



Synergistic Effect of Rotating Magnetic Field and Ultrasonic Vibrations in Magnetorheological Abrasive Flow Finishing

Yahya Choopani^{1*}, Mohsen Khajehzadeh², Mohammad Reza Razfar²

¹ Department of Mechanical Engineering, Meybod University, Meybod, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: This study employed rotating magnetic fields and ultrasonic vibrations as an effective solution to overcome the limitations associated with the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process. To this end, first, an industrial prototype of the MRAFF setup was designed and fabricated. After preparing the magnetorheological polishing (MRP) fluid, a rotating magnetic field was applied, and subsequently, ultrasonic vibrations were applied to the workpiece in a direction perpendicular to the fluid flow. In order to evaluate the efficiency of the proposed technique, the effect of processing time on three indices, i.e., surface roughness rate, finishing rate, and material removal rate, in aluminum alloy 2024 tubes was investigated. The results indicated that during the first 10 minutes of processing, besides a decrease observed in the surface roughness ratio, the finishing rate and material removal rate also increased; however, due to the destructive effects of abrasive particles, the continuation of the process caused a re-increase in the surface roughness. Microscopic images not only confirmed these findings but also indicated that under optimal conditions, in addition to creating a uniform surface, the proposed technique reduced the roughness of the inner surface of the tubes by 98%. As a result, this method offers a promising prospect as an efficient solution for finishing and deburring inner surfaces, especially in longer tubes.

Review History:

Received: Jul. 09, 2025

Revised: Jul. 26, 2025

Accepted: Aug. 19, 2025

Available Online: Aug. 24, 2025

Keywords:

Rotating Magnetic Field

Ultrasonic Vibrations

Surface Roughness Ratio

Finishing Rate

Material Removal Rate

1- Introduction

Abrasive flow machining (AFM) was developed in the 1960s by Extrude Hon for the deburring of phantom jet parts [1]. The AFM process is an advanced process based on flowing abrasive viscoelastic media over a workpiece under pressure for chipping and surface finishing [2] and [3]. Today, this technology is widely used in the medical industry (knee prostheses) [4], aerospace (engine blades) [5], automotive industry (injector nozzles) [6], and surface modification of 3D printed parts [7]. Many advantages of AFM have been reported [8]. Nonetheless, the low material removal rate and lack of control over particle movement are its main limitations, which have led to the development of hybrid techniques, such as combining it with ultrasonic vibrations and using a magnetic field.

A review of the literature shows that there are scattered studies at the national level on the separate application of magnetic fields [9], and the simultaneous combination of rotating magnetic fields and ultrasonic vibrations in the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process has so far been neglected in the research at the national level. Even in international studies, this issue has been addressed in a limited and unsystematic manner [10].

The present research systematically studies the interaction between these two factors and their synergistic effect on the finishing efficiency of aluminum alloy 2024 tubes.

2- Materials and methods

The MRAFF process, using magnetic fields and ultrasonic vibrations, consists of five main parts, including the abrasive flow finishing (AFF) device, permanent magnet rotation mechanism, ultrasonic vibration system, workpiece fixture, and the magnetorheological polishing (MRP) fluid, a schematic of which is presented in Fig. 1.

To make the MRP fluid in this study, iron particles with an average grain size of 100 microns (26.6% by volume), 180-grit Silicon Carbide (SiC) abrasive (13.4% by volume), and a paraffin oil-containing viscoplastic carrier (48% by volume) and the RENOLIT MP grease (12% by volume) were used.

In this study, aluminum alloy 2024 tubes with an inner diameter of 12 mm, an outer diameter of 18 mm, and a length of 180 mm were used as workpieces. The material removal rate was calculated by measuring the difference in mass of the samples using a digital scale with an accuracy of 0.01 mg. The surface roughness was also measured at five different points perpendicular to the machining flow direction using a MarSurf PS 10 roughness tester.

*Corresponding author's email: Choopani@meybod.ac.ir



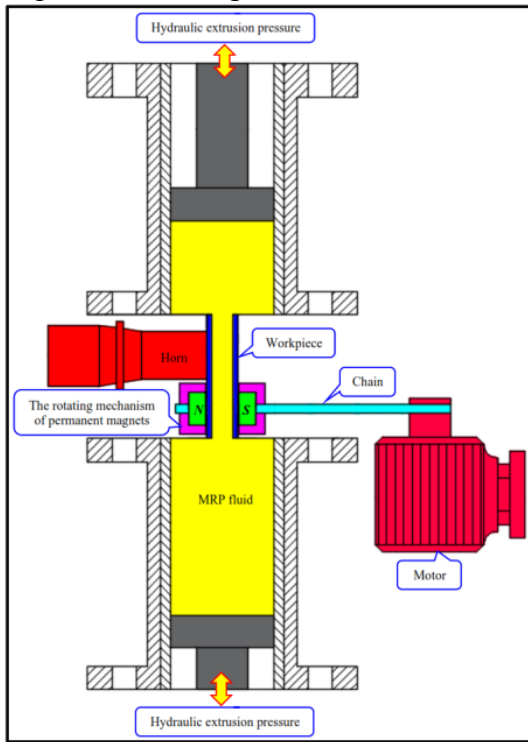


Fig. 1. Principles of the MRAFF process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations.

3- Results and discussion

3- 1- The effect of processing time on output parameters

Fig. 2 (a-b) shows the effect of the processing time of the suggested process on the surface roughness ratio and the finishing rate. The figure clearly shows that initially, due to the large number of abrasive particles colliding with the surface roughness peaks, the processing is remarkably effective, leading to a rapid reduction in the surface roughness ratio (to 0.054 in the first 5 minutes) and an increase in the finishing rate (to 0.06). This process reaches its peak between 5 and 10 minutes, resulting in the maximum reduction in roughness (up to 0.09) and the highest increase in finishing rate (up to 0.083). However, after 10 minutes, with the surface roughness removed, the process efficiency decreases and the trend reverses; so that by 15 minutes, the surface roughness increases up to 0.044 and the finish rate decreases down to 0.054, indicating a decline in surface quality.

As shown in Fig. 2-c, as the processing time of the suggested process increases, the material removal rate increases significantly. This increase is attributable to the combined motion of the abrasive particles, which undergo a helical motion (caused by the reciprocating flow of the MRP fluid and the rotation of the magnets) and a sinusoidal motion (due to the vibration of the workpiece). This motion combination causes the particles to collide with surface irregularities at a certain angle. As time increases, the number of these collisions increases, and the vibration of

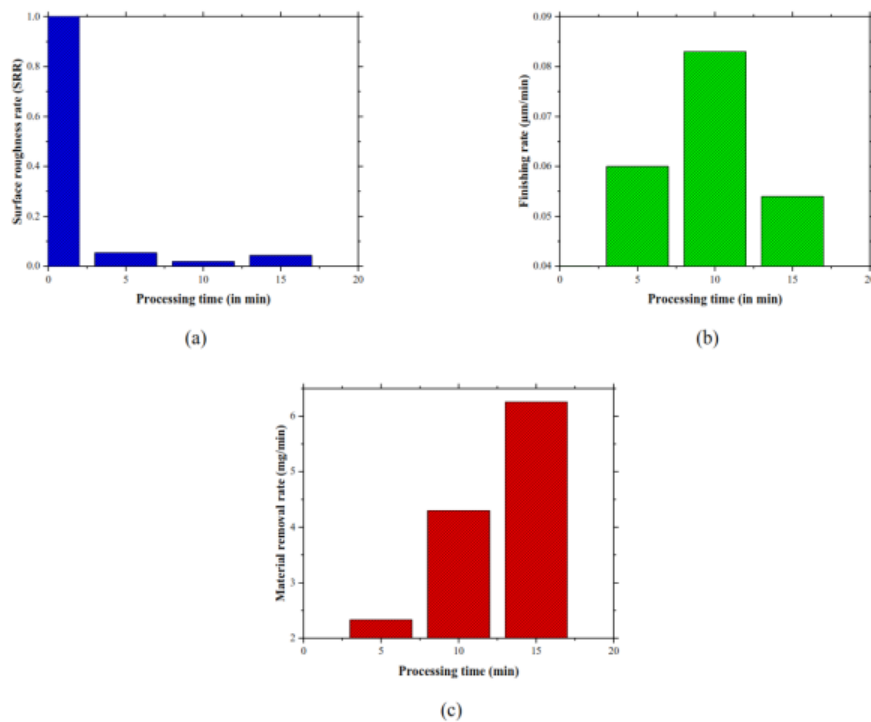


Fig. 2. Effect of processing time of the proposed process on (a) surface roughness ratio, (b) finishing rate ($\mu\text{m}/\text{min}$), and (c) material removal rate (mg/min).

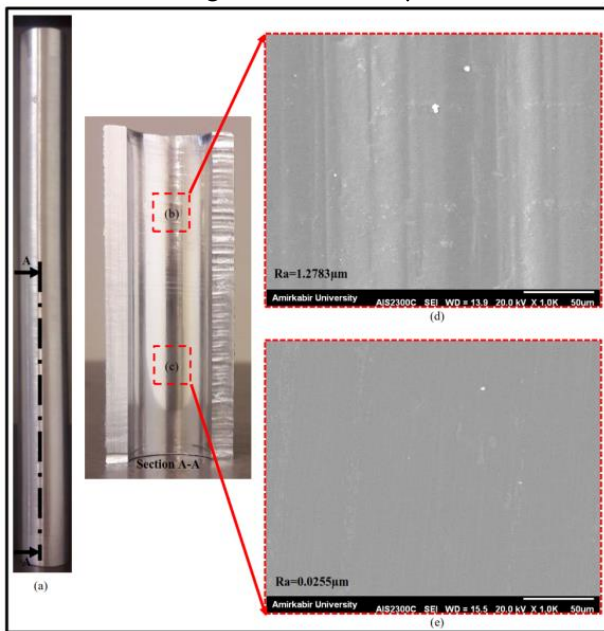


Fig. 3. Actual images and SEM images of the surface morphology of the samples: (a) a 2024 aluminum alloy sample, (b and d) after initial machining, and (c and e) after the proposed process.

the workpiece also increases the depth of penetration of the particles by applying a radial force. After 5 minutes, the removal rate reaches its maximum at that stage (2.33 mg/min), because the maximum surface roughness is provided. As the surface becomes more uniform at 10 minutes, the rate reaches 3.4 mg/min, but by 15 minutes, this value increases to 6.26, indicating a positive effect of increasing time on the penetration depth of particles and an increase in the total shear force due to extrusion pressure, rotation of magnets, and ultrasonic vibrations.

3- 2- Comparison of surface morphology before and after finishing

Comparing actual images (Figs. 3-b and 3-c) shows that the initial surface features significant roughness after manual reaming and drilling to the extent that the surrounding environment has a blurred reflection; however, after polishing through the proposed process, a smooth and uniform surface is obtained that provides a clear reflection of the surrounding environment. The scanning electron microscopy (SEM) images (Figs. 3-d and 3-e) also confirm that the initial operation caused defects, such as grooves and scratches, and increased the surface roughness to 1.2783 μm ; however, the suggested process completely eliminated these defects and reduced the roughness to 0.0255 μm .

4- Conclusion

The findings show that the highest improvement in surface quality occurs within the first 10 minutes of processing, reducing the surface roughness ratio down

to 0.09 and increasing the finishing rate up to 0.083. The material removal rate improves to 6.26 mg/min at 15 minutes. Microscopic images confirm a 98% reduction in roughness and the creation of a uniform surface.

References

- [1] A. Fletcher, J. Hull, J. Mackie, S. Trengove, Computer modelling of the abrasive flow machining process, in: Proceedings of International Conference on Surface Engineering: Toronto, Canada, (1990) 592-601.
- [2] P. Davies, A. Fletcher, The assessment of the rheological characteristics of various polyborosiloxane/grit mixtures as utilized in the abrasive flow machining process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 209(6) (1995) 409-418.
- [3] R. Williams, K. Rajurkar, Stochastic modeling and analysis of abrasive flow machining, Trans the American Society of Mechanical Engineers (ASME), Journal of Engineering for Industry, 114 (1) (1992) 74–81.
- [4] M. Sarkar, V. Jain, Nanofinishing of freeform surfaces using abrasive flow finishing process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(9) (2017) 1501-1515.
- [5] Y. Fu, X. Wang, H. Gao, H. Wei, S. Li, Blade surface uniformity of blisk finished by abrasive flow machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(5) (2016) 1725-1735.
- [6] D. Jung, W. Wang, S. Hu, Microscopic geometry changes of a direct-injection diesel injector nozzle due to abrasive flow machining and a numerical investigation of its effects on engine performance and emissions, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 222(2) (2008) 241-252.
- [7] J. Guo, C. Song, Y. Fu, K.H. Au, C.W. Kum, M.H. Goh, T. Ren, R. Huang, C.-N. Sun, Internal surface quality enhancement of Selective Laser Melted Inconel 718 by abrasive flow machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 142(10) (2020) 101003.
- [8] N. Dixit, V. Sharma, P. Kumar, Research trends in abrasive flow machining: A systematic review, Journal of Manufacturing Processes, 64 (2021) 1434-1461.
- [9] M.R. Shabgard, F. Arabzadeh Tabriz, A. Gholipour, Experimental study of the effects of abrasive particle size and workpiece hardness in Magnetic abrasive flow Machining, Modares Mechanical Engineering, 16(8) (2016) 131-138, (in Persian).
- [10] Y. Choopani, M.R. Razfar, M. Khajehzadeh, M. Khosrojerdi, Design and development of ultrasonic-assisted-rotational magnetorheological abrasive flow finishing (UA-RMRAFF) process, Applied Acoustics, 197 (2022) 108950.



اثر هم‌افزایی میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال

یحیی چوپانی^{۱*}، محسن خواجه‌زاده^۲، محمدرضا رازفر^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه میبد، میبد، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲

کلمات کلیدی:

میدان مغناطیسی دوار

ارتعاشات فراصوت

نسبت زبری سطح

نرخ پرداخت کاری

نرخ برداشت ماده

خلاصه: در این مطالعه، از میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت به‌عنوان راه‌حلی مؤثر برای رفع چالش‌های فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. برای تحقق این هدف، ابتدا یک نمونه صنعتی از فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال طراحی و ساخته شد. پس از آماده‌سازی سیال پولیشکاری مگنتورئولوژیکال، میدان مغناطیسی دوار اعمال شد و در نهایت، ارتعاشات فراصوت در جهت عمود بر جریان سیال به قطعه کار اضافه گردید. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، تأثیر زمان پردازش بر سه شاخص نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده در لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ بررسی شد. نتایج نشان داد که در ۱۰ دقیقه نخست پردازش، علاوه بر کاهش نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده نیز افزایش یافت؛ اما تداوم فرآیند، به دلیل اثرات مخرب ذرات ساینده، منجر به افزایش مجدد زبری سطح شد. تصاویر میکروسکوپی نه تنها این یافته‌ها را تأیید کردند، بلکه آشکار ساختند که روش پیشنهادی در شرایط بهینه، علاوه بر ایجاد سطحی یکنواخت، زبری سطح داخلی لوله‌ها را تا ۹۸٪ کاهش داده است. در نتیجه، این روش به‌عنوان راهکاری کارآمد برای پرداخت و پلیسه‌گیری سطوح داخلی، به‌ویژه در لوله‌های بلند، چشم‌اندازی امیدبخش ارائه می‌دهد.

۱- مقدمه

ماشین‌کاری جریان ساینده^۱ یکی از روش‌های پیشرفته ماشین‌کاری است که در دهه ۱۹۶۰ توسط شرکت اکستروود هون^۲ برای پلیسه‌گیری بلوک‌های کنترل هیدرولیک در جت‌های فانتوم^۳ توسعه یافته است [۱]. این فرآیند شامل یک دستگاه برای تأمین فشار اکستروژن بر واسطه^۴ ساینده، یک فیکسچر برای نگهداری قطعه کار و یک واسطه ساینده متشکل از ذرات ساینده معلق در یک حامل ویسکوالاستیک است [۲]. واسطه ساینده تحت فشار اکستروژن به‌صورت رفت و برگشتی از داخل قطعه کار عبور کرده و با سایش ناهمواری‌های سطح، براده‌برداری را انجام می‌دهد [۳]. امروزه از ماشین‌کاری جریان ساینده در صنایع مختلفی مانند پزشکی (پروتزهای زانو) [۴]، هوافضا (پره‌های موتور هواپیما) [۵]، خودروسازی (نازل‌های انژکتور

دیزل) [۶] و اصلاح سطح قطعات تولیدشده به روش ساخت افزایشی [۷] استفاده می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به پرداخت همزمان سطوح داخلی و خارجی با هندسه‌های پیچیده، ایجاد سطح یکنواخت، عدم ایجاد تنش‌های پسماند کششی و امکان پرداخت چندین سطح به‌طور همزمان اشاره نمود [۸]. با این حال، پایین بودن سرعت براده‌برداری و عدم کنترل حرکت ذرات ساینده از چالش‌های اصلی این فرآیند محسوب می‌شوند. برای رفع این محدودیت‌ها، روش‌های هیبریدی مانند ترکیب ماشین‌کاری جریان ساینده با ارتعاشات فراصوت برای افزایش نرخ براده‌برداری و استفاده از میدان مغناطیسی برای کنترل بهتر ذرات ساینده توسعه یافته‌اند.

برای افزایش نرخ برداشت ماده در فرآیند ماشین‌کاری جریان ساینده، می‌توان به مطالعه ونکناش و همکاران [۹] اشاره کرد. در این پژوهش، عملکرد فرآیند هیبریدی ماشین‌کاری جریان ساینده به کمک فراصوت^۵ برای پرداخت کاری سطح داخلی قطعات استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. پژوهشگران حالت‌های مختلف اعمال ارتعاشات

1. Abrasive flow machining (AFM)
2. Extrude Hone
3. Phantom jets
4. Media

5. Ultrasonic assisted abrasive flow machining (UAAFMM)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Choopani@meybod.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال، سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال^۷ حاوی ساینده‌ها، ذرات آهن و روغن پارافین، علاوه بر حرکت رفت و برگشتی، حرکت دورانی نیز بر روی ناهمواری‌های سطح قطعه کار انجام می‌دهد. این امر باعث افزایش طول تماس دانه‌های ساینده فعال با زبری‌های سطح می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال روشی کاربردی و مؤثر برای پرداخت کاری است که زبری سطح را تا ۲۶/۳ نانومتر کاهش و میزان برداشت ماده را تا ۴۱ میلی گرم در ۱۵ دقیقه افزایش می‌دهد. همچنین، این فرآیند بافت سطحی مناسبی ایجاد می‌کند که ظرفیت نگهداری روغن را بهبود بخشیده و خواص تریبولوژیکی سطح را ارتقا می‌بخشد. در تلاشی دیگر، چوبانی و همکاران [۱۴] فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک ارتعاشات فراصوت^۸ را توسعه دادند تا زمان پرداخت کاری را کاهش دهند. نتایج نشان داد که این روش نه تنها نرخ برداشت ماده را افزایش می‌دهد، بلکه سطحی یکنواخت با زبری ۲۵/۵ نانومتر (در حد آینه) و بدون عیوب سطحی ایجاد می‌کند. همچنین، فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک ارتعاشات فراصوت در مقایسه با فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال (بدون ارتعاشات فراصوت)، اصلاح سطح را با سرعت بیشتری انجام می‌دهد. در پژوهش اخیر، دیکسیت و همکاران [۱۵] فرآیند ماشین کاری جریان ساینده مغناطیسی به کمک فراصوت^۹ را توسعه دادند تا عملکرد پرداخت کاری را بهبود بخشند. نتایج نشان داد که ارتعاشات فراصوت با فرکانس بالا، حرکت ذرات ساینده را تقویت می‌کند و در نتیجه، برداشت ماده بهتر و کیفیت سطح بالاتری حاصل می‌شود. تحت شرایط بهینه پارامترهای فرآیند، پرداخت سطح نمونه‌ها تا ۵۴/۴۲ درصد بهبود یافت و حداکثر میزان برداشت ماده نیز به ۲۶/۶۲ میلی گرم رسید.

در مطالعات داخلی، پژوهش‌های محدودی در زمینه بهبود عملکرد فرآیند ماشین کاری جریان ساینده انجام شده است. به عنوان مثال، شبگرد و همکاران [۱۶] تأثیر سرعت دورانی قطعه کار، اندازه ذرات ساینده و سختی قطعه کار را بر ماشین کاری دورانی جریان ساینده^{۱۰} روی فولاد ابزار گرم کار بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش سرعت دورانی، نرخ برداشت ماده را

فراصوت به قطعه کار، واسطه ساینده و ترکیبی از هر دو را بررسی کردند و دریافتند که حالت محوری در ماشین کاری جریان ساینده به کمک فراصوت نه تنها بازدهی فرآیند را افزایش داده، بلکه ناهمواری‌های سطح را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که پرداخت سطح نمونه‌ها تا ۸۵/۱۲ درصد بهبود یافته و حداکثر مقدار برداشت ماده به ۲۱/۹۳ میلی گرم رسیده است. در مطالعه‌ای دیگر، وانگ و همکاران [۱۰] فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده به کمک فراصوت چرخشی^۱ را برای بهبود عملکرد فرآیند توسعه دادند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نشان داد که فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده به کمک فراصوت چرخشی در دامنه ارتعاشات فراصوت بالاتر، علاوه بر بهبود کیفیت سطح، بالاترین نرخ برداشت ماده را نیز به دست می‌آورد.

برای کنترل بهتر حرکت ذرات ساینده در فرآیند ماشین کاری جریان ساینده، می‌توان به مطالعه سینگ و شان [۱۱] اشاره نمود که با توسعه فرآیند ماشین کاری جریان ساینده مغناطیسی^۲، دقت پرداخت کاری را از طریق کنترل ذرات ساینده مغناطیسی بهبود بخشیدند. آن‌ها با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، رفتار ذرات ساینده حاوی ذرات فرومغناطیس را بهینه کرده و دریافتند که این روش نه تنها کنترل حرکت ذرات ساینده مغناطیسی را افزایش می‌دهد، بلکه راندمان پرداخت کاری را نیز بهبود می‌بخشد. در تحقیقی دیگر، داس و همکاران [۱۲] فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال^۳ را برای نانوپرداخت کاری سطوح پیچیده معرفی کردند. این فرآیند ترکیبی از ماشین کاری جریان ساینده و پرداخت کاری مگنتورئولوژیکال^۴ است که در آن از سیالی حاوی ذرات ساینده و ذرات آهن کربونیل^۵ استفاده می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی، ویسکوزیته سیال تغییر کرده و کنترل دقیق تری روی پرداخت کاری ایجاد می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی و تعداد سیکل‌های پرداخت کاری، کاهش زبری سطح به صورت معناداری بهبود می‌یابد. در مطالعه دیگری، چوبانی و همکاران [۱۳] فرآیند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال^۶ را برای نانو پرداخت کاری لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ ارائه کردند. در این روش، با ایجاد یک میدان مغناطیسی چرخشی ناشی از دوران آهنرباهای دائم

7. Magnetorheological polishing (MRP)
8. Ultrasonic assisted-rotational magnetorheological abrasive flow finishing (UA-RMRAFF)
9. Ultrasonic-assisted magnetic abrasive flow machining (UAMAFM)
10. Rotational abrasive flow machining (RAFM)

1. Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing (RUA-AFF)
2. Magneto abrasive flow machining (MAFM)
3. Magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF)
4. Magnetorheological finishing (MRF)
5. Carbonyl iron particles (CIPs)
6. Rotational-magnetorheological abrasive flow finishing (R-MRAFF)

۲- اصول فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت

شکل ۱ مکانیزم پرداخت کاری سطح در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این فرآیند، ابتدا یک میدان مغناطیسی دوار توسط آهنرباهای دائم در اطراف سطح خارجی قطعه کار لوله‌ای ایجاد می‌شود که بر رفتار سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال (متشکل از ذرات آهن، ساینده کاربید سیلیسیم^۴ و حامل ویسکوپلاستیک) اثر می‌گذارد. همزمان، ارتعاشات فراصوت از طریق یک هورن^۵ که عمود بر جریان سیال قرار دارد به قطعه کار اعمال می‌شود. در این سیستم، هر دانه ساینده تحت تأثیر سه مؤلفه نیرو و سرعت عمل می‌کند: نیروی محوری^۶ و سرعت محوری^۷ ناشی از فشار اکستروژن هیدرولیک، نیروی برشی مماسی^۸ و سرعت مماسی^۹ حاصل از چرخش آهنرباها، و نیروی شعاعی^{۱۰} و سرعت قطعه کار^{۱۱} ناشی از ارتعاشات فراصوت. ترکیب این عوامل باعث می‌شود دانه‌های ساینده با سرعت برآیند^{۱۲} و تحت نیروی برآیند^{۱۳} به صورت مکرر و با زاویه^{۱۴} آلفا (زاویه برخورد) به سطح برخورد کنند. بنابراین، سرعت برآیند، نیروی برآیند، و زاویه برخورد روی ذره ساینده (شکل ۱-د) را می‌توان به ترتیب از روابط (۱)، (۲) و (۳) محاسبه نمود:

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + V_w^2} \quad (1)$$

$$F_R = \sqrt{F_a^2 + F_r^2} \quad (2)$$

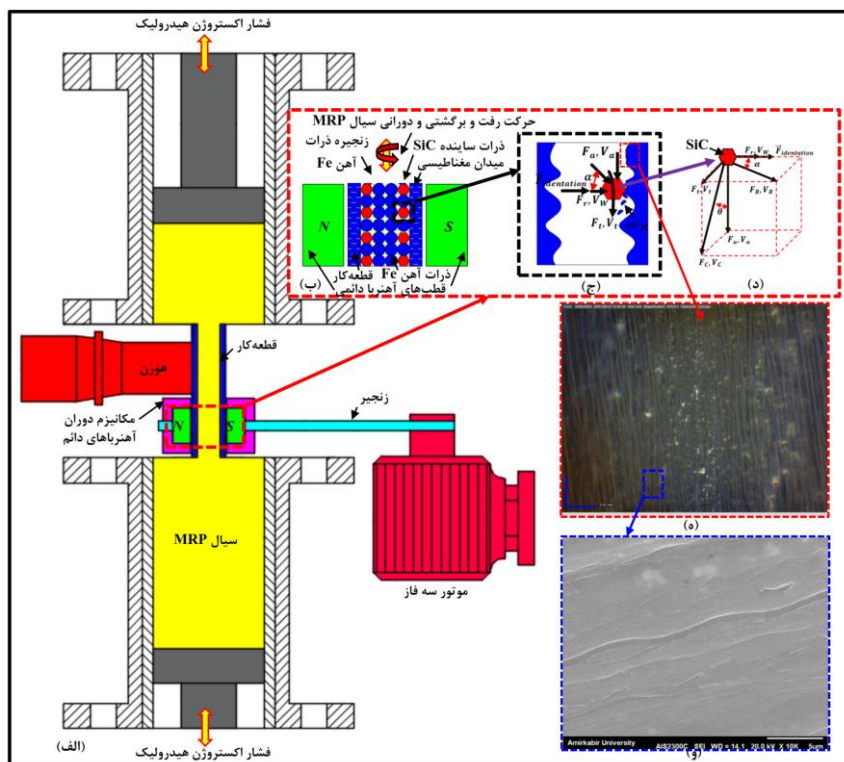
$$\alpha = \tan^{-1}(V_a/V_w) \quad (3)$$

بالا برده و زبری سطح را کاهش می‌دهد. همچنین، ذرات ریزتر ساینده موجب کاهش نرخ براده‌برداری و بهبود صافی سطح شدند، درحالی‌که افزایش سختی قطعه کار نرخ برداشت ماده را کاهش داد اما کیفیت سطح را بهبود بخشید. در مطالعه‌ای مشابه [۱۷]، تأثیر شدت میدان مغناطیسی، اندازه ذرات و سختی قطعه کار بر ماشین کاری جریان ساینده مغناطیسی^۱ بررسی شد. افزایش شدت میدان مغناطیسی منجر به بهبود همزمان نرخ برداشت ماده و صافی سطح شد. همچنین، ذرات ریزتر ساینده نتایج مشابهی داشتند و افزایش سختی قطعه کار نیز تأثیراتی مشابه پژوهش قبلی نشان داد. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب پارامترهای بهینه در فرآیندهای ماشین کاری جریان ساینده تأکید دارند.

بررسی جامع پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات داخلی در زمینه کاربرد جداگانه میدان مغناطیسی پراکنده هستند [۱۷] اما ترکیب همزمان میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال تاکنون در تحقیقات داخلی مورد توجه قرار نگرفته است. حتی در سطح بین‌المللی نیز، مطالعات محدودی مانند پژوهش چوپانی و همکاران [۱۴] به بررسی اولیه این موضوع پرداخته‌اند، اما اثر ترکیبی این دو روش به صورت نظام‌مند و جامع تحلیل نشده است. این پژوهش به مطالعه سیستماتیک برهم‌کنش میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت و تأثیر هم‌افزایی آن‌ها بر راندمان پرداخت کاری در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال می‌پردازد. برای دستیابی به این هدف، یک نمونه صنعتی از فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال طراحی و ساخته شد و پس از آماده‌سازی سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال، میدان مغناطیسی دوار اعمال گردید و همزمان ارتعاشات فراصوت در جهت عمود بر جریان سیال به قطعه کار افزوده شد. نتایج اولیه حاکی از کاهش چشم‌گیر زمان پرداخت کاری و بهبود قابل توجه پرداخت سطح است، به‌طوری‌که ترکیب این دو روش منجر به کاهش ۹۸٪ در زبری سطح نسبت به روش‌های متداول شده است. عملکرد این روش با بررسی تأثیر زمان پردازش بر نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده در لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ ارزیابی شد. همچنین، ویژگی‌های سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری^۲ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ مورد تحلیل دقیق قرار گرفت. این تحقیق با پر کردن شکاف موجود در ادبیات موضوع، دستاوردهای نوینی در بهینه‌سازی فناوری پرداخت سطح ارائه می‌دهد.

1. Magnetic abrasive flow machining (MAFM)
2. Optical microscope
3. Scanning electron microscopy (SEM)

4. Silicon carbide (SiC)
5. Horn
6. Axial force (F_a)
7. Axial velocity (V_a)
8. Tangential cutting force (F_t)
9. Tangential cutting velocity (V_t)
10. Radial force (F_r)
11. Workpiece velocity (V_w)
12. Resultant velocity (V_R)
13. Resultant force (F_R)
14. Angle of α



شکل ۱. اصول فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت: (الف) شماتیک کلی فرآیند، (ب) شماتیک ناحیه پرداخت کاری، (ج) نیروها و مولفه‌های سرعت اعمال شده بر ذره ساینده در ناحیه پرداخت کاری، (د) نمودار جسم آزاد نیروها و سرعت‌های وارد بر ذره ساینده، (ه) تصویر میکروسکوپ نوری از بافت سطح پرداخت شده و (و) تصویر میکروسکوپی از بافت سطح پرداخت شده.

Fig. 1. Principles of the magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations: a) overall schematic of the process, b) schematic of the finishing zone, c) forces and velocity components applied to the abrasive particle in the finishing zone, d) free-body diagram of the forces and velocities acting on the abrasive particle, e) optical microscope of the finished surface texture, and f) microscopic image of the finished surface texture.

$$\vec{F}_c = \vec{F}_a + \vec{F}_t + \vec{F}_R \quad (4)$$

برای تایید مفاهیم مطرح شده و درک عمیق تر عملکرد پرداخت کاری فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت، بافت سطح قطعه کار پس از پرداخت کاری با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل‌های ۱-ه و ۱-و بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که ذرات ساینده در این فرآیند تحت تاثیر دو مکانیزم حرکتی همزمان عمل می‌کنند: (۱) حرکت مارپیچی ناشی از حرکت رفت و برگشتی (بر اثر فشار اکستروژن هیدرولیک) و حرکت دورانی (بر اثر میدان مغناطیسی دوار) سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال، و (۲) حرکت نوسانی با الگوی سینوسی که در اثر ارتعاشات اعمال شده به

نیروی فرورفتگی^۱ که از ترکیب نیروی مغناطیسی، فشار اکستروژن هیدرولیکی و ارتعاشی حاصل می‌شود، عمق نفوذ ساینده‌ها را افزایش می‌دهد، درحالی‌که نیروی محوری مسئول تشکیل میکرو براده‌ها و نیروی برشی مماسی نقش اصلی در حذف ناهمواری‌ها را ایفا می‌کند. این مکانیزم دوگانه از یک سو با حرکت سینوسی دانه‌ها در مسیر مارپیچی، تعامل آن‌ها با سطح را افزایش داده و نرخ برداشت ماده را بهبود می‌بخشد، و از سوی دیگر با ایجاد الگوی هاشور متقاطع روی سطح، ظرفیت نگهداری روغن و خواص تریبولوژیکی را ارتقا می‌دهد. نیروی برشی کل^۲ در این سیستم از جمع برداری سه مؤلفه نیروی محوری، نیروی برشی مماسی و نیروی برآیند حاصل می‌شود (معادله (۴)):

1. Indentation force ($F_{\text{indentation}}$)
2. Total cutting force (F_c)

تجهیزاتی شامل گپ سنسور^۴ مدل پی-یو-۰۵ در ۱ پی سی^۵، تبدیل کننده مدل ای ای سی-۵۵۰۵^۶، اسیلوسکوپ^۷ مدل ۴۲۲-۱۱، منبع تغذیه مدل ام پی اس-۳۰۰-ال-۳^۸ و واحد کنترل کامپیوتری اندازه گیری شد که نتیجه آن ثبت دامنه ای معادل ۱۰ میکرومتر در فرکانس تشدید ۲۷۷۷۷ هرتز بود (شکل ۳).

۳-۲- دستگاه و روش پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت

دستگاه و روش پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوت شامل پنج بخش اصلی از جمله دستگاه پرداختکاری جریان ساینده^۹، مکانیزم چرخش آهنرباهای دائمی، سیستم ارتعاشات فراصوت، فیکسچر قطعه کار و سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال است که جزئیات آن در شکل ۴ نشان داده شده است. دستگاه پرداختکاری جریان ساینده شامل یک سازه فولادی برای نصب اجزاء، یک پاور یونیت هیدرولیک (شامل موتور سه فاز، شیرهای برقی و پمپ) برای تأمین فشار اکستروژن، جکهای هیدرولیکی بالا و پایین جهت اعمال فشار اکستروژن بر سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال، سیلندرهایی محفظه سیال، میکرو سوئیچها برای تنظیم کورس جکها، مکانیزم بازوی متحرک و پنل کنترل است. مکانیزم چرخش آهنرباهای دائم متشکل از یک موتور سه فاز (۳۷/۰ کیلووات، ۱۴۰۰ دور بر دقیقه)، یک درایو فرکانس متغیر^{۱۰}، چهار آهنربای دائمی نوع نئودیمیم-آهن-بور^{۱۱} گرید ان ۵۲۳ با ابعاد ۲۰ در ۲۰ در ۱۰ میلی متر، فیکسچر آلومینیومی نگه دارنده آهنرباها، بلبرینگ کف گرد و سیستم چرخ زنجیر با نسبت انتقال ۱:۲ است. سیستم ارتعاشات فراصوت نیز شامل یک منبع تغذیه فراصوت مدل کی آراف ۱۵۰۰^{۱۳}، ترانسدیوسر پیزوالکتریک، هورن ساخته شده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده برای تقویت ارتعاشات، فیکسچرهای هورن و قطعه کار و همچنین یک واحد کنترل کامپیوتری برای پایش دامنه ارتعاشات است. فیکسچر قطعه کار از جنس پلی آمید ضدسایش ساخته شده تا در شرایط دینامیک، موقعیت دهی و تزریق بهینه سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال را ممکن سازد. سیال پولیش کاری

قطعه کار ایجاد می شود. بر اساس مشاهدات انجام شده (شکل های ۱-۵، ۱-۱ و ۱-د)، ذرات ساینده ضمن حرکت در این مسیر ترکیبی (مارپیچی-سینوسی)، به صورت متناوب با ناهمواری های سطحی در زاویه مشخصی برخورد می نمایند. این مکانیسم منجر به ایجاد الگوی متقاطع مورب بر روی بافت سطح می شود که مشابه فرآیند هونینگ، اما با دقت و پرداخت سطحی بالاتر است. شیارهای متقاطع تشکیل شده قادر به حفظ روغن و ایجاد لایه ای روان کار دائمی هستند که بهبود روانکاری، کاهش اصطکاک و ارتقای خواص تریبولوژیکی سطح را در پی دارد. این ویژگی منحصربه فرد به ویژه در کاربردهای حساسی مانند سیلندرهایی موتور، بوش ها و سطوحی که نیازمند روانکاری مطلوب و افزایش عمر قطعه هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

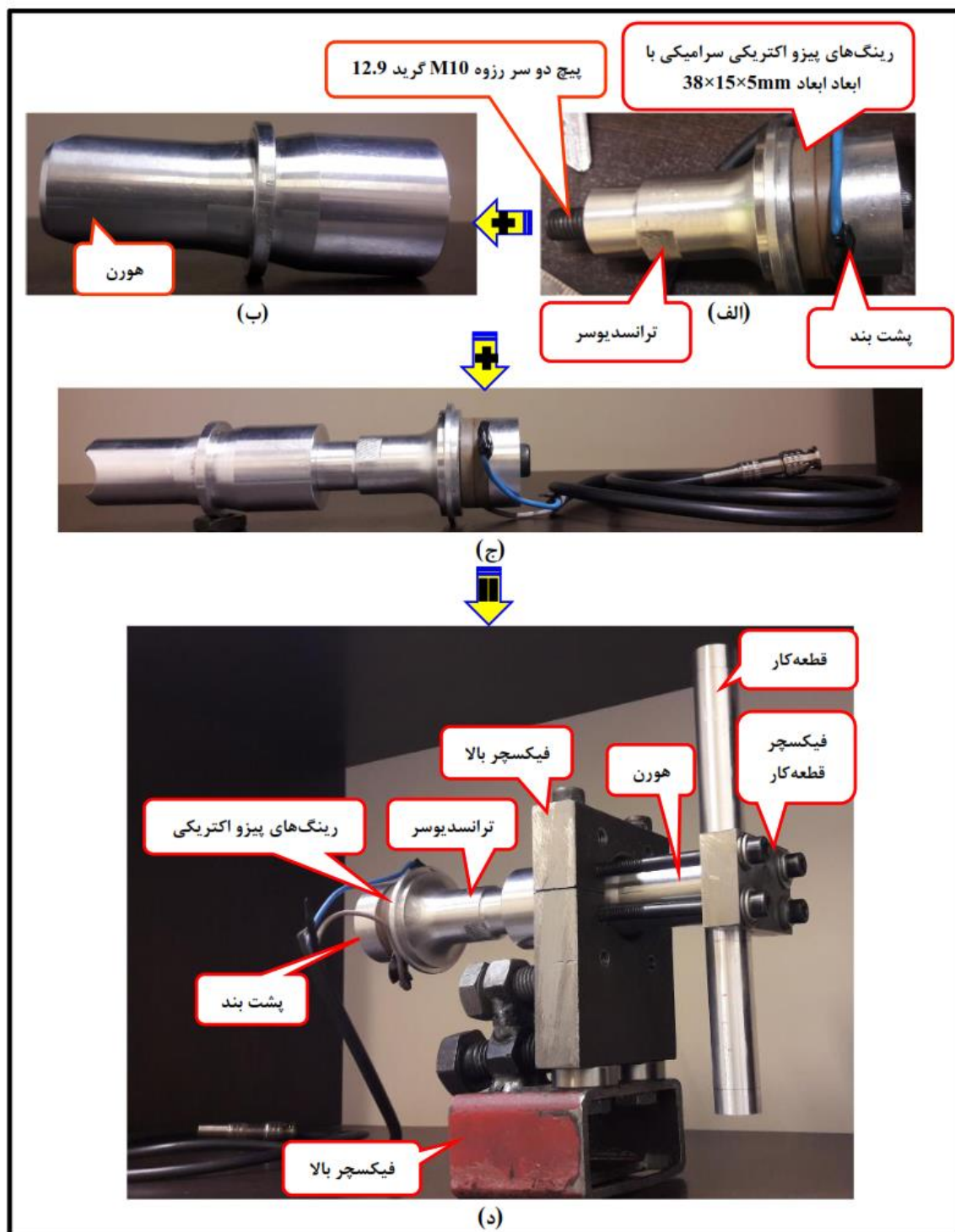
۳-۳ مواد و روش های آزمایشگاهی به همراه جزئیات اجرا

۳-۱- سیستم ارتعاشات فراصوت در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال

در این پژوهش، ارتعاشات فراصوت عمود بر جهت جریان سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال در چهار مرحله به قطعه کار اعمال شد که جزئیات آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در مرحله اول، از یک ترانسدیوسر فراصوت ساخته شده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده استفاده شد که شامل پیزوالکتریک های سرامیکی (دو عدد با ابعاد ۳۸ در ۱۵ در ۵ میلی متر)، پشت بند، بوستر، الکترودهای مسی و پیچ های ام ۱۰^۱ با درجه استحکام ۱۲/۹ بود و در فرکانس تشدید ۲۷۷۷۷ هرتز عمل می کرد (شکل ۲-الف). مرحله دوم شامل طراحی و ساخت دقیق یک هورن فراصوت از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات حرارتی شده با ماشین کاری سی ان سی^۲ بود که به گونه ای طراحی شد تا اتصال به قطعه کار با حداکثر دامنه ارتعاش در سر هورن (محل اتصال به قطعه) و قرارگیری فلانچ وسط آن در گره ارتعاشی انجام شود (شکل ۲-ب). در مرحله سوم، ترانسدیوسر و هورن با پیچ مغزی ام ده به هم متصل شدند (شکل ۲-ج) و هورن با فیکسچرهای مخصوص در محل گره ارتعاشی ثابت شد (شکل ۲-د). همچنین، برای نگهداری قطعه کار در شرایط دینامیک و انتقال ارتعاش بهینه، فیکسچری متناسب با هندسه قطعه کار و هورن طراحی شد که با چهار پیچ ام ۶^۳ به فیکسچر هورن بسته شد. در مرحله چهارم، دامنه ارتعاش در ناحیه پرداخت کاری با استفاده از

4. Gap sensor
5. PU-05×1pc
6. AEC-5505
7. Oscilloscope
8. MPS-3005L-3
9. Abrasive flow finishing (AFF)
10. Variable frequency drive (VFD)
11. Neodymium-Iron-Boron (Nd-Fe-B)
12. N52
13. KRF1500

1. M10
2. Computer numerical control (CNC)
3. M6



شکل ۲. چیدمان سیستم ارتعاشات فراصوت در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکیال: (الف) مونتاژ اجزای ترانسدیوسر شامل رینگ های پیزو الکتریک سرامیکی و پشت بند، (ب) هورن فراصوت ساخته شده، (ج) مونتاژ هورن فراصوت و ترانسدیوسر و (د) مونتاژ سیستم فراصوت برای اعمال ارتعاشات به قطعه کار.

Fig. 2. Arrangement of the ultrasonic vibrations system in the magnetorheological abrasive flow finishing process: a) assembly of transducer components including piezoelectric ceramic rings and backing, b) fabricated ultrasonic horn, c) assembly of ultrasonic horn and transducer, and d) assembly of the ultrasonic system to apply vibrations to the workpiece.



شکل ۳. تجهیزات اندازه‌گیری دامنه ارتعاش در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت.

Fig. 3. Vibration amplitude measurement equipment in the magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations.

۳-۴- روش انجام آزمایش‌های تجربی

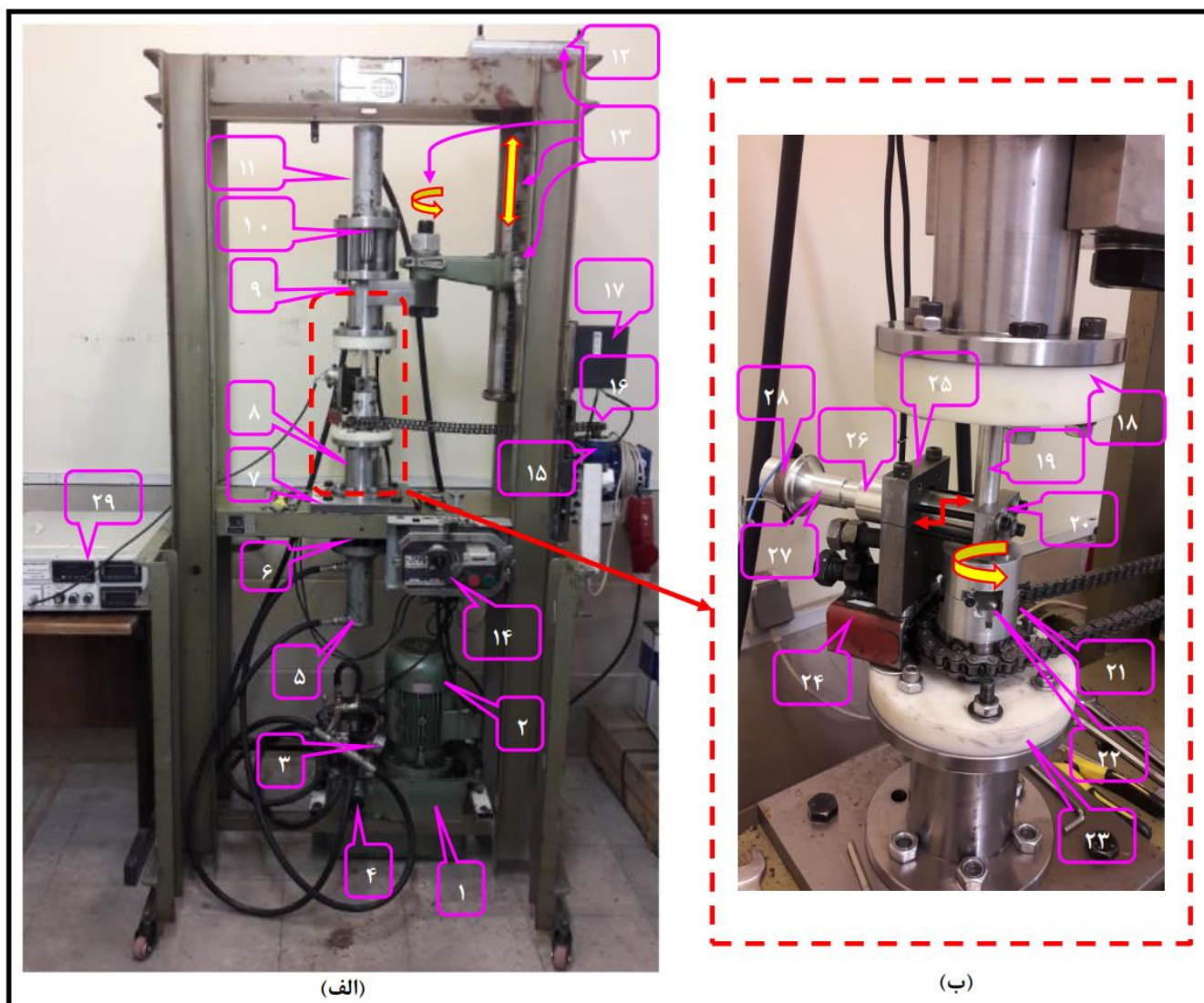
در این پژوهش، از میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال برای افزایش نرخ برداشت ماده و کاهش زمان پرداخت کاری استفاده شده است. عملکرد این روش با بررسی تأثیر زمان پردازش بر نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده در لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ ارزیابی گردیده است. پارامترهای بهینه دستگاه، شامل فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت دورانی آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه و ارتعاشات فراصوت ۱۰ میکرومتر، در آزمایش‌های مقدماتی تعیین و در طول فرآیند ثابت نگه‌داشته شدند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴ در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. نمونه‌ها ابتدا تحت شرایط یکسان ماشین کاری شدند، سپس با عملیات سوراخ کاری و برقو دستی آماده گردیدند. لوله‌های آلومینیومی با ابعاد قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر، قطر بیرونی ۱۸ میلی‌متر و طول ۱۸۰ میلی‌متر برای آزمایش‌ها استفاده شدند (شکل ۶). قبل و بعد از آزمایش‌ها، نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه در حمام فراصوت و با استون تمیز شدند. نرخ برداشت ماده با اندازه‌گیری تفاوت جرم نمونه‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌گرم محاسبه گردید. زبری سطح در ۵ نقطه مختلف و عمود بر جهت

مگنتورئولوژیکال نیز ترکیبی از ذرات آهن، ذرات ساینده کاربید سیلیسیوم و حامل ویسکوپلاستیک (مخلوطی از روغن پارافین و گریس) است.

۳-۳- ساخت سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت

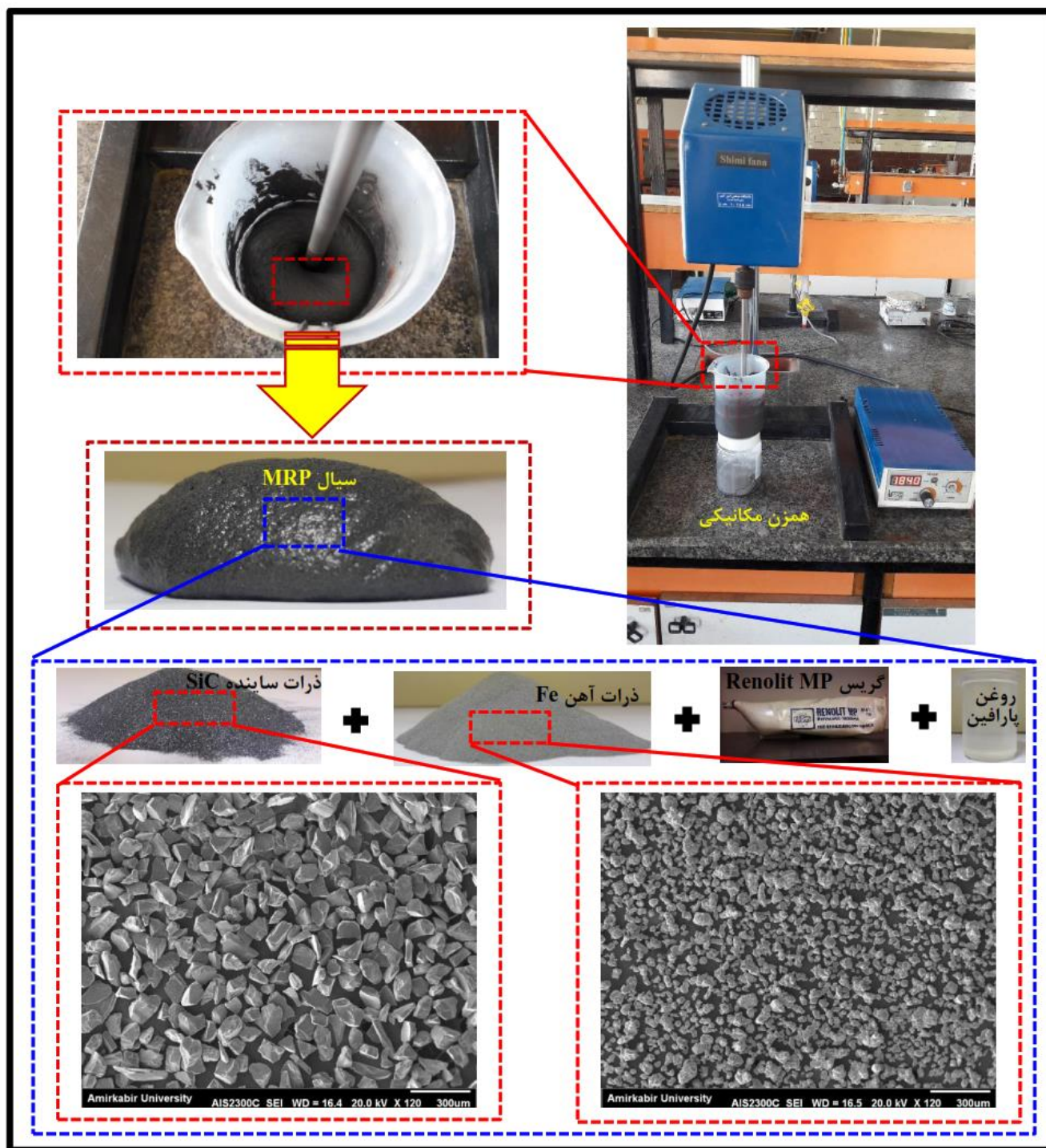
در این پژوهش، با بهره‌گیری از یافته‌های تجربی [۱۴]، برای ساخت سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال از ذرات آهن با متوسط اندازه دانه ۱۰۰ میکرون (۲۶/۶ درصد حجمی)، ساینده کاربید سیلیسیوم با شماره مش ۱۸۰ (۱۳/۴ درصد حجمی) و حامل ویسکوپلاستیک متشکل از روغن پارافین (۴۸ درصد حجمی) و گریس رنولیت ام‌پی^۱ (۱۲ درصد حجمی) استفاده شد. ابتدا ذرات آهن و ساینده کاربید سیلیسیوم مخلوط شدند، سپس گریس و روغن پارافین به تدریج در حین همزدن مکانیکی اضافه گردید. پس از یک ساعت اختلاط، یک سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال همگن و یکنواخت برای انجام آزمایش‌های فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت آماده شده است. روش ساخت این سیال در شکل ۵ ارائه شده است.

1. RENOLIT MP



شکل ۴. (الف و ب) نمای واقعی از دستگاه و روش پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکیال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت (۱) پاور یونیت هیدرولیک، (۲) موتور سه فاز به همراه پمپ هیدرولیک، (۳) گیج فشار اکستروژن، (۴) پیچ تنظیم فشار اکستروژن، (۵) فراصوت (۱۱) سیلندر هیدرولیک پایین، (۱۰) میکرو سویچ پایین، (۷) صفحه نگهدارنده پایین، (۸) سیلندر سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکیال پایین، (۹) سیلندر سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکیال بالا، (۱۰) میکرو سویچ بالا، (۱۱) سیلندر هیدرولیک بالا، (۱۲) صفحه نگهدارنده بالا، (۱۳) مکانیزم بازوی متحرک، (۱۴) کنترل پنل دستگاه، (۱۵) موتور سه فاز، (۱۶) چرخ و زنجیر، (۱۷) درایو فرکانس متغیر، (۱۸) فیکسچر قطعه کار بالا، (۱۹) قطعه کار، (۲۰) نگهدارنده قطعه کار، (۲۱) مکانیزم دوران آهنربا، (۲۲) آهنربا، (۲۳) فیکسچر قطعه کار پایین، (۲۴) فیکسچر پایین، (۲۵) فیکسچر بالا، (۲۶) هورن، (۲۷) ترانسیدوسر، (۲۸) پیزو سرامیک رینگ و (۲۹) منبع تغذیه فراصوت).

Fig. 4. (a and b) Actual view of the magnetorheological abrasive flow finishing apparatus and method assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations ((1) Hydraulic power unit, (2) Three-phase motor with hydraulic pump, (3) Extrusion pressure gauge, (4) Extrusion pressure adjustment screw, (5) Lower hydraulic cylinder, (6) Lower microswitch, (7) Lower holding plate, (8) Lower magnetorheological polishing fluid cylinder, (9) Upper magnetorheological polishing fluid cylinder, (10) Upper microswitch, (11) Upper hydraulic cylinder, (12) Upper holding plate, (13) Moving arm mechanism, (14) Device control panel, (15) Three-phase motor, (16) Wheel and chain, (17) Variable frequency drive, (18) Upper workpiece fixture, (19) Workpiece, (20) Workpiece holder, (21) Magnet rotation mechanism, (22) Magnet, (23) Lower workpiece fixture, (24) Lower fixture, (25) Upper fixture, (26) Horn, (27) Transducer, (28) Piezoceramic ring, and (29) Ultrasonic power supply.)



شکل ۵. روش ساخت سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت.

Fig. 5. Magnetorheological polishing fluid fabrication method in the magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations.

جدول ۲. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ [۱۸].

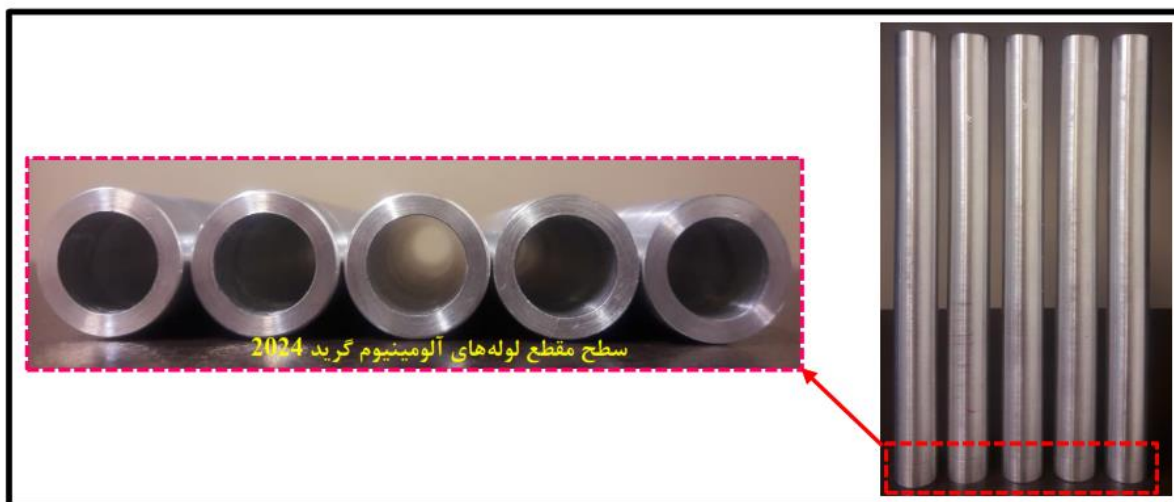
Table 2. Mechanical properties of 2024 aluminum alloy [18].

مقدار	پارامتر
۷۳/۱	مدول یانگ (MPa)
۴۸۳	مقاومت کششی نهایی (MPa)
۱۸	درصد ازدیاد طول (٪) در هنگام شکست
۱۲۰	سختی (BHN)
۲۸۰۰	چگالی (Kg/m^3)

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ [۱۸].

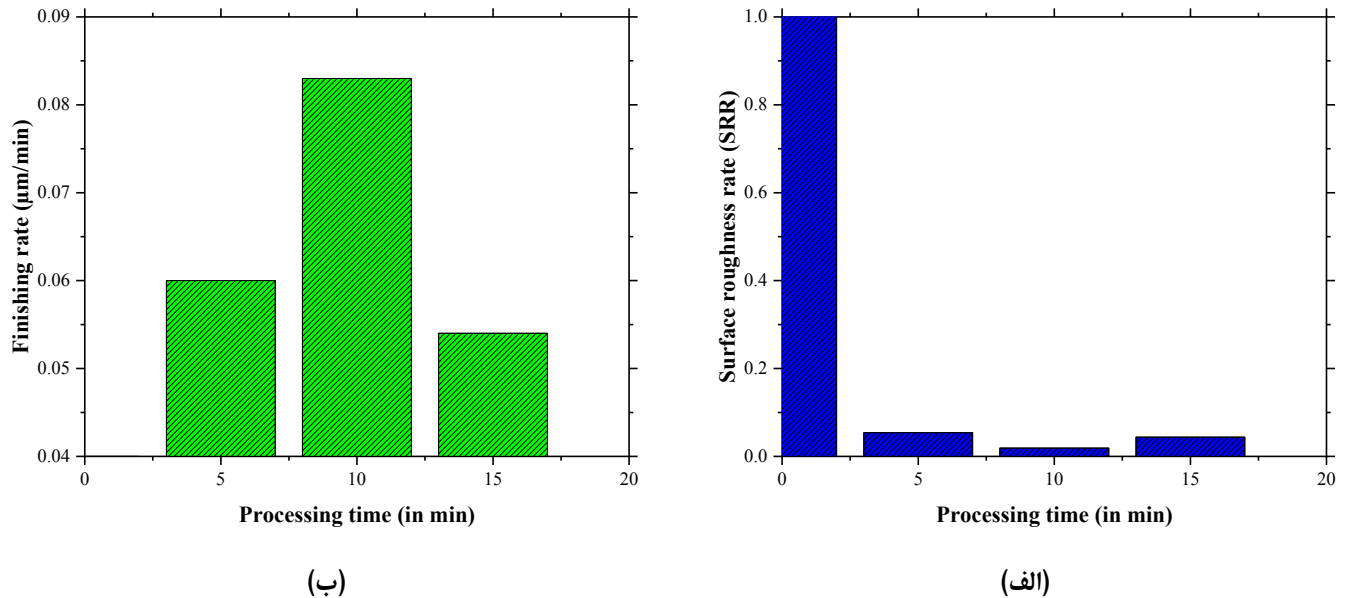
Table 1. Chemical composition of 2024 aluminum alloy [18].

عنصر شیمیایی	درصد وزنی (٪)
آلومینیوم	فلز پایه
مس	۳/۸-۴/۹
منیزیم	۱/۲-۱/۸
منگنز	۰/۳-۰/۹
سیلیکون	۰/۵
آهن	۰/۵
تیتانیوم	۰/۱۵
روی	۰/۲۵
کروم	۰/۱



شکل ۶. تصاویر واقعی تعدادی از نمونه‌های لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴.

Fig. 6. Actual images of a number of 2024 aluminum alloy tubes samples.



شکل ۷. اثر زمان پردازش فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت بر روی (الف) نسبت زبری سطح و (ب) نرخ پرداخت کاری (m/min).

Fig. 7. Effect of processing time of magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations on (a) surface roughness ratio and (b) finishing rate (μm/min).

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تأثیر زمان پردازش بر نسبت زبری سطح و نرخ پرداخت کاری

تأثیر زمان پردازش در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوت بر نسبت زبری سطح و نرخ پرداخت کاری لوله‌های آلومینیومی ۲۰۲۴ تحت شرایط بهینه (فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت دورانی آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه و دامنه ارتعاشات فراصوت ۱۰ میکرومتر) در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در ابتدای فرآیند، پردازش به‌طور چشمگیری مؤثر است، اما با گذشت زمان و کاهش ناهمواری‌های سطح، از کارایی آن کاسته می‌شود. این رفتار به این دلیل است که با افزایش زمان پردازش، تعداد ذرات ساینده موجود در سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال که در هر ثانیه به سطح ناهموار قطعه کار برخورد می‌کنند، افزایش یافته و باعث حذف قله‌های زبری سطح لوله‌های آلومینیومی ۲۰۲۴ می‌شود. در نتیجه، در مراحل اولیه پردازش، نسبت زبری سطح کاهش قابل توجهی یافته و نرخ پرداخت کاری افزایش می‌یابد. بررسی جزئیات در شکل ۷ نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۰ تا ۵ دقیقه، نسبت زبری سطح تا ۰/۰۵۴ کاهش می‌یابد، درحالی‌که نرخ پرداخت کاری تا ۰/۰۶ افزایش پیدا می‌کند. در بازه ۵ تا ۱۰

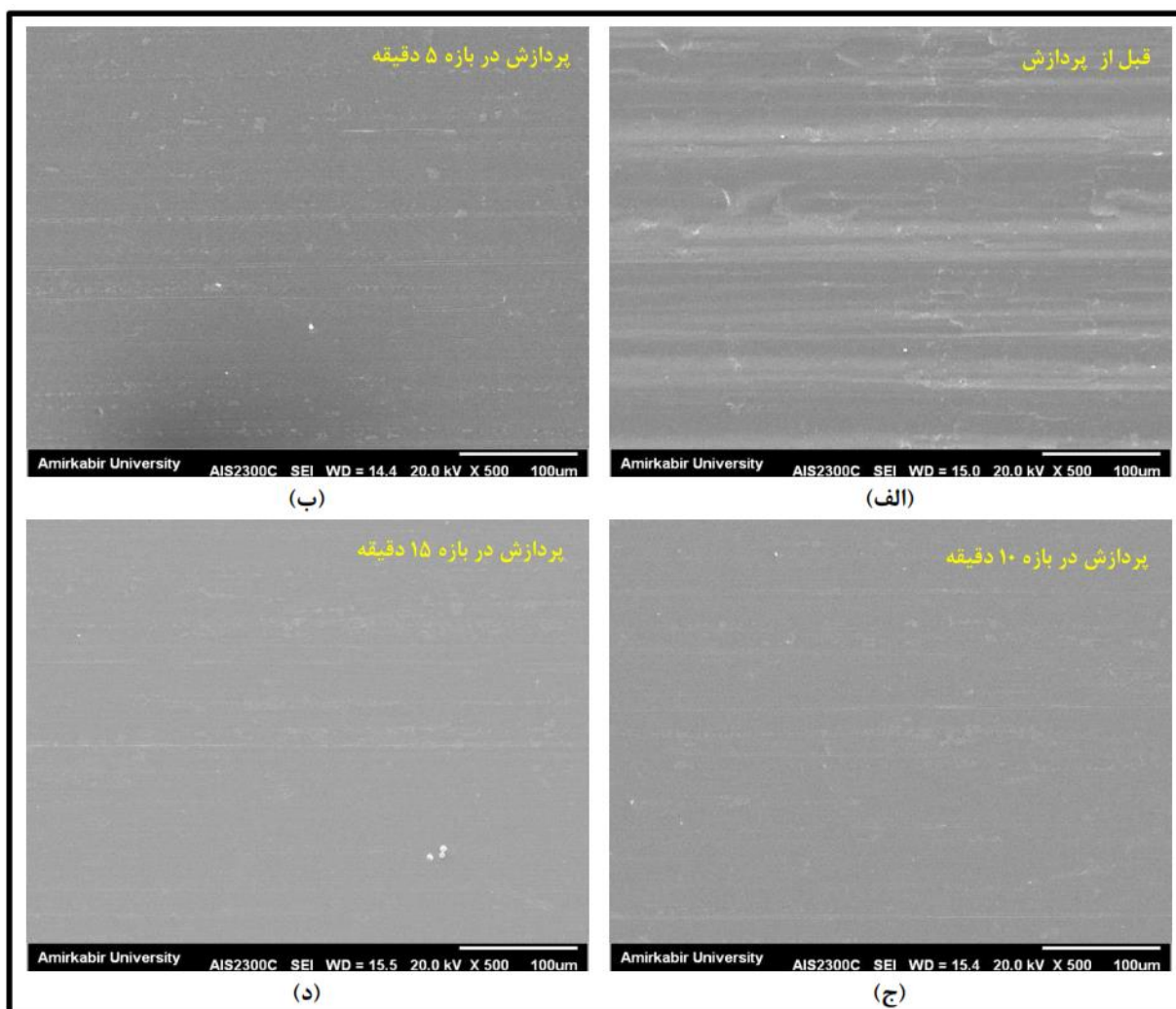
جریان ماشین کاری با دستگاه زبری سنج مدل مارسرف پی‌اس ۱۰^۱ (ساخت شرکت ماهر^۲ آلمان) با طول ارزیابی ۴ میلی‌متر و طول نمونه‌برداری ۰/۲۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و میانگین نتایج گزارش گردید. در نهایت، نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده به ترتیب با روابط (۵)، (۶) و (۷) محاسبه شدند.

$$\text{Surface roughness ratio (SRR)} = \left(\frac{\text{Final}_{Ra}}{\text{Initial}_{Ra}} \right) \quad (5)$$

$$\text{Finishing rate } (\mu\text{m/min}) = \left(\frac{\text{Initial}_{Ra} - \text{Final}_{Ra}}{\text{Total finishing time}} \right) \quad (6)$$

$$\text{Material removal rate (mg/min)} = \left(\frac{\text{Initial weight} - \text{Final weight}}{\text{Total finishing time}} \right) \quad (7)$$

1. MarSurf PS 10
2. Mahr GmbH



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی از مورفولوژی سطح نمونه‌ها: (الف) پیش از پردازش و (ب، ج و د) پس از پردازش در زمان‌های مختلف: (ب) ۵ دقیقه، (ج) ۱۰ دقیقه و (د) ۱۵ دقیقه.

Fig. 8. Microscopic images of the surface morphology of the samples: (a) before processing and (b- d) after processing at different times: (b) 5 min, (c) 10 min, and (d) 15 min.

ابتدای پردازش، ذرات ساینده به‌راحتی به زبری‌های سطح قطعه‌کار دسترسی دارند. در این شرایط، قطعه‌کار در جهت عمود بر جریان سیال پولیش‌کاری مگنتورئولوژیکال ارتعاش می‌کند که باعث می‌شود ناهمواری‌های سطح قطعه‌کار بهتر در معرض ذرات ساینده قرار بگیرند. با این توضیح، مشخص می‌شود که بیشترین میزان پردازش در زمان‌های اولیه انجام می‌گیرد و در نتیجه، سطح قطعه‌کار به‌سرعت به محدوده نانومتری می‌رسد. پس از ۱۰ دقیقه، سطحی کاملاً یکنواخت ایجاد می‌شود که زمان بهینه‌ی پردازش محسوب می‌گردد (بر اساس شکل ۸-ج). با ادامه‌ی فرآیند تا ۱۵ دقیقه، نه‌تنها تغییر قابل‌توجهی در کیفیت سطح مشاهده نمی‌شود، بلکه زبری سطح مجدداً افزایش می‌یابد (مقایسه‌ی شکل‌های ۸-ج و ۸-د). دلیل این امر آن

دقیقه، بیشترین کاهش نسبت زبری سطح (تا ۰/۰۱۹) و بیشترین افزایش نرخ پرداخت‌کاری (تا ۰/۰۸۳) مشاهده می‌شود. باین‌حال، پس از ۱۰ دقیقه، روند معکوس می‌شود؛ به‌طوری‌که با افزایش زمان پردازش تا ۱۵ دقیقه، نسبت زبری سطح تا ۰/۰۴۴ افزایش‌یافته (که نشان‌دهنده افت کیفیت سطح است) و نرخ پرداخت‌کاری تا ۰/۰۵۴ کاهش می‌یابد.

برای درک بهتر روند مشاهده‌شده در شکل ۷، مورفولوژی سطح نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ قبل و بعد از پردازش با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۸ بررسی شده است. مقایسه‌ی شکل‌های ۸-الف و ۸-ب نشان می‌دهد که پردازش در ۵ دقیقه ابتدای فرآیند بیشترین تأثیر را در حذف ناهمواری‌های سطح دارد. این امر نشان‌دهنده آن است که در

افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزایش زمان پردازش بر عمق نفوذ ذرات ساینده و همچنین افزایش نیروی برشی کل تحت تأثیر فشار اکستروژن، چرخش آهنرباها و ارتعاشات فراصوت است.

۴-۳- مقایسه مورفولوژی سطح قبل و بعد از پرداخت کاری

برای درک بهتر عملکرد فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت، مورفولوژی سطح داخلی لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ قبل و بعد از پرداخت کاری به صورت مقایسه‌ای بررسی شده است. مقایسه تصاویر واقعی (شکل‌های ۱۰-ب و ۱۰-ج) نشان می‌دهد که سطح داخلی لوله قبل از پرداخت کاری (پس از سوراخ کاری و برقی دستی) بسیار زبر است، به طوری که انعکاس محیط اطراف در آن محو شده است. در مقابل، پس از پرداخت کاری با فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت، سطحی صاف و یکنواخت ایجاد شده که انعکاس محیط را به وضوح نشان می‌دهد. همچنین، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل‌های ۱۰-د و ۱۰-ه) تأیید می‌کنند که عملیات اولیه (سوراخ کاری و برقی دستی) آسیب‌های سطحی مانند شیارها و خراش‌ها را ایجاد کرده و زبری سطح را به $1/2783$ میکرومتر رسانده است، درحالی‌که فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت این آسیب‌ها را کاملاً حذف کرده و زبری را تا 0.255 میکرومتر کاهش داده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش ناهمواری‌های سطح داخلی لوله‌ها را تا 98% بهبود بخشیده و به عنوان یک راه حل کارآمد برای پرداخت و پلیسه‌گیری سطوح داخلی، به ویژه در لوله‌های بلند، توصیه می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

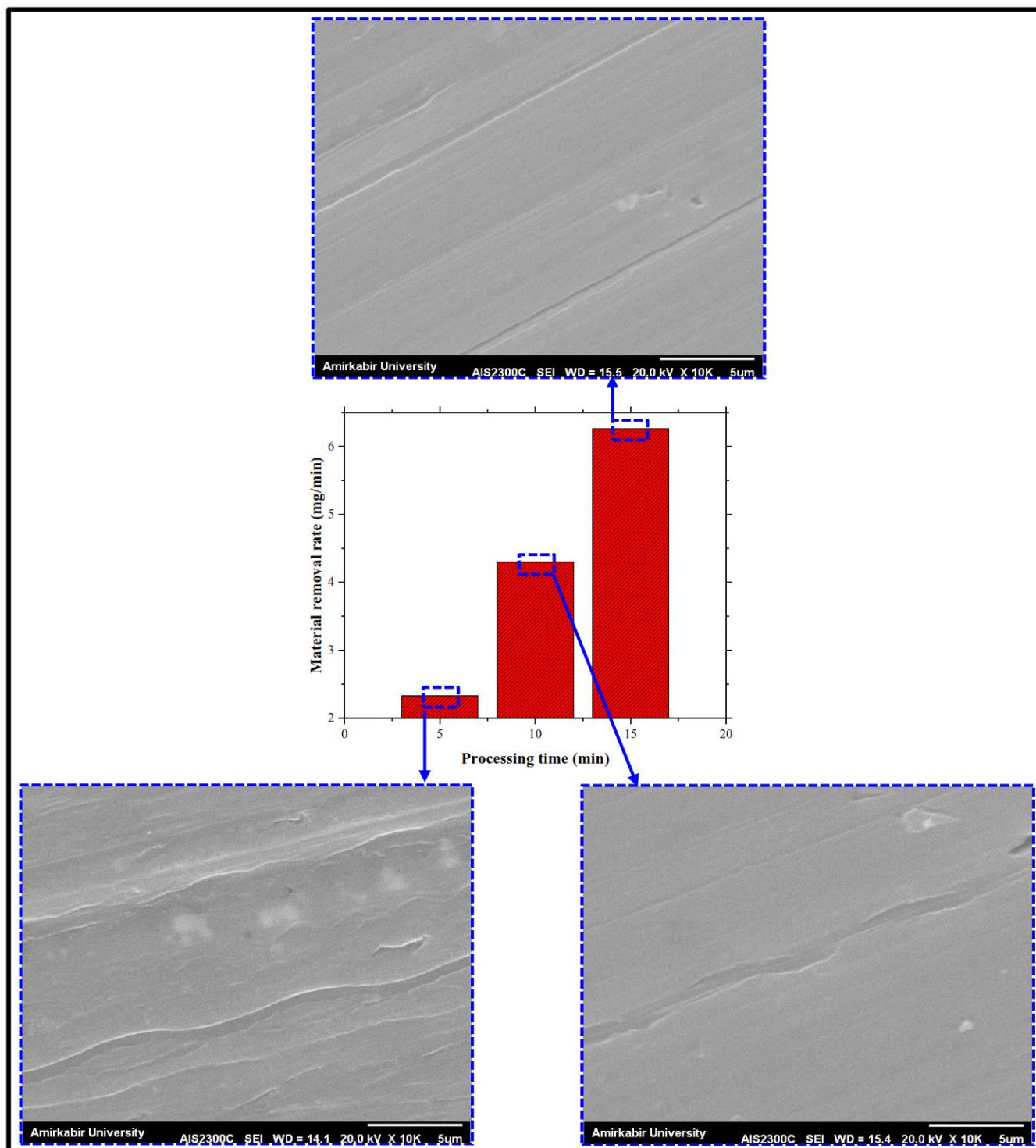
در این پژوهش، از میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت به عنوان راه‌حلی کارآمد در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا یک نمونه صنعتی از دستگاه پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال طراحی و ساخته شد و سپس بعد از آماده‌سازی سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال، میدان مغناطیسی دوار اعمال گردید. در نهایت، ارتعاشات فراصوت در جهت عمود بر جریان سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال به قطعه کار اعمال شد. برای ارزیابی عملکرد پرداخت کاری، آزمایش‌هایی انجام شد تا تأثیر زمان پردازش بر نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده از سطح داخلی لوله‌های آلیاژ

است که پس از ۱۰ دقیقه (زمان بهینه)، قله‌های زبری سطح کاملاً هموار شده‌اند و ادامه فرآیند باعث برخورد ذرات ساینده به سطح صاف و ایجاد خراش‌های ریز می‌شود. درنتیجه، پس از ۱۰ دقیقه، کیفیت سطح به تدریج کاهش می‌یابد.

بررسی شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در شرایط بهینه، به طور چشمگیری نسبت زبری سطح را کاهش داده و نرخ پرداخت کاری لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ را افزایش می‌دهد. همچنین، انتخاب زمان بهینه پردازش در محدوده ۱۰ دقیقه می‌تواند تعادل مناسبی بین کیفیت سطح و هزینه‌های فرآیند ایجاد کند.

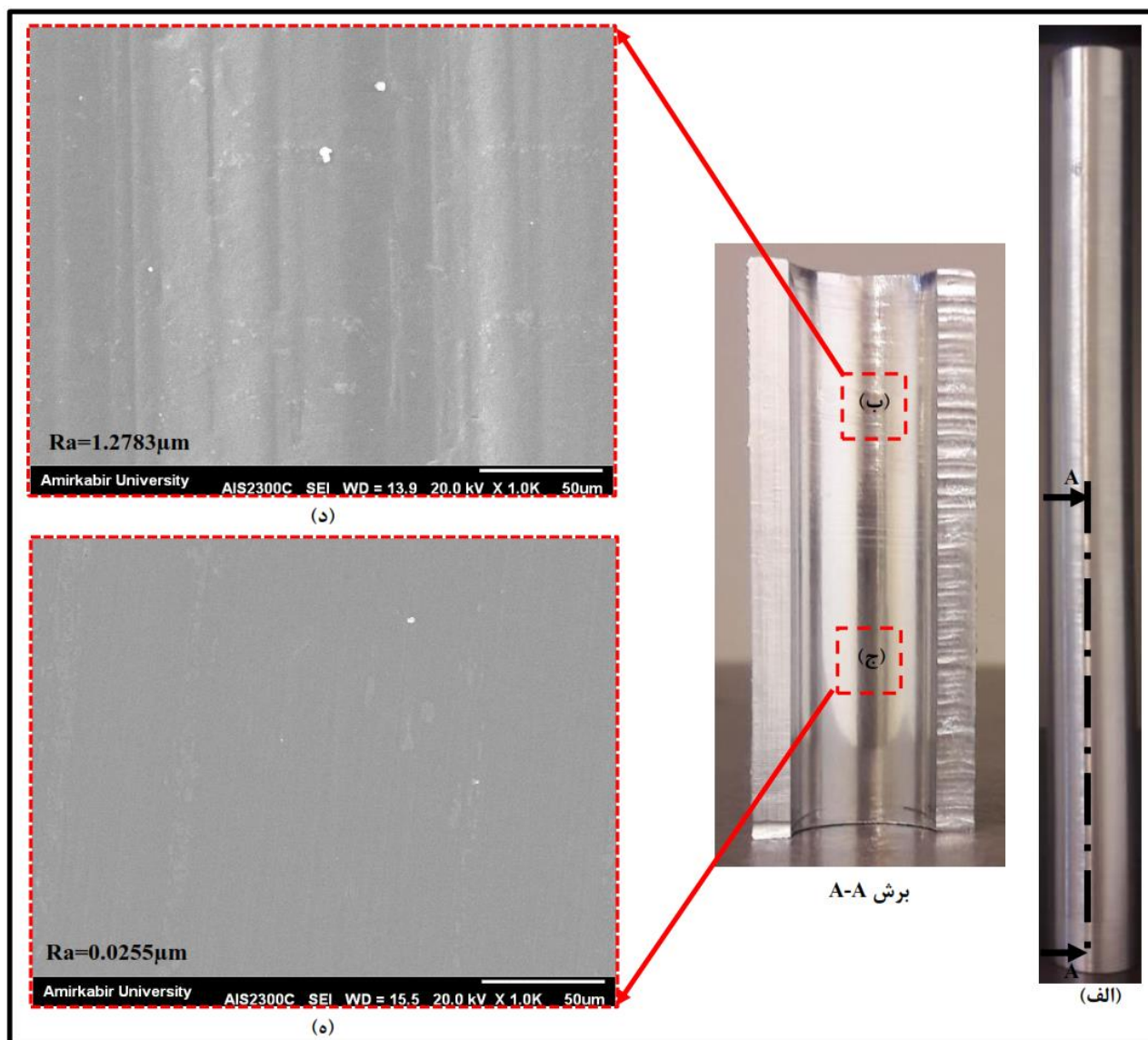
۴-۲- تأثیر زمان پردازش بر نرخ برداشت ماده

تأثیر زمان پردازش در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت بر نرخ برداشت ماده لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ تحت شرایط بهینه (فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت دورانی آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه و دامنه ارتعاشات فراصوت ۱۰ میکرومتر) در شکل ۹ نشان داده شده است. با افزایش زمان پردازش، نرخ برداشت ماده به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این امر ناشی از آن است که ذرات ساینده در فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت همزمان دو نوع حرکت را تجربه می‌کنند: یک حرکت مارپیچی ناشی از جریان رفت و برگشتی سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال و چرخش آهنرباها، و یک حرکت سینوسی که در اثر ارتعاش قطعه کار ایجاد می‌شود. ترکیب این دو حرکت باعث می‌شود ذرات ساینده با زاویه مشخصی به ناهمواری‌های سطح قطعه کار برخورد کنند (جزئیات بیشتر در بخش ۲). با افزایش زمان پردازش، تعداد این برخوردها بیشتر شده و درنتیجه برداشت ماده افزایش می‌یابد. بررسی جزئیات در شکل ۹ نشان می‌دهد که پس از ۵ دقیقه پردازش، نرخ برداشت ماده به $2/33$ میلی گرم بر دقیقه می‌رسد که بیشترین میزان در این مرحله است، چراکه ناهمواری‌های سطحی بیشتری در دسترس ذرات ساینده هستند. همچنین، به دلیل ارتعاش قطعه کار یک نیروی شعاعی به فرورفتگی ذرات ساینده به درون سطح قطعه کار اضافه می‌شود که منجر به افزایش عمق نفوذ ذرات ساینده می‌گردد. با ادامه فرآیند تا ۱۰ دقیقه، سطح قطعه کار یکنواخت تر شده و نرخ برداشت ماده به $4/3$ میلی گرم بر دقیقه می‌رسد. در زمان ۱۵ دقیقه، این مقدار به $6/26$ میلی گرم بر دقیقه



شکل ۹. اثر زمان پردازش فرآیند پرداختکاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکیال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت بر روی نرخ برداشت ماده (mg/min).

Fig. 9. Effect of processing time of magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations on the material removal rate (mg/min).



شکل ۱۰. تصاویر واقعی و تصاویر میکروسکوپی از مورفولوژی سطح نمونه‌ها: (الف) یک نمونه آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، (ب و د) بعد از عملیات سوراخ‌کاری و برق‌دستی با متوسط زبری سطح ۱/۲۷۸۳ میکرومتر و (ج و ه) بعد از فرآیند پرداخت‌کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت با متوسط زبری سطح ۰/۰۲۵۵ میکرومتر تحت شرایط تجربی (فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت دورانی آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه، دامنه ارتعاشات فراصوت ۱۰ میکرومتر و زمان پردازش ۱۰ دقیقه).

Fig. 10. Actual images and microscopic images of the surface morphology of the samples: (a) a 2024 aluminum alloy sample, (b and d) after drilling and manual reaming with an average surface roughness of 1.2783 μm , and (c and e) after the magnetorheological abrasive flow finishing process assisted by a rotating magnetic field and ultrasonic vibrations with an average surface roughness of 0.0255 μm under experimental conditions (extrusion pressure of 2 MPa, magnets' rotational speed of 100 rpm, ultrasonic vibration amplitude of 10 μm , and a processing time of 10 min).

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(5) (2016) 1725-1735.

- [6] D. Jung, W. Wang, S. Hu, Microscopic geometry changes of a direct-injection diesel injector nozzle due to abrasive flow machining and a numerical investigation of its effects on engine performance and emissions, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 222(2) (2008) 241-252.
- [7] J. Guo, C. Song, Y. Fu, K.H. Au, C.W. Kum, M.H. Goh, T. Ren, R. Huang, C.-N. Sun, Internal surface quality enhancement of selective laser melted inconel 718 by abrasive flow machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 142(10) (2020) 101003.
- [8] N. Dixit, V. Sharma, P. Kumar, Research trends in abrasive flow machining: A systematic review, Journal of manufacturing Processes, 64 (2021) 1434-1461.
- [9] G. Venkatesh, D. Sood, A.K. Sharma, On surface integrity of Al 2014 alloy finished by ultrasonic assisted abrasive flow machining, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 346 (2018) 012057.
- [10] Q. Wang, M.S. Vohra, S. Bai, S.H. Yeo, Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 113(1) (2021) 473-481.
- [11] S. Singh, H. Shan, Development of magneto abrasive flow machining process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(8) (2002) 953-959.
- [12] M. Das, V. Jain, P. Ghoshdastidar, Fluid flow analysis of magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(3-4) (2008) 415-426.
- [13] Y. Choopani, M. Khajehzadeh, M.R. Razfar, Experimental investigations into the nano-finishing of Al2024 tubes using the rotational-magnetorheological abrasive flow finishing (R-MRAFF) process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 236(6) (2022) 2545-2557.

آلومینیوم ۲۰۲۴ بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال به کمک میدان مغناطیسی دوار و ارتعاشات فراصوت در شرایط بهینه (فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال، سرعت چرخش آهنرباها ۱۰۰ دور بر دقیقه و دامنه ارتعاش ۱۰ میکرومتر)، تأثیر قابل توجهی بر کاهش زبری سطح و افزایش نرخ پرداخت کاری لوله‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ دارد. علاوه بر این، بررسی‌ها حاکی از آن است که در ۱۰ دقیقه اول پردازش، بیشترین بهبود کیفیت سطح رخ می‌دهد (کاهش زبری تا ۰/۱۹ و افزایش نرخ پرداخت کاری تا ۰/۸۳). اما ادامه فرآیند پس از این زمان، به دلیل برخورد ذرات ساینده با سطح صاف، منجر به افزایش مجدد زبری و کاهش کیفیت سطح می‌شود. از سوی دیگر، افزایش زمان پردازش باعث بهبود نرخ برداشت ماده (تا ۶/۲۶ میلی گرم بر دقیقه در ۱۵ دقیقه) می‌گردد. تصاویر میکروسکوپی تأیید می‌کنند که روش پیشنهادی ناهمواری‌های سطح را تا ۹۸٪ کاهش داده و سطحی یکنواخت ایجاد می‌کند. بنابراین، زمان بهینه پردازش ۱۰ دقیقه پیشنهاد می‌شود تا تعادلی مناسب بین کیفیت سطح و هزینه‌های فرآیند برقرار شود.

منابع

- [1] A. Fletcher, J. Hull, J. Mackie, S. Trengove, Computer modelling of the abrasive flow machining process, in: Proceedings of International Conference on Surface Engineering: Toronto, Canada, (1990) 592-601.
- [2] P. Davies, A. Fletcher, The assessment of the rheological characteristics of various polyborosiloxane/grit mixtures as utilized in the abrasive flow machining process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 209(6) (1995) 409-418.
- [3] R. Williams, K. Rajurkar, Stochastic modeling and analysis of abrasive flow machining, Trans the American Society of Mechanical Engineers (ASME), Journal of Engineering for Industry, 114 (1) (1992) 74-81.
- [4] M. Sarkar, V. Jain, Nanofinishing of freeform surfaces using abrasive flow finishing process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(9) (2017) 1501-1515.
- [5] Y. Fu, X. Wang, H. Gao, H. Wei, S. Li, Blade surface uniformity of blisk finished by abrasive flow machining,

- flow Machining, Modares Mechanical Engineering, 18(5), (2018) 75-83, (in Persian).
- [17] M.R. Shabgard, F. Arabzadeh Tabriz, A. Gholipoor, Experimental study of the effects of abrasive particle size and work piece hardness in Magnetic abrasive flow Machining, Modares Mechanical Engineering, 16(8) (2016) 131-138, (in Persian).
- [18] M. Aamir, M. Tolouei-Rad, K. Giasin, A. Vafadar, Machinability of Al2024, Al6061, and Al5083 alloys using multi-hole simultaneous drilling approach, Journal of Materials Research and Technology, 9(5) (2020) 10991-11002.
- [14] Y. Choopani, M.R. Razfar, M. Khajehzadeh, M. Khosrojerdi, Design and development of ultrasonic assisted-rotational magnetorheological abrasive flow finishing (UA-RMRAFF) process, Applied Acoustics, 197 (2022) 108950.
- [15] N. Dixit, V. Sharma, P. Kumar, Experimental investigations into ultrasonic assisted magnetic abrasive flow machining process, Materials and Manufacturing Processes, 38(10) (2023) 1291-1306.
- [16] M.R. Shabgard, A.A. Amini Khasraghi, A. Gholipoor, Experimental investigation of the effects of work piece hardness and abrasive particle size in rotational abrasive

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Y. Choopani , M. Khajehzadeh, M. R. Razfar, Synergistic Effect of Rotating Magnetic Field and Ultrasonic Vibrations in Magnetorheological Abrasive Flow Finishing, Amirkabir J. Mech Eng., 57(4) (2025) 453-472.

DOI: [10.22060/mej.2025.24373.7862](https://doi.org/10.22060/mej.2025.24373.7862)

