیم مناسب شرایط برشی می‌تواند عملکرد ماشینکاری را به‌طور محسوسی بهبود بخشد. همچنین، تحقیقات متعددی استفاده از ابزارهای سرامیکی را برای ماشینکاری سوپرآلیاژها و کامپوزیت‌های فلزی گزارش کرده‌اند که بیانگر نیاز به ابزارهای مقاوم در برابر شرایط پیچیده ماشینکاری این مواد است [8].

مطالعه دقیق نوع، شدت و الگوی سایس در سطح ابزار، امکان شناسایی مکانیزم‌های فعال مانند سایس ساینده، چسبیده، اکسیداسیون و خستگی حرارتی را فراهم می‌کند. این شناخت به پژوهشگران و مهندسان کمک می‌کند تا نه تنها ابزار مناسب برای ماشینکاری مواد سختی مانند کامپوزیت‌های Al-MgSi انتخاب کنند، بلکه بتوانند با بهینه‌سازی پارامترهای برشی و ترکیب شیمیایی ماده، از بروز سایس‌های مخرب جلوگیری کرده یا آن را کاهش دهند [9].

به‌منظور بهبود قابلیت ماشینکاری این کامپوزیت‌ها، بررسی اثر پارامترهای برشی و افزودن عناصر آلیاژی مناسب ضروری است. یکی از عناصر مؤثر در این زمینه، قلع (Sn) است که به‌دلیل نقطه ذوب پایین و خواص اصطکاکی مطلوب، می‌تواند در بهبود تشکیل براده، کاهش سایس ابزار و بهینه‌سازی فرایند ماشینکاری نقش مؤثری ایفا کند.

در مطالعه تجربی توسط سوگوار و همکاران [10, 11]، رفتار سایس ابزار در فرزکاری کامپوزیت Al520 تقویت‌شده با ذرات SiC و افزودنی‌های بیسموت و قلع بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن قلع (Sn) به دلیل خواص روانکاری و دمای ذوب پایین، سایس ابزار را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد. در حالی که کامپوزیت Al-SiC به‌واسطه سختی بالای ذرات SiC سایس ساینده شدیدی ایجاد می‌کند، کامپوزیت Al-MgSi مورد مطالعه حاضر دارای

ذرات سخت اما با رفتار شکست‌پذیر متفاوت است. این تفاوت در نوع فاز تقویت‌کننده و فرایند ماشینکاری می‌تواند به تفاوت در مکانیزم‌های سایس ابزار بین دو کامپوزیت منجر شود.

کربمی‌برام و همکاران [12] تأثیر عنصر استرانسیم (Sr) را بر سایس سطح براده ابزار در فرایند تراشکاری کامپوزیت Al-MgSi با درصد‌های مختلف MgSi بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن Sr موجب کاهش قابل توجه ناحیه سایس ابزار به‌ویژه در سرعت‌های برشی بالا شد. همچنین با افزایش درصد MgSi در حضور Sr، الگوی سایس منظم‌تر شده و رفتار سایس بهبود یافت.

امامی و همکاران [13] اثر مقادیر مختلف قلع (Sn) را بر ریزساختار و خواص کششی کامپوزیت Al-15% MgSi مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن 5 درصد وزنی Sn موجب کاهش چشمگیر اندازه ذرات اولیه MgSi از حدود 45 به 8 میکرون شده و بهبود قابل توجهی در استحکام کششی نهایی و افزایش درصد ازدیاد طول ایجاد کرده است. تشکیل فاز بین‌فلزی Mg2Sn به‌عنوان هسته‌زای ناهمگن برای MgSi نقش مؤثری در اصلاح ساختار داشته است. همچنین قلع باعث افزایش زمان انجماد، کاهش دمای رشد و تغییر رفتار شکست از حالت ترد به نسبتاً چقرمه گردید.

سنو و همکاران [14] در مطالعه‌ای روی آلیاژ Al-Sn-Zn-Mg-Li نشان دادند که قلع با تشکیل فازهای Mg2Sn و Sn-rich، و نیز تأثیر بر رفتار جای‌خالی‌ها در زمینه آلومینیوم، نقش مهمی در بهبود توزیع رسوبات و افزایش سختی ناشی از پیرسختی طبیعی ایفا می‌کند.

باک و همکاران [15] با طراحی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم-قلع (Al-Sn) تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های هیبریدی (ABO<sup>2</sup>، BN<sup>3</sup> و CNT<sup>4</sup>) خواص سایشی مواد یاتاقان موتور را بررسی کردند. نتایج نشان داد که وجود قلع در زمینه آلومینیوم باعث تشکیل فازهای غنی از قلع در نواحی بین‌دندرتی شده و خاصیت روانکاری ذاتی Al-Sn را فراهم می‌کند. با این حال، استحکام مکانیکی پایین آلیاژ پایه Al-Sn محدودکننده است و افزودن تقویت‌کننده‌ها به همراه قلع باعث بهبود چشمگیر مقاومت به سایس و کاهش ضریب اصطکاک گردید.

هی و همکاران [16] اثر افزودن قلع به آلیاژهای Al-Mg-Si را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن مقدار اندک قلع باعث کاهش پهنای ناحیه بدون رسوب، ریزدانه‌سازی مرز دانه‌ها و در نتیجه بهبود استحکام کششی و مقاومت به خوردگی شد.

در این پژوهش، دو نوع کامپوزیت پایه آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات MgSi تولید شدند که یکی فاقد افزودنی و دیگری حاوی عنصر قلع (Sn) به‌عنوان افزودنی اصلاح‌کننده بود. این انتخاب با هدف بررسی نقش قلع در بهبود رفتار سایس ابزار انجام گرفت؛ موضوعی که علیرغم گزارش‌های متعدد درباره اثر قلع بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم، تاکنون در زمینه بررسی هم‌زمان تأثیر افزودن قلع و شرایط ماشینکاری بر رفتار سایس ابزار در کامپوزیت‌های Al-MgSi بررسی نشده است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند این خلأ علمی را پوشش داده و درک بهتری از مکانیزم‌های مؤثر در فرایند سایس ابزار فراهم آورد.

<sup>3</sup> Boron Nitride  
<sup>4</sup> Carbon Nanotubes

<sup>1</sup> PCD  
<sup>2</sup> Aluminum Borate



**Fig. 2** Casting mold used for in-situ Al-15%Mg<sub>2</sub>Si composite production

شکل 2 قالب ریخته‌گری مورد استفاده برای تولید کامپوزیت درجا Al-15%Mg<sub>2</sub>Si

قالب‌های سرامیکی قبل از ریخته‌گری تا دمای 750 درجه سلسیوس پیش گرم شدند تا از شوک حرارتی و انجماد سریع در دیواره‌ها جلوگیری شود. این کار موجب شد سرعت انجماد کنترل شده و فرصت کافی برای توزیع ذرات در ساختار فراهم گردد [5, 19].

به‌منظور اطمینان از کیفیت مطلوب در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، بخشی از هر دو نمونه کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si+Sn و Al-Mg<sub>2</sub>Si برش داده شد و پس از آماده‌سازی متالوگرافی شامل ساب و پولیش، برای انجام بررسی‌های ریزساختاری مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات میکروسکوپی با بهره‌گیری از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و تحلیل انرژی پراکندگی پرتو ایکس (EDS) صورت پذیرفت. همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود، ذرات تقویت‌کننده Mg<sub>2</sub>Si در هر دو نوع کامپوزیت عمدتاً به‌صورت چندوجهی و با ابعاد تقریباً مشابه تشکیل شده‌اند. حضور عنصر قلع در ساختار باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ریزساختار گردید؛ به‌طوری‌که این فلز به‌عنوان یک روانکار در مرز دانه‌ها به شکل لایه‌های نازک توزیع شد و با تسهیل جوانه‌زنی و رشد کنترل‌شده، منجر به تشکیل لایه‌هایی منظم از ریزدانه‌ها در زمینه آلومینیومی گردید. در مقابل، در کامپوزیت فاقد قلع، توزیع نامنگن ذرات Mg<sub>2</sub>Si و بروز پدیده‌هایی نظیر آتروفی و بی‌نظمی ساختاری مشاهده شد که می‌تواند به افت خواص کامپوزیت منجر گردد. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن قلع نقش مؤثری در بهبود یکنواختی ریزساختار و افزایش کیفیت نهایی کامپوزیت ایفا می‌کند.

این بهبود ریزساختاری می‌تواند اثرات چشمگیری بر فرآیند ماشینکاری کامپوزیت‌ها داشته باشد [11]. توزیع یکنواخت و منظم ذرات تقویت‌کننده در ساختار آلومینیوم، مقاومت به تغییر شکل و تخریب را بهبود بخشیده و فشار وارد بر ابزار برشی را کاهش می‌دهد. به علاوه، حضور لایه‌های قلع در مرز دانه‌ها به‌عنوان یک روانکار جامد باعث کاهش اصطکاک میان ابزار برشی و سطح قطعه می‌شود. این ویژگی منجر به کاهش سایس ابزار در حین فرآیند ماشینکاری، بهبود عمر ابزار و افزایش دقت برش می‌گردد. به طور کلی، افزودن قلع نه تنها بر کیفیت ریزساختار تأثیر دارد، بلکه شرایط ماشینکاری را بهبود بخشیده و میزان سایس ابزار را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. آنالیز کوانتومتری نمونه‌ها تحت شرایط کنترل‌شده شامل دمای 25 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 38% انجام شد. ترکیب شیمیایی نهایی کامپوزیت‌های تولیدشده در جدول 1 ارائه شده است.

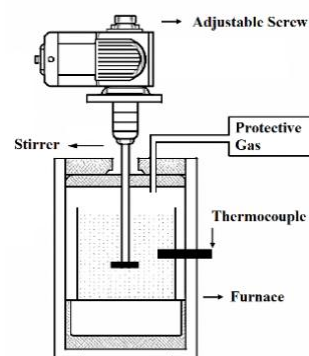
## 2- مواد و تجهیزات

تولید کامپوزیت بر پایه‌ی روش ریخته‌گری درجا انجام شد، به‌طوری‌که ذرات تقویت‌کننده‌ی Mg<sub>2</sub>Si مستقیماً درون مذاب آلومینیوم تشکیل شدند و نیازی به افزودن ذرات خارجی وجود نداشت. این روش نه تنها هزینه تولید را کاهش می‌دهد بلکه توزیع یکنواخت‌تری از ذرات و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی ایجاد می‌کند [13, 17, 18].

برای تنظیم ترکیب شیمیایی، از آلیاژ تجاری آلومینیوم-سیلیسیم<sup>1</sup> به‌همراه منیزیم و آلومینیوم خالص به‌عنوان مواد اولیه استفاده گردید. این مواد به‌منظور تولید شمش Al-15%Mg<sub>2</sub>Si درون یک بوته کاربید سیلیسیم و درون کوره مقاومتی ذوب شدند. دمای فرایند ذوب 5 ± 750 درجه سانتی‌گراد تنظیم و کنترل شد [13].

از همزن فولادی چهارپاره با زاویه 30 درجه نسبت به راستای دسته استفاده شد تا جریان گردابه‌ای مؤثری در کل مذاب ایجاد شود. فرآیند هم‌زدن به مدت 15 دقیقه ادامه یافت که باعث معلق ماندن و توزیع یکنواخت ذرات Mg<sub>2</sub>Si در سراسر حجم مذاب گردید.

با توجه به واکنش‌پذیری بالای منیزیم در دماهای بالا، جهت جلوگیری از اکسیداسیون و سوختن آن، فرآیند ذوب در یک اتمسفر کنترل‌شده انجام شد. برای این منظور، از مخلوط گاز SF<sub>6</sub> و CO<sub>2</sub> به‌عنوان گاز محافظ در محیط کوره استفاده گردید [19]. حضور این گازها لایه‌ای پایدار بر سطح مذاب ایجاد کرده و مانع از تماس مستقیم آن با اکسیژن هوا شد. به این ترتیب، کیفیت مذاب حفظ شده و تشکیل لایه‌های اکسیدی مضاعف مانند Mg-Al-O به حداقل رسید. شکل 1 شماتیک سیستم ریخته‌گری کامپوزیت درجا Al-Mg<sub>2</sub>Si را نشان می‌دهد.



**Fig. 1** Schematic of the casting system used for in-situ composite production

شکل 1 شماتیک سیستم ریخته‌گری مورد استفاده برای تولید کامپوزیت درجا

عنصر آلیاژی قلع (Sn) به‌صورت خالص و با درصد وزنی 1% به مذاب اضافه گردید تا به‌عنوان عامل اصلاح‌کننده ساختار عمل کند. عملیات انحلال و همگن‌سازی در مدت 15 دقیقه انجام شد، که طی آن مذاب به‌طور پیوسته هم‌زده شده و سطح آن به‌منظور حذف ناخالصی‌ها پاک‌سازی گردید.

پس از آن، مذاب درون یک قالب سرامیکی استوانه‌ای با قطر خارجی 30 میلی‌متر، ارتفاع 150 میلی‌متر و ضخامت دیواره 10 میلی‌متر که از پیش به مدت 15 دقیقه تا دمای 750 درجه سانتی‌گراد گرم شده بود، ریخته شد [20]. شکل 2 قالب مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها را نشان داده است.

<sup>1</sup> LM6

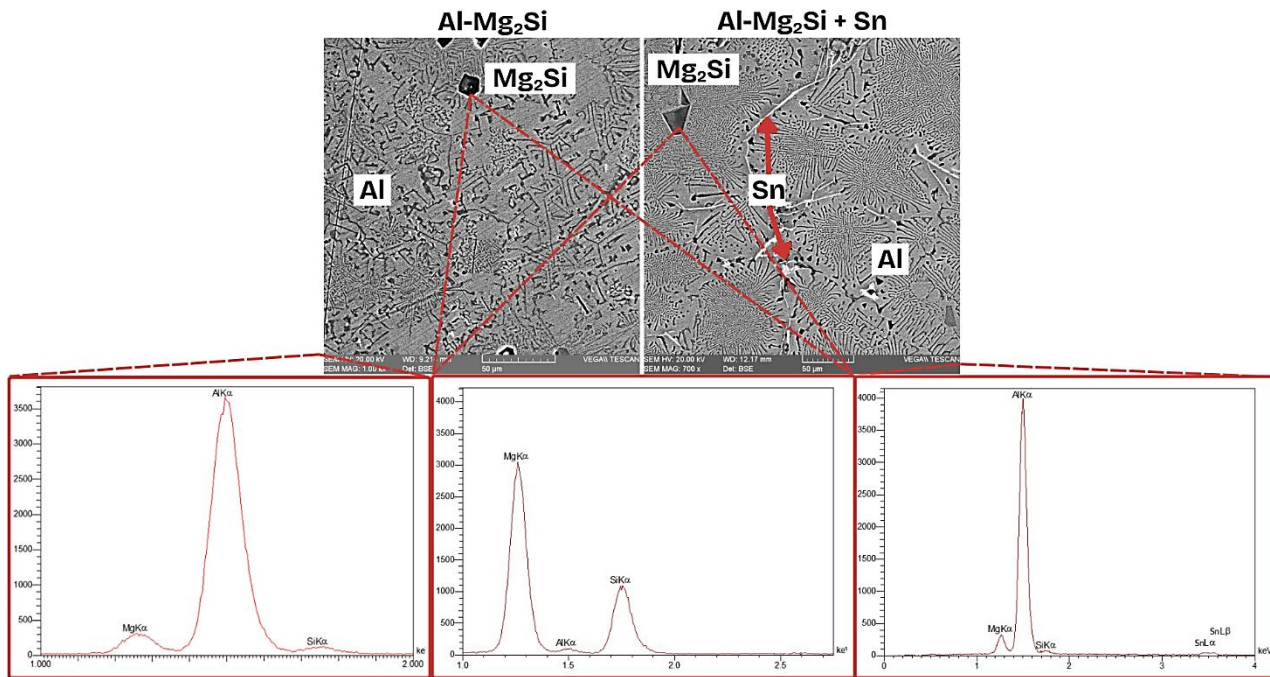


Fig. 3 Microstructure image with EDS analysis for the two fabricated composites: unreinforced and Sn-reinforced

شکل 3 تصویر ریزساختار همراه با آنالیز EDS برای دو کامپوزیت ساخته شده: تقویت نشده و تقویت شده با قلع

جدول 1 درصد وزنی عناصر در نمونه‌های ریخته‌گری شده Al-Mg<sub>2</sub>Si

Table 1 Weight percentage of elements in the cast Al-Mg<sub>2</sub>Si samples

Cr	Si	Zn	Mn	Cu	Fe	Mg	Sn	Al	کامپوزیت
0.01	5.61	0.13	0.12	0.17	0.21	9.53	-	پایه	Al-Mg <sub>2</sub> Si
0.03	5.43	0.15	0.14	0.12	0.15	9.42	1.03	پایه	Al-Mg <sub>2</sub> Si + Sn

اجرا شد که در مجموع 32 آزمایش اولیه را شامل می‌شد. به منظور اطمینان از صحت نتایج و کاهش احتمال خطای تصادفی، تمامی این آزمایش‌ها یک بار دیگر تکرار گردید و مقادیر میانگین نتایج به‌عنوان داده نهایی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این فرآیند تکرار مضاعف موجب افزایش دقت آماری و اعتبار نتایج گردید.

تحلیل‌های آماری حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار تجاری مینی‌تب<sup>2</sup> انجام شد که ابزار مناسبی برای طراحی تاگوچی، محاسبه نسبت سیگنال به نویز و تحلیل رگرسیون چندمتغیره در این پژوهش فراهم آورد.

جدول 2 پارامترهای برشی مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table 2 Cutting parameters used in the experiments

ردیف	فاکتورها	سطوح			
		سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
1	روانکاری	خشک	مرطوب		
2	سرعت دورانی (rpm) (N)	360	500	710	1000
3	سرعت پیشروی (mm/rev) (f)	0.08	0.12	0.2	0.28
4	عمق برش (mm) (d)	0.5	1	1.5	2

<sup>2</sup> Minitab

<sup>1</sup> MeC Green

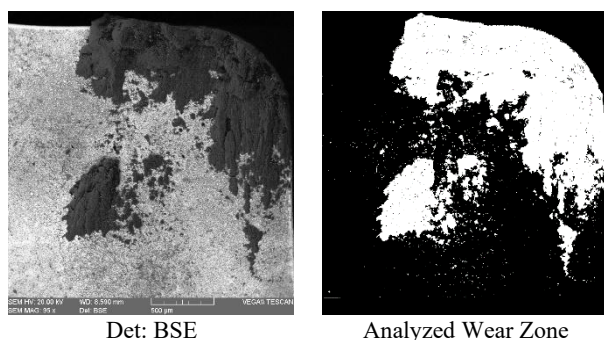
### 3- طراحی آزمایش

پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده در این پژوهش در جدول 2 ارائه شده‌اند. مقادیر انتخابی برای سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش بر اساس توصیه‌های صنعتی شرکت سازنده ابزار برشی و با در نظر گرفتن محدوده عملیاتی ابزار تعیین شدند. در شرایط برش مرطوب نیز از سیال پایه گیاهی به‌عنوان روانکار استفاده گردید [21]. در شرایط برش مرطوب نیز از سیال برشی پایه گیاهی<sup>1</sup> به‌عنوان روانکار استفاده گردید.

به‌منظور طراحی آزمایشی بهینه با حداقل تعداد آزمایش و در عین حال دستیابی به نتایج معتبر، از آرایه متعامد L16 تاگوچی استفاده شد [22]. این مدل به‌طور خاص برای بررسی اثرات اصلی پارامترهای ماشینکاری (سرعت برش، نرخ پیشروی، عمق برش و استراتژی روانکاری) طراحی گردید و برهمکنش‌های دوتایی در آن لحاظ نشده‌اند. دلیل این انتخاب آن است که هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی و کمی‌سازی تأثیر مستقل هر یک از پارامترهای ماشینکاری بر میزان سایس ابزار بوده است. روش تاگوچی علاوه بر کاهش تعداد آزمایش‌ها و صرفه‌جویی در زمان و هزینه، امکان تحلیل آماری دقیق و قابل استناد را در شرایط پیچیده ماشینکاری فلزات سخت و کامپوزیت‌ها فراهم می‌سازد [23-25].

در این پژوهش، تعداد 16 آزمایش اصلی برای هر یک از دو نوع کامپوزیت (کامپوزیت بدون افزودنی قلع و کامپوزیت حاوی 1 درصد وزنی قلع) طراحی و

بررسی نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که مکانیزم سایش چسبنده، رایج‌ترین و غالب‌ترین نوع سایش در فرایند تراشکاری کامپوزیت‌های  $Al-Mg_2Si$  بوده است. این نوع سایش به صورت تشکیل لبه چسبیده<sup>7</sup> و لایه چسبیده<sup>8</sup> در سطح برشی ابزار مشاهده شد که عمدتاً از برهم‌کنش شدید میان ابزار و قطعه‌کار، به همراه نوسانات حرارتی و مکانیکی در ناحیه برش ناشی می‌شود [26]. شکل 5 به عنوان نمونه‌ای نماینده از این الگوی سایش غالب، مورفولوژی مشخصی از سایش چسبنده را در سطح ابزار نشان می‌دهد که تأثیر مستقیم پارامترهای ماشینکاری بر تخریب و زوال سطح ابزار در حین فرایند برش را نیز به خوبی منعکس می‌سازد. نتایج نهایی مربوط به مساحت سایش ابزار، به همراه ماتریس طراحی آزمایش، در جدول 4 ارائه شده است.



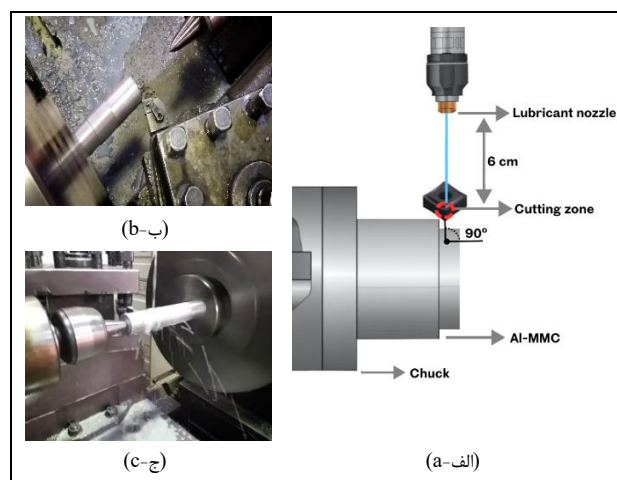
**Fig. 5** Tool wear mechanism under machining conditions:  $L = dry$ ,  $f = 0.12$  mm/rev,  $d = 1.5$  mm,  $N = 1000$  rpm  
 شکل 5 مکانیزم سایش ابزار در شرایط ماشینکاری: محیط خشک،  $f = 0.12$  mm/rev عمق برش  $d = 1.5$  mm و سرعت دورانی  $N = 1000$  rpm

شکل 6 تغییرات میانگین مساحت سایش ابزار را در شرایط مختلف ماشینکاری نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار مشخص است، روندهای واضحی در پاسخ به تغییر پارامترهای برشی مشاهده می‌شود و شرایط مربوط به بیشترین و کمترین مقدار سایش به روشنی قابل شناسایی هستند. این نتایج با تحلیل تاگوجی ارائه شده در جدول 5 پشتیبانی و تأیید می‌شوند.

مساحت بالای سایش ابزار در ماشینکاری کامپوزیت‌های  $Al-Mg_2Si$  عمدتاً ناشی از سختی زیاد ذرات  $Mg_2Si$  است. این ذرات با ایجاد خراش در سطح ابزار و افزایش اصطکاک در منطقه برش، موجب تخریب لبه برشی و تشدید فرایند سایش می‌شوند؛ به‌ویژه در شرایطی با پیشروی و عمق برش بالا که تماس بیشتری بین ابزار و ذرات برقرار می‌گردد [27].

نتایج جدول 5 بیانگر آن است که هر یک از پارامترهای ماشینکاری اثرات مشخصی بر میانگین مساحت سایش ابزار داشته‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با تغییر سطوح مختلف پارامترها (اعم از سرعت دورانی، نرخ پیشروی، عمق برش و روانکاری)، مقادیر میانگین مساحت سایش دچار نوسان گردیده و روندهای مشخصی را نشان می‌دهند.

ماشین تراش مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع SN71C ساخت شرکت توس<sup>1</sup> جمهوری چک بود. ابزار برشی به کاررفته، از نوع کاربید سمانته پوشش‌دار با کاربید تنگستن و ساخت شرکت بوهرلیت<sup>2</sup> (اتریش) بوده که بر اساس استاندارد ISO 3685:1993 انتخاب شده است. هندسه ابزار به صورت مربعی بوده و با کد تجاری CNMG-120408-MS شناخته می‌شود. کد اختصاصی این ابزار طبق سیستم کدگذاری شرکت سازنده، LC415Z(HC-S15) است. این ابزار از نوع پوشش‌دار، دارای براده‌شکن و دارای مقاومت سایشی بالا می‌باشد. ابزارگیر مورد استفاده نیز از نوع MCLNR2020K12 مطابق با استاندارد ISO بوده است. شماتیک نحوه قرارگیری المان‌ها و انجام آزمایش‌ها در دو حالت خشک و مرطوب در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های کامپوزیتی و نحوه استقرار آن‌ها در ماشین تراش در جدول 3 آمده است.



**Fig. 4** (a) Schematic setup of the experiment for machining operations, (b) dry condition, and (c) wet condition.

شکل 4 (الف) شماتیک چیدمان آزمایش برای انجام عملیات ماشینکاری در حالت: (ب) خشک و (ج) مرطوب

**جدول 3** خواص فیزیکی کامپوزیت‌ها و نحوه قرارگیری آن‌ها روی دستگاه تراش  
**Table 3** Physical properties of the composites and their positioning in the lathe

پارامتر	مقدار (میلی‌متر)
طول قطعه‌کار	150
قطر قطعه‌کار	30
طول منطقه ماشینکاری شده در هر آزمایش	18
طول درگیری قطعه با فک سه‌نظام	30

#### 4- نتایج و بحث

برای تحلیل دقیق سطح سایش ابزار، از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>3</sup> مدل وگا 2<sup>4</sup> ساخت شرکت تسکن<sup>5</sup> (جمهوری چک) استفاده شد. تصاویر با بزرگ‌نمایی‌های مختلف از نواحی سایش تهیه گردید تا ویژگی‌های مورفولوژیکی، از جمله نوع، عمق و گسترش سایش قابل تشخیص باشد. به‌منظور ارزیابی کمی میزان سایش، مساحت ناحیه سایش با استفاده از نرم‌افزار ایمیج‌جی<sup>6</sup> اندازه‌گیری و بررسی شد.

<sup>1</sup> Tos Machine Tools  
<sup>2</sup> Bohlerit  
<sup>3</sup> SEM  
<sup>4</sup> Vega2

<sup>5</sup> Tescan  
<sup>6</sup> ImageJ  
<sup>7</sup> BUE  
<sup>8</sup> BUL

جدول 4 نتایج مربوط به مساحت سایش در سطح براده ابزار به همراه ماتریس طراحی آزمایش‌ها

Table 4 Results of the tool rake face wear area along with the experimental design matrix

نتایج	پارامترهای ماشینکاری				شماره آزمایش
مساحت سایش (mm <sup>2</sup> )	سرعت دورانی (rpm) (N)	سرعت پیشروی (mm/rev) (f)	عمق برش (mm) (d)	روانکاری	
0.417	360	0.08	0.5	مرطوب	1
0.582	360	0.12	1	مرطوب	2
1.782	360	0.2	1.5	خشک	3
2.565	360	0.28	2	خشک	4
0.903	500	0.08	1	خشک	5
0.642	500	0.12	0.5	خشک	6
1.635	500	0.2	2	مرطوب	7
1.844	500	0.28	1.5	مرطوب	8
0.783	710	0.08	1.5	مرطوب	9
1.193	710	0.12	2	مرطوب	10
1.249	710	0.2	0.5	خشک	11
1.128	710	0.28	1	خشک	12
1.541	1000	0.08	2	خشک	13
1.379	1000	0.12	1.5	خشک	14
0.653	1000	0.2	1	مرطوب	15
0.901	1000	0.28	0.5	مرطوب	16

پارامتر دلتا که اختلاف بین حداکثر و حداقل مقادیر میانگین سایش برای هر عامل را نشان می‌دهد، به‌عنوان شاخصی برای تعیین اهمیت نسبی پارامترها در مدل مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس این نتایج، عمق برش با بالاترین مقدار دلتا (0.9313)، مهم‌ترین پارامتر مؤثر شناخته شد و پس از آن به ترتیب نرخ پیشروی (0.6985)، روانکاری (0.3976) و سرعت دورانی (0.2483) قرار گرفتند. علاوه بر این، مقدار ضریب تعیین<sup>1</sup> ( $R^2 = 96.03\%$ ) که برای مدل محاسبه شد، نشان‌دهنده همبستگی قوی بین متغیرهای ورودی و پاسخ خروجی است. این مقدار بالا تأیید می‌کند که مدل تاگوچی به‌کاررفته توانسته است تغییرات سایش ابزار را با دقت بالایی پیش‌بینی کند. بنابراین، جدول 5 علاوه بر مقایسه کمی اثرات پارامترهای ماشینکاری، معیاری روشن برای اولویت‌بندی عوامل کلیدی در فرآیند ماشینکاری فراهم می‌آورد.

مساحت سایش با افزایش عمق برش از 0.5 میلی‌متر به 1 میلی‌متر تغییر محسوسی نداشته است. اما با افزایش بیشتر عمق برش از 1 به 1.5 و 2 میلی‌متر، سایش ابزار به‌طور چشمگیری افزایش یافته است.

دلیل این افزایش بی‌رویه در سایش ابزار را می‌توان در چندین عامل کلیدی جستجو کرد. نخست، افزایش عمق برش منجر به افزایش تنش‌های مکانیکی در ناحیه تماس ابزار و قطعه‌کار شده که این امر فشار بیشتری را به سطح ابزار وارد کرده است [28]. در نتیجه، چسبندگی مواد قطعه‌کار به ابزار افزایش یافته و تشکیل لایه‌های براده با لبه انباشته تسریع شده. همچنین، با افزایش عمق برش، نیروهای برشی بزرگ‌تر شده و موجب افزایش دما در ناحیه برش گردیده است. این افزایش دما سبب کاهش سختی موضعی ابزار و تشدید مکانیسم سایش چسبنده شده است.

مساحت سایش در ابتدا با افزایش نرخ پیشروی از 0.08 تا 0.12 میلی‌متر بر دور تغییر چندانی نداشته است، اما با افزایش نرخ پیشروی از 0.12 به 0.2 و سپس به 0.28 میلی‌متر بر دور، میزان سایش به‌طور چشمگیری افزایش یافته است.

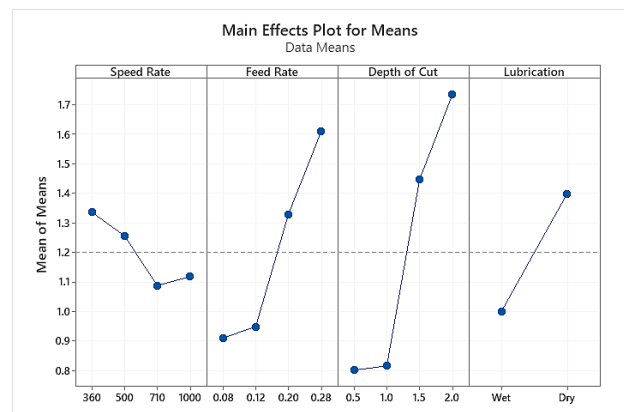


Fig. 6 The mean tool wear area for different machining parameters

شکل 6 میانگین مساحت سایش ابزار در پارامترهای مختلف ماشینکاری

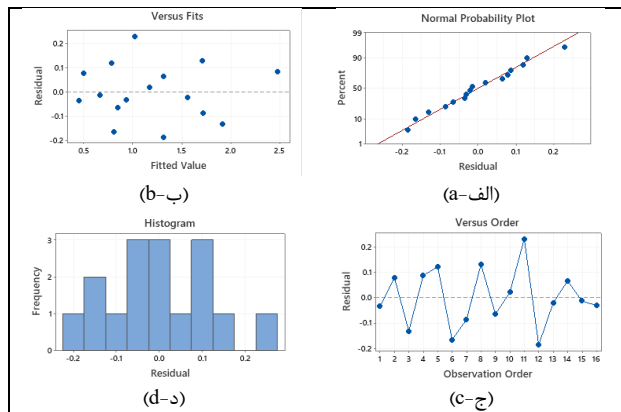
جدول 5 نتایج مساحت سایش ابزار به همراه میزان اثرگذاری هر پارامتر ماشینکاری

Table 5 Tool wear area results along with the contribution percentage of each machining parameter

سطح	سرعت دورانی	نرخ پیشروی	عمق برش	روانکاری
1	1.3365	0.9110	0.8022	1.0010
2	1.2560	0.9490	0.8165	1.3986
3	1.0882	1.3298	1.4470	
4	1.1185	1.6095	1.7335	
دلتا	0.2483	0.6985	0.9313	0.3976
رتبه	4	2	1	3
درصد ضریب تعیین	96.03%			

<sup>1</sup> R-squared

باقیمانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده و ترتیب آزمایش‌ها بیانگر عدم وجود خودهمبستگی یا روند سیستماتیک، و هیستوگرام باقیمانده‌ها مؤید توزیع متقارن داده‌ها می‌باشد. در نتیجه، این تحلیل‌های آماری صحت و اعتبار مدل آماری تاگوچی به کاررفته در پژوهش حاضر را تأیید کرده و نشان داد که مدل ارائه شده قادر است تغییرات سایس ابزار را با دقت قابل قبولی تبیین نماید.



**Fig. 7** Residual plots for evaluating the Taguchi model: (a) Normal probability plot, (b) Residuals versus fitted values, (c) Residuals versus order of experiments, and (d) Histogram of residuals.

شکل 7 نمودارهای باقیمانده ارزیابی مدل تاگوچی: (الف) نمودار احتمال نرمال، (ب) نمودار باقیمانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده، (ج) نمودار باقیمانده‌ها در برابر ترتیب آزمایش‌ها، و (د) هیستوگرام باقیمانده‌ها.

سطوح بهینه برای تمامی پارامترهای ورودی فرایند ماشینکاری تعیین گردید که در جدول 6 ارائه شده است. این سطوح بهینه بر اساس تأثیر آن‌ها در کاهش مساحت سایس در سطح براده ابزار و حفظ کارایی فرایند ماشینکاری انتخاب شدند. در ادامه، مقادیر پیش‌بینی شده برای میانگین مساحت سایس و نسبت سیگنال به نویز با استفاده از مدل تاگوچی محاسبه شد. این مقادیر، تخمینی از عملکرد فرایند ماشینکاری تحت شرایط بهینه ارائه داده‌اند. به منظور اعتبارسنجی پیش‌بینی‌های انجام شده، آزمایش‌هایی با استفاده از پارامترهای بهینه تعیین شده صورت گرفت. در این مرحله، مساحت سایس در سطح براده ابزار حاصل از آزمایش‌های تجربی، با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه گردید که نتایج این مقایسه در جدول 7 ارائه شده است.

**جدول 6** سطوح بهینه برای هر کدام از پارامترهای ماشینکاری

**Table 6** Optimal levels for each machining parameter

رخ پیشروی (mm/rev)	عمق برش (mm)	سرعت دورانی (rpm)	روانکاری
0.08	0.5	710	مرطوب

**جدول 7** نتایج پیش‌بینی شده و اعتبارسنجی آن در شرایط بهینه ماشینکاری

**Table 7** Predicted results and their validation under optimal machining conditions

خطا (%)	آماری	تجربی
7.85	میانگین مساحت سایس (mm <sup>2</sup> )	میانگین مساحت سایس (mm <sup>2</sup> )
	0.203063	0.219
	سیگنال به نویز	6.60033

این روند افزایشی به دلیل افزایش نیروی برشی و دمای موضعی در منطقه تماس ابزار و قطعه کار رخ داده است [28]. در نرخ‌های پیشروی پایین، زمان تماس ابزار با ماده بیشتر بوده و نرخ براده برداری کمتر است، در نتیجه تأثیر مکانیزم سایس چسبنده غالب‌تر بوده و مساحت سایس روند افزایشی ملایمی را نشان داده است. اما با افزایش نرخ پیشروی به مقادیر بالاتر، نرخ تغییر شکل ماده افزایش یافته و تنش‌های مکانیکی اعمال شده بر ابزار نیز بیشتر شده است. این امر منجر به افزایش شکست و خوردشدگی ذرات سخت Mg<sub>2</sub>Si در سطح تماس ابزار و قطعه کار شده که در نتیجه آن، سایس ساینده نیز به صورت محسوس‌تری ظاهر شده است.

استفاده از سیال برشی زیست‌سازگار موجب کاهش قابل توجهی در مساحت سایس نسبت به ماشینکاری در شرایط خشک شده است. این کاهش، به صورت یک شیب تند در نمودار نمایان شده و نشان‌دهنده نقش مؤثر روانکاری در بهبود عملکرد ابزار است.

دلیل این کاهش سایس را می‌توان به چندین عامل مرتبط دانست. اولاً، استفاده از روانکار باعث کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار شده و از افزایش بیش‌از حد دمای موضعی در منطقه برش جلوگیری کرده است [29, 30]. این موضوع به‌ویژه در ماشینکاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده اهمیت دارد، چراکه دمای بالا می‌تواند منجر به چسبندگی بیشتر مواد به سطح ابزار و افزایش نرخ سایس چسبنده شود. ثانیاً، روانکار موجب بهبود تخلیه براده از ناحیه برش شده و از تجمع براده روی سطح ابزار جلوگیری کرده است، عاملی که معمولاً در ماشینکاری خشک منجر به تشکیل لایه‌های چسبنده و افزایش مساحت سایس می‌شود [31, 32].

افزایش تدریجی سرعت دورانی از 360 تا 710 دور در دقیقه باعث کاهش مساحت سایس در سطح براده ابزار شد. این امر به دلیل کاهش نیروی برشی و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در سطح ابزار است. در این بازه، افزایش سرعت دورانی باعث کاهش ضخامت براده و بهبود فرایند برش شد و با کاهش اصطکاک میان ابزار و قطعه کار، میزان سایس کاهش یافت. همچنین، حرارت تولیدی به صورت یکنواخت‌تر در منطقه ماشینکاری پخش شد و از تمرکز تنش‌های حرارتی در یک نقطه جلوگیری کرد [33].

اما با افزایش سرعت دورانی از 710 تا 1000 دور در دقیقه، مساحت سایس به‌طور نسبی افزایش یافت. این تغییر به دلیل افزایش دمای موضعی و تغییر مکانیزم سایس بود. هرچند که نیروی برشی کاهش یافته، اما افزایش دما باعث تشکیل لایه‌های چسبنده بر سطح ابزار شده که پس از جدا شدن، موجب ایجاد سطحی ناهموار و افزایش نرخ سایس شده است. همچنین، در سرعت‌های بالا، زمان تماس بین ابزار و قطعه کار کاهش یافته و این باعث محدودیت در خروج مؤثر حرارت و کاهش اصطکاک در منطقه برش شده است [10].

در شکل 7، چهار نمودار اصلی برای ارزیابی باقیمانده‌های مدل تاگوچی ارائه شده است. این نمودارها شامل: نمودار احتمال نرمال<sup>1</sup>، نمودار باقیمانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده<sup>2</sup>، نمودار باقیمانده‌ها در برابر ترتیب آزمایش‌ها<sup>3</sup> و هیستوگرام باقیمانده‌ها<sup>4</sup> می‌باشند.

بررسی این نمودارها نشان داد که توزیع باقیمانده‌ها از الگوی تصادفی و تقریباً نرمال پیروی می‌کند و هیچ روند سیستماتیک یا الگوی غیرعادی در داده‌ها مشاهده نشد. این موضوع بیانگر آن است که فروض اساسی رگرسیون خطی از جمله نرمال بودن، استقلال و همگنی واریانس باقیمانده‌ها برقرار بوده است. به‌ویژه، نمودار احتمال نرمال نشان‌دهنده برازش مناسب مدل، نمودار

<sup>1</sup> Normal Probability Plot

<sup>2</sup> Residuals versus Fits

<sup>3</sup> Residuals versus Order

<sup>4</sup> Histogram of Residuals

قرار داده است. نرمال بودن باقیمانده‌ها یکی از فرضیات اساسی در رگرسیون خطی بوده و نشان داده است که مدل به درستی داده‌های تجربی را توصیف کرده و نتایج آن از نظر آماری معتبر هستند.

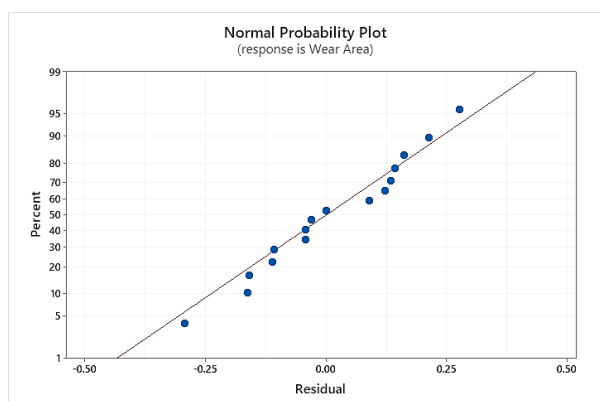


Fig. 8 Normal probability plot for the fitted regression model

شکل 8 نمودار احتمال نرمال برای مدل رگرسیون برازش شده

شکل 9 تأثیر افزودنی قلع بر رفتار سایش ابزار را نسبت به شماره آزمایش نشان می‌دهد. این نمودار به‌وضوح بیانگر آن است که تغییر در ترکیب کامپوزیت‌ها، به‌ویژه افزودن عنصر قلع، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر میزان سایش ابزار در فرایند ماشینکاری داشته باشد. تحلیل روندهای مشاهده‌شده در نمودار نشان می‌دهد که افزودنی قلع موجب کاهش چشمگیر سایش ابزار شده است، به‌گونه‌ای که نمونه‌های حاوی قلع در اکثر شرایط، مساحت سایش کمتری نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی نشان داده‌اند.

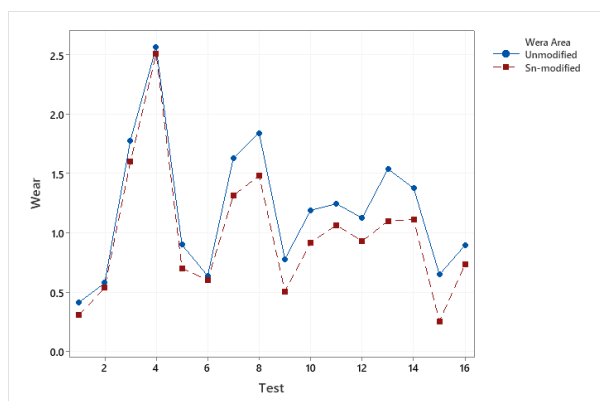


Fig. 9 Effect of tin (Sn) presence in the composite structure on the tool wear area

شکل 9 اثر حضور عنصر قلع (Sn) در ساختار کامپوزیت بر مساحت سایش ابزار

کاهش چشمگیر سایش ابزار در حضور عنصر قلع را می‌توان به چند عامل کلیدی نسبت داد. نخست آن‌که قلع با دمای ذوب پایین، رفتاری مشابه یک فاز روان‌ساز در ناحیه تماس ابزار و قطعه‌کار از خود نشان می‌دهد [34]. این ویژگی باعث کاهش اصطکاک بین ابزار و سطح براده‌برداری شده و در نتیجه، از شدت سایش چسبیده و ساینده در سطح ابزار می‌کاهد.

دوم، افزودن قلع در ساختار کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si منجر به تشکیل فازهای بین‌فلزی مانند Mg<sub>2</sub>Sn می‌شود که به‌عنوان هسته‌زای ناهمگن عمل کرده و

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترهای ماشینکاری استخراج‌شده، منجر به بهبود قابل‌توجهی در کنترل سایش ابزار در فرایند ماشینکاری کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si گردید. نتایج حاصل نشان داد که میانگین مساحت سایش به مقدار 0.203063 میلی‌متر مربع کاهش یافته است که این مقدار بیانگر نرخ سایش قابل‌قبول و مطلوبی در فرایند ماشینکاری این کامپوزیت است. علاوه بر این، درصد خطای پایین بین نتایج حاصل از روش‌های آماری و داده‌های تجربی، اعتبار بالای نتایج به‌دست‌آمده را تأیید کرده و نشان‌دهنده دقت بالای مدل تاگوچی در پیش‌بینی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر سایش ابزار بوده است.

نکته‌ی قابل‌توجه دیگر در این بررسی، تفاوت اندک میان میانگین مساحت سایش در شرایط ماشینکاری با عمق برش 1 میلی‌متر و نرخ پیشروی 0.12 میلی‌متر بر دور، در مقایسه با حالت‌های بهینه‌ی انتخاب‌شده (یعنی عمق برش 0.5 میلی‌متر و نرخ پیشروی 0.08 میلی‌متر بر دور) بوده است. این تفاوت کم نشان می‌دهد که در شرایطی که اولویت اصلی کاهش نرخ سایش ابزار نباشد، می‌توان با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی، راندمان زمانی فرایند ماشینکاری را بهبود بخشید، بدون اینکه تأثیر منفی قابل‌توجهی بر سایش ابزار ایجاد شود. بنابراین، در شرایطی که نیاز به افزایش بهره‌وری فرایند و کاهش زمان ماشینکاری مطرح باشد، می‌توان از این مقادیر جایگزین به‌عنوان یک گزینه‌ی عملی و مقرون‌به‌صرفه استفاده کرد.

مدل رگرسیونی مساحت سایش در سطح براده ابزار برای کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si توسعه داده شده و مورد برازش قرار گرفته است. این مدل با هدف پیش‌بینی دقیق‌تر میزان سایش ابزار، با در نظر گرفتن متغیرهای کلیدی تأثیرگذار شامل سرعت پیشروی، عمق برش، سرعت دورانی و استراتژی روانکاری ارائه شده است. از آنجایی که هر یک از این متغیرها اثرات متفاوتی بر میزان سایش ابزار دارند، مدل رگرسیونی توسعه‌یافته توانسته است میزان وابستگی و تأثیر هر پارامتر را کمی‌سازی کرده و یک رابطه ریاضی معتبر میان متغیرهای ماشینکاری و سایش ابزار ارائه دهد.

معادله (1) بیانگر مدل رگرسیونی نهایی برای اندازه‌گیری مساحت سایش در فرایند تراشکاری کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si است. در این مدل، ضرایب تعیین‌شده نشان داده‌اند که کدام یک از پارامترهای ماشینکاری تأثیر بیشتری بر سایش ابزار داشته‌اند و چگونه تغییر هر متغیر می‌تواند بر میزان سایش تأثیر بگذارد. این مدل می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کاربردی برای بهینه‌سازی شرایط ماشینکاری مورد استفاده قرار گیرد و در نهایت، باعث افزایش دقت در فرایند پیش‌بینی سایش، کاهش هزینه‌های تعویض ابزار و بهبود بهره‌وری فرایندهای تولید گردد.

$$\text{Wear Area} = -0.255 - 0.000358(\text{Spindle Speed}) + 3.708(\text{Feed Rate}) + 0.6848(\text{Depth of Cut})$$

ماشینکاری  
مرطوب

$$\text{Wear Area} = 0.142 - 0.000358(\text{Spindle Speed}) + 3.708(\text{Feed Rate}) + 0.6848(\text{Depth of Cut})$$

ماشینکاری  
خشک

(1)

شکل 8 نمودار احتمال عادی<sup>1</sup> را برای مدل رگرسیونی برازش‌شده نمایش داده است. این نمودار یکی از ابزارهای مهم در ارزیابی کیفیت برازش مدل محسوب شده و به‌طور خاص، نرمال بودن باقیمانده‌های مدل را مورد بررسی

<sup>1</sup> Normal Probability Plot

شدیدی رخ می‌دهد. اما وجود قلع با تشکیل لایه‌ای روانکار بین ابزار و قطعه‌کار، اصطکاک را کاهش داده و مانع از چسبندگی براده به سطح ابزار شده است. در سرعت بالا این لایه بهتر فعال می‌شود و نقش محافظتی بیشتری داشته [15]. در پیشروی 0.2 نیز شرایط در حدی است که جریان براده هنوز قابل کنترل است و قلع توانسته تا حدودی از تشکیل لایه انباشته جلوگیری کند. همچنین در عمق برش 2 میلی‌متر که تماس ابزار با ذرات سخت  $Mg_2Si$  بیشتر است، اثر قلع در کاهش سایش ابزار به‌وضوح دیده شده است. در نهایت، استفاده از روانکاری مرطوب به پایداری این لایه کمک کرده و دفع حرارت را تسهیل کرده است. بنابراین مشخص شد که در شرایطی با بار مکانیکی و حرارتی بالا، اثرگذاری قلع بیشتر بوده و بیشترین کاهش سایش ابزار به دست آمده است.

### 5- نتیجه‌گیری

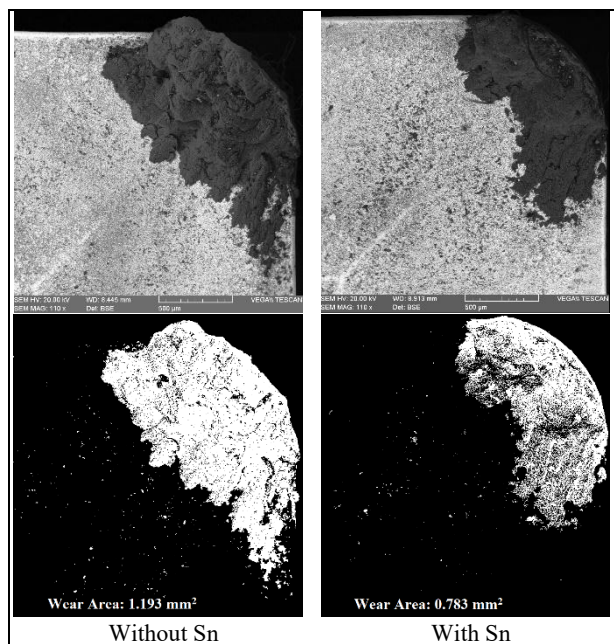
در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ماشینکاری و افزودنی قلع (Sn) بر سایش ابزار در فرایند تراشکاری کامپوزیت‌های  $Al-Mg_2Si$  مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های آماری، جمع‌بندی‌های زیر ارائه می‌شود:

- سایش چسبنده به‌عنوان مکانیزم غالب در فرایند ماشینکاری هر دو نوع کامپوزیت شناسایی شد. این سایش به‌صورت تشکیل لایه و لبه چسبیده در سطح ابزار مشاهده شد که ناشی از تماس شدید و نوسانات حرارتی-مکانیکی در ناحیه برش بود.
- افزودنی قلع (Sn) به‌طور چشمگیری موجب کاهش مساحت سایش ابزار شد. این بهبود عملکرد را می‌توان به نقش روان‌ساز قلع، تشکیل فازهای بین‌فلزی مانند  $Mg_2Sn$  و کاهش چسبندگی براده به سطح ابزار نسبت داد.
- افزودنی قلع (Sn) به‌طور چشمگیری موجب کاهش 16.31 درصدی مساحت سایش ابزار شد. این بهبود عملکرد را می‌توان به نقش روان‌ساز قلع، تشکیل فازهای بین‌فلزی مانند  $Mg_2Sn$ ، کاهش چسبندگی براده به سطح ابزار و بهبود ریزساختار نسبت داد. به‌طور کلی، افزودن قلع باعث کاهش اصطکاک و فشار در ناحیه تماس ابزار و قطعه‌کار می‌شود که در نتیجه عمر ابزار را افزایش می‌دهد و عملکرد کلی فرایند ماشینکاری را بهبود می‌بخشد.
- تحلیل آماری نشان داد که عمق برش مؤثرترین پارامتر بر میزان سایش ابزار است، به‌طوری‌که افزایش آن منجر به رشد قابل توجه سایش شد. پس از آن، نرخ پیشروی، روانکاری و سرعت دورانی به‌ترتیب بیشترین تأثیر را داشتند.
- استفاده از روانکاری مرطوب با سیال پایه گیاهی موجب کاهش قابل ملاحظه‌ای در نرخ سایش ابزار شد، که دلیل آن کاهش اصطکاک، دمای موضعی و بهبود تخلیه براده از ناحیه برش بود.
- مدل آماری تاگوچی و رگرسیون چندمتغیره به‌خوبی توانستند تأثیر پارامترهای مختلف ماشینکاری بر سایش ابزار را پیش‌بینی کنند. مقدار  $R^2$  برابر با 96.03% اعتبار بالای مدل را تأیید کرد.
- شرایط بهینه ماشینکاری برای کمینه‌سازی سایش ابزار شامل: عمق برش 0.5 میلی‌متر، نرخ پیشروی 0.08 mm/rev، سرعت دورانی 710 rpm و روانکاری مرطوب شناسایی شد. نتایج تجربی حاصل از آزمون تأییدی، خطای بسیار اندکی نسبت به مقادیر پیش‌بینی‌شده داشت.

باعث ریزتر شدن ذرات اولیه  $Mg_2Si$  و بهبود توزیع آن‌ها در زمینه آلومینیومی می‌گردد [13]. این اصلاح ریزساختاری موجب کاهش تمرکز تنش در ناحیه تماس ابزار و ماده شده و از ایجاد خراش‌های موضعی و شکست لبه‌های ابزار جلوگیری می‌کند.

سوم، حضور قلع موجب کاهش چسبندگی براده به سطح ابزار شده و تشکیل لایه‌های چسبیده را محدود می‌سازد، که خود یکی از دلایل اصلی سایش شدید ابزار در کامپوزیت‌های سخت به شمار می‌رود. در مجموع، نقش نرم‌کننده، اصلاح‌کننده ساختار و روان‌ساز قلع در کنار کاهش برهم‌کنش مکانیکی-حرارتی در منطقه برش، به‌صورت هم‌افزا موجب کاهش قابل توجه مساحت ناحیه سایش ابزار در این پژوهش شده است.

شکل 10 اثر افزودن قلع را بر مساحت سایش ابزار در تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح براده ابزار نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن قلع به ساختار کامپوزیت باعث کاهش قابل توجه سایش در سطح براده ابزار شد. این کاهش سایش را می‌توان به دلیل تشکیل لایه‌ای روانکار و کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار نسبت داد. همچنین، حضور قلع باعث بهبود توزیع ذرات سخت در زمینه آلومینیوم شده و از ایجاد خراش‌های موضعی و افزایش سایش جلوگیری کرده است.



**Fig. 10** Effect of tin addition on tool wear area in scanning electron microscope images of the tool rake face under identical cutting conditions: spindle speed of 710 rpm, feed rate of 0.12 mm/rev, depth of cut of 2 mm, and wet lubrication.

شکل 10 اثر افزودن قلع بر مساحت سایش ابزار در تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح براده ابزار تحت شرایط برشی یکسان شامل سرعت دورانی 710 دور در دقیقه، نرخ پیشروی 0.12 میلی‌متر بر دور، عمق برش 2 میلی‌متر و روانکاری مرطوب.

شکل 11 تأثیر افزودن عنصر قلع در پارامترهای ماشینکاری مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، بیشترین اثر قلع در شرایط سرعت دورانی 1000 دور در دقیقه، پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور، عمق برش 2 میلی‌متر و روانکاری مرطوب ظاهر شده است. علت این موضوع آن است که در چنین شرایطی فشار و حرارت زیادی به ابزار وارد می‌شود و معمولاً سایش

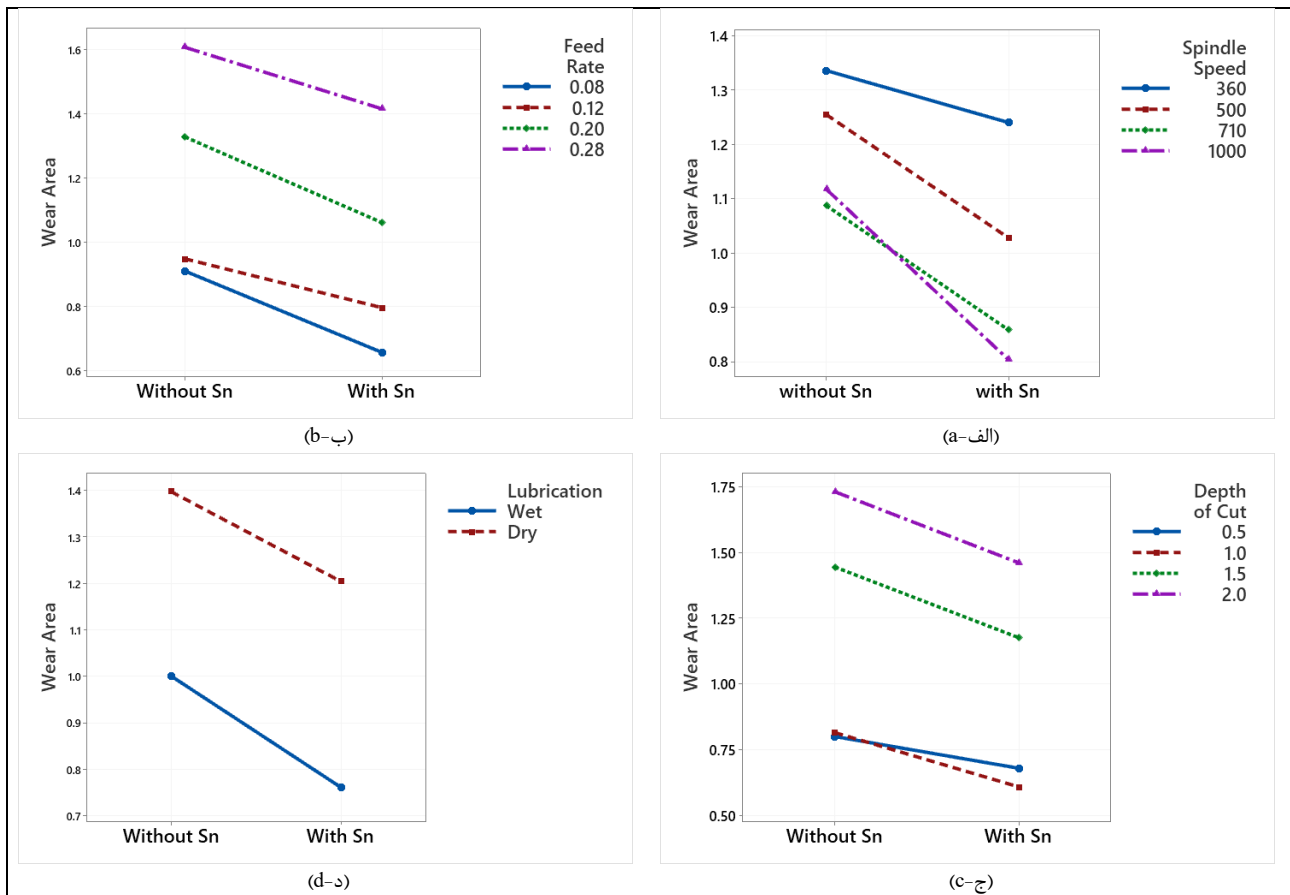


Fig. 11 Effect of tin addition in machining parameters: (a) spindle speed, (b) feed rate, (c) depth of cut, and (d) lubrication strategy

شكل 11 تأثير افزودن عنصر قلع در پارامترهاى ماشينكارى: (الف) سرعت دورانى، (ب) سرعت پيشروى، (ج) عمق برش و (د) استراتژى روانكارى

#### 6- مراجع

- [1] Verma, V., Khvan, A., "A Short Review on Al MMC with Reinforcement Addition Effect on Their Mechanical and Wear Behaviour," IntechOpen, 2019.
- [2] Chithra, N., Karuppasamy, R., Manickaraj, K., Ramakrishnan, T., "Effect of Reinforcement Addition on Mechanical Behavior of Al MMC-A Critical Review," Journal of Environmental Nanotechnology, Vol. 13, No. 2, pp. 65-79, 2024.
- [3] Khalid, M. Y., Umer, R., Khan, K. A., "Review of Recent Trends and Developments in Aluminium 7075 Alloy and Its Metal Matrix Composites (MMCs) for Aircraft Applications," Results in Engineering, Vol. 20, p. 101372, 2023.
- [4] Ram, S. C., Chattopadhyay, K., Bhushan, A., "A Literature Review on Al-Si Alloy Matrix Based In Situ Al-Mg<sub>2</sub>Si FG-Composites: Synthesis, Microstructure Features, and Mechanical Characteristics," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 237, No. 4, pp. 919-940, 2023.
- [5] Alizadeh, A., Heydari Beni, M., Zahmatkesh, M., Eskandari Jam, J., "Manufacturing and Investigation of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composite Materials Reinforced with Short Carbon Fibers Using Powder Metallurgy Method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2334-2347, 2024.
- [6] Moharami, A., Razaghian, A., Babaei, B., Ojo, O., Šlapáková, M., "Role of Mg<sub>2</sub>Si Particles on Mechanical, Wear, and Corrosion Behaviors of Friction Stir Welding of AA6061-T6 and Al-Mg<sub>2</sub>Si Composite," Journal of Composite Materials, Vol. 54, No. 26, pp. 4035-4057, 2020.

• با در نظر گرفتن عملکرد مکانیکی، سایش ابزار، و راندمان زمانی فرایند، می‌توان عمق برش 1 میلی‌متر و نرخ پیشروی 0.12 mm/rev را به‌عنوان جایگزینی عملی و مؤثر برای شرایط بهینه معرفی کرد، به‌ویژه در مواردی که کاهش زمان تولید اولویت دارد.

#### 5- فهرست علائم

Al	آلومینیوم
Mg <sub>2</sub> Si	سیلیسید منیزیم
Mg	منیزیم
Sn	قلع
SiC	کاربید سیلیسیم
Fe	آهن
Si	سیلیسیم
Cu	مس
Zn	روی
Spindle Speed	علائم معادله
(rpm)	سرعت دورانی
Feed Rate	نرخ پیشروی (mm/rev)
Depth of Cut	عمق برش (mm)
Wera Area	مساحت سایش (mm <sup>2</sup> )

- [22] Sundaramoorthy, R., Ravindran, R., "Tool Wear Optimization in CNC Milling Operation of Al-Mg<sub>2</sub>Si Alloys by Taguchi Method," SN Applied Sciences, Vol. 1, No. 9, p. 1093, 2019.
- [23] Abdu, H. M., Tahaa, S. M., Wazeer, A., Abd El-Mageed, A., Mahmoud, M. M., "Application of Taguchi Method and Response Surface Methodology on Machining Parameters of Al MMCs 6063-TiO<sub>2</sub>," Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Vol. 17, No. 4, 2023.
- [24] Prakash, K. S., Gopal, P., Karthik, S., "Multi-Objective Optimization Using Taguchi Based Grey Relational Analysis in Turning of Rock Dust Reinforced Aluminum MMC," Measurement, Vol. 157, p. 107664, 2020.
- [25] Narenthiran, B., Paranthaman, P., "Investigations on Effect of FSW Process Parameter on Hybrid Al MMC Using Taguchi Approach," Materials Today: Proceedings, Vol. 37, pp. 759-763, 2021.
- [26] Ghandvar, H., et al., "Role of B<sub>4</sub>C Addition on Microstructure, Mechanical, and Wear Characteristics of Al-20% Mg<sub>2</sub>Si Hybrid Metal Matrix Composite," Applied Sciences, Vol. 11, No. 7, p. 3047, 2021.
- [27] Fard, R. K., Afza, R. A., Teimouri, R., "Experimental Investigation, Intelligent Modeling and Multi-Characteristics Optimization of Dry WEDM Process of Al-SiC Metal Matrix Composite," Journal of Manufacturing Processes, Vol. 15, No. 4, pp. 483-494, 2013.
- [28] Chen, Z., et al., "The Study on the Effect of Various Tool Wear Indicators on the Machining of MMCs," Journal of Materials Research and Technology, Vol. 30, pp. 231-244, 2024.
- [29] Kelly, J., Cotterell, M., "Minimal Lubrication Machining of Aluminium Alloys," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 120, No. 1-3, pp. 327-334, 2002.
- [30] Davoodi, B., Tazehkandi, A. H., "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, Vol. 68, pp. 234-242, 2014.
- [31] Duan, C., Sun, W., Che, M., Yin, W., "Effects of Cooling and Lubrication Conditions on Tool Wear in Turning of Al/SiCp Composite," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 103, pp. 1467-1479, 2019.
- [32] Singh, H., Bhowmick, H., "Lubricated Tribology of Lightweight MMCs: Recent and Future Perspectives of AMMCs," Metal Matrix Composites, pp. 233-274, 2022.
- [33] Sankhla, A. M., Patel, K. M., Makhesana, M. A., Saxena, K. K., Gupta, N., "Experimental Investigation of Tool Wear in Machining of SiC Based Al-MMC," Advances in Materials and Processing Technologies, Vol. 8, No. Sup2, pp. 635-654, 2022.
- [34] Gxowa-Penxa, Z., Daswa, P., Modiba, R., Mathabathe, M., Bolokang, A., "Development and Characterization of Al-Al<sub>3</sub>Ni-Sn Metal Matrix Composite," Materials Chemistry and Physics, Vol. 259, p. 124027, 2021.
- [7] Szalóki, I., Sipos, S., Viharos, Z. J., "Aluminum-Based MMC Machining with Carbide Cutting Tool," Key Engineering Materials, Vol. 686, pp. 149-154, 2016.
- [8] Ghoreishi, R., Roohi, A. H., Ghadikolaei, A. D., "Analysis of the Influence of Cutting Parameters on Surface Roughness and Cutting Forces in High Speed Face Milling of Al/SiC MMC," Materials Research Express, Vol. 5, No. 8, p. 086521, 2018.
- [9] Laghari, R. A., Jamil, M., Laghari, A. A., Khan, A. M., Akhtar, S. S., Mekid, S., "A Critical Review on Tool Wear Mechanism and Surface Integrity Aspects of SiCp/Al MMCs During Turning: Prospects and Challenges," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 126, No. 7, pp. 2825-2862, 2023.
- [10] Sougavabar, M. A., Niknam, S. A., 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, Vol. 24, pp. 571-585, 2023.
- [11] Alipour Sougavabar, M., Niknam, S. A., Davoodi, B., "Study of Tool Flank Wear and Surface Quality in Milling of Al520-MMCs Reinforced with SiC and Sn Particles," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1970-1975, 2022.
- [12] Karimi Beram, I., Niknam, S. A., Davoodi, B., "Investigating the Effect of Sr Element on the Wear Area on the Cutting Tool Rake Surface During Turning Al-Mg<sub>2</sub>Si with Different Percentages of Mg<sub>2</sub>Si," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 26-37, 2024.
- [13] Emamy, M., Pourbahari, B., Malekan, M., Emami, K., "Effects of Mg<sub>2</sub>Sn Intermetallic on the Microstructure and Tensile Properties of Al-15% Mg<sub>2</sub>Si-X% Sn Composite," Journal of Materials Research, Vol. 31, pp. 3891-3899, 2016.
- [14] Seo, N., et al., "Microstructural Evolution and Aging Behavior of Multicomponent Al-Sn-Zn-Mg-Li Alloy," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 1011, p. 178381, 2025.
- [15] Bak, J. H., Cho, D. H., Shin, S., Park, J. Y., Park, I. M., "Wear Properties of Hybrid ABO+ BN+ CNT/Al-Sn Alloy Matrix Composites for Engine Bearing Materials," Metals and Materials International, Vol. 24, No. 1, pp. 205-215, 2018.
- [16] He, C., Luo, B., Zheng, Y., Yin, Y., Bai, Z., Ren, Z., "Effect of Sn on Microstructure and Corrosion Behaviors of Al-Mg-Si Alloys," Materials Characterization, Vol. 156, p. 109836, 2019.
- [17] Hasanifard, M., Azarafza, R., Alaei, M. H., Najafi, M., "Experimental Investigation of the Effects of Machining Parameters on Surface Quality in Turning Aluminum Matrix Composites Reinforced with Mg<sub>2</sub>Si Particles," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 11, No. 9, pp. 13-25, 2024.
- [18] Gobalakrishnan, B., Rajaravi, C., Udhayakumar, G., Lakshminarayanan, P., "A Comparative Study on Ex-Situ and In-Situ Formed Metal Matrix Composites," Archives of Metallurgy and Materials, pp. 171-185, 2023.
- [19] Zamani, R., Mirzadeh, H., Emamy, M., "Mechanical Properties of a Hot Deformed Al-Mg<sub>2</sub>Si In-Situ Composite," Materials Science and Engineering: A, Vol. 726, pp. 10-17, 2018.
- [20] Alizadeh, A., Heydari Beni, M., Rezaei, A., Eskandari Jam, J., "Fabrication and Mechanical Properties of AA5083/TiB<sub>2</sub> In Situ Composite by Stir Casting Process," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 3, pp. 2525-2535, 2024.
- [21] Hasanifard, M., Niknam, S. A., "Study of Surface Wear in Coated Carbide Tools During Turning of MO40 Steel," In Persian, Proceedings of the 17th National Conference and the 6th International Conference on Construction and Production Engineering, 2021.