

Experimental Investigation of the Effects of Micro-Texture Geometrical Parameters on Tool Wear and Hole Burr Formation in Aluminum Drilling Using a Textured Drill

Zahra BayazGhorbani¹, Mohammad Mahdi Abootorabi^{1*}, Ali Akbar Jafari KhosroAbadi²

¹Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

²Department of Statistics, Yazd University, Yazd, Iran

ABSTRACT

Burrs can prevent the proper assembly of components. Industrial manufacturers employ secondary operations to remove burrs, which increases both production time and manufacturing costs. Several factors contribute to burr formation, with tool wear being one of the factors responsible for burr formation on drilled components. Micro- and nano-texturing of cutting tools is a novel approach for addressing the problems of hole burr formation and tool wear. In this study, micro-grooves with widths ranging from 200 to 400 μm , inter-groove spacings of 200 to 400 μm , and orientation angles relative to the cutting edge ranging from 0° to 90° were fabricated on the flank surface of a drill. The effects of micro-groove geometry on tool wear and hole burr formation were investigated. Statistical analysis showed that increasing the micro-groove width and inter-groove spacing from 200 to 400 μm reduced tool wear. Furthermore, as the micro-groove orientation angle increased from 0° to 90° , tool wear initially increased and then decreased. Increasing the inter-groove spacing from 200 to 400 μm and the micro-groove orientation angle relative to the cutting edge from 0° to 90° resulted in an increase in burr width.

KEYWORDS

Drilling, textured tool, tool wear, burr, aluminum.

* Corresponding Author: Email: abootorabi@yazd.ac.ir

1. Introduction

Cutting fluids are widely used in many machining processes to reduce friction, extend tool life, and decrease machining temperature. However, their use not only increases production costs but can also adversely affect human health and the environment [1]. Micro- and nano-texturing of cutting tools is a recent technique for improving the machinability of aluminum alloys. This approach can reduce cutting temperature and friction, improve tool life, and decrease burr formation on the workpiece [2].

Salem et al. [3] investigated the effect of micro-texture geometry on tool wear during turning of AISI 1045 steel. They reported that all textured tools exhibited lower wear than the untextured tool. Agari et al. [4] investigated micro-grooves and micro-dimples on turning tools during machining of AISI 1014 steel and reported lower wear for textured tools. Yang et al. [5] investigated groove width during milling of Al7Ni17Cr alloy and reported lower wear for textured tools than for the untextured tool. Sristi and Zaman [6] reported that tool texturing generally improves tool durability, reduces cutting temperature, and enhances lubrication performance. They emphasized that texture dimensions, shape, position, distance from cutting edges, density, and orientation affect machining performance. Ullah et al. [7] identified burr formation as a common and problematic defect in micro-drilling, with burr size and shape affected by the drill, workpiece material, cutting parameters, and drill geometry. Öztürk and Kadir [8] fabricated micro-grooves on different regions of a twist drill and reported improved drilling performance for grooves on the flank face.

The present study investigates the effects of micro-groove geometry fabricated on the flank face of a drill on tool wear and hole-exit burr width during drilling of an aluminum alloy. Micro-groove width, inter-groove spacing, and orientation angle relative to the drill cutting edge are considered as the principal geometrical parameters.

2. Experimental Setup

Uncoated white HSS-G type N twist drills were used for drilling the aluminum alloy. Parallel, perpendicular, and inclined micro-grooves relative to the cutting edge were fabricated on the drill flank face. Micro-groove width and inter-groove spacing were each varied at three levels of 200, 300, and 400 μm , while the orientation angle relative to the cutting edge was set at 0°, 45°, and 90°. Figure 1 shows a representative drill before and after machining.

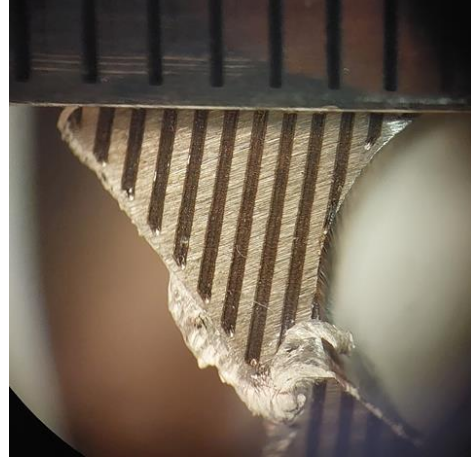


Figure 1. An example of a drill bit after creating micro-grooves on the flank face, after machining

Drilling experiments were conducted using the experimental conditions specified in the study. Tool wear was evaluated on the flank face, and burr width was measured at the exit edge of the drilled hole. Three holes were produced using each textured drill, and the mean value of the three measurements was used for evaluation. An optical microscope and image analysis were employed for quantitative assessment of wear and burr geometry.

3. Experimental Results and Discussion

Figure 2 presents the effects of inter-groove spacing (D), micro-groove width (W), and micro-groove orientation angle relative to the drill cutting edge (A) on tool wear. Increasing the inter-groove spacing from 200 to 400 μm reduced tool wear. Compared with the untextured tool, the mean wear reduction was 48.7%, 51.4%, and 54.0% for inter-groove spacings of 200, 300, and 400 μm , respectively.

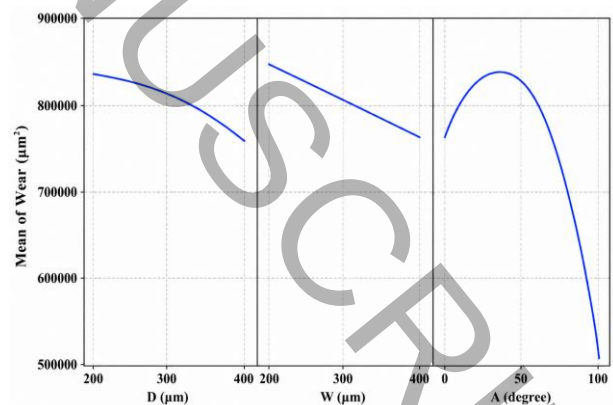


Figure 2. Effect of the spacing between micro-grooves (D), width of the micro-grooves (W), and the orientation angle of the micro-grooves relative to the cutting edge of the drill (A) on the drill wear

Increasing the micro-groove width from 200 to 400 μm also reduced flank-face wear. The mean wear reduction relative to the untextured tool was 48.3%, 51.9%, and 53.5% for groove widths of 200, 300, and 400 μm , respectively. Flank-face wear increased slightly as the orientation angle increased from 0° to 45° and then decreased from 45° to 90° . The increase from 0° to 45° was not statistically significant and may be attributed to laser fabrication error. Wear reductions of 47.7%, 44.8%, and 66.5% relative to the conventional drill were obtained for micro-grooves parallel, inclined, and perpendicular to the cutting edge, respectively.

Figure 3 illustrates the effects of the input parameters on the burr width at the hole-exit edge. Compared with the untextured tool, burr width was reduced by 42.7%, 42.2%, and 36.7% for inter-groove spacings of 200, 300, and 400 μm , respectively. Increasing the inter-groove spacing and the micro-groove orientation angle generally increased burr width.

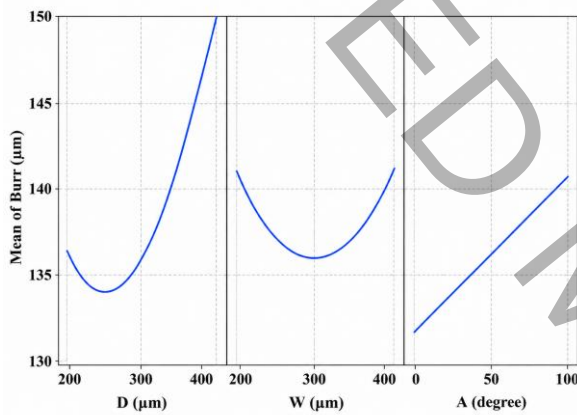


Figure 3. Variations of the average burr width at the exit edge of the hole with respect to the spacing (D), width (W), and orientation angle (A) of the micro-grooves

4. Conclusions

This study investigated the effects of micro-groove geometrical parameters fabricated on the drill flank face on tool wear and burr formation during drilling of an aluminum alloy. Micro-groove width, inter-groove spacing, and orientation angle relative to the drill cutting edge were considered as input parameters, while flank-face wear and hole-exit burr width were considered as output responses.

The results showed that increasing micro-groove width from 200 to 400 μm and inter-groove spacing from 200 to 400 μm reduced tool wear. Increasing the orientation angle from 0° to 45° increased tool wear, whereas a further increase from 45° to 90° reduced

wear. Increasing groove width from 200 to 300 μm reduced exit-edge burr width, while a further increase from 300 to 400 μm increased burr width. Burr width remained approximately constant as spacing increased from 200 to 300 μm and increased when spacing increased from 300 to 400 μm . Increasing the orientation angle also increased exit-edge burr width.

This study is among the early investigations of the effects of micro-groove geometry and texture density on drilling performance. The findings indicate that identifying an optimum texture geometry for different drilling conditions requires further investigation and provides opportunities for future research.

5. References

- [1] M.A. Makhesana, K. Patel, N. Ghetiya, R. Binali, M. Kuntoğlu, Evaluation of drilling and hole quality characteristics in green machining aluminium alloys: A new approach towards green machining, *Journal of Manufacturing Processes*, 129 (2024) 176-186.
- [2] D.Y. Pimenov, M. Kiran, N. Khanna, G. Pintaude, M.C. Vasco, L.R.R. da Silva, K. Giasin, Review of improvement of machinability and surface integrity in machining on aluminum alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(11) (2023) 4743-4779.
- [3] A. Salem, H. Hegab, H.A. Kishawy, Experimental investigation of the derivative cutting when machining AISI 1045 with micro-textured cutting tools, *Metals*, 13(9) (2023) 1587.
- [4] S.R. Agari, A. Lakshmikanthan, C.P. Selvan, K.S.V. Sekar, Improvement in the Machining Processes by Micro-Textured Tools during the Turning Process, *Engineering Proceedings*, 61(1) (2024) 2.
- [5] L. Yang, W. Ma, F. Gao, S. Xi, Effect of groove width on micromachine groove texture tribology characteristics of 0Cr17Ni7Al, *Coatings*, 12(8) (2022) 1221.
- [6] N.A. Sristi, P.B. Zaman, A review of textured cutting tools' impact on machining performance from a tribological perspective, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133(9) (2024) 4023-4057.
- [7] S. Ullah, Z. Liang, Y. Ma, S. Xing, Y. Du, M. Zhou, J. Xu, T. Zhou, X. Wang, A comprehensive review of mechanical micro-drilling: Toward a tool-process-quality framework from tool fabrication to micro-hole quality, *Journal of Materials Research and Technology*, 42 (2026) 10550-10587.
- [8] E. Öztürk, K. Kadir, Drilling performance of micro-textured twist drill bit for Ti-6Al-4V alloy: validated FEM and statistical approaches, *Journal of Manufacturing Processes*, 115 (2024) 342-351.

بررسی تجربی تأثیر پارامترهای هندسی میکرو طرح بر سایش ابزار و پلیسه سوراخ در فرآیند سوراخکاری آلومینیوم با مته طرح‌دار

زهرایباض قربانی^۱، محمد مهدی ابوترابی^{۱*}، علی اکبر جعفری خسروآبادی^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشکده آمار، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*abootorabi@yazd.ac.ir

چکیده

پلیسه‌ها مانع از مونتاژ صحیح قطعات می‌شوند. تولیدکنندگان صنعتی از عملیات‌های ثانویه برای حذف پلیسه‌ها استفاده می‌کنند که زمان و هزینه تولید را افزایش می‌دهد. عوامل متعددی باعث ایجاد پلیسه‌ها می‌شوند. سایش ابزار یکی از عوامل ایجاد پلیسه روی قطعات سوراخکاری- شده است. طرح‌دار کردن ابزار برش در مقیاس میکرو و نانو ایده‌ای جدید برای حل مشکل پلیسه سوراخ‌ها و سایش ابزار است. در این پژوهش، میکروشیارهایی با عرض ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، فاصله بین میکروشیارها ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر و زاویه قرارگیری نسبت به لبه برنده بین ۰ تا ۹۰ درجه بر روی سطح آزاد مته ایجاد و تأثیر هندسه میکروشیار بر سایش ابزار و پلیسه سوراخ بررسی شده است. علاوه بر این، بهینه‌سازی پارامتر های هندسی میکروشیار برای داشتن کمترین سایش و پلیسه به صورت جداگانه و همچنین بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن هم‌زمان این دو پارامتر خروجی، با روش سطح پاسخ انجام شده است. تحلیل آماری نشان می‌دهد که با افزایش عرض میکروشیار و فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر سایش ابزار کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش زاویه قرارگیری میکروشیار از صفر تا ۹۰ درجه، سایش ابزار ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر و افزایش زاویه قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه برنده از صفر تا ۹۰ درجه باعث افزایش عرض پلیسه شده است.

کلمات کلیدی

سوراخکاری، ابزار طرح‌دار، سایش ابزار، پلیسه، آلومینیوم

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و رسانایی حرارتی بالا به طور گسترده در اغلب صنایع مانند خودروسازی و هوافضا استفاده می‌شوند. علی‌رغم این ویژگی‌های مفید، به دلیل سهولت واکنش شیمیایی با جنس‌های مختلف ابزار و نرم بودن نسبی آلومینیوم، سوراخکاری آن‌ها اغلب دشوار و پر از چالش است. یکی از راه‌های افزایش قابلیت ماشینکاری آلیاژهای آلومینیوم استفاده از سیالات برشی است [۱]. سیالات برشی در بسیاری از روش‌های ماشینکاری برای کاهش اصطکاک، افزایش عمر ابزار و کاهش دمای ماشینکاری استفاده می‌شوند؛ اما استفاده از آن‌ها، علاوه بر افزایش هزینه تولید بر سلامتی انسان و محیط زیست اثر نامطلوب دارد [۲]. یکی از تکنیک‌های جدید برای افزایش قابلیت ماشینکاری آلیاژهای آلومینیوم، فناوری طرح‌دار کردن ابزار برش در مقیاس میکرو و نانو است که باعث کاهش دمای برش، کاهش اصطکاک، کاهش سایش ابزار و کاهش ایجاد پلیسه روی قطعه کار شده است [۱]. در سال‌های اخیر بیشترین تحقیقات منتشر شده در زمینه ماشینکاری با ابزارهای طرح‌دار مربوط به فرآیند تراشکاری بوده است. در ادامه تعدادی از این تحقیقات ارائه شده‌اند. در مورد سوراخکاری با مته‌های طرح‌دار تاکنون مطالعات کمی انجام شده است. یکی از دلایل این موضوع، سختی ایجاد میکرو طرح روی مته است.

سالم و همکاران [۳] با ایجاد میکروشیارهایی با عرض‌های ۴۵، ۶۰ و ۹۰ میکرومتر و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰، ۴۵ و ۹۰ میکرومتر روی ابزار تراش، تأثیر هندسه میکرو طرح بر سایش ابزار در فرآیند تراشکاری فولاد AISI 1045 را بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که سایش ابزار در تمام ابزارهای طرح‌دار نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته است. ابزار با عرض میکروشیار ۴۵ میکرومتر و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰ میکرومتر کمترین سایش ابزار را در مقایسه با سایر ابزارها داشته است. ارولکیروباکاران و همکاران [۴] تأثیر ابزارهای میکرو طرح‌دار بر سایش سطح ابزار را در فرآیند تراشکاری آلیاژ Ti-6Al-4V بررسی کردند. آن‌ها با ایجاد میکروشیار موازی و عمود نسبت به لبه برش روی سطح براده ابزار و انجام آزمایش‌های تجربی گزارش کردند که ابزار با میکرو طرح عمود بر لبه برش کمترین میزان سایش را نسبت به ابزارهای دیگر دارد و نسبت به ابزار بدون طرح، سایش را به میزان ۵۰/۷ درصد کاهش می‌دهد. زی و همکاران [۵] برای بررسی اثرات میکرو طرح‌ها بر سایش ابزار، میکروشیارهای مورب و عمود نسبت به لبه برش را روی سطح براده ابزار تراشکاری ایجاد کردند. آن‌ها گزارش کردند که استفاده از ابزارهای میکرو طرح‌دار نسبت به ابزار بدون طرح باعث ایجاد سایش کمتری روی سطوح براده و آزاد ابزار می‌شود. ابزار با میکروشیار مورب باعث کاهش ۶/۷ درصد سایش ابزار نسبت به ابزار بدون طرح شده است.

آگری و همکاران [۶] با ایجاد میکروشیار و میکرو گودال روی سطح براده ابزار تراش تأثیر ابزار طرح‌دار بر سایش ابزار را در طول فرآیند تراشکاری فولاد AISI 1014 بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که سایش ابزار در ابزارهای طرح‌دار نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته و ابزار میکروشیاردار با کاهش قابل توجه سایش ابزار، عملکرد بهتری نسبت به ابزار با میکرو گودال از خود نشان داده است. یانگ و همکاران [۷] تأثیر عرض شیار بر سایش ابزار در فرآیند فرزکاری آلیاژ 0Cr17Ni7Al را بررسی کردند. آن‌ها با ایجاد شیارهایی با عرض ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متر روی ابزار فرز و انجام آزمایش‌های تجربی گزارش کردند که سایش در تمام ابزارهای طرح‌دار نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته است. سایش ابزار با افزایش عرض شیار از ۰/۴ تا ۰/۶ میلی‌متر کاهش و از ۰/۶ تا ۱ میلی‌متر افزایش یافته است. نیکت و ساموئل [۸] با استفاده از یک ابزار مته جدید و ایجاد میکرو طرح در قسمت شیار و حاشیه ابزار مته، نیروی پیشروی را تحت شرایط روانکاری خشک، تر و روانکاری کمینه بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که ابزار با میکرو طرح در قسمت حاشیه مؤثرتر از ابزار با میکرو طرح در قسمت شیار و ابزار بدون میکرو طرح عمل می‌کند. کاهش نیروی پیشروی با ابزار طرح‌دار در حالت روانکاری خشک ۱۰ تا ۱۲ درصد، در حالت روانکاری تر ۱۵ تا ۲۰ درصد و در حالت روانکاری کمینه ۱۵ تا ۱۹ درصد گزارش شده است. نیکت و ساموئل در پژوهشی دیگر [۹] برای بررسی اثر مته‌های طرح‌دار بر سوراخکاری با نسبت طول به قطر بالا، بافت‌هایی به شکل حفره‌های دایروی روی قسمت حاشیه و شیار ابزار مته ایجاد کردند و آزمایش‌های تجربی را در حالت خشک، تر و روانکاری کمینه انجام دادند. آن‌ها گزارش کردند که ابزار طرح‌دار در شرایط تر بهترین عملکرد را در مقایسه با حالت‌های دیگر داشته و باعث کاهش ۱۷ درصدی نیروی پیشروی و ۲۷ درصدی گشتاور شده است. علاوه بر این، ابزار طرح‌دار در مقایسه با ابزار بدون طرح باعث کاهش ۵۴ درصدی ارتفاع پلیسه سوراخ شده است. لینگ و همکاران [۱۰] اثر میکرو طرح بر چسبندگی بین مته و قطعه کار و عمر ابزار را در فرآیند

سوراخکاری بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که ایجاد طرح در حاشیه مته روشی مفید برای کاهش چسبندگی و افزایش عمر ابزار است.

سریستی و زمان [۱۱] با بررسی جامع پژوهش‌های پیشین در خصوص ابزارهای طرح‌دار بیان کردند که طرح‌دار کردن ابزار برش به طور کلی باعث ارتقای دوام ابزار، کاهش دمای برش و بهبود عملکرد روانکاری می‌شود. آن‌ها همچنین بیان کردند که تراکم یافت ابزار نقش حیاتی در تأثیرگذاری بر نیروهای برشی دارد. آن‌ها در این تحقیق جامع به این نتیجه رسیدند که به‌طور کلی، میزان اثر ابزارهای برشی طرح‌دار در بهبود عملکرد فرآیندهای ماشینکاری به پارامترهای هندسی مانند ابعاد، شکل، موقعیت، فاصله از لبه‌های برشی، چگالی و جهت این طرح‌ها بستگی و بررسی اثر هندسه طرح‌ها اهمیت زیادی دارد. بهینه‌سازی پارامترهای هندسی طرح‌های ایجاد شده روی ابزارها برای رسیدن به بهترین عملکرد تریبولوژیکی ابزارهای برش نیز بسیار مهم ارزیابی شده‌است. اولاد و همکاران [۱۲] تشکیل پلیسه را یکی از رایج‌ترین و مشکل‌سازترین عیوب هندسی در فرآیند میکروسوراخکاری معرفی کردند. ساین و شکل پلیسه‌ها تحت تأثیر مته، جنس قطعه‌کار و پارامترهای برشی است و هندسه مته از عوامل مهم اثرگذار بر تشکیل پلیسه معرفی شده‌است. علاوه بر این، در بررسی جامع سایش ابزار در فرآیند میکروسوراخکاری در این مقاله مروری، نویسندگان فاکتورهای هندسی ابزار مته را از مهمترین عوامل مؤثر بر سایش ابزار ارزیابی و تحقیقات بیشتر در این زمینه برای کاهش سایش ابزار را پیشنهاد کردند. اوزتورک و کدیر [۱۳] با ایجاد میکروشیار روی سطح آزاد، شیار و حاشیه ابزار مته و سوراخکاری آلیاژ $Ti-6Al-4V$ در حالت خشک، عملکرد میکروشیارها را بر نیروی پیشروی، گشتاور و دمای ابزار بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که ابزار با میکروشیار روی سطح آزاد مته نسبت به بقیه حالت‌ها، باعث بهبود عملکرد سوراخکاری شده‌است. در این پژوهش، ابزار با میکروشیار روی سطح آزاد و حاشیه مته و بدون طرح در قسمت شیار مته به‌عنوان ابزار بهینه معرفی شده و استفاده از آن در مقایسه با ابزار بدون طرح، نیروی پیشروی را ۵۱ درصد، گشتاور را ۲۰/۵ درصد و دمای ابزار را ۲۳/۴ درصد کاهش داده‌است.

برای افزایش بازدهی فرآیند سوراخکاری، افزایش عمر ابزار و حل مشکل پلیسه سوراخ ضرورت دارد. سایش ابزار مهم‌ترین عامل مؤثر بر عمر ابزار برشی است. در روش‌های سنتی ماشینکاری، برای کاهش سایش و افزایش عمر ابزار، از سیالات برشی جهت روغن‌کاری و خنک‌کاری منطقه ماشینکاری استفاده می‌شود. سیالات برشی تأثیر نامطلوبی بر سلامتی انسان و محیط زیست دارند، بنابراین استفاده از روش‌های جدید برای کاهش مصرف سیالات برشی ضروری است. پلیسه ایجاد شده روی لبه سوراخ نیز باعث کاهش کارایی فرآیند سوراخکاری و ایجاد مشکل در عملیات مونتاژ قطعات می‌شود. برای غلبه بر این مشکلات، در سال‌های اخیر از ابزارهای میکرو طرح‌دار در فرآیندهای ماشینکاری از جمله سوراخکاری استفاده شده است. طرح‌دار کردن ابزارها باعث کاهش مساحت تماس براده با ابزار و بهبود ویژگی‌های تریبولوژیکی سطح می‌شود. در تحقیقات پیشین مرتبط با فرآیند سوراخکاری، معمولاً تأثیر میکرو طرح‌های ایجاد شده روی حاشیه و شیار مارپیچ ابزار مته بر سایش ابزار، پلیسه سوراخ و دما بررسی و به تأثیر میکرو طرح‌های ایجاد شده روی سطح آزاد ابزار مته کمتر پرداخته شده‌است. در این پژوهش تأثیر هندسه میکرو طرح ایجاد شده روی سطح آزاد مته در سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم بر سایش ابزار و عرض پلیسه سوراخ بررسی شده‌است. علاوه بر این، در تحقیقات پیشین به تأثیر هندسه و تراکم میکرو طرح‌ها بر سایش ابزار و عرض پلیسه کمتر پرداخته شده و به طور خاص، فرآیند سوراخکاری در حالت بدون روانکار (ماشینکاری خشک) کمتر موضوع تحقیقات مرتبط با استفاده از ابزارهای میکرو طرح‌دار در ماشینکاری بوده‌است. عرض میکرو طرح‌ها، فاصله بین میکرو طرح‌ها و زاویه قرارگیری میکرو طرح‌ها نسبت به لبه مته، هندسه میکرو طرح را مشخص می‌کند که در تحقیق حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

۲- تنظیم تجربی

برای انجام آزمایش‌های تجربی از مته HSS-G سفید نوع N و بدون پوشش برای سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم استفاده شد. مشخصات مته مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی عبارت است از: قطر اسمی ۱۰/۵ میلی‌متر، طول کلی ۱۳۳ میلی‌متر، طول فاز ۸۷ میلی‌متر، زاویه رأس ۱۱۸ درجه و زاویه مارپیچ ۲۵ درجه. سوراخکاری با استفاده از ماشین فرز CNC عمودی مدل MAHO MH 700C ساخت کشور آلمان انجام شد. پارامترهای ثابت ماشینکاری که با انجام آزمایش‌های اولیه مشخص شدند عبارتند از: سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۱۵ میلی‌متر بر دور و عمق سوراخ ۴۰ میلی‌متر. لازم به ذکر است که این مقادیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی مته بیش از مقادیر مورد استفاده هنگام کارهای صنعتی انتخاب شده‌اند تا سایش مته در این کار تحقیقاتی زودتر اتفاق افتد و حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شود. آزمایش‌های تجربی به صورت خشک روی قطعه کار از جنس آلیاژ آلومینیوم با سطح مقطع مستطیل به طول ۱۴۰، عرض ۱۰۰ و ضخامت ۴۰ میلی‌متر انجام شده است.

برای رفع آلودگی سطحی و چربی‌زدایی، ابزارهای خام درون محلول اتانول با خلوص ۹۶ درصد قرار گرفتند. میکرو شیارهای موازی، عمود و مورب نسبت به لبه برنده ابزار مته و تغییر ابعاد آن‌ها در سه سطح، هندسه و تراکم میکروشیار را مشخص می‌کند. به دلیل توانایی محدود لیزر در دسترس، میکروشیارهای ایجاد شده با عرض‌های کمتر از ۲۰۰ میکرومتر کیفیت قابل قبولی نداشتند. عرض میکرو شیار و فاصله بین میکرو شیارها در سه سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومتر و زاویه قرارگیری نسبت به لبه برنده ابزار مته در سه سطح ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه تعیین شده است. در انتخاب این سطوح برای عرض میکرو شیار و فاصله بین میکرو شیارها، علاوه بر توجه به مطالعات قبلی در زمینه ماشینکاری با ابزارهای میکرو طرح‌دار، ایده استفاده از حداقل مقادیر و ایجاد طرح‌های ظریف‌تر در نظر بوده است. برای ایجاد میکروشیار روی سطح آزاد مته، از روش میکرولیزر سطح استفاده شد. پارامترهای فرآیند میکرو حکاکی لیزر در جدول ۱ ذکر شده است. برای انتخاب پارامترهای فرآیند حکاکی لیزر، ابتدا میکروشیارهایی با پارامترهای حکاکی مختلف از جمله پارامترهای ذکر شده در جدول ۱ بر روی ابزار مته ایجاد شد. سپس عرض و فاصله بین میکروشیارها با استفاده از آنالیز تصاویر میکروسکوپی و نرم افزار ImageJ اندازه‌گیری و با مقادیر اسمی مورد نظر در آزمون‌های تجربی یعنی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میکرومتر مقایسه شد. ابعاد میکروشیارها در حالت ذکر شده در جدول ۱ نسبت به سطوح دیگر کمترین خطا را داشتند. پارامترهای جدول ۱ برای تمام آزمایش‌ها ثابت بوده است. بعد از فرآیند میکرو حکاکی لیزر، برای از بین بردن دوده حاصل از میکرو لیزر سطح و شست و شوی مته، ابزارهای برش به مدت ۱۰ دقیقه داخل ظرف حاوی اتانول ۹۶ درصد به صورت غوطه‌ور قرار داده شده‌اند. شکل ۱ یک نمونه از مته بعد از ایجاد میکروشیار در حالت‌های قبل و بعد از ماشینکاری را نشان می‌دهد.

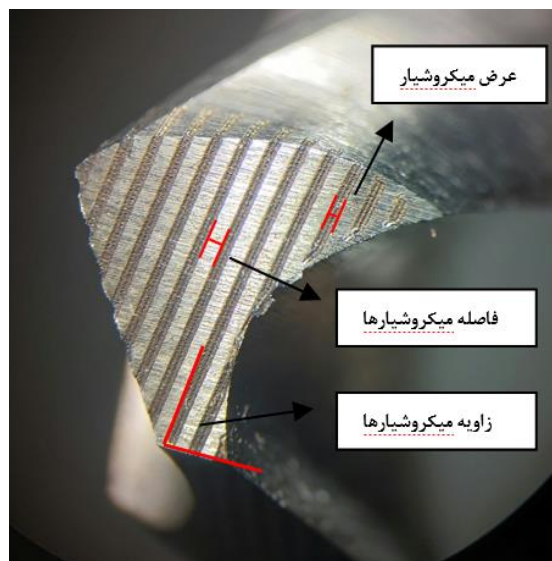
جدول ۱: پارامترهای فرآیند میکرو حکاکی لیزر روی سطح مته

Table 1. Parameters of the laser micro-engraving process on the drill surface

پارامتر	مقدار	واحد
سرعت پیشروی	۱۰۰۰	mm/s
میزان فرکانس	۲۰	KHz
میزان قدرت	۸۰	%



(ب)



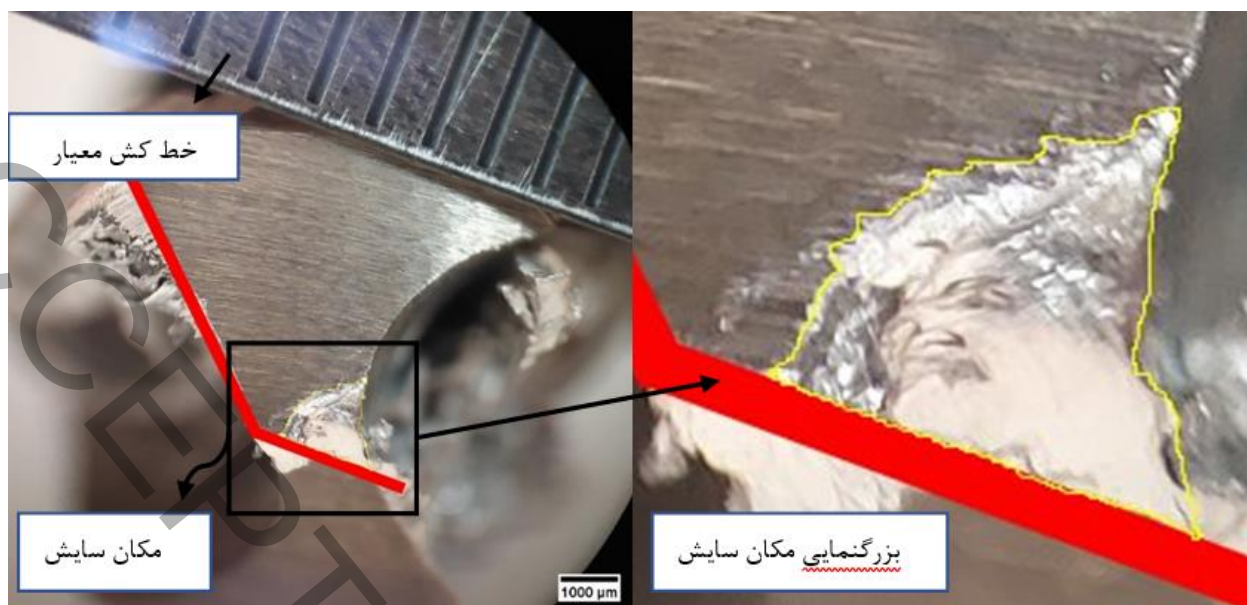
(الف)

شکل ۱: نمونه‌ای از مته بعد از ایجاد میکروشیار روی سطح آزاد قبل و بعد از ماشینکاری، (الف) قبل از انجام آزمایش و (ب) بعد از انجام آزمایش

Figure 1. An example of a drill bit after creating micro-grooves on the flank face, before and after machining: a) before the experiment, and b) after the experiment

اندازه‌گیری میزان سایش سطح آزاد ابزار برشی و پلیسه لبه خروجی سوراخ با استفاده از آنالیز تصاویر گرفته‌شده توسط میکروسکوپ نوری انعکاسی دو چشمی مدل NSZ-606 ساخت شرکت ژنوس چین که با نام استریومیکروسکوپ شناخته می‌شود و نرم افزار ImageJ انجام شد. هنگام تصویربرداری توسط میکروسکوپ به منظور تعریف مقیاس اندازه‌گیری در نرم‌افزار ImageJ از خط‌کش اندازه‌گیری استفاده شده است (شکل ۲). در نرم‌افزار ImageJ فاصله دو خط از خط‌کش ۱۰۰۰ میکرومتر تعریف شد. برای اندازه‌گیری سایش ابزار، کروکی ناحیه ساییده شده مشخص شد و نرم‌افزار با توجه به مقیاس تعریف شده، میزان سایش سطح ابزار را بر حسب μm^2 محاسبه کرد. عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ نیز با خط به نرم‌افزار معرفی شد و نرم‌افزار با توجه به مقیاس از قبل تعریف شده، عرض پلیسه را بر حسب μm اندازه‌گیری کرد (شکل ۳). برای اندازه‌گیری و بررسی پلیسه از معیارهای مختلفی نظیر ارتفاع، عرض یا ضخامت ریشه پلیسه استفاده می‌شود [۹]. در مطالعه حاضر، عرض پلیسه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۲ پارامترهای ورودی آزمایش‌های تجربی و طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار مینی تب و روش باکس-بنکن انجام شده است. تعداد آزمایش‌های تجربی انجام‌شده با ابزار طرح‌دار در مجموع ۱۵ عدد و آزمایش شماره ۱۶ مربوط به ابزار بدون طرح است. روش باکس-بنکن یکی از روش‌های طراحی سطح پاسخ است که به دلیل طراحی متوازن و متعادل خود، توانایی تفکیک و برآورد دقیق اثرات متقابل را با حداقل تعداد آزمایش دارد. استفاده از روش باکس-بنکن برای طراحی آزمایش به دلیل کاهش تعداد آزمایش‌ها و مدل‌سازی دقیق‌تر اثرات متقابل در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در هر آزمایش، ابزار برش جدید سه سوراخ روی قطعه کار ایجاد کرده است. شکل ۴ قطعه کار آلومینیومی بعد از انجام فرآیند سوراخکاری را نشان می‌دهد. سایش مته پس از ایجاد این سه سوراخ اندازه‌گیری و میانگین عرض پلیسه لبه انتهایی سه سوراخ به عنوان میزان پلیسه در هر آزمایش ثبت شد.



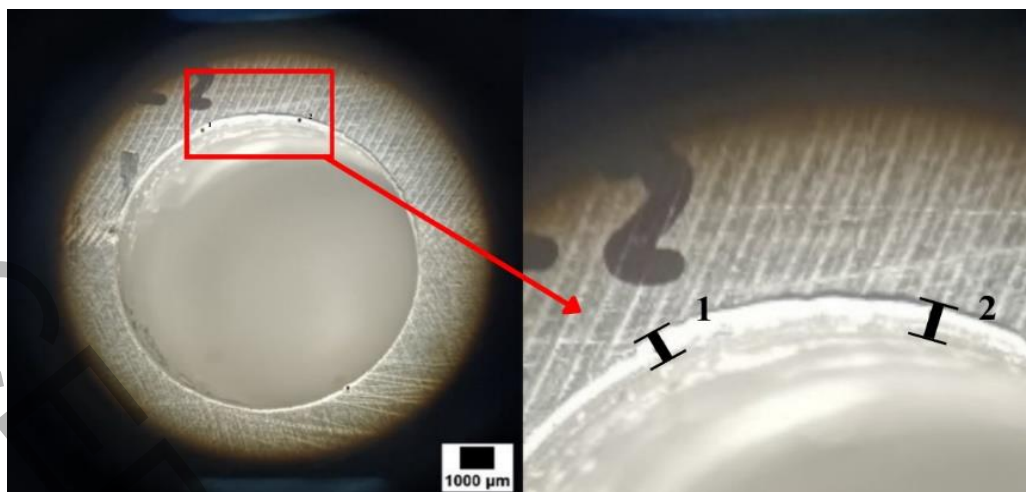
(الف)



(ب)

شکل ۲: تصویر محل سایش ابزار زیر میکروسکوپ نوری و نحوه اندازه‌گیری مساحت سایش؛ (الف) ابزار بدون طرح و (ب) ابزار میکروشیاردار عمود نسبت به لبه برش با عرض میکروشیار ۴۰۰ و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰۰ میکرومتر

Figure 2. Optical microscope image of the tool wear area and the method of measuring the wear area: a) non-patterned tool, and b) tool with micro-grooves perpendicular to the cutting edge (micro-groove width: 400 μm , spacing between micro-grooves: 300 μm)



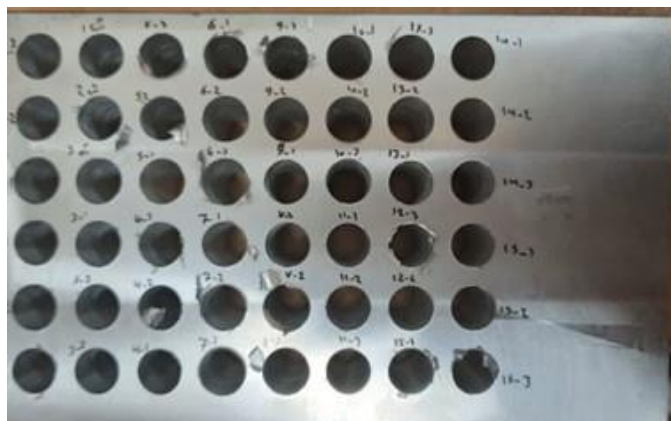
شکل ۳: تصویر عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ زیر میکروسکوپ نوری و نحوه اندازه گیری عرض پلیسه

Figure 3. Optical microscope image of the burr width at the exit edge of the hole and the method of measuring the burr width

جدول ۲: پارامترهای ورودی و طراحی آزمایش های تجربی

Table 2. Input parameters and design of experiments

شماره آزمایش	عرض میکروشیارها (μm)	فاصله بین میکروشیارها (μm)	زاویه میکروشیار نسبت به لبه برش (درجه)
۱	۲۰۰	۴۰۰	۴۵
۲	۲۰۰	۳۰۰	۹۰
۳	۳۰۰	۴۰۰	۰
۴	۴۰۰	۳۰۰	۹۰
۵	۳۰۰	۳۰۰	۴۵
۶	۳۰۰	۲۰۰	۰
۷	۳۰۰	۳۰۰	۴۵
۸	۳۰۰	۳۰۰	۴۵
۹	۳۰۰	۲۰۰	۹۰
۱۰	۴۰۰	۲۰۰	۴۵
۱۱	۴۰۰	۳۰۰	۰
۱۲	۴۰۰	۴۰۰	۴۵
۱۳	۳۰۰	۴۰۰	۹۰
۱۴	۲۰۰	۳۰۰	۰
۱۵	۲۰۰	۲۰۰	۴۵



شکل ۴: قطعه کار آلومینیومی بعد از انجام آزمون‌های سوراخکاری

Figure 4. Aluminum workpiece after performing the drilling tests

۳- نتایج تجربی و بحث

۳-۱ سایش ابزار

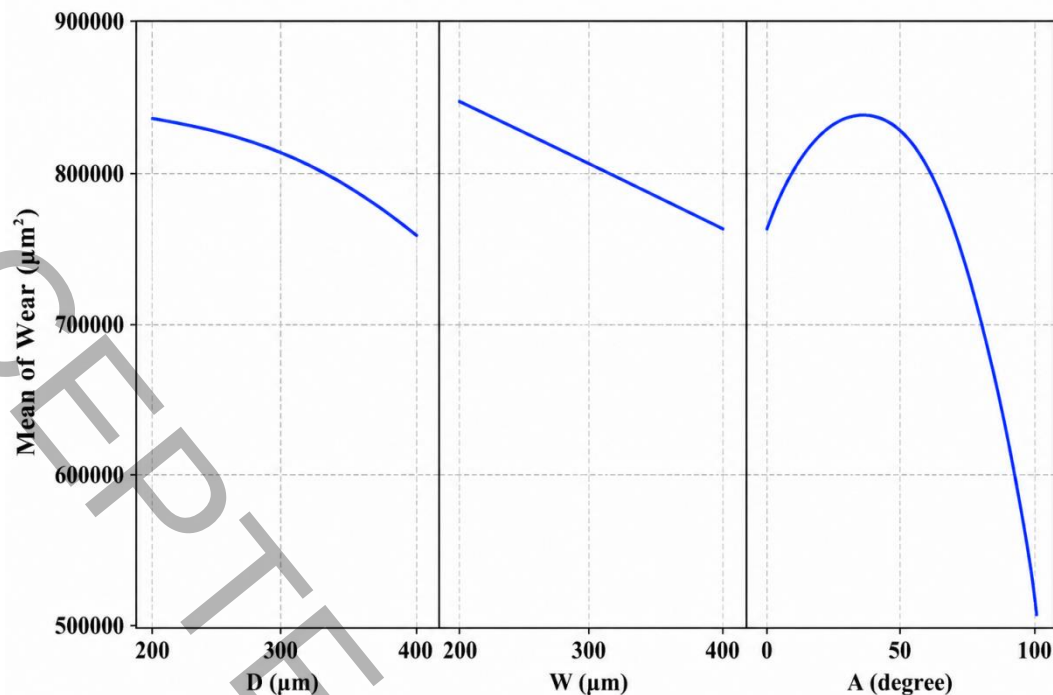
جدول ۳ میزان سایش سطح آزاد ابزار مته پس از هر آزمایش تجربی و شکل ۵ تأثیر فاصله بین میکروشیارها (D)، عرض میکروشیار (W) و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده مته (A) بر سایش سطح مته را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول ۳ و شکل ۵، با افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، سایش ابزار کاهش پیدا کرده است. میانگین سایش در ابزار با فاصله بین میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر ۴۸/۷٪، ۳۰۰ میکرومتر ۵۱/۴٪ و ۴۰۰ میکرومتر ۵۴٪ نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته است.

لیو و همکاران [۱۴] با ایجاد میکروشیار روی سطح آزاد ابزار، تأثیر عرض میکروشیار، فاصله بین میکروشیارها و فاصله میکروشیار از لبه برش را بر سایش ابزار در فرآیند برش سرامیک سبز بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که ابزار با فاصله میکروشیار بیشتر، مقاومت به سایش بهتری دارد که با نتایج پژوهش حاضر همسو است. موسوی و همکاران [۱۵] نیز با ایجاد میکروشیار روی سطح ابزار تنگستن کارباید، تأثیر فاصله بین میکروشیارها روی سایش ابزار را در فرآیند تراشکاری خشک آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که افزایش فاصله بین میکروشیارها باعث افزایش سایش ابزار می‌شود که با نتایج پژوهش حاضر همسو نیست. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش و مقایسه آن‌ها با مراجع ذکر شده قبلی نشان می‌دهد که در مورد اثر فاصله بین میکروشیارها بر سایش ابزار نمی‌توان با انجام آزمایش‌های محدود روی یک جنس قطعه کار نتیجه کلی گرفت. به عبارت دیگر ممکن است با تغییر مقادیر فاصله بین میکروشیارها و همچنین جنس ابزار و قطعه کار، نتایج به‌دست آمده متفاوت از نتایجی باشد که در آزمایش‌های تجربی پژوهش حاضر به‌دست آمده است. لازم به ذکر است که موسوی و همکاران [۱۵] آزمایش‌ها را در حالت تراشکاری با روانکاری کمینه نیز انجام دادند. هنگام استفاده از روانکاری کمینه، با افزایش فاصله بین میکروشیارها و کاهش تعداد آن‌ها در واحد سطح، سیال برشی کمتری به ناحیه برش تزریق می‌شود و کیفیت براده‌برداری را کاهش و سایش ابزار را افزایش می‌دهد؛ به عبارت دیگر، اثر میکروطرح‌ها هنگام ماشینکاری کاهش می‌یابد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، آن‌ها افزایش سایش ابزار با افزایش فاصله بین میکروشیارها در ماشینکاری خشک را نیز مشاهده کردند ولی دلیلی برای این اتفاق ذکر نشده است.

Table 3. Values of the flank wear of the drill

شماره آزمایش	سایش سطح آزاد (μm^2)
۱	۳۸۴۵۷۸
۲	۶۰۸۲۲۳
۳	۷۵۸۴۲۶
۴	۳۳۶۴۹۹
۵	۷۰۳۶۸۳
۶	۷۰۶۵۳۸
۷	۷۹۵۶۶۵
۸	۹۳۳۱۶۱
۹	۳۸۳۸۶۶
۱۰	۹۱۹۸۴۵
۱۱	۵۴۴۷۳۸
۱۲	۹۱۳۱۳۲
۱۳	۶۲۷۵۶۷
۱۴	۱۰۴۱۰۰۵
۱۵	۹۸۴۰۰۶
۱۶	۱۴۵۸۲۳۸

در سوراخ کاری خشک، ابزار تحت بارهای مکانیکی و ضربه‌های ناشی از خروج براده قرار دارد. در فاصله ۲۰۰ میکرون دیواره‌های بین میکروشیارها بسیار نازک هستند. نسبت ارتفاع به پهنای این دیواره‌ها به گونه‌ای است که تحت تنش‌های شدید برشی دچار دفرمه شدن میکروسکوپی یا خمیدگی لبه‌ها می‌شوند. این تغییر شکل‌های ریز، پایداری هندسی ابزار را به هم زده و منجر به شکست‌های موضعی ریز در لبه میکروشیارها می‌شود که سایش ابزار را تسریع می‌کند. در فاصله ۴۰۰ میکرون، پهنای دیواره‌ها دو برابر می‌شود و گشتاور اینرسی مقاوم دیواره در برابر خم شدن افزایش می‌یابد. در نتیجه، دیواره‌ها صلبیت ساختاری بیشتری پیدا می‌کنند و لبه‌های میکروشیار در برابر بارهای ضربه‌ای کاملاً پایدار می‌مانند. علاوه بر این، در فاصله ۲۰۰ میکرون تعداد میکروشیارها در واحد سطح بسیار زیاد می‌شود. تعداد زیاد میکروشیار یعنی تعداد لبه‌های تیز بیشتر که با قطعه کار درگیر می‌شوند. این لبه‌های تیز در لحظات اولیه تماس، مثل دندان‌های اره عمل کرده و تنش تماسی بسیار بالایی ایجاد می‌کنند که سایش چسبنده اولیه را بالا می‌برد. افزایش فاصله به ۴۰۰ میکرون، یک سطح تماس هموارتر و پهن‌تر ایجاد می‌کند که فشار عمودی قطعه را بدون ایجاد تمرکز تنش‌های موضعی شدید تحمل می‌کند.



شکل ۵: تأثیر فاصله بین میکروشیارها (D)، عرض میکروشیارها (W) و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده مته (A) بر سایش مته

Figure 5. Effect of the spacing between micro-grooves (D), width of the micro-grooves (W), and the orientation angle of the micro-grooves relative to the cutting edge of the drill (A) on the drill wear

با توجه شکل ۵، با افزایش عرض میکروشیار از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، سایش سطح آزاد ابزار کاهش پیدا می‌کند. میانگین سایش در ابزار با عرض میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر ۳/۴۸٪، ۳۰۰ میکرومتر ۵/۱۹٪ و ۴۰۰ میکرومتر ۵/۵۳٪ نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته‌است. لیو و همکاران [۱۴] گزارش کردند که با افزایش عرض میکروشیار، سایش ابزار کاهش پیدا می‌کند که نتایج آن‌ها با نتایج پژوهش حاضر همسو است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که افزایش عرض میکروشیار در کنار افزایش فاصله میکروشیارها نسبت به هم در سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم باعث کاهش سایش مته شده‌است و می‌تواند در کارهای صنعتی مورد توجه قرار گیرد.

در سوراخ‌کاری بدون روان‌کار، هیچ جریانی از مایع وجود ندارد تا ذرات میکروسکوپی فرسایشی و ریز براده‌ها را از ناحیه تماس بشوید و خارج کند. این ذرات به ناچار بین سطح آزاد مته و دیواره سوراخ گیر می‌افتند و سایش شدید ایجاد می‌کنند. در عرض ۲۰۰ میکرون، میکروشیارها به‌سرعت توسط این ذرات پر و متراکم می‌شوند. پس از پر شدن میکروشیار، این ذرات فشرده‌شده خودشان مثل یک ابزار ساینده علیه مته عمل می‌کنند. در عرض ۴۰۰ میکرون ظرفیت حجمی میکروشیارها افزایش می‌یابد. این فضا اجازه می‌دهد ذرات ساینده بدون متراکم شدن و ایجاد فشار اضافه، به داخل میکروشیار سقوط کنند و از سطح تماس واقعی خارج شوند. همچنین در سوراخکاری بدون روان‌کار، حرارت زیادی در محل برش تولید می‌شود که فلز قطعه‌کار را به حالت خمیری نزدیک می‌کند. این امر باعث می‌شود فلز قطعه‌کار به سطح آزاد مته جوش بخورد و پدیده لبه انباشته رخ دهد. افزایش عرض میکروشیار به ۴۰۰ میکرون، مساحت سطح تماس واقعی را به میزان مؤثری کاهش می‌دهد. کاهش سطح تماس یعنی کاهش نقاطی که پتانسیل جوش خوردن موضعی فلز به ابزار را دارند. در نتیجه، چسبندگی فلز کاهش یافته و وقتی لبه‌های چسبیده کنده می‌شوند، ذرات کمتری از بدنه ابزار را با خود جدا می‌کنند. در سوراخ‌کاری خشک، تنها عامل خنک‌کننده، هوای اطراف است. علت دیگر کاهش سایش در عرض میکروشیار ۴۰۰ میکرون این است که این میکروشیارها به عنوان کانال‌های مینیاتوری هوا عمل می‌کنند. در سرعت‌های دورانی بالا،

گردش این میکروشیارهای پهن‌تر باعث ایجاد اغتشاشات ریز در جریان هوا در ناحیه تماس می‌شود. این جریان هوای آشفته، گرما را بهتر از سطح آزاد مته دور می‌کند و مانع از نرم شدن حرارتی لبه مته می‌شود.

برای بررسی تأثیر زاویه قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه برنده بر سایش سطح مته، آزمایش‌های تجربی با استفاده از ابزار میکروشیاردار موازی، مورب و عمود نسبت به لبه برنده انجام شده‌است. با توجه به شکل ۵، سایش سطح آزاد ابزار با افزایش زاویه از ۰ تا ۴۵ درجه اندکی افزایش و از ۴۵ تا ۹۰ درجه کاهش پیدا می‌کند. افزایش سایش از ۰ تا ۴۵ درجه معنادار نیست و می‌تواند ناشی از خطای ایجاد میکروشیارها توسط لیزر باشد، بنابراین می‌توان گفت افزایش زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده اثر مثبتی روی سایش سطح آزاد ابزار دارد. چانگ و همکاران [۱۶] با ایجاد میکروشیارهای موازی، مورب و عمود نسبت به لبه برش ابزار فرز، تأثیر جهت قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه برش را بر سایش ابزار در فرآیند میکروفرزکاری بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که ابزار با میکروشیار عمود نسبت به لبه برش بیشترین مقاومت در برابر سایش را از خود نشان داده‌است. نتایج آن‌ها با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. سایش در ابزار با میکروشیار موازی نسبت به لبه برنده ۴۷/۷٪، مورب نسبت به لبه برنده ۴۴/۸٪ و عمود نسبت به لبه برنده به میزان ۶۶/۵٪ نسبت به ابزار معمولی کاهش یافته‌است. سایش کمتر در حالت عمود، می‌تواند به دلیل انتقال بیشتر گرما از ناحیه برشی و کاهش چسبندگی بین ابزار و قطعه‌کار باشد. آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در انجام آزمون‌ها به‌عنوان قطعه‌کار، یک فلز نرم و شکل‌پذیر با دمای ذوب پایین است. مته HSS مورد استفاده نیز در ماشینکاری خشک به سرعت داغ می‌شود. ترکیب حرارت بالا و فشار زیاد باعث می‌شود آلومینیوم به سطح مته بچسبد. در حالت میکروشیار موازی با لبه برش، جهت حرکت مته روی دیواره سوراخ، عمود بر میکروشیارها است. میکروشیارهای موازی مانند دام عمل کرده و آلومینیوم را به دام می‌اندازد. آلومینیوم داخل میکروشیارها متراکم و منجمد می‌شود و لبه انباشه^۱ ایجاد می‌کند. هنگام جدا شدن این لبه انباشته، ذراتی نیز از بدنه مته جدا می‌شود. به‌عبارت دیگر، مکانیزم سایش چسبنده باعث افزایش سایش در این حالت است. همچنین میکروشیارهای موازی با لبه برنده مانند یک سد حرارتی عمل می‌کنند و مانع از انتقال حرارت کافی از لبه برنده به بدنه مته می‌شوند. این پدیده باعث افزایش حرارت در ناحیه لبه برنده و در نتیجه، افزایش تغییر شکل یا سایش ابزار می‌شود. در حالت عمود به لبه برش، میکروشیارها هم‌راستا با جهت لغزش مته روی دیواره قطعه‌کار و حرکت براده قرار دارند. بنابراین مانعی برای حرکت ذرات برش یافته آلومینیوم وجود ندارد و مساحت تماس واقعی و در نتیجه، اصطکاک کاهش پیدا می‌کند. همچنین در حالت میکروشیارهای عمود بر لبه برنده، میکروشیارهای عمودی باعث انتقال حرارت بیشتر از لبه برنده به بدنه مته می‌شود و دمای محل برش را کاهش می‌دهد. کاهش حرارت در ناحیه لبه برنده باعث کاهش سایش ابزار می‌شود.

۳-۱-۱- بهینه‌سازی سایش ابزار

هدف از بهینه‌سازی سایش ابزار، کمینه کردن مقدار آن است. در این تحقیق برای بهینه‌سازی از نرم‌افزار مینی‌تب و روش بهینه‌سازی سطح پاسخ استفاده شده‌است. استفاده از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی، به دلیل وجود اثرات متقابل توصیه می‌شود؛ زیرا روش سطح پاسخ با برازش یک مدل درجه کامل (شامل جمله‌های خطی، متقابل و درجه‌دو) قادر است سطح بهینه را در حضور برهم‌کنش‌های پیچیده بیابد. روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی قادر به یافتن نقطه بهینه در فضای پیوسته متغیرها با دقت بالا و هزینه محاسباتی کمتر نسبت به روش‌های گرادیانی است. در این پژوهش، عرض میکروشیارها، فاصله بین میکروشیارها و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برش به عنوان متغیر مستقل و سایش سطح آزاد ابزار به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده‌است. در جدول ۴ مقادیر بهینه پیش‌بینی شده برای پارامترهای ورودی و سایش پیش‌بینی شده ابزار ارائه شده‌است.

^۱ Built up edge (BUE)

جدول ۴: مقادیر بهینه پارامترهای ورودی و سایش ابزار پیش‌بینی شده با روش سطح پاسخ

Table 4. Optimal values of the input parameters and the predicted tool wear using the response surface methodology

عرض میکروشیار (μm)	فاصله بین میکروشیارها (μm)	زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده (درجه)	سایش سطح آزاد ابزار (μm^2)
۲۰۰	۴۰۰	۹۰	۳۲۶۵۸۵

با توجه به جدول ۴، مقادیر ارائه شده برای حالت بهینه در بین ۱۵ آزمایش اصلی نیست. کمترین میزان سایش ابزار اندازه‌گیری شده ۳۳۶۴۹۹ میکرومتر مربع و مربوط به آزمایش شماره ۴ با عرض میکروشیار ۴۰۰ و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰۰ میکرومتر با زاویه عمود نسبت به لبه برنده است. با انجام آزمایش بهینه می‌توان به سایش سطح ۳۲۶۵۸۵ میکرومترمربع رسید که نسبت به ابزار معمولی سایش ابزار را به میزان ۷۷/۶ درصد بهبود می‌دهد.

۲-۳- پلیسه سوراخ

با پیشروی مته داخل سوراخ، دمای برش افزایش پیدا می‌کند. افزایش دمای برش در سمت خروجی سوراخ باعث ایجاد پلیسه بزرگ‌تر نسبت به لبه ورودی می‌شود [۹]. به این دلیل در پژوهش حاضر با آزمایش‌های تجربی انجام‌شده با استفاده از ابزارهای میکرو طرح‌دار و معمولی، عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ مورد بررسی قرار گرفته‌است. جدول ۵ میانگین عرض پلیسه لبه خروجی سوراخ پس از هر آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. شکل ۶ تأثیر پارامترهای ورودی بر عرض پلیسه لبه خروجی را نشان می‌دهد.

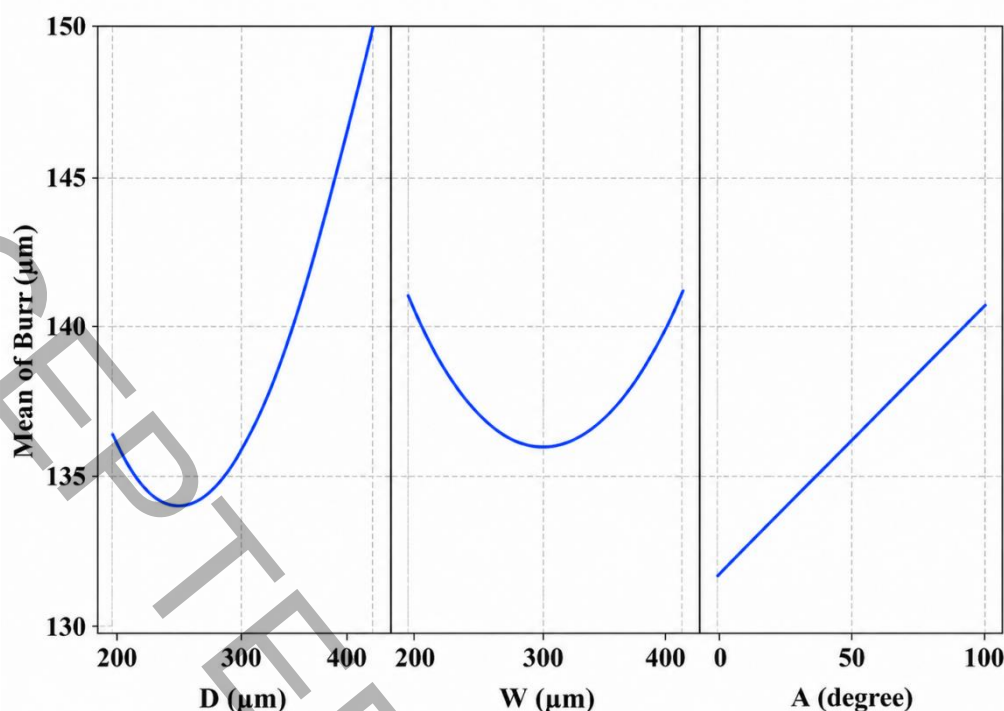
میزان عرض پلیسه در ابزار با فاصله بین میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر ۴۲/۷٪، ۳۰۰ میکرومتر ۴۲/۲٪ و ۴۰۰ میکرومتر ۳۶/۷٪ نسبت به ابزار بدون طرح کاهش یافته‌است. با توجه به شکل ۶ تقریباً می‌توان گفت با افزایش فاصله بین میکروشیارها میزان عرض پلیسه نیز افزایش پیدا می‌کند. هنگام میکرو طرح‌دار کردن سطح ابزار چندین عامل تغییر می‌کند که تعامل بین آن‌ها مشخص می‌کند که خروجی‌های فرآیند چگونه تغییر می‌کند. با زیاد شدن فاصله میکروشیارها از یکدیگر، میزان تماس قطعه‌کار/ ابزار افزایش می‌یابد. ولی از طرفی کاهش تعداد طرح‌ها بر واحد سطح، به دلیل مداخله کمتر روی ابزار در مواردی باعث کاهش پدیده تضعیف مکانیکی ابزار می‌شود که در ابزارهای طرح‌دار قابل مشاهده است. با زیاد شدن فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، این تغییرات سطح تماس و میزان تضعیف مکانیکی ابزار یکدیگر را خنثی کرده‌اند و میزان پلیسه تقریباً ثابت مانده‌است. ولی افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۳۰۰ به ۴۰۰ میکرون، از طریق دو مکانیسم همزمان به کاهش عرض پلیسه خروجی کمک می‌کند. هنگامی که مته در سوراخ پیشروی می‌کند، سطح آزاد مته به دیواره داخلی سوراخ ساییده می‌شود. این تماس مداوم، تنش برشی زیادی به دیواره وارد کرده و فلز را به سمت پایین (مسیر خروج) فشار می‌دهد. این فلزات رانده‌شده، در نهایت به حجم پلیسه خروجی اضافه می‌شوند. در فاصله ۳۰۰ میکرون دیواره‌های بین میکروشیارها نازک هستند، سریع‌تر تحت اصطکاک تغییر شکل می‌دهند، داغ می‌شوند و ضریب اصطکاک بالایی ایجاد می‌کنند که جریان فلز دیواره به سمت خروجی را تشدید می‌کند. در فاصله ۴۰۰ میکرون دیواره‌های پهن‌تر صلیبیت خود را حفظ کرده، دفرمه نمی‌شوند و به دلیل توزیع بهتر تنش تماسی، ضریب اصطکاک کمتری دارند؛ در نتیجه، تنش برشی تماس کاهش یافته و فلز کمتری به سمت خروجی سوراخ جریان می‌یابد. پلیسه خروجی زمانی تشکیل می‌شود که فلز انتهایی سوراخ، تحت بارهای مکانیکی و حرارتی شدید، رفتار انعطاف‌پذیر پیدا کرده و به جای برش خوردن، خم شود. در فاصله ۳۰۰ میکرون دیواره‌های نازک بین میکروشیارها حرارت را در خود محبوس می‌کنند و نوک ابزار به شدت داغ می‌شود. این حرارت به لبه انتهایی

قطعه کار منتقل شده، آن را نرم و شکل پذیر می کند و عرض پلیسه افزایش می یابد. در فاصله ۴۰۰ میکرون دیواره های پهن تر حرارت را به عمق مته هدایت می کنند. با خنک تر ماندن ابزار، دمای قطعه کار در لبه خروجی پایین تر می ماند؛ بنابراین به جای کش آمدن و خم شدن پلاستیک، با مکانیزم برش تمیز جدا می شود و عرض پلیسه کاهش می یابد.

جدول ۵: میانگین عرض پلیسه اندازه گیری شده سوراخ ها در آزمایش های تجربی

Table 5. Average measured burr width of the holes in the experimental tests

شماره آزمایش	عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ (μm)				انحراف استاندارد
	سوراخ اول	سوراخ دوم	سوراخ سوم	میانگین سه سوراخ	
۱	۲۹۲	۸۰	۱۸۴	۱۸۵	۱۰۶/۰۱
۲	۲۴۷	۱۱۵	۲۰۴	۱۸۹	۶۷/۳۲
۳	۱۴۶	۱۷۴	۱۴۸	۱۵۶	۱۵/۶۲
۴	۱۶۴	۱۴۲	۸۲	۱۲۹	۴۲/۴۴
۵	۱۲۴	۱۴۷	۱۱۰	۱۲۷	۱۸/۶۸
۶	۱۳۵	۱۱۹	۱۸۹	۱۴۸	۳۶/۶۸
۷	۱۰۷	۱۶۳	۱۹۴	۱۵۵	۴۴/۰۹
۸	۱۰۲	۱۶۰	۱۱۹	۱۲۷	۲۹/۸۲
۹	۱۸۰	۹۲	۱۳۱	۱۳۴	۴۴/۰۹
۱۰	۱۶۱	۱۲۹	۲۱۹	۱۷۰	۴۵/۶۲
۱۱	۱۴۷	۱۳۱	۱۵۹	۱۴۶	۱۴/۰۵
۱۲	۱۲۶	۱۴۶	۱۳۵	۱۳۶	۱۰/۰۲
۱۳	۱۲۲	۱۴۰	۱۴۱	۱۳۴	۱۰/۶۹
۱۴	۷۵	۱۰۳	۱۲۹	۱۰۲	۲۷/۰۱
۱۵	۱۰۴	۸۹	۱۱۲	۱۰۲	۱۱/۶۸
۱۶	۸۲	۳۲۸	۳۱۳	۲۴۱	۱۳۷/۹۰



شکل ۶: تغییرات میانگین عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ نسبت به فاصله (D), عرض (W) و زاویه قرارگیری (A) میکروشیار

Figure 6. Variations of the average burr width at the exit edge of the hole with respect to the spacing (D), width (W), and orientation angle (A) of the micro-grooves

میانگین عرض پلیسه در مقادیر مختلف عرض میکروشیار به یکدیگر نزدیک است. با توجه به شکل ۶ نحوه رفتار پلیسه با تغییر عرض میکروشیار نشان می‌دهد که با تغییر هندسه میکروشیارها ممکن است پارامترهای خروجی به صورت خطی و یکنواخت تغییر نکنند. به عبارت دیگر، ممکن است تغییر هندسه میکروشیار تا جایی باعث افزایش بازدهی فرآیند شود و بیش از آن، از بازدهی بکاهد. در این مورد خاص، با افزایش عرض میکروشیار از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرون، فضای کافی برای به دام انداختن ذرات فرسایشی ساينده فراهم می‌شود و اصطکاک روی سطح آزاد مته را کاهش می‌دهد. کاهش اصطکاک یعنی تولید حرارت کمتر؛ بنابراین، فلز خروجی سوراخ دچار نرمی حرارتی شدید نمی‌شود و با حفظ سختی خود، به صورت شکننده بریده می‌شود که نتیجه آن کاهش عرض پلیسه است. با افزایش بیشتر عرض میکروشیار تا ۴۰۰ میکرومتر، یک پدیده مکانیکی بر مزایای تریبولوژیکی غلبه می‌کند. با عریض‌تر شدن میکروشیارها، مساحت دیواره‌هایی که وظیفه تحمل نیروهای عمودی قطعه‌کار را دارند کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، تنش تماسی و فشار موضعی روی دیواره‌ها زیاد می‌شود. این فشار شدید مکانیکی در لحظه خروج مته از سوراخ، به عنوان یک نیروی متمرکز بر لبه انتهایی سوراخ عمل کرده و آن را به سمت بیرون هل می‌دهد و باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک و بزرگتر شدن عرض پلیسه می‌شود. مشاهده نحوه اثر فاصله بین میکروشیارها بر میزان پلیسه نیز همانند اثر عرض میکروشیار نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هندسی میکروشیارها اهمیت زیادی دارد. به نظر می‌رسد که در نهایت برای هر فرآیند برش خاص با جنس قطعه‌کار خاص، باید مقادیر بهینه هندسی میکروشیارها را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد.

با توجه به شکل ۶ با افزایش زاویه میکروشیار نسبت به لبه برش، میزان عرض پلیسه اندکی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش زاویه قرارگیری میکروشیارها، میزان تلاقی طرح‌ها با لبه برشی بیشتر شده و باعث تضعیف مکانیکی و کاهش طول مؤثر لبه برش می‌شود. این پدیده در نهایت باعث می‌شود که مقداری از ماده به جای بریده شدن، تغییر شکل پلاستیک پیدا کند و منجر به افزایش مقدار پلیسه شود.

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی میکروشیار بر عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ، تحلیل واریانس برای عرض پلیسه در جدول ۶ ارائه شده است. در این تحلیل، مقایسه انحراف کل نمونه ها با استفاده از آزمون T و تعیین سطح معناداری نیز با استفاده از P- مقدار انجام شده است. P- مقدار کمتر از ۰/۰۵، به عنوان پارامتر معنادار در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می شود P- مقدار برای پارامترهای عرض میکروشیار و فاصله بین میکروشیارها از ۰/۰۵ کمتر است و می توان نتیجه گرفت که این دو پارامتر بر میزان عرض پلیسه تأثیر معنادار دارند. مقدار R^2 برای تابع پاسخ عرض پلیسه، ۷۳/۶ درصد به دست آمده است که نشان دهنده دقت مناسب تابع پاسخ است. در قسمت اثرات متقابل، تعامل دوتایی فاصله و عرض میکروشیارها بسیار نزدیک به آستانه معناداری است ولی سایر تعاملات دوتایی متقابل اثر معنادار ندارند. علاوه بر این، اثر متقابل سه طرفه بین عرض، فاصله و زاویه بر متغیر وابسته معنادار است ($t = -3.052, p = 0.016$). این بدان معناست که اثر متقابل بین عرض و فاصله به سطح زاویه نیز بستگی دارد. در مجموع، این نتایج نشان می دهد که تفسیر اثرات اصلی پارامترهای ورودی به تنهایی کافی نیست و باید تعاملات آنها نیز مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۶: آنالیز واریانس برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی میکروشیار بر عرض پلیسه

Table 6: Analysis of variance (ANOVA) for investigating the effect of the geometric parameters of the micro-grooves on the burr width

منبع تغییرات	برآورد	خطای استاندارد	آماره t	p-مقدار
ثابت	-۱۸۴/۲۷۲	۹۴/۷۲۲	-۱/۹۴۵	۰/۰۸۸
عرض میکروشیار	۰/۹۱۵	۰/۲۷۸	۳/۲۹۵	۰/۰۱۱
فاصله بین میکروشیارها	۰/۷۶۰	۰/۳۱۱	۲/۴۴۶	۰/۰۴۰
زاویه قرارگیری میکروشیار	۰/۴۳۰	۰/۶۷۵	۰/۶۳۷	۰/۵۴۲
فاصله × عرض	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	-۲/۲۵۵	۰/۰۵۴
فاصله × زاویه	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۱/۷۱۸	۰/۱۲۴
فاصله × عرض × زاویه	۱/۹۸۱×۱۰ ^{-۵}	۰/۰۰۰	-۳/۰۵۲	۰/۰۱۶

مقدار R^2 تعدیل شده^۱ برابر با ۵۳.۷۴٪ است؛ یعنی این مدل حدود ۵۴٪ از تغییرات متغیر هدف را توضیح می دهد. این مقدار نشان دهنده آن است که مدل قابل قبول ولی دارای بیش برآزش است، زیرا تعداد نمونه های جمع آوری شده کم و تعداد متغیرهای در نظر گرفته شده زیاد است. برای بررسی اینکه آیا مانده ها^۲ دارای توزیع نرمال هستند یا خیر، آزمون های کلموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک انجام شده است. مقدار آماره کلموگروف-اسمیرنوف برابر با ۰/۱۷۲ با p-مقدار ۰/۲ و مقدار آماره شاپیرو-ویلک برابر با ۰/۹۶۴ با p-مقدار ۰/۷۶۹ به دست آمد. این مقادیر نشان می دهد که مانده ها دارای توزیع نرمال هستند.

برای بررسی نرمال بودن مانده ها، نمودار احتمال نرمال مانده ها و برای بررسی واریانس مانده ها، نمودار مانده ها در مقابل مقادیر برازش شده مورد بررسی قرار گرفت. این نمودارها نرمال بودن مانده ها را مورد تأیید قرار می دهد و نشان می دهد که مانده ها دارای واریانس ثابت هستند.

¹ Adjusted R^2

² Residuals

۳-۲-۲- بهینه سازی عرض پلیسه

هدف از بهینه سازی عرض پلیسه، کمینه کردن مقدار آن است. عرض میکروشیارها، فاصله بین میکروشیارها و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده به عنوان متغیر مستقل و عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده است. در جدول ۷ مقادیر بهینه پیش بینی شده برای پارامترهای ورودی و عرض پلیسه پیش بینی شده ارائه شده است.

جدول ۷: مقادیر بهینه به دست آمده از روش سطح پاسخ و عرض پلیسه پیش بینی شده

Table 7. Optimal values obtained from the response surface methodology and the predicted burr width

عرض میکروشیار (μm)	فاصله بین میکروشیارها (μm)	زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده (درجه)	عرض پلیسه (μm)
۲۰۰	۲۰۰	۰	۷۹

مقادیر ورودی پیش بینی شده بهینه در بین ۱۵ عدد آزمایش اصلی نیست. کمترین میزان اندازه گیری شده عرض پلیسه لبه انتهایی سوراخ ۱۰۲ میکرومتر و مربوط به آزمایش شماره ۱۴ با عرض میکروشیار ۲۰۰ و فاصله بین میکروشیارهای ۳۰۰ میکرومتر با زاویه صفر درجه نسبت به لبه برنده و آزمایش شماره ۱۵ با عرض میکروشیار ۲۰۰ و فاصله بین میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر با زاویه ۴۵ درجه نسبت به لبه برنده است. با انجام آزمایش در شرایط بهینه می توان به عرض پلیسه ۷۹ میکرومتر رسید که نسبت به سوراخ ایجاد شده توسط ابزار معمولی، به میزان ۶۷/۲ درصد کاهش می یابد.

۳-۲-۳- بهینه سازی همزمان سایش ابزار و عرض پلیسه

به دلیل اهمیت همزمان هر دو پارامتر خروجی در این تحقیق یعنی سایش ابزار و عرض پلیسه، بهینه سازی چند هدفه با هدف به حداقل رساندن همزمان این دو پارامتر خروجی نیز با روش سطح پاسخ انجام شده است. جدول ۸ مقادیر بهینه پارامترهای ورودی و مقادیر پیش بینی شده سایش سطح آزاد ابزار و عرض پلیسه هنگام استفاده از این سطوح بهینه را نشان می دهد. لازم به ذکر است که پارامترهای بهینه به دست آمده در جدول ۸ متفاوت از جداول ۴ و ۷ است که بهینه سازی تک هدفه انجام شده بود.

جدول ۸: مقادیر بهینه به دست آمده از بهینه سازی چند هدفه و سایش ابزار و عرض پلیسه پیش بینی شده

Table 8. Optimal values obtained from multi-objective optimization and the predicted tool wear and burr width

عرض میکروشیار (μm)	فاصله بین میکروشیارها (μm)	زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده (درجه)	سایش سطح آزاد ابزار (μm^2)	عرض پلیسه (μm)
۴۰۰	۳۱۷	۹۰	۵۴۰۶۴۴	۱۱۶

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر پارامترهای هندسی میکروشیارهای ایجاد شده روی سطح آزاد مته بر سایش ابزار و پلیسه در فرآیند سوراخکاری آلایژ آلومینیوم بررسی شده است. سه پارامتر عرض میکروشیار، فاصله بین میکروشیارها و زاویه قرارگیری میکروشیارها نسبت به لبه برنده مته به عنوان پارامترهای ورودی و سایش سطح آزاد مته و پلیسه لبه خروجی سوراخ به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش عرض میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر و همچنین با افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، سایش ابزار کاهش یافته است. افزایش زاویه قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه مته از صفر تا ۴۵ درجه باعث افزایش و از ۴۵ تا ۹۰ درجه باعث کاهش سایش ابزار شده است. برای رسیدن به کمترین میزان سایش سطح ابزار، باید از ابزار با عرض میکروشیار ۲۰۰ میکرومتر، فاصله بین میکروشیارهای ۴۰۰ میکرومتر و زاویه قرارگیری عمود بر نوک مته استفاده کرد که نسبت به ابزار بدون طرح، سایش مته را به میزان ۷۷/۶ درصد بهبود می دهد. همچنین با افزایش عرض میکروشیار از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر، عرض پلیسه لبه خروجی سوراخ کاهش و با افزایش از ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر عرض پلیسه افزایش یافته است. با افزایش فاصله بین میکروشیارها از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر عرض پلیسه ثابت است و با افزایش از ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر، عرض پلیسه افزایش یافته است. افزایش زاویه قرارگیری میکروشیار نسبت به لبه برنده مته نیز باعث افزایش عرض پلیسه لبه خروجی سوراخ شده است. برای رسیدن به کمترین میزان عرض پلیسه باید از ابزار با عرض و فاصله بین میکروشیارهای ۲۰۰ میکرومتر و موازی با لبه برنده مته استفاده کرد که عرض پلیسه را نسبت به ابزار بدون طرح به میزان ۶۷/۲ درصد بهبود می دهد.

پژوهش حاضر جزء اولین مطالعات منتشر شده در زمینه بررسی اثر هندسی و تراکم میکروشیار ایجاد شده روی مته بر فرآیند سوراخکاری است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که یافتن هندسه بهینه طرح برای حالت های مختلف سوراخکاری نیاز به انجام پژوهش های بیشتری در این زمینه دارد و می تواند موضوع تحقیقات زیادی در آینده باشد. تحقیق حاضر دارای محدودیت هایی است که در مطالعات آینده باید مورد توجه قرار گیرد. یکی از این محدودیت ها، عدم اندازه گیری و بررسی اثر عمق میکرو طرح ها است که می تواند روی نتایج اثرگذار باشد. استفاده از سایر طرح ها مخصوصاً طرح های ایده گرفته شده از طبیعت یا بایو طرح ها و همچنین انجام آزمایش روی جنس های مختلف قطعه کار باعث گسترش دانش در زمینه سوراخکاری با ابزارهای طرح دار می شود. از دیگر محدودیت های پژوهش حاضر، عدم بررسی نیروی برشی و دمای ماشینکاری و همچنین زمان ماشینکاری (یا تعداد سوراخ ایجاد شده) محدود است. علاوه بر این ها، آزمون های تحقیق حاضر با پارامترهای ماشینکاری ثابت انجام شده است و استفاده از سرعت دورانی مته، نرخ پیشروی، قطر مته و عمق سوراخ های مختلف در سوراخکاری با ابزار طرح دار باعث می شود نتایج جامع تری به دست آید. در کنار این پیشنهادات، استفاده از هندسه و جنس های مختلف مته، انجام آزمون ها در حالت های روانکاری کمینه و معمولی (یا مرطوب) و بررسی اثر تراکم میکرو طرح های ایجاد شده روی حاشیه و سطح مارپیچ مته نیز می تواند در تحقیقات آینده مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

۶- منابع و مراجع

- [1] D.Y. Pimenov, M. Kiran, N. Khanna, G. Pintaude, M.C. Vasco, L.R.R. da Silva, K. Giasin, Review of improvement of machinability and surface integrity in machining on aluminum alloys, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 129(11) (2023) 4743-4779.
- [2] M.A. Makhesana, K. Patel, N. Ghetiya, R. Binali, M. Kuntoğlu, Evaluation of drilling and hole quality characteristics in green machining aluminium alloys: A new approach towards green machining, Journal of Manufacturing Processes, 129 (2024) 176-186.
- [3] A. Salem, H. Hegab, H.A. Kishawy, Experimental investigation of the derivative cutting when machining AISI 1045 with micro-textured cutting tools, Metals, 13(9) (2023) 1587.

- [4] D. Arulkirubakaran, V. Senthilkumar, V. Kumawat, Effect of micro-textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy: an experimental and numerical approach, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54 (2016) 165-177.
- [5] J. Xie, M.-J. Luo, J.-L. He, X.-R. Liu, T.-W. Tan, Micro-grinding of micro-groove array on tool rake surface for dry cutting of titanium alloy, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(10) (2012) 1845-1852.
- [6] S.R. Agari, A. Lakshmikanthan, C.P. Selvan, K.S.V. Sekar, Improvement in the Machining Processes by Micro-Textured Tools during the Turning Process, *Engineering Proceedings*, 61(1) (2024) 2.
- [7] L. Yang, W. Ma, F. Gao, S. Xi, Effect of groove width on micromachine groove texture tribology characteristics of 0Cr17Ni7Al, *Coatings*, 12(8) (2022) 1221.
- [8] S. Niketh, G. Samuel, Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition, *Journal of Manufacturing Processes*, 32 (2018) 254-268.
- [9] S. Niketh, G. Samuel, Surface textured drill tools—An effective approach for minimizing chip evacuation force and burr formation during high aspect ratio machining of titanium alloy, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(4) (2021) 041005.
- [10] T.D. Ling, P. Liu, S. Xiong, D. Grzina, J. Cao, Q.J. Wang, Z.C. Xia, R. Talwar, Surface texturing of drill bits for adhesion reduction and tool life enhancement, *Tribology Letters*, 52(1) (2013) 113-122.
- [11] N.A. Sristi, P.B. Zaman, A review of textured cutting tools' impact on machining performance from a tribological perspective, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133(9) (2024) 4023-4057.
- [12] S. Ullah, Z. Liang, Y. Ma, S. Xing, Y. Du, M. Zhou, J. Xu, T. Zhou, X. Wang, A comprehensive review of mechanical micro-drilling: Toward a tool-process-quality framework from tool fabrication to micro-hole quality, *Journal of Materials Research and Technology*, 42 (2026) 10550-10587.
- [13] E. Öztürk, K. Kadir, Drilling performance of micro-textured twist drill bit for TI-6AL-4V alloy: validated FEM and statistical approaches, *Journal of Manufacturing Processes*, 115 (2024) 342-351.
- [14] Y. Liu, J. Deng, W. Wang, R. Duan, R. Meng, D. Ge, X. Li, Effect of texture parameters on cutting performance of flank-faced textured carbide tools in dry cutting of green Al₂O₃ ceramics, *Ceramics International*, 44(11) (2018) 13205-13217.
- [15] S.H. Musavi, M. Sepehriki, B. Davoodi, S.A. Niknam, Performance analysis of developed micro-textured cutting tool in machining aluminum alloy 7075-T6: assessment of tool wear and surface roughness, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(5) (2022) 3343-3362.
- [16] W. Chang, J. Sun, X. Luo, J.M. Ritchie, C. Mack, Investigation of microstructured milling tool for deferring tool wear, *Wear*, 271(9-10) (2011) 2433-2437.