



ارزیابی عملکرد فرایند ماشین کاری جریان ساینده به کمک میدان مغناطیسی چرخشی

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

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه میبد، میبد، ایران

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

* ایمیل نویسنده مسئول: Choopani@meybod.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
ماشین کاری جریان ساینده (AFM) با وجود کاربرد گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی و پزشکی برای پرداخت سطوح با هندسه پیچیده و غیرقابل دسترس، از محدودیت‌هایی مانند زمان پرداخت طولانی و نرخ برداشت ماده پایین رنج می‌برد. در این پژوهش، برای غلبه بر این چالش‌ها، یک فرایند ماشین کاری جریان ساینده به کمک میدان مغناطیسی چرخشی (RMF-AFM) ارائه شده است. در این روش، علاوه بر حرکت رفت و برگشتی سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال (MRP) ناشی از فشار اکستروژن، یک میدان مغناطیسی چرخشی ناشی از دوران آهنرباهای دائم بر روی اعمال می‌گردد. عملکرد فرایند پیشنهادی بر روی نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده لوله‌های آلومینیومی سری ۲۰۲۴ با یک رویکرد تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. مورفولوژی و توپوگرافی سطح نمونه‌ها نیز پیش و پس از پرداخت تحلیل شد. همچنین، یک مطالعه مقایسه‌ای بین کارایی فرایند RMF-AFM و AFM سنتی انجام پذیرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زمان پرداخت از ۵ به ۱۰ دقیقه، نسبت زبری سطح از ۰/۱۲۶ به ۰/۱۹۲ کاهش و هم‌زمان نرخ پرداخت کاری نیز از ۰/۵۶۸ به ۰/۹۳۳ میکرومتر بر دقیقه افزایش می‌یابد؛ بااین حال، فراتر از این بازه زمانی، راندمان فرایند افت می‌کند. در مقابل، نرخ برداشت ماده در بازه زمانی ۵ تا ۱۵ دقیقه به‌طور پیوسته از ۱/۲۶۶ به ۲/۷۳۳ میلی گرم بر دقیقه رشد کرده است. مشاهدات میکروسکوپی ضمن تأیید این نتایج، مؤید آن است که فرایند RMF-AFM اصلاح سطح داخلی لوله‌های آلومینیومی را با سرعت و کیفیت بالاتری محقق می‌سازد. علاوه بر این، نتایج مقایسه‌ای نهایی نیز حاکی از برتری ۲۴/۴۵ درصدی عملکرد فرایند RMF-AFM نسبت به روش AFM سنتی می‌باشد.	مقاله پژوهشی دریافت: ۱۵ بهمن ۱۴۰۴ پذیرش: ۲۰ مرداد ۱۴۰۵
	کلیدواژگان: ماشین کاری جریان ساینده میدان مغناطیسی چرخشی نسبت زبری سطح نرخ پرداخت کاری نرخ برداشت ماده

Performance evaluation of rotary magnetic field-assisted abrasive flow machining process

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

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

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

* Corresponding Author's Email: Choopani@meybod.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 4 February 2026

Accepted: 11 August 2026

Keywords:

Abrasive Flow Machining

Rotary Magnetic Field

Surface Roughness Ratio

Finishing Rate

Material Removal Rate

Abstract

abrasive flow machining (AFM), despite its widespread application in aerospace, automotive, and medical industries for finishing surfaces with complex and hard-to-reach geometries, suffers from limitations such as long processing times and low material removal rates. To overcome these challenges, this study proposes a rotary magnetic field-assisted abrasive flow machining (RMF-AFM) process. In this method, a rotating magnetic field is applied to a magnetorheological polishing fluid. The performance of the proposed process was experimentally evaluated on 2024 series aluminum alloy tubes in terms of surface roughness ratio, finishing rate, and material removal rate (MRR). The surface morphology and topography of the samples were also analyzed before and after finishing. Furthermore, a comparative study was conducted between the efficiency of the RMF-AFM and conventional AFM processes. The findings indicate that increasing the finishing time from 5 to 10 minutes reduces the surface roughness ratio from 0.126 to 0.0192, while simultaneously increasing the finishing rate from 0.0568 to 0.0933 $\mu\text{m}/\text{min}$. However, beyond this time interval, the process efficiency declines. In contrast, the MRR increased consistently from 1.266 to 2.733 mg/min over the 5 to 15-minute interval. Microscopic observations confirm these quantitative results and demonstrate that the RMF-AFM process achieves internal surface modification of aluminum tubes with higher speed and quality. Additionally, the final comparative results indicate a 24.45% superiority in the performance of the RMF-AFM process compared to the conventional AFM method.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Choopani Y, Khajehzadeh M, Razfar MR. Performance evaluation of rotary magnetic field-assisted abrasive flow machining process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2026 Jan 21;12(11):78-96. doi: 10.22034/ijme.2026.573929.2163 [In Persian]

۱- مقدمه

در فرایندهای ساخت قطعات صنعتی، دستیابی به کیفیت سطحی مطلوب و یکنواخت، به ویژه در قطعات با هندسه های پیچیده و سطوح داخلی غیرقابل دسترس، از چالش های عمده به شمار می رود. روش های سنتی پرداخت دستی، علاوه بر زمان بر بودن، غالباً فاقد تکرارپذیری و یکنواختی کافی بوده و در مواردی منجر به تغییر شکل نامطلوب لبه ها و کاهش قابلیت اطمینان قطعه می گردند. در این راستا، فرایند جریان ساینده که عموماً تحت عنوان ماشین کاری جریان ساینده^۱ (AFM) یا پرداخت کاری جریان ساینده^۲ (AFF) شناخته می شود، به عنوان یک فرایند پیشرفته و خودکار، راه حلی مؤثر و اقتصادی ارائه نموده است. در این فرایند، با عبور دادن یک واسطه^۳ ماشین کاری نیمه جامد متشکل از یک پایه پلیمری و ذرات ساینده، از درون یا روی قطعه کار تحت فشار کنترل شده، عملیات پرداخت سطح، پلیسه گیری و ایجاد شعاع کنترل شده روی لبه ها، با دقت و یکنواختی بالا و غالباً به صورت هم زمان بر روی چندین قطعه یا سطح انجام می پذیرد [۱]. به لطف انعطاف پذیری ذاتی این روش از طریق تنظیم پارامترهایی نظیر ویسکوزیته واسطه، تعداد سیکل های کاری، نوع، اندازه و غلظت ذرات ساینده و فشار اکستروژن، قابلیت اعمال آن بر طیف گسترده ای از مواد، از آلومینیوم نرم تا آلیاژهای نیکل سخت، سرامیک ها و کاربیدها فراهم شده است [۲]. کاربردهای موفق و گسترده این فناوری در صنایع پیشرفته ای چون هوافضا (پرداخت پره های توربین و نازل های سوخت)، خودرو سازی، قالب سازی (پولیش سطوح داخلی قالب های اکستروژن و فورج) و پزشکی (ایمپلنت های جراحی)، گواهی بر اثربخشی و قابلیت اطمینان آن است [۳، ۴]. علاوه بر این، یکی از چالش های جدی قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی، افزایش زبری سطح است که می تواند عملکرد قطعه را به ویژه در کاربردهای حساس تحت تأثیر قرار دهد [۵]. [۶]. برای اصلاح سطح این قطعات، فرایند AFM به عنوان یکی از روش های مؤثر پیشنهاد شده است [۷، ۸]. باین حال، از محدودیت های اصلی فرایند AFM می توان به زمان پرداخت طولانی و نرخ پایین برداشت ماده اشاره نمود [۹]. برای غلبه بر این محدودیت ها و ارتقای کارایی فرایند، تلاش های پژوهشی بسیاری در سال های اخیر معطوف به توسعه و بررسی فرایندهای ترکیبی مبتنی بر AFM انجام شده است که در ادامه به بررسی شماری از آن ها پرداخته می شود.

در ادبیات تحقیق، به منظور غلبه بر چالش های اصلی فرایند AFM، یعنی زمان پرداخت کاری طولانی و نرخ برداشت ماده پایین، پژوهشگران رویکردهای مبتکرانه ای را ارائه کرده اند. تمرکز اصلی این راهکارها بر ایجاد حرکت نسبی اضافی بین قطعه کار و واسطه ساینده قرار دارد. از جمله این روش ها می توان به تکنیک های میله چرخان، دوران مته و چرخش قطعه کار اشاره کرد که همگی به صورت مؤثری بر بهبود عملکرد فرایند گزارش شده اند. به عنوان نمونه، والیا و همکاران [۱۰] با معرفی فرایند ماشین کاری جریان ساینده با کمک نیروی گریز از مرکز^۴ (CFAAFM)، از یک میله چرخان برای اعمال نیروی گریز از مرکز بر واسطه ساینده استفاده کردند. بررسی آن ها بر روی قطعات استوانه ای برنجی نشان داد که پارامترهای شکل و سرعت میله، فشار اکستروژن، تعداد سیکل ها و اندازه دانه ساینده، همگی تأثیر معناداری بر زبری سطح و نرخ برداشت ماده دارند. دستاورد کلیدی این پژوهش، کاهش ۷۰ تا ۸۰ درصدی زمان ماشین کاری در مقایسه با روش AFM سنتی برای دستیابی به صافی سطح مطلوب بود. در مطالعه ای دیگر، سانکار و همکاران [۱۱] با ابداع فرایند پرداخت کاری جریان ساینده هدایت شده توسط مته^۵ (DBG-AFF)، یک مته شیاردار مارپیچی را در ناحیه پرداخت به کار گرفتند تا واسطه را با کارایی بیشتری هدایت و متراکم کند. نتایج مقایسه ای این روش با AFF مرسوم بر روی فولادهای AISI 1040 و AISI 4340، بهبود قابل توجهی را در درصد تغییر در زبری سطح^۶ (%ΔRa) و میزان ماده برداشته شده نشان داد. همچنین، در تکمیلی بر این تحقیقات، سانکار و همکاران [۱۲] با افزودن حرکت چرخشی به قطعه کار، فرایند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده^۷ (R-AFF) را توسعه دادند. هدف اصلی، افزایش سرعت پرداخت و بهبود کیفیت سطح در قطعات پیچیده ای مانند لوله های فولاد سخت AISI 4340 بود. پژوهش آن ها حاکی از آن بود که با بهینه سازی پارامترهایی چون فشار اکستروژن، سرعت چرخش قطعه کار، تعداد سیکل ها و ترکیب واسطه، می توان خروج از گردی ناشی از عملیات سنگ زنی اولیه را تا ۳۹٪ کاهش داد. همچنین مشخص شد که افزایش درصد وزنی ذرات ساینده، سرعت دورانی قطعه کار، تعداد سیکل ها و فشار اکستروژن، به طور مداوم

¹ Abrasive Flow Machining (AFM)

² Abrasive Flow Finishing (AFF)

³ Media

⁴ Centrifugal Force Assisted Abrasive Flow Machining (CFAAFM) Process

⁵ Drill Bit-Guided Abrasive Flow Finishing (DBG-AFF) Process

⁶ Percentage Change in Average Surface Roughness (%ΔRa)

⁷ Rotational-Abrasive Flow Finishing (R-AFF) Process

باعث افزایش نرخ برداشت ماده می شود. در این میان، سرعت دورانی قطعه کار به عنوان عاملی با تأثیر بسیار زیاد بر کیفیت و سرعت پرداخت کاری شناسایی شد. در نهایت، این محققان نتیجه گرفتند که فرایند R-AFF جایگزینی مؤثر برای روش AFF مرسوم جهت ارتقای عملکرد کلی فرایند است.

به منظور افزایش کارایی فرایند AFM، رویکردهای ترکیبی متعددی توسعه یافته که از میان آنها، کمک گیری از ارتعاشات اولتراسونیک و الکتروشیمیایی از جایگاه برجسته ای برخوردارند. به طور مشخص، دابروسکی و همکاران [۱۳] با تلفیق اصول ماشین کاری الکتروشیمیایی (ECM) و AFM، روش ماشین کاری جریان ساینده به کمک الکتروشیمیایی (ECAFM) را مبتنی بر الکترولیت های پلیمری ارائه نمودند. یافته های تجربی حاکی از آن است که در این فرایند ترکیبی، زبری سطح نهایی عمدتاً تابع انتخاب نوع خمیر ساینده بوده و تأثیر انفرادی کمک الکتروشیمیایی بر این شاخص به وضوح تعیین شده نیست. با این حال، نقش کمک الکتروشیمیایی در افزایش معنادار نرخ برداشت ماده کاملاً مشهود است؛ به گونه ای که کاهش جرم قابل توجه و ایجاد تغییرات ابعادی عمدتاً در حضور این مکانیسم کمکی محقق می گردد. علاوه بر این، ادغام الکتروشیمیایی منجر به کاهش محسوس زمان فرایند از طریق کاهش تعداد پاس های مورد نیاز می شود. در نتیجه، کاربرد بهینه ECAFM مستلزم انتخاب دقیق خمیر ساینده و به کارگیری هم زمان کمک الکتروشیمیایی برای دستیابی هم زمان به کیفیت سطح مطلوب و بهره وری فرایند بالاست. در پژوهشی دیگر، علی و همکاران [۱۴] فرایند نوآورانه ای به نام ماشین کاری جریان ساینده گریز از مرکز با افزودنی حرارتی^۱ (TACAFM) را ارائه نمودند. این فرایند، ترکیبی از فرایند CFAAFM و فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی^۲ (EDM) است. در این روش، ذرات ساینده ضمن حرکت هم محور با قطعه کار، توسط یک سیستم چرخشی در داخل قطعه کار توخالی به چرخش درآمده و هم زمان، اثر حرارتی مشابه فرایند EDM اعمال می شود. نتایج آزمایش های آن ها حاکی از بهبود عملکرد چشمگیر این فرایند ترکیبی است؛ به طوری که به طور متوسط ۴۴/۳۴٪ افزایش در برداشت ماده و ۳۹/۷۴٪ بهبود در کیفیت پرداخت سطح گزارش شده است. در پژوهشی دیگر، ویوی و همکاران [۱۵] کاربرد ماشین کاری جریان ساینده با کمک اولتراسونیک^۳ (UAAFM) را برای پرداخت کانال های جریان داخلی در قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی از جنس آلیاژ آلومینیوم AISi10Mg مورد مطالعه قرار دادند. در این روش، ارتعاشات اولتراسونیک مستقیماً به قطعه کار اعمال گردید. نتایج نشان داد که کمک اولتراسونیک به طور مؤثری منجر به حذف بهتر عیوب سطحی مشخصه قطعات ساخت افزایشی می شود. با این وجود، توانایی این روش در رفع کامل اثر کروی شدن در نواحی مقعر با عمق بیشتر، محدود گزارش شد. به طور کلی، کارایی فرایند AFM و کیفیت سطح نهایی با تلفیق ارتعاش اولتراسونیک به طور قابل توجهی بهبود یافت. تحت شرایط بهینه پارامترهای پرداخت کاری شامل فرکانس اولتراسونیک ۲۰ کیلوهرتز، دامنه سر ابزار ۳۰ میکرومتر و زمان پردازش ۳۶۰ ثانیه میزان زبری سطح در بخش مستقیم کانال به ۰/۱۶۵ میکرومتر و در بخش منحنی به ۰/۳۷۱ میکرومتر کاهش یافت.

برای بهبود عملکرد فرایند AFM، محققان روش هایی را مبتنی بر اعمال میدان مغناطیسی و چرخاندن آن بر روی سیال پولیش کاری پیشنهاد کرده اند. به عنوان مثال، سینگ و همکاران [۱۶] از فرایند ماشین کاری جریان ساینده مغناطیسی شده^۴ (MAAFM) برای پرداخت سطوح داخلی سوراخ های کوچک در لوله های آلومینیومی با استفاده از مواد ساینده مغناطیسی تولید شده به روش آلیاژ سازی مکانیکی و تفجوشی بهره گرفتند. این فرایند بر سیال پولیش کاری هوشمند واکنش دهنده به مغناطیس متکی است که خواص رئولوژیکی آن ها با اعمال میدان مغناطیسی کنترل می شود. فرایند MAAFM در مقایسه با فرایند AFM متعارف، به دلیل کنترل بهتر روی سیال ساینده مغناطیسی، از قابلیت کنترل بالاتری برخوردار است. نتایج نشان می دهد که فرایند MAAFM منجر به بهبود ۷۲/۷ درصدی پرداخت سطح (با مقدار Ra معادل ۰/۲۲ میکرومتر) شده است. همچنین مورفولوژی سطح نمونه ها حاکی از کاهش چشمگیر ناهمواری ها و ایجاد بافتی یکنواخت و ظریف بر روی سطح است. در پژوهشی دیگر، جها و همکاران [۱۷] فرایند پرداخت کاری جریان ساینده مگنتورئولوژیکال^۵ (MRAFF) را به عنوان یک روش پرداخت کاری دقیق و نوین برای سطوح با هندسه پیچیده و با استفاده از سیال پولیش کاری مگنتورئولوژیکال^۶ (MRP) هوشمند توسعه دادند. این فرایند، قابلیت کنترل و قطعیت رفتار رئولوژیکی

¹ Thermal Additive Centrifugal Abrasive Flow Machining (TACAFM) Process

² Electrical Discharge Machining (EDM) Process

³ Ultrasonic Assisted Abrasive Flow Machining (UAAFM) Process

⁴ Magnetically Assisted Abrasive Flow Machining (MAAFM) Process

⁵ Magnetorheological Abrasive Flow Finishing (MRAFF) Process

⁶ Magnetorheological Polishing (MRP)

واسطه حاوی ساینده را در حین پرداخت سطوح پیچیده فراهم می کند. سیال MRP از پودر آهن کربونیل و ذرات ساینده تشکیل شده است که در یک پایه ویسکوپلاستیک^۱ متشکل از گریس و روغن معدنی پراکنده شده اند. این سیال در حضور میدان مغناطیسی خارجی، تغییر رفتار رئولوژیکی نشان می دهد. از این رفتار هوشمند می توان برای کنترل دقیق نیروهای پرداخت کاری استفاده کرد. نتایج مطالعه این مطالعه نشان می دهد که اثر فشار اکستروژن به طور کلی چشمگیر نیست؛ با این حال، در فشار ۳/۷۵ مگاپاسکال، حداکثر بهبود کیفیت سطح به دست می آید که ناشی از ترکیب بهینه تنش های تسلیم القاشده توسط میدان مغناطیسی و تنش های برشی حاصل از جریان سیال است. بررسی های مربوط به تعداد سیکل های پرداخت نیز نشان می دهد که پس از کاهش اولیه زبری سطح در ۲۰۰ سیکل نخست، روندی افزایشی در زبری مشاهده می شود. در واقع، پرداخت مؤثر تنها پس از حذف کامل لایه های آسیب دیده و باقیمانده از فرایند سنگ زنی قبلی آغاز می گردد. پس از آن، با افزایش سیکل های پرداخت، زبری سطح به تدریج کاهش می یابد؛ هر چند این کاهش توسط عوامل محدودکننده ای مانند اندازه ذرات ساینده و فشار اکستروژن مهار می شود. اخیراً، کارتیکیان و همکاران [۱۸] پژوهشی را در مورد ترشوندگی سطح، مقاومت در برابر خوردگی زیستی و سازگاری خونی ایمپلنت های ساخته شده از فولاد زنگ نزن 316L پرداخت شده با فرایند پرداخت کاری دورانی جریان ساینده مگنتورئولوژیکال^۲ (R-MRAFF) انجام دادند. در این روش، سیال MRP ضمن حرکت رفت و برگشتی، حرکت دورانی نیز بر روی ناهمواری های سطح قطعه کار تجربه می کند. یافته ها نشان می دهند که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، زاویه تماس سطح ایمپلنت ها (معیار ترشوندگی) از مقدار آب گریز ۱۰۰/۹۲ درجه به مقدار آب دوست ۸۳/۴۵۲ درجه کاهش یافت. همچنین، مطالعات خوردگی زیستی بهبود مقاومت به خوردگی نمونه های پرداخت شده با R-MRAFF را نشان دادند؛ به طوری که نرخ خوردگی از ۳/۶۹۳ میکرومتر بر سال به ۰/۹۶۷ میکرومتر بر سال کاهش یافت. علاوه بر این، سازگاری خونی فولاد زنگ نزن 316L با کاهش معنادار چسبندگی پلاکت ها در مقایسه با نمونه اولیه بهبود یافت.

در مطالعات داخلی، پژوهش های متعددی به بررسی جنبه های مختلف فرایند AFM پرداخته اند [۱۹-۲۳]. به طور خاص، شبگرد و همکاران [۲۴] تأثیر پارامترهای کلیدی فرایند AFF را بر روی زبری سطح و برداشت ماده در پرداختکاری فولاد گرمکار AISI H13 مطالعه کردند. یافته های این پژوهش نشان داد که افزایش غلظت ذرات ساینده، هر دو شاخص کاهش زبری و برداشت ماده را بهبود می بخشد. فشار اکستروژن رفتاری غیرخطی از خود نشان داد به گونه ای که افزایش فشار از ۴ به ۶ مگاپاسکال اثر مثبت داشت، اما افزایش بیشتر آن به ۸ مگاپاسکال منجر به افت عملکرد گردید. تصاویر میکروسکوپی نشان داد که زمان پرداختکاری بیش از ۴ ساعت باعث نفوذ و ماندگاری ذرات ساینده در سطح نمونه و در نتیجه تخریب سطح می شود. همچنین با افزایش اندازه ذرات ساینده، میزان کاهش زبری و برداشت ماده افزایش یافت. از دیگر یافته های این مطالعه، اثربخشی بیشتر فرایند AFF بر روی سطوح اولیه خشن کاری شده در مقایسه با سطوح با زبری اولیه کمتر بود. در تحقیقی دیگر، عبدالمهی و صفوی [۲۵] با استفاده از فرایند AFF به بررسی پرداخت قالب فورج با سطح انحنا دار پرداختند. این قالب ها به روش EDM تولید شده بودند. آن ها با به کارگیری یک قطعه واسطه، گذرگاه مناسبی برای هدایت جریان ساینده در انحنای قالب ایجاد کردند. شبیه سازی دو فازی (سیال-جامد) جریان نشان داد که مجموع فشار در هر نقطه در یک کورس کامل رفت و برگشت تقریباً ثابت است. با توجه به رابطه مستقیم فشار با نرخ برداشت ماده در فرایند AFF، این نتیجه حاکی از امکان دستیابی به پرداخت یکنواخت در سطح قطعه است. یافته های تجربی نیز صحت شبیه سازی را تأیید کرده و نشان دادند که افزایش اندازه ذرات ساینده، تعداد کورس ها و غلظت ساینده منجر به افزایش نرخ براده برداری می شود. همچنین در این فرایند، دقت ابعادی قطعه حفظ گردید. در مطالعه ای دیگر، اسحاقی و همتی [۲۶] فرایند ماشینکاری چرخشی جریان ساینده^۳ (AFRM) بر روی یک دستگاه تراش معمولی راه اندازی نمودند و اثر دما بر عملکرد پرداختکاری این فرایند را بررسی کردند. یافته ها نشان دادند که فرایند AFRM قادر به دستیابی به نرخ براده برداری و کیفیت سطح مشابه با AFM است. از مزایای این روش جدید، عدم افزایش محسوس دمای خمیر ساینده در بازه زمانی معمول پرداختکاری است. با این حال، در صورت ادامه عملیات، افزایش دما رخ داده و نرخ براده برداری کاهش می یابد که رفتاری مشابه با AFM دارد. در تحقیقی دیگر، چوپانی و همکاران [۲۷] به چالش ماشین کاری یکنواخت سر فمورال مفصل ران مصنوعی به دلیل هندسه پیچیده آن پرداختند. محققان با طراحی و ساخت یک فیکسچر ماکت معکوس نوآورانه، سعی در بهبود فرایند AFF برای این کاربرد خاص داشتند. آن ها تأثیر پارامترهای کلیدی این فرایند را بر روی بهبود

¹ Viscoplastic² Rotational Magnetorheological Abrasive Flow Finishing (R-MRAFF) Process³ Abrasive Flow Rotary Machining (AFRM)

زبری سطح نمونه های فولاد زنگ نزن 316L بررسی کردند. یافته ها نشان داد که روش پیشنهادی قادر به ایجاد سطحی صاف و یکنواخت بدون آسیب های سطحی است و با ریزتر شدن ذرات ساینده، درصد بهبود زبری سطح افزایش می یابد. این مطالعه اثربخشی AFF را برای کاربردهای پزشکی و قطعات با هندسه کروی تأیید کرده است.

مرور ادبیات نشان می دهد که رویکردهای ترکیبی مبتنی بر میدان مغناطیسی، چالش های کلیدی فرایند AFM را به طور مؤثری بهبود بخشیده اند. به طور خاص، اگرچه میدان مغناطیسی در فرایند MRAFF بر پلایه آهنرباهای الکتریکی بود و عملکردی بهتر از فرایند AFF گزارش شد [۱۷]، اما این فرایند با مشکل پرداختکاری غیر یکنواخت و نرخ پایین برداشت ماده مواجه است. علاوه بر این، با وجود اینکه فرایند R-MRAFF طیف وسیعی از قابلیت ها، مزایا و کاربردهای صنعتی را دارد [۱۸]، اما این فرایند به صورت دستگاهی خانگی و غیر خودکار طراحی شده است. در همین راستا، نوآوری اصلی پژوهش حاضر ارائه و بررسی تجربی یک فرایند ترکیبی نوین با عنوان ماشین کاری جریان ساینده به کمک میدان مغناطیسی چرخشی^۱ (RMF-AFM) است. این فرایند از دو جهت با مطالعات پیشین تفاوت اساسی دارد (۱): نسبت به MRAFF [۱۷]، از آهنرباهای دائم با چیدمان متفاوت و میدان مغناطیسی چرخشی استفاده می کند؛ (۲) نسبت به R-MRAFF [۱۸]، کاملاً خودکار و در مقیاس صنعتی طراحی شده است. اگرچه گزارش اولیه ای بین المللی از این فرایند توسط چوپانی و همکاران [۲۸] ارائه شده، اما کاربرد عملی و بررسی سیستماتیک آن در صنعت و پژوهش های داخلی مورد توجه کافی قرار نگرفته و به صورت یک شکاف پژوهشی باقی مانده است. در این پژوهش: (۱) نمونه ای در مقیاس صنعتی از دستگاه RMF-AFM طراحی و ساخته شد؛ (۲) عملکرد فرایند بر روی لوله های آلومینیومی سری ۲۰۲۴ با تمرکز بر شاخص های کلیدی شامل نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده ارزیابی گردید؛ (۳) مورفولوژی و توپوگرافی سطح نمونه ها پیش و پس از پرداخت، به طور کمی و کیفی تحلیل شد؛ و (۴) مقایسه ای نظام مند میان کارایی فرایند نوین RMF-AFM و فرایند AFM سنتی انجام پذیرفت. بنابراین، هدف نهایی این مطالعه، علاوه بر معرفی و بومی سازی این فناوری پیشرفته، تبیین قابلیت های متمایز آن در دستیابی به کیفیت سطحی برتر و بازدهی فرایندی بالاتر در چهارچوب صنعت ملی است.

۲- اصول پرداخت کاری فرایند RMF-AFM

اصول پایه و مکانیسم فرایند RMF-AFM به طور شماتیک در شکل ۱ (الف-ه) ارائه شده است. در این فرایند، یک میدان مغناطیسی دوار که از چرخش آهنرباهای دائم حول قطعه کار لوله ای ایجاد می شود، بر سیال MRP اعمال می گردد. اعمال این میدان، خواص رئولوژیکی سیال MRP را به طور هوشمندانه و برگشت پذیر از حالت نیوتنی به حالت پلاستیک بینگهام^۲ با تنش تسلیم مشخص تغییر می دهد. تحت تأثیر خطوط میدان مغناطیسی، ذرات فرو مغناطیسی موجود در سیال MRP، ساختارهای زنجیره ای صلب و موقتی را در راستای میدان تشکیل می دهند. این زنجیره ها ذرات ساینده را محصور کرده و به طور مؤثری آن ها را در ناحیه پرداخت نگه می دارند [۱۷]. در این شرایط، سیال MRP درون قطعه کار، یک حرکت ترکیبی را تجربه می کند: حرکت رفت و برگشتی محوری ناشی از فشار هیدرولیکی و یک حرکت چرخشی ناشی از چرخش میدان مغناطیسی (شکل ۱-ج). در نتیجه، مسیر حرکت هر دانه ساینده فعال بر روی سطح قطعه کار، از یک مسیر خطی ساده به یک مسیر مارپیچی تبدیل می شود. این تغییر هندسه مسیر، به طور همزمان طول تماس مؤثر و مؤلفه تنش برشی اعمال شده توسط دانه ساینده بر ناهمواری های سطح را افزایش می دهد که در نهایت به افزایش نرخ برداشت ماده و بهبود کیفیت سطح پرداخت منجر می گردد. مکانیسم برداشت ماده در این فرایند در شکل ۱-د و ۱-ه به صورت شماتیک نشان داده شده است. تحلیل نیروها نشان می دهد که سه مؤلفه نیروی محوری^۳ (F_a)، نیروی فرورفتگی کل^۴ ($F_{indentation}$) و نیروی برشی مماسی^۵ (F_t) به طور همزمان بر هر دانه ساینده فعال اثر می گذارند. نیروی محوری که مستقیماً از فشار پمپاژ سیال MRP ناشی می شود، مسئول شکل گیری، برش و جدایش میکرو براده ها است. نیروی فرورفتگی کل، حاصل برهم نهی نیروی های مغناطیسی^۶ (F_m)، شعاعی^۷ (F_r) و

¹ Rotary Magnetic Field-Assisted Abrasive Flow Machining (RMF-AFM) Process

² Bingham Plastic

³ Axial Force (F_a)

⁴ Indentation Force ($F_{indentation}$)

⁵ Tangential Cutting Force (F_t)

⁶ Magnetic Force

⁷ Radial Force

گریز از مرکز^۱ (F_{cen}) بوده و عامل کلیدی برای نفوذ دانه ساینده به زیر لایه و غلبه بر استحکام تسلیم ماده قطعه کار است. نیروی برشی مماسی نیز که مستقیماً از حرکت چرخشی میدان مغناطیسی و سیال MRP ایجاد می‌شود، نقش اصلی را در حذف پیک‌های ناهمواری‌ها و ایجاد سطحی صاف بر عهده دارد. همان‌گونه که داس و همکاران [۲۹] اشاره کرده‌اند، نیروی فرورفتگی کل را می‌توان با رابطه (۱) بیان نمود:

$$\bar{F}_{indentation} = \bar{F}_m + \bar{F}_r + \bar{F}_{cen} \quad (1)$$

که در آن، نیروی مغناطیسی (F_m) که از میدان آهنرباهای دائم ناشی می‌شود، از طریق ذرات فرو مغناطیسی به دانه ساینده اعمال می‌گردد و مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$F_m = m\mu_0 X_m H \nabla H \quad (2)$$

که در آن، m جرم ذره فرو مغناطیسی، μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلأ، X_m حساسیت جرم ذره مغناطیسی، H شدت میدان مغناطیسی و ∇H گرادیان شدت میدان مغناطیسی است.

نیروی محوری (F_a)/شعاعی (F_r) تابعی خطی از فشار پمپاژ سیال (P) (رابطه ۳) است. این نیرو هم باعث پیشروی محوری ذرات می‌شود و هم سهمی در افزایش نفوذ آن‌ها دارد.

$$F_r = F_a = kP \quad (3)$$

که در آن k یک ثابت تجربی است.

چرخش آهنرباها (با چیدمان بهینه قطب‌ها، نظیر الگوی ۹۰ درجه) حول قطعه کار، حرکت دورانی را به سیال MRP منتقل می‌کند. از این حرکت دو مؤلفه نیروی دیگر پدید می‌آید: نیروی گریز از مرکز (F_{cen}) (رابطه ۴) که به نفوذ دلنه کمک می‌کند و نیروی برشی مماسی (F_t) (رابطه ۵) عامل اصلی صاف کردن ناهمواری‌های سطحی است.

$$F_{cen} = mr\omega^2 \quad (4)$$

$$F_t = 2m(\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (5)$$

که در آن، r شعاع قطعه کار، ω سرعت زاویه‌ای و v سرعت خطی دانه ساینده است. ω تابعی از $\omega = \frac{2\pi N}{60}$ است که در آن N سرعت دورانی دانه ساینده است.

درنهایت، نیروی برش مؤثر (F_c) که عمل نهایی برداشت ماده و پرداخت را انجام می‌دهد، از برآیند برداری نیروی محوری و نیروی برشی مماسی حاصل می‌شود (رابطه ۶). این ترکیب هوشمندانه نیروها، مکانیسم اصلی برتری فرایند RMF-AFM نسبت به روش AFM سنتی است.

$$\vec{F}_c = \vec{F}_a + \vec{F}_t \quad (6)$$

درمجموع، هم‌افزایی بین میدان مغناطیسی دوار کنترل‌پذیر و فشار هیدرولیکی در فرایند RMF-AFM، منجر به ایجاد یک میدان نیروی ترکیبی و سه‌بعدی بر هر دانه ساینده می‌گردد. این مکانیسم نه تنها نرخ برداشت ماده را از طریق افزایش نفوذ و تنش برشی افزایش می‌دهد، بلکه از طریق ایجاد مسیر حرکت مارپیچی، یکنواختی و کیفیت پرداخت سطح را نیز به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- دستگاه و روش RMF-AFM

تصویری از دستگاه و روش RMF-AFM در شکل ۲ (الف-ب) نشان داده شده است. این دستگاه با هدف اعمال هم‌زمان فشار هیدرولیک و یک میدان مغناطیسی دوار بر سیال MRP طراحی و ساخته شد. دستگاه اصلی بر پایه یک دستگاه AFM سنتی بنا شده که شامل یک شاسی فولادی، پاور یونیت هیدرولیک (شامل دو جک دوطرفه با حداکثر طول کورس ۷۵ میلی‌متر، سنسورهای جابجایی و گیج فشار)، دو سیلندر ذخیره سیال، سیستم معکوس کننده جهت جک‌ها و یک پنل کنترل است که وظیفه ایجاد حرکت رفت و برگشتی سیال

¹ Centrifugal Force

MRP را بر عهده دارد. در سیستم هیدرولیک، کنترل فشار برگشت در مسیر تخلیه روغن برای یکنواختی نیروی محوری و پایداری حرکت جک‌ها ضروری است. آشنایی بیشتر با اصول طراحی این مدارها در مراجع [۳۰] و [۳۱] با جزئیات بیشتری ارائه شده است. به این سیستم پایه، یک مجموعه برای ایجاد میدان مغناطیسی دوار افزوده شد. این مجموعه متشکل از یک الکتروموتور سه فاز (۳۷/۰ کیلووات، ۱۴۰۰ دور بر دقیقه) به عنوان محرک اصلی، یک درایو فرکانس متغیر^۱ (VFD) برای کنترل دقیق سرعت دورانی، چهار آهنربای دائم نئودیمیوم (Nd-Fe-B، گرید N52 و ابعاد ۲۰×۲۰×۱۰ میلی‌متر) و یک فیکسچر نگه‌دارنده آهنرباها است. انتقال قدرت از موتور به فیکسچر حاوی آهنرباها از طریق یک سیستم چرخ‌زنجیر با نسبت کاهش ۱:۲ و یک بلبرینگ کف گرد انجام می‌پذیرد که امکان چرخش روان مجموعه مغناطیسی را حول قطعه کار فراهم می‌آورد. قطعه کار لوله‌ای از جنس آلومینیوم سری ۲۰۲۴ توسط دو فیکسچر فوقانی و تحتانی که از پلی‌امید ضد سایش ماشین کاری شده‌اند، در راستای مرکزی دستگاه نگهداری می‌شود. این فیکسچرها ضمن تثبیت قطعه کار و سیستم مغناطیسی در موقعیت هم‌محور، مجرای لازم برای تزریق یکنواخت سیال MRP را ایجاد می‌کنند. سیال مورد استفاده ترکیبی از ذرات فرو مغناطیس آهن^۲ (Fe)، ذرات ساینده سیلیکون کارباید^۳ (SiC) و یک سیال حامل ویسکوپلاستیک (متشکل از گریس و روغن پارافین) با نسبت‌های وزنی بهینه شده است. پس از نصب قطعه کار و پر کردن سیستم با سیال MRP، دستگاه با پارامترهای از پیش تنظیم شده (فشار اکستروژن و سرعت دورانی آهنرباها) راه‌اندازی می‌شود. در حین فرایند، حرکت ترکیبی ناشی از فشار هیدرولیک (ایجاد حرکت محوری رفت و برگشتی) و چرخش میدان مغناطیسی (ایجاد حرکت دورانی) باعث می‌شود سیال MRP درون قطعه کار یک مسیر مارپیچی را طی کند (رجوع شود به شکل ۱-ج). این مسیر حرکت پیشرفته، در کنار میدان نیروی ترکیبی توصیف شده در بخش تئوری (بخش ۲)، موجب افزایش نرخ برداشت ماده و بهبود کیفیت پرداخت سطح داخلی لوله می‌گردد.

۳-۲- آماده سازی سیال MRP

سیال MRP مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس آزمایشات اولیه و رویکرد ارائه شده در مرجع [۲۹]، از اختلاط سه جزء اصلی بر اساس درصد حجمی تهیه گردید (شکل ۳). این اجزا شامل: ۱) ذرات Fe با اندازه متوسط ۱۰۰ میکرومتر (۲۶/۶ درصد حجمی)، ۲) ذرات ساینده SiC با شماره مش ۱۸۰ (۱۳/۴ درصد حجمی) و ۳) یک حامل ویسکوپلاستیک متشکل از روغن پارافین (۴۸ درصد حجمی) و گریس MP RENOLIT (۱۲ درصد حجمی) بود. برای دستیابی به پراکندگی یکنواخت و جلوگیری از جدایش، مخلوط سازی با استفاده از یک همزن مکانیکی به مدت ۱ ساعت در دمای محیط انجام شد. حجم کل سیال MRP در هر آزمایش ۱۶۰/۷۳ سانتی متر مکعب بوده که بر اساس قطر داخلی سیلندر (۶۱ میلی‌متر) و طول کورس موثر (۵۵ میلی‌متر) محاسبه شده است.

۳-۳- رویکرد تجربی

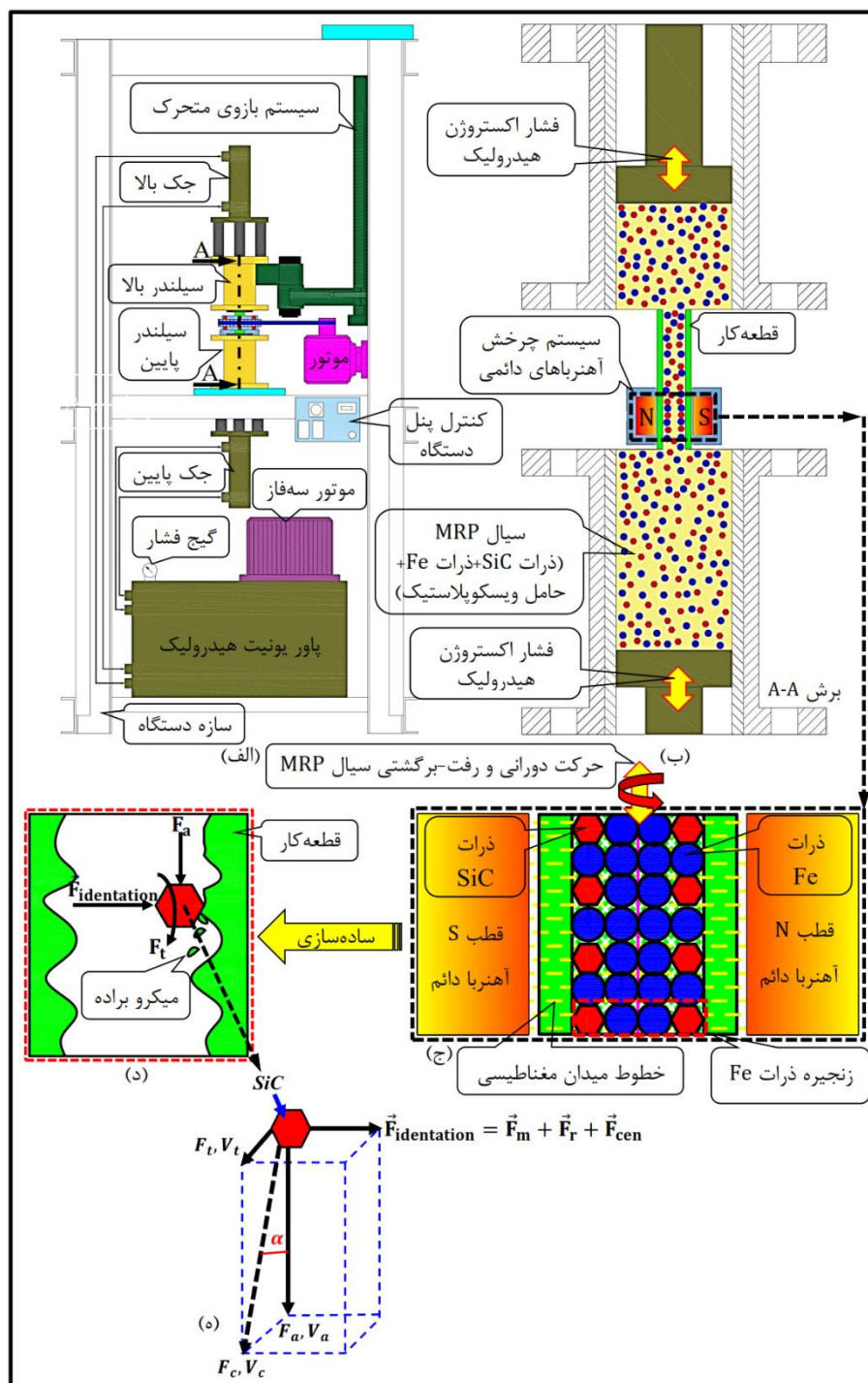
در این پژوهش، به منظور بررسی اثر میدان مغناطیسی چرخشی بر روی عملکرد فرایند AFM، یک مطالعه تجربی بر روی لوله‌های آلومینیوم سری ۲۰۲۴ (ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱) انجام شد. پارامترهای کلیدی فرایند RMF-AFM شامل فاصله بین آهنرباهای دائم و سطح خارجی قطعه کار (۱ میلی‌متر)، سرعت چرخش آهنرباها (۱۰۰ دور بر دقیقه) و فشار اکستروژن هیدرولیک (۲ مگاپاسکال) بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مقدماتی و با در نظر گرفتن محدوده بهینه گزارش شده در مطالعات مشابه [۲۹] به عنوان مرجع راهنما، در سطوح بهینه ثابت نگه‌داشته شد. فاصله ۱ میلی‌متر با توجه به اصل حداکثر کردن نیروی مغناطیسی و محدودیت‌های عملی مونتاژ (جلوگیری از برخورد فیزیکی) انتخاب گردید. نمونه‌های آزمایشی با ابعاد قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۸ میلی‌متر و طول ۱۸۰ میلی‌متر، پس از ماشین کاری اولیه به وسیله تراش، سوراخ کاری و برق کاری، تحت شرایط یکسان آماده سازی شدند. پیش و پس از عملیات پرداخت، تمامی نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه در حمام آلتراسونیک حاوی استون شستشو و خشک شدند. تغییرات جرم با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی گرم اندازه گیری گردید (شکل ۴). اندازه گیری زبری سطح نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISO 4287 و با استفاده از زبری سنج (MarSurf PS 10 ساخت شرکت Mahr GmbH، آلمان) انجام شد. بر اساس توصیه استاندارد

¹ Variable Frequency Drive (VFD)

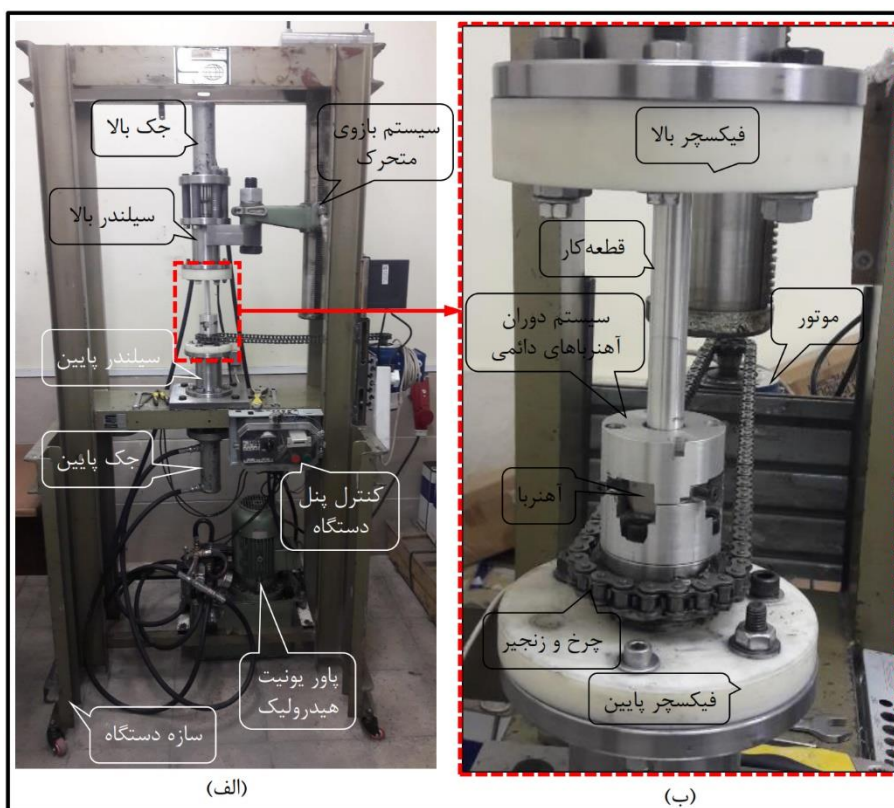
² Ferromagnetic Iron (Fe)

³ Silicon Carbide (SiC)

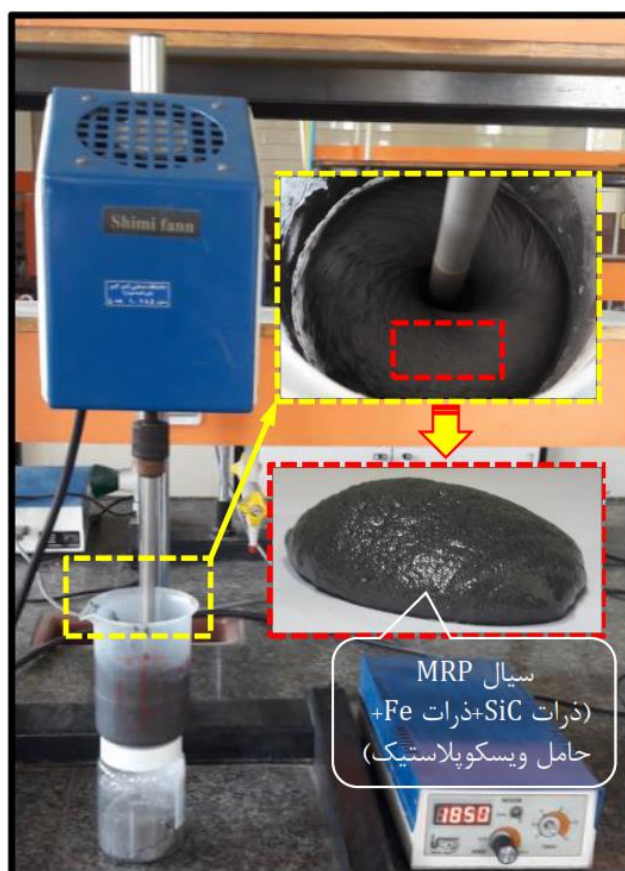
ISO 4288:1996 و با توجه به محدوده زبری مورد انتظار، طول ارزیابی معادل ۴ میلی متر انتخاب گردید. طول نمونه برداری نیز برابر ۰/۲۵ میلی متر، مطابق با دستورالعمل دستگاه و متناسب با محدوده زبری مذکور، تعیین شد. به منظور تأیید تکرارپذیری نتایج، هر آزمایش ۳ بار تکرار گردید. همچنین برای هر نمونه، اندازه گیری زبری سطح در ۵ نقطه مختلف و به صورت عمود بر جهت ماشین کاری انجام گرفت (شکل ۵) و در نهایت، میانگین این پنج اندازه گیری به عنوان مقدار نهایی زبری سطح (Ra) گزارش شد. شاخص های عملکردی اصلی شامل نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری، نرخ برداشت ماده و $\Delta Ra\%$ به ترتیب با استفاده از روابط (۷) تا (۱۰) محاسبه گردیدند. آزمایش ها در بازه های زمانی مختلف پرداخت کاری (۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه) به منظور تحلیل روند تغییرات این شاخص ها تکرار شد. پارامترهای ورودی فرایند RMF-AFM و سطوح آن ها در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱ شماتیکی از اصول پرداخت کاری دستگاه و روش RMF-AFM



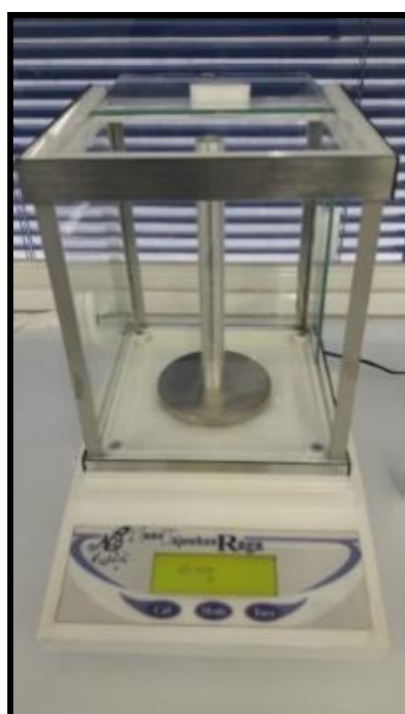
شکل ۲ تصویری از دستگاه و روش RMF-AFM



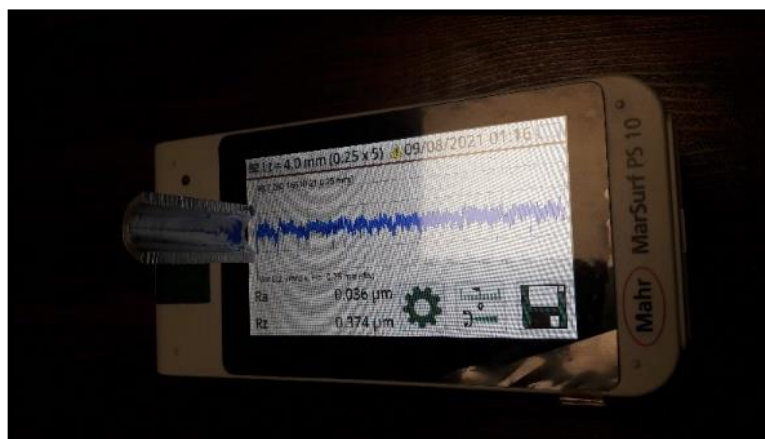
شکل ۳ تصویری از آماده سازی سیال MRP

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم

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 ۴ تصویری از نحوه اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها توسط ترازوی دیجیتال ساخت شرکت نانو پژوهان راگا با دقت ۰/۰۱ میلی‌گرم



شکل ۵ تصویری از نحوه اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها توسط دستگاه زبری سنج مدل MarSurf PS 10 ساخت شرکت Mahr آلمان

$$\text{Surface roughness ratio}(SRR) = \left(\frac{Final_{Ra}}{Initial_{Ra}} \right) \quad (7)$$

$$\text{Finishing rate} \left(\frac{\mu m}{min} \right) \circ \left(\frac{Initial_{Ra} - Final_{Ra}}{Total \text{ finishing time}} \right) \quad (8)$$

$$\text{Material removal rate} \left(\frac{mg}{min} \right) \circ \left(\frac{Initial \text{ weight} - Final \text{ weight}}{Total \text{ finishing time}} \right) \quad (9)$$

$$\text{Percentage change in } R_a \text{ (or } \% \Delta R_a) = \left(\frac{Initial_{Ra} - final_{Ra}}{Initial_{Ra}} \right) \times 100 \quad (10)$$

جدول ۲ پارامترهای ورودی فرایند RMF-AFM

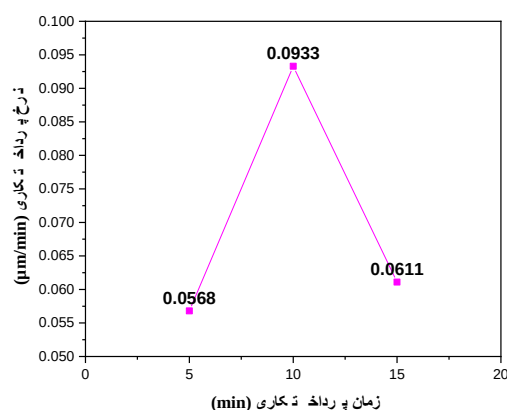
مقادیر سطوح پارامترها			واحد	پارامترهای ورودی فرایند RMF-AFM
۱۵	۱۰	۵	دقیقه	زمان پرداخت کاری
۲	۲	۲	مگاپاسکال	فشار اکستروژن هیدرولیک
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	دور بر دقیقه	سرعت چرخش آهنرباها
۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	---	شماره مش ساینده SiC

۴- نتایج و بحث

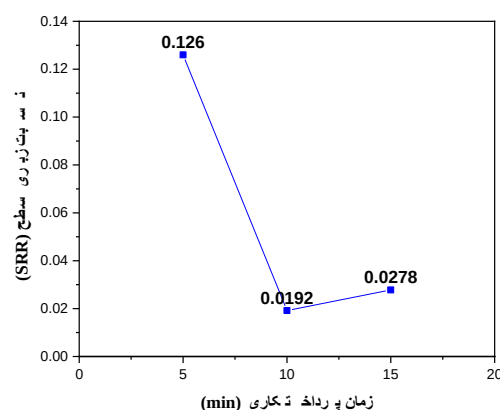
هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی عملکرد فرایند RMF-AFM بر روی لوله‌های آلومینیومی سری ۲۰۲۴ در بازه‌های زمانی مختلف پرداخت است. عملکرد فرایند از طریق تحلیل سه شاخص کلیدی کمی نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده (MRR) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، به منظور درک مکانیسم بهبود سطح، تغییرات مورفولوژی و توپوگرافی سطح نمونه‌ها قبل و پس از پرداخت به طور کیفی تحلیل شده است. در نهایت، برای نشان دادن برتری فرایند پیشنهادی، $\% \Delta R_a$ حاصل از فرایند RMF-AFM با نتایج حاصل از فرایند AFM سنتی مقایسه شده است.

۴-۱- مشاهدات کلیدی و تفسیر آن‌ها

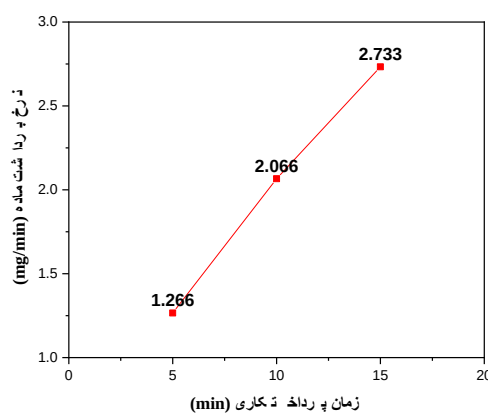
شکل ۶ (الف-ج) تأثیر زمان پرداخت کاری را بر سه شاخص کلیدی عملکرد فرایند RMF-AFM نسبت زبری سطح، نرخ پرداخت کاری و نرخ برداشت ماده در نمونه‌های لوله‌ی آلومینیومی سری ۲۰۲۴ تحت شرایط بهینه (گپ کاری ۱ میلی‌متر، سرعت چرخش آهنربا ۱۰۰ دور بر دقیقه، فشار اکستروژن ۲ مگاپاسکال) نشان می‌دهد. تحلیل این نمودارها حاکی از تأثیر معنادار و غیرخطی پارامتر زمان بر فرایند است. با افزایش زمان از ۵ به ۱۰ دقیقه، نسبت زبری سطح از ۰/۱۲۶ به ۰/۱۹۲ کاهش و هم‌زمان نرخ پرداخت کاری از ۰/۰۵۶۸ به ۰/۰۹۳۳ میکرومتر بر دقیقه افزایش یافته است (شکل‌های ۶-الف و ۶-ب). این بهبود عملکرد را می‌توان مستقیماً به مکانیسم منحصربه‌فرد فرایند RMF-AFM (نگاه کنید به بخش ۲ و شکل ۱). در این حالت، برآیند نیروهای فرورفتگی و برشی مماسی ناشی از میدان مغناطیسی چرخشی، همراه با حرکت دورانی و رفت‌وبرگشتی سیال MRP، منجر به تماس کارآمد و طولانی‌تر ذرات ساینده SiC با ناهمواری‌های سطح می‌شود. در مراحل اولیه، این برهمکنش، حذف مؤثر قله‌های زبری و در نتیجه بهبود سریع کیفیت سطح را در پی دارد. با این حال، فراتر از زمان بهینه (۱۰ دقیقه) و با ادامه فرایند تا ۱۵ دقیقه، روند معکوس می‌شود؛ به طوری که نسبت زبری سطح با شیبی ملایم به ۰/۰۲۷۸ افزایش و نرخ پرداخت کاری به ۰/۰۶۱۱ میکرومتر بر دقیقه کاهش می‌یابد. این افت کارایی را می‌توان ناشی از کاهش چشم‌گیر ناهمواری‌های اولیه و صاف شدن نسبی سطح دانست. در این مرحله، برهمکنش ذرات ساینده ممکن است به جای حذف قله‌ها، منجر به ایجاد خراش‌های ریز ثانویه (میکرو خراش) یا تغییر شکل پلاستیک موضعی شود که خود سبب افزایش مجدد مقدار زبری می‌گردد. در مقابل، نرخ برداشت ماده در بازه ۵ تا ۱۵ دقیقه روندی یکنواخت افزایشی نشان داده و از ۱/۲۶۶ به ۲/۷۳۳ میلی‌گرم بر دقیقه رسیده است (شکل ۶-ج). این رفتار متمایز را می‌توان به ماهیت حجم‌بر و تجمعی این پارامتر مرتبط دانست. با افزایش زمان، افزایش تعداد برخورد، طول مسیر تماس (به دلیل حرکت مارپیچی ذرات) و عمق نفوذ ذرات ساینده فعال، به طور مستمر منجر به تشکیل میکرو براده‌های بیشتر و در نتیجه افزایش نرخ کلی برداشت ماده می‌شود، حتی در شرایطی که کیفیت سطح در نقطه‌ای بهینه از کارایی افت کند.



(ب)



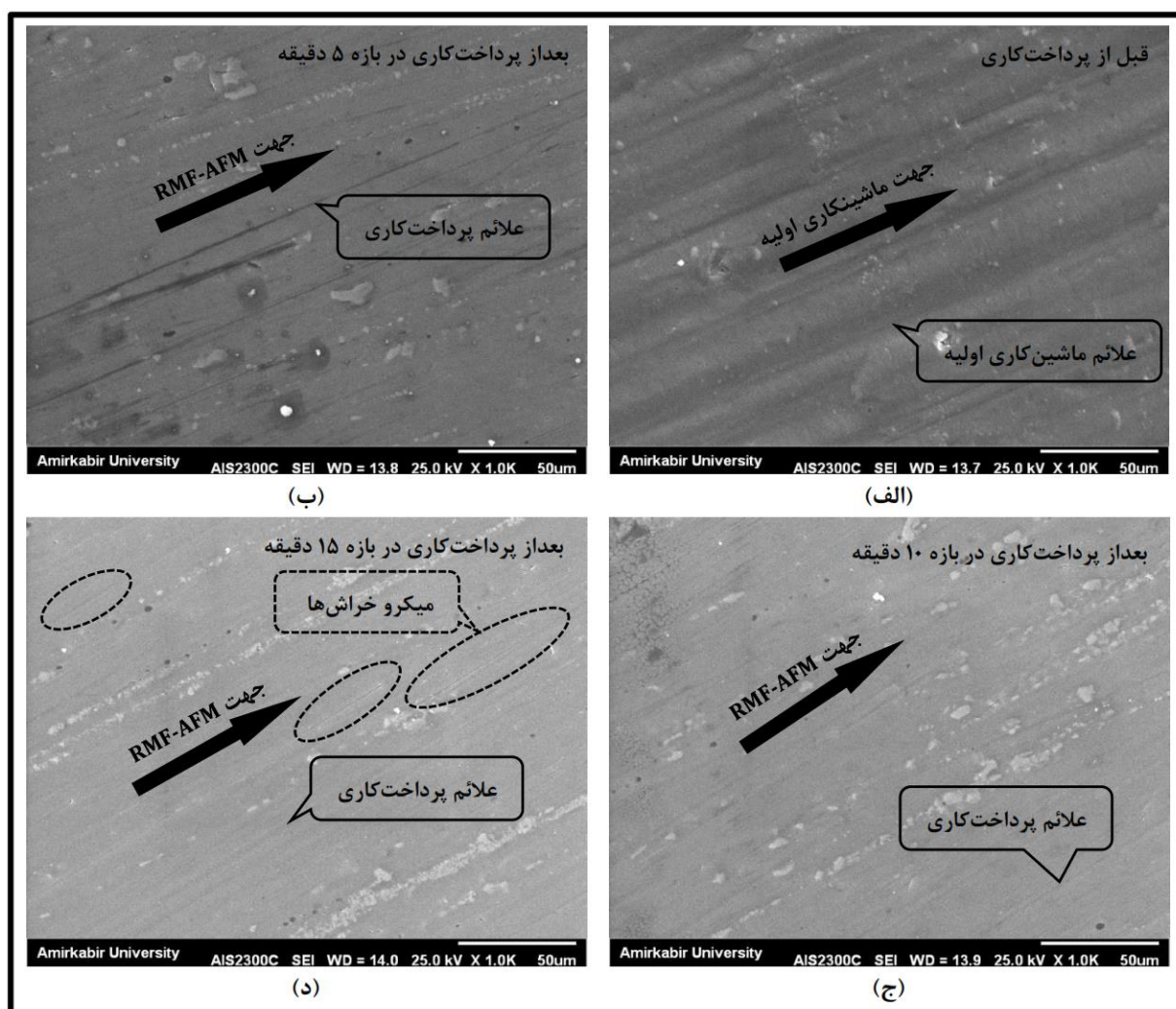
(الف)



(ج)

شکل ۶ اثر زمان پرداخت کاری فرایند RMF-AFM بر روی الف) نسبت زبری سطح $(SRR) = \left(\frac{FinalRa}{InitialRa} \right)$ ، ب) نرخ پرداخت کاری $(Finishing\ rate) (\mu m/min) = \left(\frac{InitialRa - FinalRa}{Total\ finishing\ time} \right)$ و ج) نرخ برداشت ماده $(Material\ removal\ rate) (mg/min) = \left(\frac{Initial\ weight - Final\ weight}{Total\ finishing\ time} \right)$

برای درک بهتر این روندهای کمی، مورفولوژی سطح نمونه‌ها قبل و پس از پرداخت کاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷ الف-د). مقایسه‌ی شکل‌های ۷-الف (سطح خام) و ۷-ب (پس از ۵ دقیقه پرداخت) به‌وضوح نشان می‌دهد که پرداخت کاری در این بازه‌ی اولیه بیشترین تأثیر را در حذف ناهمواری‌های اولیه داشته است، به‌طوری‌که نه‌تنها علائم ماشین کاری اولیه کاملاً محو شده، بلکه جهت و الگوی حرکت ذرات در فرایند RMF-AFM به‌صورت رگه‌هایی منظم بر روی سطح حک شده است. این مشاهدات کیفی به‌خوبی تأیید می‌کنند که در دقایق اولیه، بیشترین کار مکانیکی مؤثر بر روی سطح انجام شده و دلیل کاهش سریع زبری در شکل ۶-الف است. پس از ۱۰ دقیقه (شکل ۷-ج)، سطحی صاف و یکنواخت حاصل شده، اگرچه رگه‌های ناشی از پرداخت همچنان به‌وضوح قابل تشخیص هستند. این وضعیت مطابق با نقطه بهینه در نمودارهای کمی است. با افزایش زمان پرداخت کاری به ۱۵ دقیقه (شکل ۷-د)، سطح تا حد زیادی صیقلی شده و علائم پرداخت به‌طور قابل توجهی کمرنگ‌تر می‌گردند. با این حال، بررسی دقیق‌تر تصویر SEM در این زمان، وجود علائم پرداخت کاری به شکل میکرو خراش‌ها و شیارهای کم‌عمق ناشی از تغییر شکل پلاستیک (شخم‌زنی) را آشکار می‌سازد. این پدیده‌ها را می‌توان به گذار از مکانیسم برش به مکانیسم شخم‌زنی نسبت داد که ناشی از عواملی نظیر خرد شدن ذرات ساینده SiC و ایجاد لبه‌های تیزتر، جدا شدن ذرات مغناطیسی Fe از سیال MRP و عملکرد آن‌ها به‌عنوان ذرات ساینده ثانویه، و همچنین کاهش ویسکوزیته سیال در اثر حرارت اصطکاکی می‌باشد. این تغییر مکانیسم، منجر به ایجاد خراش‌های کم‌عمق جدید و افزایش جزئی زبری سطح (مطابق با شکل ۶-الف) می‌گردد که نشان‌دهنده وقوع پدیده پرداخت بیش‌ازحد در زمان‌های طولانی‌تر از نقطه بهینه (۱۰ دقیقه) است.



شکل ۷ تصاویر SEM از بافت سطح نمونه‌ها: الف) قبل از پرداخت کاری و بعد از پرداخت کاری با فرایند RMF-AFM به مدت ب) ۵ دقیقه، ج) ۱۰ دقیقه و د) ۱۵ دقیقه

یافته‌های این بخش به‌طور همگرا نشان می‌دهند که زمان پرداخت کاری در فرایند RMF-AFM یک پارامتر بحرانی با تأثیر متضاد بر شاخص‌های مختلف عملکرد است. درحالی که برای دستیابی به پایین‌ترین زبری و بالاترین نرخ پرداخت، یک‌زمان بهینه (در این مطالعه ۱۰ دقیقه تحت شرایط آزمایشی فوق) وجود دارد، نرخ برداشت ماده در بازه‌های زمانی طولانی‌تر نیز کماکان رو به بهبود می‌گذارد. این تفاوت ناشی از ماهیت ذاتی این شاخص‌هاست: زبری سطح یک پارامتر کیفی و سطحی است، درحالی که نرخ برداشت ماده یک شاخص کمی و حجمی است. بنابراین، انتخاب زمان عملیات در این فرایند باید با در نظر گرفتن اولویت نهایی پژوهش (دستیابی به صافی سطح حداکثری، برداشت ماده بیشتر، یا توازن بین این دو) صورت پذیرد.

۴-۲- مقایسه توپوگرافی و مورفولوژی سطح قبل و بعد از پرداخت کاری

برای ارزیابی جامع عملکرد فرایند RMF-AFM، مورفولوژی و توپوگرافی سطح داخلی لوله‌های آلومینیومی سری ۲۰۲۴ قبل و بعد از پرداخت کاری به‌صورت مقایسه‌ای در شکل ۸ (الف-ز) مورد تحلیل قرار گرفت. این ارزیابی چند مقایسه برتری چشم‌گیر فرایند RMF-AFM را تأیید می‌کند. مقایسه‌ی تصاویر ماکروسکوپی (شکل‌های ۸-ب و ۸-ه) نشان می‌دهد که سطح خام، به دلیل زبری بالا، نور را به‌صورت پراکنده بازتاب می‌دهد که منجر به ظاهری کدر می‌شود. در مقابل، سطح پرداخت‌شده با RMF-AFM طی ۱۵ دقیقه بازتابی آینه‌وار و حداکثری از خود نشان می‌دهد که حاکی از ایجاد سطحی صیقلی و کاهش شدید پراکندگی نور است. داده‌های کمی

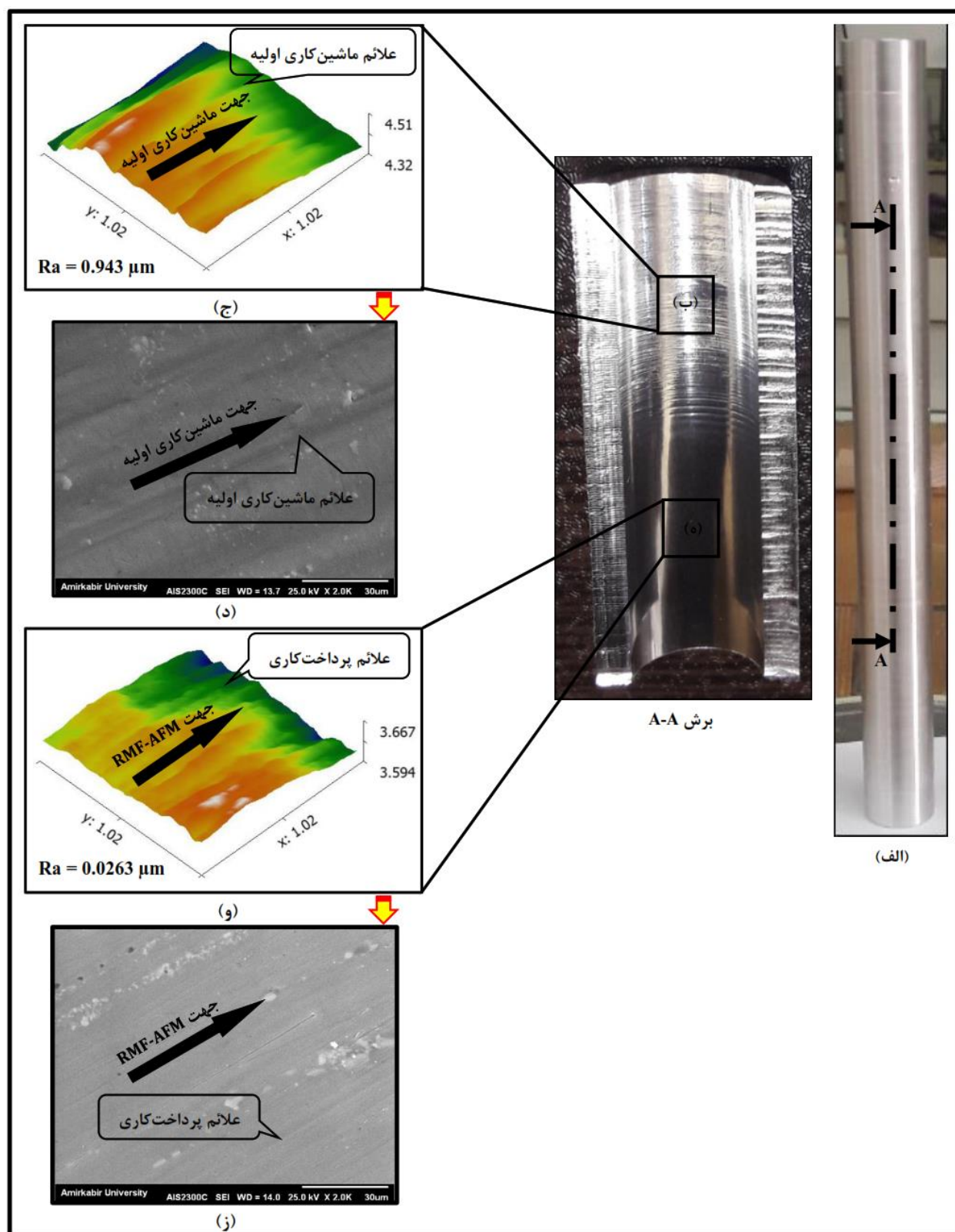
پروفیلومتری نوری (شکل های ۸-ج و ۸-و) این مشاهدات را تأیید می کنند. زبری سطح از $0.943/\mu\text{m}$ میکرومتر در حالت اولیه به $0.263/\mu\text{m}$ میکرومتر پس از پرداخت کاهش یافته که بیانگر کاهش $97/21\%$ درصدی است. این افت چشمگیر، حذف مؤثر قله ها و دره های عمیق ناشی از ماشین کاری اولیه را نشان می دهد. در مقیاس میکروسکوپی، تصاویر SEM (شکل های ۸-د و ۸-ز) دلایل این بهبود را آشکار می سازند. سطح خام دارای عیوبی نظیر شیارها و خراش های عمیق است که می توانند به عنوان تمرکز دهنده تنش عمل کنند و سلامت مکانیکی قطعه را تضعیف نمایند. فرایند RMF-AFM این آسیب های سطحی را به طور کامل حذف کرده و سطحی یکنواخت با سلامت سطح بالایی ایجاد نموده است.

نتایج این بخش به وضوح نشان می دهند که فرایند RMF-AFM نه تنها زبری سطح را به طور کمی تا حدود 97% بهبود می بخشد، بلکه با حذف عیوب زیرسطحی، سلامت سطح و یکنواختی مورفولوژیکی آن را به صورت کیفی ارتقا می دهد. بر این اساس، این فرایند به عنوان یک راه حل فنی مؤثر برای پرداخت و اصلاح سطوح داخلی با دسترسی دشوار، نظیر لوله های بلند پیشنهاد می شود.

۴-۳- مقایسه فرایندهای AFM سنتی و RMF-AFM

به منظور اعتبارسنجی عینی و کمی برتری فرایند پیشنهادی، یک مطالعه مقایسه ای سیستماتیک بین فرایند RMF-AFM و فرایند AFM سنتی بر مبنای شاخص $\Delta Ra\%$ طراحی و اجرا شد. شرایط آزمایشی، برای هر دو فرایند مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شد تا اطمینان حاصل شود که تفاوت مشاهده شده صرفاً ناشی از ماهیت مکانیسم پرداخت کاری است. لازم به ذکر است که شرایط فرایند در جدول ۳ برای دو روش AFM و RMF-AFM یکسان نیست، اما این تفاوت به دلیل تفاوت بنیادین در مکانیزم فیزیکی و رفتار رئولوژیکی سیال ها اجتناب ناپذیر است. مقایسه ارائه شده مبتنی بر بهترین عملکرد هر روش در شرایط بهینه خودش می باشد. نتایج این مقایسه که در شکل ۹ ارائه شده است، به وضوح برتری فرایند RMF-AFM را تأیید می کند. مقدار $\Delta Ra\%$ برای فرایند AFM سنتی $73/44\%$ اندازه گیری شد، در حالی که این شاخص برای فرایند RMF-AFM به $97/21\%$ رسید. محاسبات نشان می دهد که فرایند RMF-AFM از نظر کارایی بهبود زبری سطح، برتری $24/45\%$ درصدی را نسبت به روش AFM سنتی دارا است. این اختلاف عملکرد قابل توجه را می توان با تحلیل فیزیک بنیادی حاکم بر هر دو فرایند توضیح داد. در AFM سنتی، سیال ویسکوالاستیک تحت فشار اکستروژن، تنها یک حرکت خطی رفت و برگشتی بر روی سطح تجربه می کند. در نتیجه، مسیر تماس هر ذره ساینده با ناهمواری های سطح، مستقیم و محدود به طول قطعه کار است [۳۲]. این امر موجب برخورد های تصادفی و گذرا می شود و مشارکت هر دانه ساینده در عملیات برداشت ماده را به حداقل می رساند. در مقابل، در فرایند RMF-AFM، سیال MRP تحت تأثیر میدان مغناطیسی چرخشی خارجی، از یک دینامیک جریان کاملاً متفاوت تبعیت می کند. این سیال یک حرکت ترکیبی شامل مؤلفه ی خطی (ناشی از فشار اکستروژن) و مؤلفه ی دورانی قوی (ناشی از دوران آهنرباها) را تجربه می کند (مطابق شماتیک شکل ۱).

این ترکیب، یک مسیر سه بعدی مارپیچی برای ذرات ساینده ایجاد می نماید که طول تماس مؤثر هر ذره با سطح را به طور چشمگیری افزایش می دهد. مهم تر آنکه، ماهیت هوشمند سیال MRP که در آن ذرات آهن تحت میدان مغناطیسی زنجیره های محکمی تشکیل می دهند سبب هدایت هدفمند و پایدار ذرات ساینده می شود. در این پیکربندی، هر دانه ساینده تحت تأثیر یک میدان نیروی چندمحوره قرار می گیرد که شامل نیروی محوری اکستروژن، برآیند نیروهای فرورفتگی (مغناطیسی، شعاعی و گریز از مرکز) و نیروی برشی مماسی است. حاصل این میدان نیرو، عمق نفوذ بیشتر و درگیری سیستماتیک تر هر ذره ساینده با تعداد بیشتری از قله های زبری سطح است. این یافته های کمی به طور مستقیم توسط مشاهدات میکروسکوپی مقایسه ای شکل ۱۰ (الف-ب) تأیید می شوند. تصاویر SEM به وضوح نشان می دهند که سطح پرداخت شده توسط RMF-AFM از نظر یکنواختی، صافی و عیوب باقیمانده، کیفیت برتری نسبت به سطح حاصل از فرایند سنتی AFM دارد. این مشاهدات بصری، نتیجه عددی به دست آمده را تکمیل و تقویت می نمایند. بنابراین، می توان استنتاج نمود که برتری $24/45\%$ درصدی کارایی فرایند RMF-AFM، مستقیماً ناشی از تغییر پارادایم در مکانیزم برهمکنش ذره-سطح است. گذار از یک حرکت خطی و برخوردهای تصادفی در AFM سنتی، به یک حرکت مارپیچی و برخوردهای هدفمند در RMF-AFM، همراه با اعمال میدان نیروی چندمحوره قوی تر، کارایی فرایند برداشت ماده و اصلاح سطح را در مقیاس میکرو به طور بنیادی متحول ساخته است. این برتری، فرایند پیشنهادی را به عنوان یک جایگزین فنی مؤثر و کارآمد برای پرداخت سطوح داخلی پیچیده تثبیت می کند.



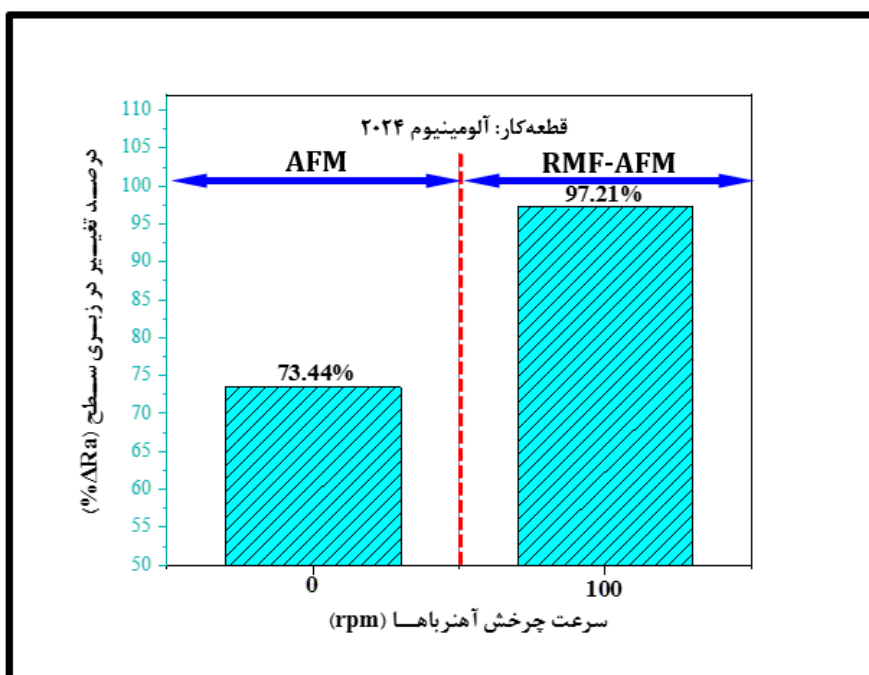
شکل ۸ تصاویر واقعی و تصاویر میکروسکوپی از بافت سطح نمونه‌ها: الف) یک نمونه آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، ب، ج و د) قبل از پرداخت کاری با متوسط زبری سطح ۰/۹۴۳ میکرومتر و ه، و ز) بعد از پرداخت کاری با فرایند RMF-AFM طی ۱۵ دقیقه با متوسط زبری سطح ۰/۰۲۶۳ میکرومتر.

جدول ۳ مقایسه ΔRa در فرایندهای AFM سنتی [۳۳] و RMF-AFM [مطالعه حاضر]

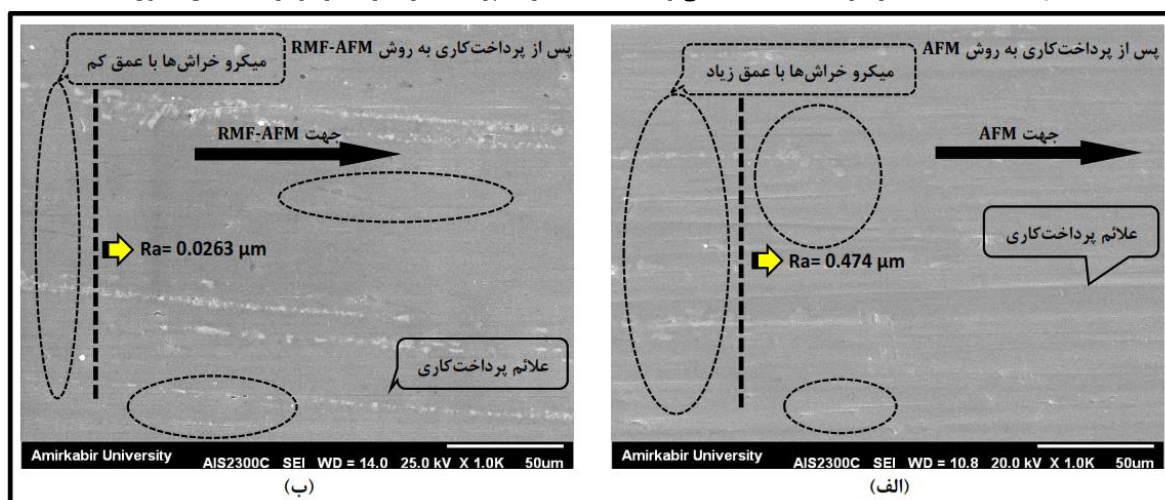
نتایج	شرایط پرداخت کاری					فرایندها
	چرخش آهنرباها (RPM)	تعداد سیکل‌ها	فشار اکستروژن (MPa)	واسطه پولیش کاری	قطعه کار	
۷۳/۴۴	۰	۱۸۰	۱۲	ساینده SiC با مش ۱۰۰۰ + حامل ویسکوالاستیک + روغن نفتنیک	آلومینیوم ۲۰۲۴	AFM*
۹۷/۲۱	۱۰۰	۱۳۸	۲	ساینده SiC با مش ۱۸۰ + پودر آهن + حامل ویسکوپلاستیک	آلومینیوم ۲۰۲۴	RMF- AFM**

* ماشین کاری جریان ساینده (AFM) [۳۳]

** ماشین کاری جریان ساینده به کمک میدان مغناطیسی چرخشی (RMF-AFM) [مطالعه حاضر]



شکل ۹ مقایسه ΔRa در فرایندهای AFM سنتی و RMF-AFM (شرایط پرداخت کاری برای هر دو فرایند مطابق جدول ۳)



شکل ۱۰ تصاویر SEM از بافت سطح نمونه‌های پرداخت شده در فرایندهای الف) AFM و ب) RMF-AFM (شرایط پرداخت کاری برای هر دو فرایند مطابق جدول ۳)

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، فرایند RMF-AFM به منظور غلبه بر محدودیت های زمان پرداخت طولانی و نرخ برداشت ماده پایین در روش AFM سنتی معرفی و ارزیابی شد. نتایج حاصل از آزمایش های تجربی بر روی لوله های آلومینیومی سری ۲۰۲۴ به شرح زیر قابل جمع بندی است:

- (۱) در زمان بهینه ۱۰ دقیقه، نسبت زبری سطح به مقدار ۰/۰۱۹۲ کاهش می یابد.
 - (۲) در همان زمان بهینه (۱۰ دقیقه)، نرخ پرداخت کاری به ۰/۰۹۳۳ میکرومتر بر دقیقه افزایش می یابد.
 - (۳) نرخ برداشت ماده در بازه زمانی ۱۵ دقیقه به طور پیوسته رشد کرده و به ۲/۷۳۳ میلی گرم بر دقیقه می رسد.
 - (۴) مطالعه مقایسه ای نشان می دهد که فرایند RMF-AFM دارای برتری ۲۴/۴۵ درصدی در بهبود زبری سطح نسبت به روش AFM سنتی است.
 - (۵) این برتری ناشی از ایجاد میدان نیروی چندمحوره و الگوی جریان مارپیچی در سیال هوشمند MRP می باشد که فرایند پیشنهادی را به عنوان یک راه حل مهندسی کارآمد برای پرداخت سطوح داخلی پیچیده تثبیت می کند.
- از منظر کاربرد صنعتی، فرایند RMF-AFM پتانسیل مناسبی برای پرداخت کاری قطعات با هندسه پیچیده و سطوح حساس دارد. این فرایند نسبت به AFM سنتی، به دلیل مشارکت میدان مغناطیسی چرخشی، از بهره وری و نرخ برداشت ماده بالاتری برخوردار است. از نظر مقیاس پذیری، با افزایش ابعاد قطعه کار و تعداد آهنرباها، امکان طراحی آرایه های چندآهنربایی برای کاربردهای صنعتی فراهم می شود. با این حال، تحلیل عملکرد-هزینه اولیه نشان می دهد که هزینه تجهیزات و سیال مگنتورئولوژیکال در فرایند RMF-AFM نسبت به AFM معمولی بالاتر است؛ هرچند این هزینه در کاربردهای حساس به کیفیت سطح (مانند صنایع هوافضا، پزشکی و قالب سازی) قابل توجیه خواهد بود.
- در راستای توسعه این پژوهش، مسیرهای زیر برای تحقیقات آینده پیشنهاد می شود: (۱) بهینه سازی پارامترهای فرایند با استفاده از روش های طراحی آزمایش؛ (۲) مدلسازی تحلیلی و عددی فرایند با در نظر گرفتن برهم کنش میدان مغناطیسی، جریان سیال و ذرات ساینده؛ (۳) کاربرد روش های هوشمند نظیر شبکه های عصبی مصنوعی و الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک برای مدلسازی و یافتن شرایط بهینه عملیاتی.

References

- [1] Rhoades LJ. Abrasive flow machining for automatic surface finishing and capacitance technology for in-process surface and dimensional metrology. In Surface engineering 1990 Jun 30 (pp. 456-467). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-94-009-0773-7-46
- [2] Kumar S, Singh K, Brar BS, Kumar R. Effect of processing condition on abrasive flow machining process: A review. Materials Today: Proceedings. 2023 Jan 9. doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.237
- [3] Kumar S, Jagadeesha T, Mandal G, Talib N. Abrasive flow finishing. Advanced Machining and Micromachining Processes. 2025 Apr 8:447-61. doi: 10.1002/9781394301744.ch26
- [4] Guo J, Qin P, Li Q, Li J. Abrasive flow machining. In Advanced Finishing Technologies for High Performance Manufacturing 2025 May 2 (pp. 113-139). Singapore: Springer Nature Singapore. doi: 10.1007/978-981-96-1900-9-4
- [5] Sohrabpoor H, Mousavian RT, O'Halloran S, Benyounis KY, Baraheni M, Obeidi MA, Ahad IU, Raghavendra R, Brabazon D. Experimental and empirical model analysis of microsurface texturing on 316 L press-fit joints fabricated by selective laser melting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020 Jun;108(9):2687-99. doi: 10.1007/s00170-020-05458-9
- [6] Baraheni M, Shabgard MR, Amini S, Gholipour F. Experimental evaluation and optimization of parameters affecting delamination, geometrical tolerance and surface roughness in ultrasonic drilling of 3D-Printed PLA thermoplastic. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2026 Apr;39(4):1937-66. doi: 10.1177/08927057241264803
- [7] Ferchow J, Baumgartner H, Klahn C, Meboldt M. Model of surface roughness and material removal using abrasive flow machining of selective laser melted channels. Rapid Prototyping Journal. 2020 Jul 23;26(7):1165-76. doi: 10.1108/RPJ-09-2019-0241
- [8] Samoilenko M, Lanik G, Brailovski V. Towards the determination of machining allowances and surface roughness of 3D-printed parts subjected to abrasive flow machining. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2021 Oct 17;5(4):111. doi: 10.3390/jmmp5040111

- [9] Gupta K, Jain NK, Laubscher RF. Assisted hybrid machining processes. In Hybrid Machining Processes: Perspectives on Machining and Finishing 2015 Nov 8 (pp. 45-65). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-25922-2-4
- [10] Walia RS, Shan HS, Kumar P. Abrasive flow machining with additional centrifugal force applied to the media. Machining science and technology. 2006 Sep 1;10(3):341-54. doi: 10.1080/10910340600902157
- [11] Sankar MR, Mondal S, Ramkumar J, Jain VK. Experimental investigations and modeling of drill bit-guided abrasive flow finishing (DBG-AFF) process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009 Jun;42(7):678-88. doi: 10.1007/s00170-008-1642-y
- [12] Sankar MR, Jain VK, Ramkumar J. Nano-finishing of cylindrical hard steel tubes using rotational abrasive flow finishing (R-AFF) process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016 Aug;85(9):2179-87. doi: 10.1007/s00170-015-8189-5
- [13] Dabrowski L, Marciniak M, Szewczyk T. Analysis of abrasive flow machining with an electrochemical process aid. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2006 Mar 1;220(3):397-403. doi: 10.1243/095440506X77571
- [14] Ali P, Walia RS, Murtaza Q, Singari RM. Material removal analysis of hybrid EDM-assisted centrifugal abrasive flow machining process for performance enhancement. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020 Jun;42(6):302. doi: 10.1007/s40430-020-02375-6
- [15] Liu W, Wu Y, Li H, LUO Z, LIU J, WANG Z. Study on ultrasonic-assisted abrasive flow polishing of internal flow channels in additive manufacturing. Journal of Northwestern Polytechnical University. 2024 Oct;42(5):809-17. doi: 10.1051/jnwpu/20244250809
- [16] Singh P, Singh L, Singh S. Analyzing process parameters for finishing of small holes using magnetically assisted abrasive flow machining process. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion. 2020 Mar;6(1):17. doi: 10.1007/s40735-019-0315-8
- [17] Jha S, Jain VK, Komanduri R. Effect of extrusion pressure and number of finishing cycles on surface roughness in magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007 Jul;33(7):725-9. doi: 10.1007/s00170-006-0502-x
- [18] Karthikeyan S, Mohan B, Kathiresan S, Anbuezhayan G. A study on in-vitro behaviour of stainless steel 316L subjected to rotational magnetorheological abrasive flow finishing process. Surface Topography: Metrology and Properties. 2022 Sep 1;10(3):035037. doi: 10.1088/2051-672X/ac9150
- [19] Neshati A. Optimization of abrasive flow machining (AFM) parameters in machining of aluminum [master's thesis]. Isfahan, Iran: Isfahan University of Technology; 2010. [In Persian]
- [20] Dehghan Ghadikolaei A. Design, manufacture and test of magneto-rheological abrasive flow finishing (MRAFF) process [master's thesis]. Tehran, Iran: K. N. Toosi University of Technology; 2011. [In Persian]
- [21] Afkandeh F. Investigation of the effect of abrasive flow machining (AFM) parameters on material removal rate and surface finish [master's thesis]. Tehran, Iran: Shahid Rajaei Teacher Training University; 2012. [In Persian]
- [22] Choopani Y, Khajehzadeh M, Razfar MR. Novel polishing media based on fiber for finishing hip joint implants. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022 Jan;118(1):479-95. [In Persian]
- [23] Karimi M. Numerical and experimental study of the effect of workpiece hardness in machining using the AFM method [master's thesis]. Tehran, Iran: Iran University of Science and Technology; 2023. [In Persian]
- [24] Shabgard MR, Karamzadeh B, Alizadegan R, Gholipour A. Experimental study of finishing of AISI H13 hot work steel using Abrasive Flow Finishing (AFF) process. Modares Mechanical Engineering. 2015 May 1;15(3):106. [In Persian]
- [25] Abdollahi D, Safavi SM. Simulation and study of polishing of special curvature based forging die by using abrasive flow machining. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2017 Feb 19;3(3):48-57. [In Persian]
- [26] Eshaghi M, Hemmati SJ. Experimental Study of Abrasive Flow Rotary Machining and Effect of Abrasive Paste Temperature on Material Removal Rate of the Process. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2019 Dec 22;51(5):1157-66. doi: 10.22060/mej.2018.13623.5689 [In Persian]
- [27] Choopani Y, Khajehzadeh M, Razfar MR. An experimental study on abrasive flow machining of artificial hip joint. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2025 Apr 21;57(2):215-34. doi: 10.22060/mej.2025.24050.7834 [In Persian]
- [28] Choopani Y, Khajehzadeh M, Razfar MR. 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. 2022 Dec;236(6):2545-57. doi: 10.1177/09544089221094999
- [29] Das M, Jain VK, Ghoshdastidar PS. Nano-finishing of stainless-steel tubes using rotational magnetorheological abrasive flow finishing process. Machining Science and Technology. 2010 Nov 1;14(3):365-89. doi: 10.1080/10910344.2010.511865

- [31] Shergill M, Singh K, Kumar S, Brar BS. The development of a Simple Hydraulic Circuit for Abrasive Flow Machining. *International Journal of Scientific & Technical Development*. 2021;7(2):11-15.
- [32] Sankar MR, Jain VK, Ramkumar J. Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing. *Wear*. 2009 Jun 15;267(1-4):43-51. doi: [10.1016/j.wear.2008.11.007](https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.007)
- [33] Choopani Y, Khajehzadeh M, Razfar MR. An experimental study on the abrasive flow machining of aluminum alloy (AA 2024). *SN Applied Sciences*. 2023 May;5(5):151. doi: [10.1007/s42452-023-05370-3](https://doi.org/10.1007/s42452-023-05370-3)