



## بررسی تاثیر عنصر استرانسیوم بر روی مساحت سایش یافته در سطح براده ابزار برشی حین فرایند تراشکاری کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si با درصدهای مختلف Mg<sub>2</sub>Si

ایلناز کریمی برام<sup>۱</sup>، سیدعلی نیک‌نام<sup>۲\*</sup>، بهنام داودی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: saniknam@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۳ آذر ۱۴۰۲

پذیرش: ۹ مرداد ۱۴۰۳

### کلیدواژگان:

Al-Mg<sub>2</sub>Si

سایش ابزار

ماشین کاری

کامپوزیت‌های پایه فلزی

### چکیده

امروزه ابزارهای برشی جدیدی با تکنولوژی پیشرفته برای افزایش بهره‌وری و بهبود قطعه‌های تولیدی ساخته شده‌اند. از سوی دیگر هر روزه مواد مهندسی و غیرمهندسی جدید با فناوری‌ها و کاربردهای منحصر به فرد وارد بازار می‌شوند که نیازمند روش‌های ماشین کاری نوین و ابزارهای برشی مخصوص هستند. همچنین نیاز فراوان به کاهش مصرف انرژی، ساخت اتومبیل‌هایی با بازده مناسب را گسترش داده است. کامپوزیت‌های پایه فلزی یکی از مواد مدرن و در حال توسعه هستند که در صنایع مختلف محبوبیت زیادی به دست آورده‌اند. از جمله این مواد می‌توان به Al-Mg<sub>2</sub>Si اشاره کرد که ویژگی‌های منحصر به فرد ترکیب Mg<sub>2</sub>Si تقویت شده با آلومینیوم (Al) همچون چگالی پایین، قابلیت ریخته‌گری خوب و مقاومت به سایش بالا است. پژوهش‌های کاربردی در مورد ارزیابی توانایی ماشین کاری این دسته از مواد از جمله Al-Mg<sub>2</sub>Si نیازمند تحقیقات بیشتر است. لذا در این پژوهش، راه کارهای مناسب در جهت کاهش مساحت سایش سطح تراشه ابزار برشی در حین ماشین کاری کامپوزیت فلزی Al-Mg<sub>2</sub>Si با درصدهای وزنی متفاوتی از ترکیب شیمیایی Mg<sub>2</sub>Si مطالعه شده است. از این رو و بعد از ساخت چندین نمونه استوانه‌ای با فرایند ریخته‌گری القایی با درصدهای وزنی متفاوتی از ترکیب Mg<sub>2</sub>Si و مقدار ثابتی عنصر استرانسیوم، فرایند تراشکاری تحت شرایط برشی مشخص شده‌ای انجام یافت؛ سپس سطح براده ابزار با میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری و تحلیل شد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، عنصر استرانسیوم باعث ریزساختار شدن کامپوزیت و در نتیجه کاهش سایش سطح براده ابزار گردید. با افزایش درصد ترکیب Mg<sub>2</sub>Si در حضور استرانسیوم که خود باعث بهسازی خواص مکانیکی از جمله استحکام و شکل‌پذیری کامپوزیت می‌گردد نیز کاهش ۵۴٪ سایش سطح براده ابزار حین افزایش سرعت برشی مشاهده شد.

## 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

Ilnaz Karimi Beram<sup>1</sup>, Seyed Ali Niknam<sup>2\*</sup>, Behnam Davoodi<sup>3</sup>

1- MSc Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: saniknam@iust.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 14 December 2023

Accepted: 30 July 2024

### Keywords:

Al-Mg<sub>2</sub>Si

Tool Wear

Machining

Metal Matrix Composites

### Abstract

Nowadays, to increase productivity and improve the technical and geometrical aspects of products, new cutting tools with advanced technology have been developed. On the other hand, each day new engineering and non-engineering materials with unique features and applications turn into the market, which require unique machining methods and cutting tools. Metal matrix composites (MMCs) are one of the modern and developing materials that have gained great popularity in various industries. However, applied research works about the evaluation of their machinability still require additional studies. Amongst, Al-Mg<sub>2</sub>Si is one of these materials. Therefore, the solution for decreasing the area of wear on the flank size of the cutting tool in the machining of Al-Mg<sub>2</sub>Si with different percentages of Mg<sub>2</sub>Si was proposed. Therefore, at the first step, the cylindrical samples were fabricated by induction casting, each containing a uniform percentage of strontium (Sr) element. Thereafter, a scanning electron microscope (SEM) for image processing and analysis of the cutting tool surface. Finally, it was observed that the Sr element significantly reduced the area of wear land of the tool rake face. In addition, lower wear area was observed at a higher percentage of Mg<sub>2</sub>Si and cutting speed.

### Please cite this article using:

Karimi Beram I, Niknam SA, 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. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jun 21;11(4):26-37. doi: 10.22034/IJME.2024.418231.1842 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

پیشرفت‌های گسترده‌ای که در تمام زمینه‌های صنعتی به‌وجود آمده است، باعث دستیابی به مواد با کیفیت بالاتر شده است که در ساخت قطعه‌های ماشین آلات و تجهیزات صنعتی به کار می‌روند. انتخاب مواد مناسب برای یک کاربرد مشخص یکی از دغدغه‌های مهندسان شاغل در واحدهای صنعتی، به‌ویژه بخش طراحی و ساخت است. در طراحی و ساخت قطعه‌ها برای انتخاب جنس آن‌ها باید به مسائل مهمی از قبیل روش ساخت، دقت ابعادی، حفظ و نگهداری شکل صحیح اولیه در حین کاربرد، داشتن خواص مورد نظر و حفظ آن خواص برای مدت معین تحت شرایط محیط کار، امکان تعمیر و نگهداری آسان در هنگام کاربرد، سازگاری ماده با دیگر مواد اجزاء سیستم، بازیابی آسان ماده، مسائل مربوط به زیست محیطی ماده در ارتباط با ساخت و تولید، هزینه تولید و بالاخره در مواردی وزن و نوع سطح ظاهری آن توجه شود. به طور کلی مواد جامد مهندسی مورد نیاز برای طراحی و ساخت و تولید را می‌توان به سه گروه اصلی با خواص مربوط به خود تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از مواد فلزی، مواد غیر فلزی معدنی یا سرامیکی و مواد پلیمری یا مصنوعی. علاوه بر این سه گروه، گروه دیگری از مواد وجود دارد که از این سه گروه منشعب می‌شود که به نام کامپوزیت یا مختلط معروف است. کامپوزیت  $Al-Mg_2Si$  به دلیل خواص مطلوب و دمای ذوب نسبتاً پایینی که دارد، می‌تواند به راحتی با روش‌های ساخت حالت جامد مانند متالورژی پودر و یا ریخته‌گری تولید شود و دسته‌ای از مواد جدید فوق سبک با خواص ویژه را تولید نماید. ویژگی‌هایی از جمله چگالی پایین، قابلیت ریخته‌گری عالی و مقاومت سایشی خوب، موجب شده است که این دسته از کامپوزیت‌ها به عنوان جایگزین خوبی برای آهن و فولاد در صنایع مختلف از جمله اتومبیل‌سازی انتخاب گردند و به بهبود مصرف سوخت و کاهش وزن مواد مورد استفاده در این صنایع و کاهش هزینه‌ها کمک نمایند. افزودن عنصر استرانسیوم به این کامپوزیت نیز باعث ریز ساختاری و همچنین بهبود خواص مکانیکی از جمله استحکام و شکل‌پذیری می‌شود. سایش ابزار به عنوان یک ویژگی تریبولوژیکی و شاخصه مهمی در توانایی ماشین‌کاری در نظر گرفته می‌شود که طی فرایند ماشین‌کاری گسترش یافته و بر کیفیت سطح، عمر ابزار، دقت ابعادی و بازده اقتصادی فرایند ماشین‌کاری تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، جهت استفاده بهینه از ابزارهای برشی، روش‌های مختلف برای بررسی سایش ابزار یک نگرانی قابل توجه در صنایع ماشین‌کاری است. اوککپوچی [۱] از ترکیب پارامترهای فرایند برشی، مدلی آماری جهت پیش‌بینی سایش ابزار برشی با دقت ۹۹/۷ درصد توسعه داد. متغیر مهم‌تر در انحراف هندسی سطوح ماشین‌کاری شده، سطح، اندازه، شکل و جهت ابزار برشی است [۲]. همچنین، سرعت برشی نوسان کم‌تری در نتیجه چسبندگی (تمایل چسبیدن بخشی از قطعه کار به سطح ابزار که می‌تواند منجر به لبه انباشته شود) دارد، زیرا تأثیر بسیار کم‌تری بر تغییرات نیروهای برش از خود برجای می‌گذارد [۳]. بر اساس تجزیه و تحلیل بیجار و همکاران [۴]، در فرایند تراشکاری خشک آلیاژ  $Al-Zn$ ، فاکتورهای ماشین‌کاری از جمله عمق برشی، نرخ پیشروی و سرعت برشی تأثیر می‌گذارند. مضافاً مشاهده گردید که افزایش نرخ پیشروی و عمق برشی موجب افزایش لبه انباشته می‌شود و بیشترین تأثیر را دارند. نرخ پیشروی پارامتر مهمی در بافت سطح می‌باشد که با عمق برشی مرتبط است. اوککپوچی و همکاران [۵] دریافتند که سایش ابزار با سرعت پیشروی کاهش می‌یابد؛ در حالی که با پیشروی و همچنین عمق برش بالاتر افزایش می‌یابد. بوشان و همکاران [۶] مشاهده کردند در ماشین‌کاری آلیاژ آلومینیوم با ۱۰٪ وزنی ذرات  $SiC$  در ماتریس فلزی، سایش ابزار PCD ساده کمتر از ابزار PCD کاربیدی است. سرعت برشی مهم‌ترین پارامتر سطح در حین ماشین‌کاری آلیاژها و کامپوزیت‌های پایه فلزی MMC<sup>۱</sup> است. ساندارامورثی [۷] در پژوهش خود از تکنیک تاگوچی برای تعیین سایش بهینه ابزار در فرزکاری آلیاژهای سیلیسید منیزیم با آلومینیوم استفاده کرد و نرخ پیشروی و عمق برشی به عنوان پارامترهای ماشین‌کاری با سایش ابزار به عنوان متغیر انتخاب شدند. نتیجه تجزیه و تحلیل انجام شده مبین این موضوع بود که پارامترهای انتخابی ماشین‌کاری به شدت بر فرسودگی ابزار تأثیر می‌گذارد؛ در حالی که در ماشین‌کاری آلیاژهای سیلیسید منیزیم با آلومینیوم، سرعت اسپیندل و به عبارتی سرعت برشی تأثیرگذارترین پارامتر در مقایسه با نرخ پیشروی و عمق برشی می‌باشد. در نهایت، نتیجه‌ها با آزمایش‌های اعتبارسنجی تایید شدند.

از آزمایش‌های ساندارامورثی نتیجه شد که تکنیک تاگوچی برای بهینه‌سازی سایش ابزار فرزکاری در حین ماشین‌کاری آلیاژهای  $Al-Mg_2Si$  مناسب است. سطوح پارامترهای ماشین‌کاری برای حداقل سایش ابزار فرزکاری در حین ماشین‌کاری آلیاژهای  $Al-Mg_2Si$  مشخص شد و سایش ابزار تا ۲۶٪ کاهش یافت. ست و همکاران [۸] خواص مکانیکی آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم حاوی فاز  $Mg_2Si$  را

<sup>1</sup> Metal Matrix Composites

مورد بحث قرار دادند. این امر بر اهمیت میانگین اندازه دانه، مورفولوژی و الگوی توزیع فاز  $Mg_2Si$  در تعیین رفتار مکانیکی این آلیاژها تاکید می‌کند. کین و همکاران [۹] در پژوهش خود اتصال‌های آلیاژی  $Al-Mg_2Si-Si$  تولید شده از طریق جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی (RSW) را با و بدون استفاده از لایه‌های میانی  $Al-Si$  بررسی کردند. همچنین پژوهش آن‌ها بر روی ریزساختارها و خواص مکانیکی اتصال‌های جوش داده شده تمرکز داشت. برزنی و همکاران [۱۰] ویژگی‌های ماشین‌کاری، خواص حرارتی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های  $Al-Mg_2Si$  را با افزودن بیسموت بررسی کردند. در این پژوهش آن‌ها تکنیک‌های بهینه‌سازی اعمال شده برای تراشکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیوم را نیز مورد بحث و بررسی قرار دادند. سورن و همکاران [۱۱] پژوهش مختصری بر رفتار ماشین‌کاری آلیاژهای آلومینیوم انجام دادند. آن‌ها همچنین استحکام مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم و مناسب بودن آن‌ها برای ماشین‌کاری سخت را نیز مورد بحث و بررسی قرار دادند.

در مطالعه‌ای که توسط نیک نام و همکاران و همکاران [۱۲] صورت گرفت،  $Al520-MMC$  با عناصر تقویت‌کننده مختلفی مانند ذرات کاربید سیلیکون ( $SiC$ )، بیسموت ( $Bi$ ) و قلع ( $Sn$ ) ساخته شدند. علاوه بر ساخت  $MMC$ های جدید، توصیف تجربی مورفولوژی سایش ابزار هنگام عملیات فرزکاری  $Al520-MMC$  با عناصر تقویت‌کننده مختلف انجام شد. علی‌رغم عناصر تقویت‌کننده مورد استفاده، سایش سطح جانب ابزار بیشتر تحت ماشین‌کاری خشک مشاهده شد. به‌علاوه با علم به این‌که  $Al520-MMC$  یک فلز نرم است، لبه انباشته در تمام حالت‌های روانکاری و سرعت‌های برش مشاهده شد. همچنین سایش در تمام شرایط برش مورد استفاده یافت گردید. بنابر این، محققان نتیجه گرفتند که عناصر تقویت‌کننده و سرعت برش بیشترین تأثیر را داشته و حالت روانکاری کمترین تأثیر را بر اندازه سایش داشته است. در مقایسه با مقادیر ثبت شده سایش کنار ابزار در ماشین‌کاری  $Al520 + 10\% SiC$ ، زمانی که  $Sn$  و  $Bi$  در ساختار ماتریس استفاده شد، سایش سطح جانب ابزار حدود  $50\%$  کاهش یافت. به‌عبارت دیگر، استفاده از ذرات بیسموت ( $Bi$ ) و قلع ( $Sn$ ) ممکن است به عمر ابزار بهتر منجر شود.

کورکماز و همکاران [۱۳] به بررسی روش‌های یادگیری ماشین و پردازش تصویر در تخمین مقادیر سایش ابزار هنگام تراشکاری آلیاژ آلومینیوم AA7075 پرداختند. در پژوهش آن‌ها تجزیه و تحلیل ابزارهای برش در پارامترهای مختلف با تجزیه و تحلیل SEM و EDS مورد بررسی قرار گرفت.  $44/4\%$  درصد افزایش در سایش ابزار زمانی که سرعت برش  $100$  درصد افزایش یافت، مشاهده شد درحالی‌که نرخ پیشروی در همان سطح حفظ گردید. در پژوهش سیلوا و همکاران [۱۴] پوشش مبتنی بر  $TiAlN$  بر روی ابزارهای برش با ایتريوم به‌عنوان عنصر دوپینگ برای بهبود عملکرد فرایند استفاده شده است. بر این اساس، محققان یکپارچگی سطح ماشین‌کاری شده و مقاومت در برابر سایش ابزارهای برش پوشش داده شده با استفاده از رسوب بخار فیزیکی  $HiPIMS$  (PVD) با  $TiAlYN$  را در عملیات پرداخت در فرزکاری Inconel 718 ارزیابی کرده و پارامترهای فرایند مانند سرعت برش و سرعت پیشروی را تغییر دادند. مشخص شد که طول برش پارامتری است که بیشترین تأثیر را دارد.

$Al-Mg_2Si$  جز دسته‌ای از مواد است که ویژگی‌های منحصر به فرد ترکیب  $Mg_2Si$  تقویت‌شده با آلومینیوم ( $Al$ )، همچون دانسیته پایین، قابلیت ریخته‌گری خوب و مقاومت به سایش بالا را دارا می‌باشد. باین‌وجود، پژوهش‌های کاربردی در مورد ارزیابی توانایی ماشین‌کاری  $Al-Mg_2Si$  با درصد‌های وزنی متفاوتی از ترکیب شیمیایی  $Mg_2Si$  نیازمند تحقیقات بیشتر است. لذا در این پژوهش، راهکارهای مناسب در جهت کاهش مساحت سایش سطح تراشه ابزار برشی در حین ماشین‌کاری کامپوزیت فلزی  $AlMg_2Si$  با درصد‌های وزنی متفاوتی از ترکیب شیمیایی  $Mg_2Si$  مطالعه شده است که بر اساس پیشینه پژوهشی، مطالعه مشابهی یافت نشد.

## ۲- روش تحقیق

روش آزمایش فول فاکتوریل به منظور بررسی متغیرهای درصد  $Mg_2Si$ ، نرخ پیشروی و سرعت برشی با هدف تعریف یک مدل ریاضی و نیز بهینه‌سازی انجام گردید. از این رو، ابتدا درصد‌های مختلف  $0.15\%$ ،  $0.20\%$  و  $0.25\%$   $Mg_2Si$  و سه سرعت مختلف برشی با تفاضل یکسان در مقادیر  $100$ ،  $200$  و  $300$  متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. سه نرخ پیشروی متفاوت نیز در مقادیر  $0.1$ ،  $0.2$  و  $0.3$  میلی‌متر بر دور تعیین شد. پس از اتمام طراحی آزمایش، قطعه‌ها با فرایند ریخته‌گری القایی در قالب فولادی تولید شدند و از هر قطعه دو نمونه ساخته شد. ماشین‌کاری بر روی یک دستگاه تراش CNC (شکل ۱) با توان و دور مناسب و بدون استفاده از سیال خنک‌کار انجام شد. دقت دستگاه بر اساس ملاحظات آزمایشگاهی ابتدایی بررسی و تایید شد. از این رو از وجود خطاهای اپراتوری و ناشی از فرسودگی دستگاه تا حد ممکن اجتناب شد.



شکل ۱ دستگاه تراش CNC استفاده شده به منظور تراش نمونه‌ها

به منظور افزایش دقت نتیجه‌های آزمایش، قبل از هر آزمایش یک پاس از روی هر قطعه برداشته شد تا شروع فرایند با سطحی صاف صورت گیرد. تمامی نمونه‌ها در یک شیفت کاری و در شرایط یکسان ریخته‌گری شدند. سپس هر آزمایش توسط یک ابزار جداگانه با ویژگی‌های یکسان انجام گردید. پس از اتمام تمامی آزمایش‌ها سطوح براده و جانبی اینسرت‌های مختلف به وسیله یک میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر و در شرایط کاملاً یکسان تصویربرداری شدند. تمامی آزمایش‌ها در دمای ۲۲ درجه سلسیوس و رطوبت ۵٪ انجام شدند. همان‌طور که اشاره شد، هر آزمایش یک نوبت نیز تکرار گردید و میانگین اندازه‌گیری‌ها به عنوان مبنای تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات اینسرت برشی مورد استفاده نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ اطلاعات اینسرت برش مورد استفاده در تراشکاری نمونه‌ها

NR01 SCGT 120408-AL	نوع و گرید اینسرت
N	نوع مواد قابل ماشینکاری
80-300 m/min	سرعت برش
0.1-0.6 mm/rev	نرخ پیشروی

به منظور بررسی عناصر نمونه‌های ریخته‌گری شده، آنالیز کوانتومتری بر روی تمامی نمونه‌ها صورت گرفت. آنالیز طبق استاندارد ASTM E1251-17a و با استفاده از دستگاه کوانتومتری Hitachi High-Tech FOUNDRY-MASTER Smart انجام شد. همچنین، به منظور بررسی اثر عنصر استرانسیوم بر قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت Al-Mg2Si، از معیار سایش سطح براده ابزار استفاده شد. سطح براده یکی از سطوح مهم ابزار برشی است که مشخصه‌های هندسی، فیزیکی و مکانیکی آن اهمیت بسیار بالایی در فرایند برشی و بهره‌وری نهایی دارد. جدول ۱ اطلاعات اینسرت مورد استفاده و جدول ۲ طرح آزمایش را نشان می‌دهد. جدول ۳ درصد وزنی عناصر مهم‌تر موجود در هر کدام از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> SEM

جدول ۲ طرح آزمایش

شماره آزمایش	کسر جرمی Mg <sub>2</sub> Si	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی متر بر دور)
۱	۰/۲	۲۰۰	۰/۳
۲	۰/۲۵	۲۰۰	۰/۳
۳	۰/۱۵	۳۰۰	۰/۲
۴	۰/۲۵	۳۰۰	۰/۳
۵	۰/۲۵	۲۰۰	۰/۱
۶	۰/۲۵	۲۰۰	۰/۲
۷	۰/۱۵	۲۰۰	۰/۱
۸	۰/۱۵	۱۰۰	۰/۳
۹	۰/۲۵	۳۰۰	۰/۱
۱۰	۰/۲	۲۰۰	۰/۲
۱۱	۰/۱۵	۳۰۰	۰/۱
۱۲	۰/۱۵	۱۰۰	۰/۱
۱۳	۰/۲	۲۰۰	۰/۱
۱۴	۰/۱۵	۲۰۰	۰/۲
۱۵	۰/۲	۱۰۰	۰/۳
۱۶	۰/۱۵	۳۰۰	۰/۳
۱۷	۰/۲	۱۰۰	۰/۲
۱۸	۰/۲	۳۰۰	۰/۱
۱۹	۰/۱۵	۱۰۰	۰/۲
۲۰	۰/۲	۱۰۰	۰/۱
۲۱	۰/۲۵	۱۰۰	۰/۱
۲۲	۰/۲	۳۰۰	۰/۲
۲۳	۰/۲۵	۳۰۰	۰/۲
۲۴	۰/۲۵	۱۰۰	۰/۲
۲۵	۰/۲	۳۰۰	۰/۳
۲۶	۰/۱۵	۲۰۰	۰/۳
۲۷	۰/۲۵	۱۰۰	۰/۳

جدول ۳ درصد وزنی عناصر در نمونه های ریخته گری شده Al-Mg<sub>2</sub>Si با درصدهای مختلف Mg<sub>2</sub>Si

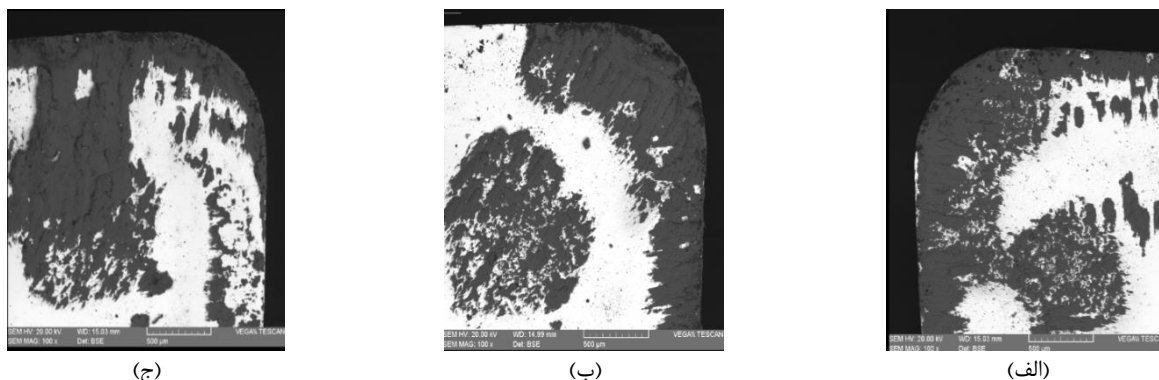
عنصر	درصد وزنی عناصر در ۱۵٪ Al-Mg <sub>2</sub> Si	درصد وزنی عناصر در ۲۰٪ Al-Mg <sub>2</sub> Si	درصد وزنی عناصر در ۲۵٪ Al-Mg <sub>2</sub> Si
Al	٪ ۸۲/۳۷	٪ ۷۳/۵	٪ ۶۳/۲۳
Mg	٪ ۱۰/۰	>٪ ۱۳/۰	>٪ ۱۳/۰
Si	٪ ۶/۴۷	٪ ۱۰/۱	٪ ۱۳/۴
Sr	٪ ۰/۱۳۰	٪ ۰/۱۴۱	٪ ۰/۱۳۶

### ۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر عنصر استرانسیوم بر بهبود قابلیت ماشین کاری کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی به استخراج تصاویری از سطح براده ابزار پرداخته شد. در ادامه به بررسی تاثیر هر پارامتر ماشین کاری (سرعت برش و نرخ پیشروی) بر مقدار سایش سطح براده ابزار پرداخته خواهد شد. فعالیت های مرتبط با مشخص نمودن منطقه سایشی و اندازه گیری های مرتبط با مساحت سایش در نرم افزار Image J انجام گردید.

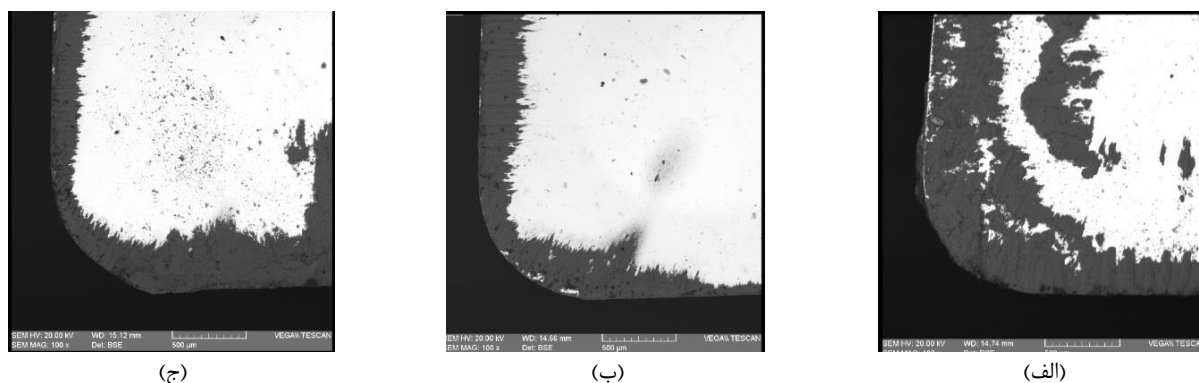
### ۳-۱- اثر سرعت برشی بر سایش

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح براده ابزار در سرعت‌های برش ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۱ میلی‌متر بر دور و ۱۵٪ درصد  $Mg_2Si$  در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲، با افزایش سرعت برشی، ناحیه سایش از لبه‌های ابزار به نواحی دورتر از لبه برش جابه‌جا شده است. این بدان معناست که در سرعت‌های برشی پایین‌تر اغلب لبه‌های برش، آزاد و نوک ابزار در معرض سایش قرار دارند؛ اما با افزایش سرعت برشی نواحی میانی ابزار در معرض پدیده سایش قرار می‌گیرند و با توجه به عدم استفاده از سیال برشی می‌توان به افزایش حرارت در منطقه برشی نیز اشاره کرد.



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح براده ابزار در شرایط ماشین‌کاری با نرخ پیشروی ۰/۱ میلی‌متر بر دور و ۱۵٪  $Mg_2Si$  در سرعت‌های برشی: (الف) ۱۰۰ متر بر دقیقه، (ب) ۲۰۰ متر بر دقیقه و (ج) ۳۰۰ متر بر دقیقه

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح براده ابزار را به ترتیب در سرعت‌های برشی ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۱ میلی‌متر بر دور و ۲۵٪ درصد  $Mg_2Si$  نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات موجود در شکل ۳ با افزایش سرعت برشی، نواحی سایش در لبه‌های ابزار کم‌تر شده‌اند، با این تفاوت که در میانه ابزار پدیده سایش رخ نداده است. این پدیده بدان معناست که با افزایش درصد ترکیب  $Mg_2Si$  با اینکه سایش در لبه‌ها تغییری نداشته است، اما در سایش میانه ابزار کاهش قابل توجهی مشاهده شد. در حقیقت وجود ترکیب  $Mg_2Si$  در حضور عنصر استرانسیوم به افزایش مقاومت به سایش در میانه ابزار کمک شایانی کرده است.

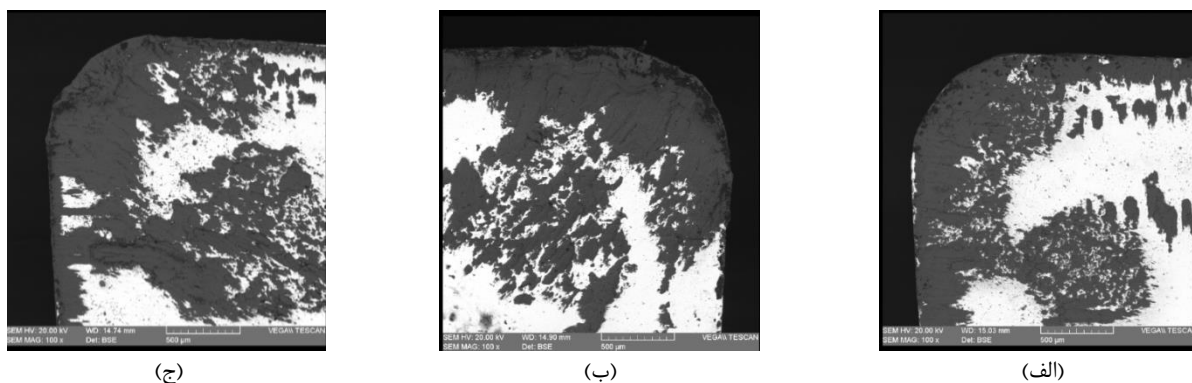


شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح براده ابزار در شرایط ماشین‌کاری با نرخ پیشروی ۰/۱ میلی‌متر بر دور و ۲۵٪  $Mg_2Si$  در سرعت‌های برشی: (الف) ۱۰۰ متر بر دقیقه، (ب) ۲۰۰ متر بر دقیقه و (ج) ۳۰۰ متر بر دقیقه

### ۳-۲- اثر نرخ پیشروی بر سایش

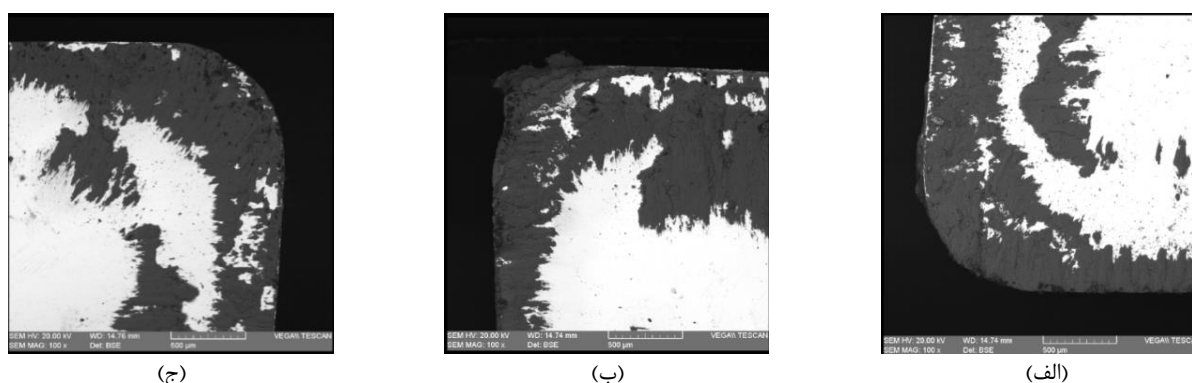
به منظور بررسی تاثیر تغییر درصد ترکیب  $Mg_2Si$  در حضور عنصر استرانسیوم بر سایش نواحی مختلف ابزار در نرخ‌های پیشروی مختلف مجدداً از آنالیز سطح ابزار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. آزمایش‌ها در سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه انجام شدند. شکل ۴ سایش سطح ابزار را حین استفاده از ۱۵٪  $Mg_2Si$  و به ترتیب در نرخ‌های پیشروی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳

میلی متر بر دور نشان می دهد. بر این اساس، حین استفاده از  $Mg_2Si$  ٪۱۵، با افزایش نرخ پیشروی تنها اندکی سایش بیش تر بر روی سطح براده ابزار مشاهده شد. لذا به منظور بررسی و تحلیل دقیق تر لازم است تا تصاویر سایش سطح حین استفاده از  $Mg_2Si$  ٪۲۵ نیز بررسی شود.



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح براده ابزار در ماشین کاری با سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه و  $Mg_2Si$  ٪۱۵ در نرخ های پیشروی: الف) ۰/۱ میلی متر بر دور، ب) ۰/۲ میلی متر بر دور و ج) ۰/۳ میلی متر بر دور

شکل ۵ سایش سطح ابزار را حین استفاده از  $Mg_2Si$  ٪۲۵ و به ترتیب در نرخ های پیشروی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ میلی متر بر دور و سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه نشان می دهد. همچون موارد پیشین، با افزایش نرخ پیشروی تغییر چندانی در سایش ابزار مشاهده نشده است. نظر به اینکه سایش ابزار به طور کلی به تغییرات سرعت برشی حساس است، بررسی تاثیر وجود عنصر استرانسیوم در هر نرخ پیشروی به طور مجزا مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت. بر این اساس و با مقایسه تصاویر به صورت دو به دو می توان نتیجه گرفت که عنصر استرانسیوم باعث منظم تر شدن و اندکی کاهش سایش سطح براده شده است. هنگام استفاده  $Mg_2Si$  ٪۱۵، الگوهای سایش به صورت پراکنده مشاهده شدند اما با افزایش این ترکیب به ٪۲۵، شاهد الگوهایی منظم تر بوده و اندکی از مجموع سایش ها کاسته شده است. با این وجود، مطالعات تکمیلی کماکان نیاز است. به منظور ارزیابی مساحت ناحیه سایش سطح براده ابزار، سعی شد تمامی نواحی قرار گرفته در معرض سایش اعم از نواحی پیوسته و گسسته مورد ارزیابی و محاسبه قرار گیرد. پس از اندازه گیری ناحیه سایش بر روی سطح براده ابزار مقادیر جدول ۴ در سطوح مختلف متغیرهای آزمایش به دست آمد.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح براده ابزار در شرایط ماشین کاری با سرعت برش ۱۰۰ متر بر دقیقه و  $Mg_2Si$  ٪۲۵ در نرخ های پیشروی: الف) ۰/۱ میلی متر بر دور، ب) ۰/۲ میلی متر بر دور و ج) ۰/۳ میلی متر بر دور

مدل ریاضی به دست آمده (رابطه ۱) برای پیش بینی نتیجه های مساحت سایش سطح براده ابزار از نوع درجه ۳ انتخاب شد. مدل مذکور تشکیل شده از پارامترهای ورودی، اثرات مستقیم هر یک از پارامترها و تاثیرات متقابل آن ها است که به صورت معادله با مرتبه درجه ۳ نشان داده شده است. مقدار  $R^2$  برای این مدل برابر با ۰/۸۰ است. شکل ۶، تطابق مدل ریاضی انتخاب شده و نتایج

آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همچنین بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که داده‌های استخراج شده پراکندگی متناسب با توزیع نرمال از خود نشان می‌دهند.

$$\text{Wear area} = 1.33 - 0.069A - 0.485B - 0.219C + 0.07AB - 0.181AC - 0.175BC + 0.121A^2 + 0.359B^2 - 0.0041C^2 - 0.113ABC - 0.158A^2B - 0.575A^2C - 0.022AB^2 + 0.23AC^2 + 0.228B^2C + 0.416BC^2 \quad (1)$$

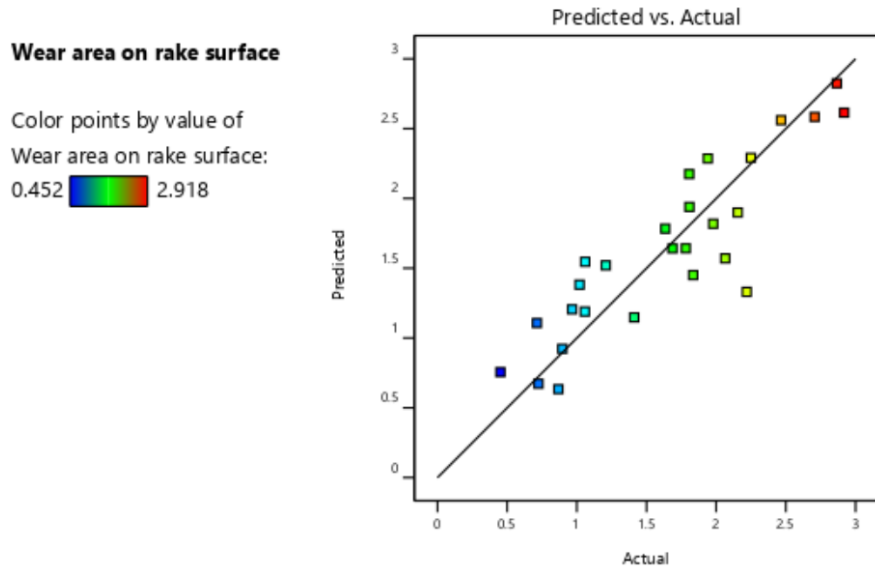
که در آن A سرعت برشی، B نرخ پیشروی و C کسر جرمی می‌باشد.

جدول ۴ نتیجه‌های آنالیز مساحت ناحیه سایش سطح براده ابزار در سطوح مختلف متغیرها

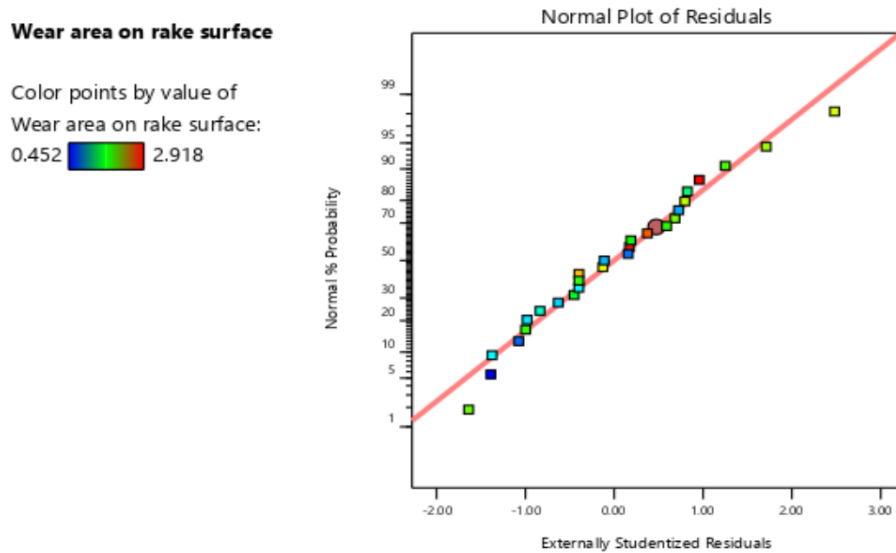
شماره آزمایش	کسر جرمی Mg <sub>2</sub> Si	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دور)	مساحت ناحیه سایش سطح براده ابزار (میلی‌متر مربع)
۱	۰/۲	۲۰۰	۰/۳	۱/۰۲
۲	۰/۲۵	۲۰۰	۰/۳	۰/۸۶۸
۳	۰/۱۵	۳۰۰	۰/۲	۱/۶۳۵
۴	۰/۲۵	۳۰۰	۰/۳	۰/۴۵۲
۵	۰/۲۵	۲۰۰	۰/۱	۰/۷۲۵
۶	۰/۲۵	۲۰۰	۰/۲	۰/۷۱۴
۷	۰/۱۵	۲۰۰	۰/۱	۲/۱۵۵
۸	۰/۱۵	۱۰۰	۰/۳	۲/۴۶۶
۹	۰/۲۵	۳۰۰	۰/۱	۰/۸۹۶
۱۰	۰/۲	۲۰۰	۰/۲	۲/۲۱۹
۱۱	۰/۱۵	۳۰۰	۰/۱	۱/۹۷۹
۱۲	۰/۱۵	۱۰۰	۰/۱	۱/۹۴
۱۳	۰/۲	۲۰۰	۰/۱	۱/۲۰۸
۱۴	۰/۱۵	۲۰۰	۰/۲	۱/۰۶
۱۵	۰/۲	۱۰۰	۰/۳	۲/۲۴۹
۱۶	۰/۱۵	۳۰۰	۰/۳	۲/۸۶۶
۱۷	۰/۲	۱۰۰	۰/۲	۱/۸۰۷
۱۸	۰/۲	۳۰۰	۰/۱	۱/۰۵۸
۱۹	۰/۱۵	۱۰۰	۰/۲	۲/۰۶۵
۲۰	۰/۲	۱۰۰	۰/۱	۲/۹۱۸
۲۱	۰/۲۵	۱۰۰	۰/۱	۱/۶۸۷
۲۲	۰/۲	۳۰۰	۰/۲	۰/۹۶۶
۲۳	۰/۲۵	۳۰۰	۰/۲	۱/۸۳۵
۲۴	۰/۲۵	۱۰۰	۰/۲	۱/۸۰۸
۲۵	۰/۲	۳۰۰	۰/۳	۱/۴۱۲
۲۶	۰/۱۵	۲۰۰	۰/۳	۲/۷۰۷
۲۷	۰/۲۵	۱۰۰	۰/۳	۱/۷۸۲

روند تغییرهای مساحت سطح براده ساییده شده ابزار برحسب متغیرهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و درصد Mg<sub>2</sub>Si به صورت کانتور سه بعدی در سه مقدار مختلف از درصد Mg<sub>2</sub>Si در شکل ۸ قابل مشاهده است. کمترین و بیشترین مقدار ناحیه سایش سطح براده ابزار در شرایط ذکر شده در جدول ۵ مشخص شده‌اند. طبق مشاهدات آزمایشگاهی، با کاهش سرعت برشی و درصد Mg<sub>2</sub>Si، سایش سطح براده افزایش چشمگیری پیدا کرد. در مورد سایش سطح براده، افزودن Mg<sub>2</sub>Si در حضور استرانسیوم ظاهراً یک عامل مثبت تلقی می‌شود، اما لازم است نگاه دقیق‌تری به این مورد شود. بدین منظور نمودار مساحت سایش برحسب سرعت برشی در نرخ پیشروی ۰/۳ میلی‌متر بر دور و دو کسر حجمی Mg<sub>2</sub>Si ۰/۱۵ و Mg<sub>2</sub>Si ۰/۲۵ در شکل ۹ نشان داده شده است.

لذا این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش درصد  $Mg_2Si$ ، به‌طور کلی مساحت سایش سطح براده ابزار کاهش پیدا می‌کند، اما روند تغییرات سایش وابستگی بیش‌تری به‌سرعت برشی پیدا کرده است. از این رو افزودن استرانسیوم به ماده  $Al-Mg_2Si$  در اغلب سطوح آزمایش باعث بهبود نرخ سایش سطح براده ابزار شده است. در مقادیر کم تر  $Mg_2Si$ ، با افزایش سرعت پیشروی مقدار، سایش سطح براده ۱۲٪ افزایش یافت. در مقادیر بالاتر  $Mg_2Si$  نیز با افزایش سرعت پیشروی، سایش سطح براده ۵۴٪ کاهش یافت. شکل ۱۰، کم‌ترین و بیش‌ترین ناحیه سایش ایجاد شده بر روی سطح براده ابزار را نمایش می‌دهد.



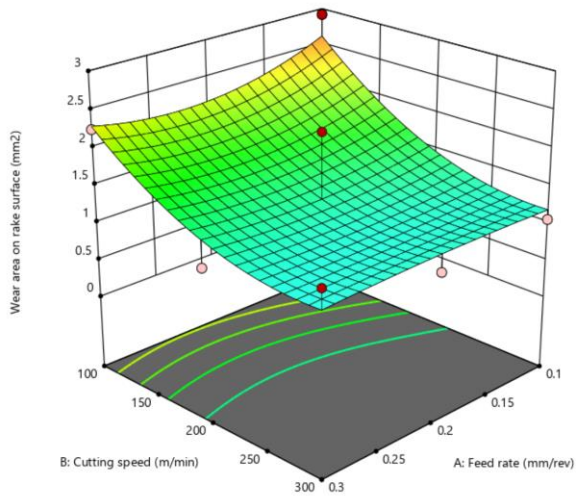
شکل ۶ مقایسه تطابق مدل ریاضی منتخب و نتایج آزمایشگاهی



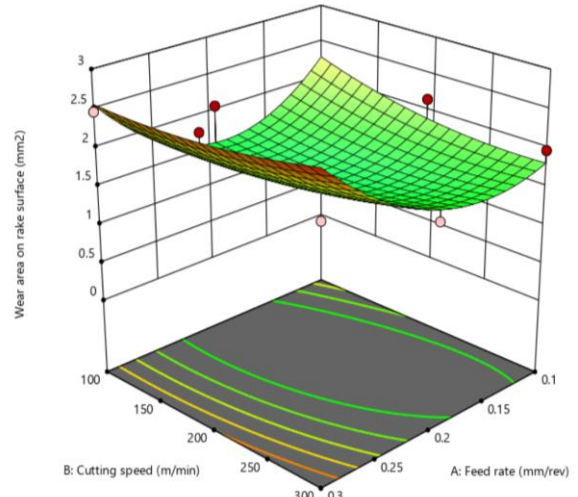
شکل ۷ نرمال بودن توزیع داده‌های آزمایشگاهی

جدول ۵ کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر مساحت ناحیه سایش سطح براده ابزار در سطوح مختلف متغیرهای آزمایشگاهی

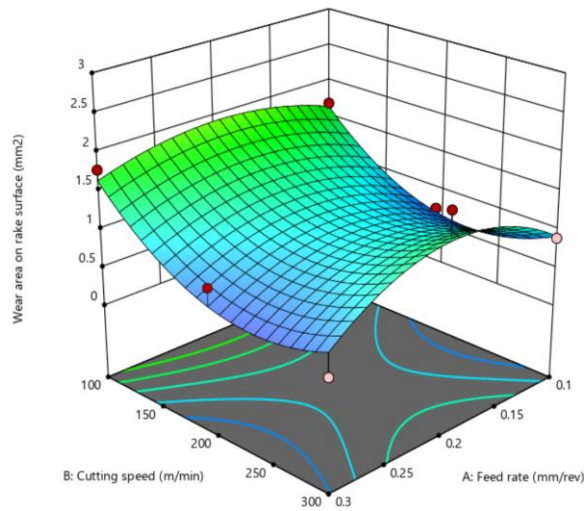
درصد $Mg_2Si$	سرعت برشی (میلی‌متر بر دقیقه)	نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دور)	مساحت سایش (میلی‌متر مربع)
۰/۲۱۰	۳۰۰	۰/۳	۰/۹۵۹
۰/۱۵۰	۱۰۰	۰/۳	۲/۵۶۱



(ب)

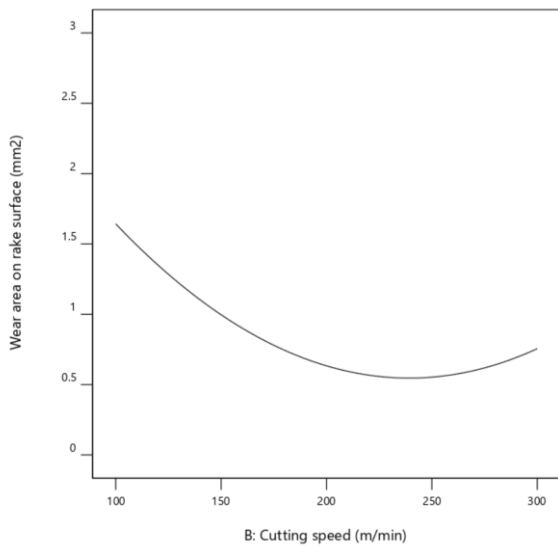


(الف)

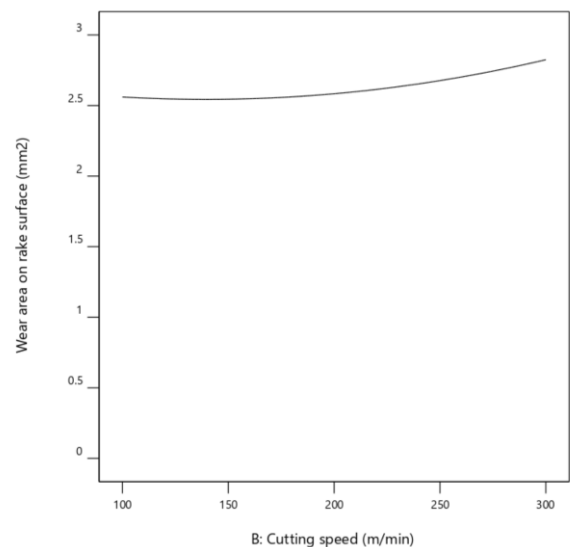


(ج)

شکل ۸ نمودار سه بعدی مقدار مساحت ناحیه سایش سطح براده ابزار در کسرهای جرمی الف) ۱۵٪، ب) ۲۰٪، و ج) ۲۵٪  $Mg_2Si$

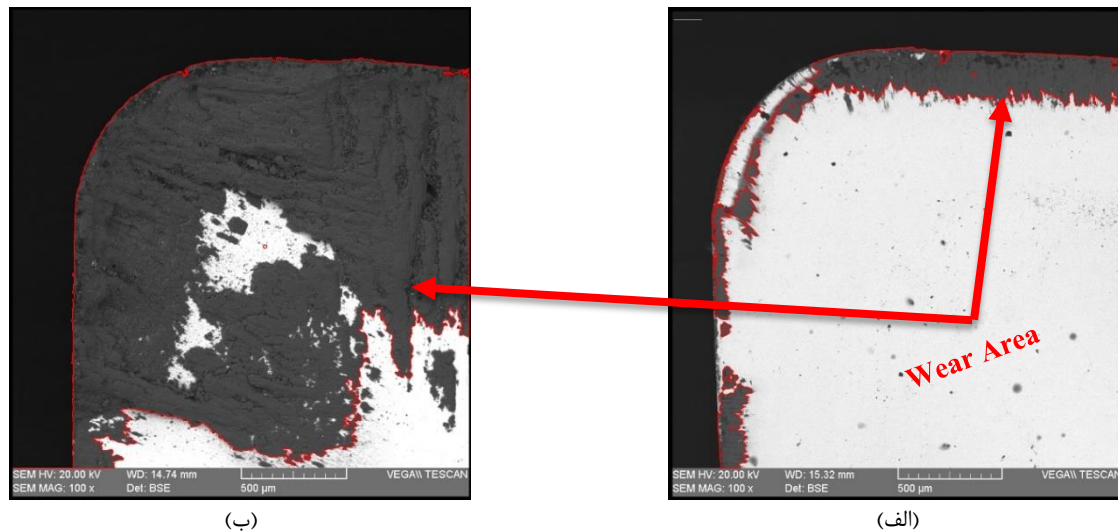


(ب)



(الف)

شکل ۹ نمودار نرخ سایش برحسب سرعت برشی ابزار در نرخ پیشروی ۰/۳ میلی متر بر دور؛ الف) ۱۵٪  $Mg_2Si$ ، ب) ۲۵٪  $Mg_2Si$



شکل ۱۰ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح براده ابزار و مقایسه ناحیه ساییش (سیاه‌رنگ؛ الف) ابزار با کم‌ترین مقدار ساییش، (ب) ابزار با بیش‌ترین مقدار ساییش

#### ۴- نتیجه‌گیری

مساحت سطح ساییش یافته برای اولین بار به عنوان شاخصه‌ای کیفی در تعیین عملکرد ماشین‌کاری کامپوزیت Al-Mg<sub>2</sub>Si مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر از پژوهش کنونی استخراج شدند:

- عنصر استرانسیوم باعث جلوگیری از پراکندگی الگوهای ساییشی سطح براده ابزار شد.
- با افزایش ترکیب Mg<sub>2</sub>Si در حضور استرانسیوم، نرخ ساییش سطح براده ابزار حین افزایش سرعت برشی، کاهش یافت.
- وجود عنصر استرانسیوم در کنار افزایش نرخ پیشروی منجر به کاهش اندک در مقدار ساییش سطح براده ابزار شد.
- در مقادیر کم تر Mg<sub>2</sub>Si، با افزایش سرعت پیشروی، ساییش سطح براده ۱۲٪ بیشتر شد.
- با افزایش سرعت پیشروی در مقادیر بالاتر Mg<sub>2</sub>Si، ساییش سطح براده ۵۴٪ کاهش یافت.

#### Reference

- [1] Okokpujie IP, Ikumapayi OM, Okonkwo UC, Salawu EY, Afolalu SA, Dirisu JO, Nwoke ON, Ajayi OO. Experimental and mathematical modeling for prediction of tool wear on the machining of aluminium 6061 alloy by high speed steel tools. *Open Engineering*. 2017 Dec 29;7(1):461-9. doi: 10.1515/eng-2017-0053
- [2] Lu C. Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of materials processing technology*. 2008 Aug 26;205(1-3):439-50. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.270
- [3] Vilches FT. Análisis paramétrico del mecanizado en seco de la aleación UNS A97075 (Doctoral dissertation, PhD Thesis, University of Málaga).
- [4] Martin-Bejar S, Trujillo FJ, Sevilla L, Marcos M. Indirect adhesion wear parametric analysis in the dry turning of UNS A97075 Alloys. *Procedia Manufacturing*. 2017 Jan 1;13:418-25. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.036
- [5] Okokpujie IP, Ohunakin OS, Bolu CA, Okokpujie KO. Experimental data-set for prediction of tool wear during turning of Al-1061 alloy by high speed steel cutting tools. *Data in brief*. 2018 Jun 1;18:1196-203. doi: 10.1016/j.dib.2018.04.003
- [6] Bhushan RK, Kumar S, Das S. Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010 Sep;50:459-69. doi: 10.1007/s00170-010-2529-2
- [7] 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*. 2019 Sep;1(9):1093. doi: 10.1007/s42452-019-1100-5
- [8] Seth PP, Parkash O, Kumar D. Structure and mechanical behavior of in situ developed Mg 2 Si phase in magnesium and aluminum alloys—a review. *RSC advances*. 2020;10(61):37327-45. doi: 10.1039/D0RA02744H

- [9] Qin Q, Zhao H, Zhang Y, Li J, Wang Z. Microstructures and mechanical properties of Al-Mg<sub>2</sub>Si-Si alloys resistance spot welded with Al-Si interlayers. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019 Sep 1;8(5):4318-32. doi: [10.1016/j.jmrt.2019.07.043](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.043)
- [10] Barzani MM, Farahany S, Songmene V. Machinability characteristics, thermal and mechanical properties of Al-Mg<sub>2</sub>Si in-situ composite with bismuth. *Measurement*. 2017 Nov 1;110:263-74. doi: [10.1016/j.measurement.2017.06.028](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.028)
- [11] Soren TR, Kumar R, Panigrahi I, Sahoo AK, Panda A, Das RK. Machinability behavior of aluminium alloys: A brief study. *Materials Today: Proceedings*. 2019 Jan 1;18:5069-75. doi: [10.1016/j.matpr.2019.07.502](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.502)
- [12] 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)
- [13] Korkmaz ME, Gupta MK, Çelik E, Ross NS, Günay M. Tool wear and its mechanism in turning aluminum alloys with image processing and machine learning methods. *Tribology International*. 2024 Mar 1;191:109207. doi: [10.1016/j.triboint.2023.109207](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109207)
- [14] Silva FJ, Sebbe NP, Costa RD, Pedroso AF, Sales-Contini RC, Barbosa ML, Martinho RP. Investigations on the Surface Integrity and Wear Mechanisms of TiAlYN-Coated Tools in Inconel 718 Milling Operations. *Materials*. 2024 Jan 17;17(2):443. doi: [10.3390/ma17020443](https://doi.org/10.3390/ma17020443)