



Investigating the Effect of Different Parameters on the Surface Roughness in Magnetorheological Polishing



ARTICLE INFO

Authors

Bashiri Sh.¹,
Khalili M.^{1*}

¹ Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

* Correspondence

Address: Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
m-khalili@araku.ac.ir

How to cite this article

Bashiri Sh, Khalili M. Investigating the effect of different parameters on the Surface Roughness in Magnetorheological Polishing. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):203-208.

ABSTRACT

The proper operation and quality of the finished product are highly dependent on the surface roughness of parts in a variety of industries. Among the most sophisticated techniques for reducing a part's surface roughness is the magnetorheological polishing procedure. This technique uses a magnetic field and rheological materials to improve the surface roughness of items. The parameters of turning radius, gap, machining time, magnetic pole rotation speed, and workpiece rotation speed have all been studied in the present research. By applying the Sobol method for statistical sensitivity analysis, the parameters have been examined via the surface roughness regression equation. According to the results, the most effective parameters are the workpiece's rotation speed (impact of 51%) and the magnetic pole's rotation speed (impact of approximately 21%). The next parameters to be considered are the machining gap (14% impact) and machining time (11% impact). With a 3% impact, the radius of gyration is thought to be the least important parameter in this process. This means that the time parameter's impact on this procedure can be neglected.

Keywords Surface Roughness, Magnetorheological Polishing, Sobol Statistical Method

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۲۰۳-۲۰۸



مطالعه اثرگذاری پارامترهای مختلف بر زبری سطح پرداخت مگنتورئولوژیکال



چکیده

در صنایع مختلف، اهمیت زبری سطح قطعات برای عملکرد صحیح و کیفیت محصول نهایی بسیار حائز اهمیت است. یکی از روش‌های پیشرفته برای بهبود زبری سطح قطعات، استفاده از روش پرداخت مگنتورئولوژیکال است. این روش با استفاده از یک ترکیب از میدان مغناطیسی و مواد رئولوژیکی، میزان زبری سطح قطعات را بهبود می‌بخشد. در این پژوهش پارامترهای سرعت چرخش قطب مغناطیسی، سرعت چرخش قطعه کار، شعاع دوران، شکاف و زمان ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از معادله رگرسیون زبری سطح، پارامترها به وسیله آنالیز حساسیت آماری به روش سوبل تحلیل گردیده است. نتایج به دست آمده بیان می‌کنند که سرعت چرخش قطعه کار با ۵۱ درصد و سرعت چرخش قطب مغناطیسی در حدود ۲۱ درصد تأثیر به عنوان مؤثرترین پارامترها و شکاف ماشین‌کاری با ۱۴ درصد و زمان ماشین‌کاری با ۱۱ درصد تأثیر به عنوان پارامترهای بعدی در نظر گرفته می‌شوند. شعاع دوران با ۳ درصد کم‌اثرترین پارامتر در این فرایند شناخته می‌شود. براین اساس می‌توان از اثر پارامتر زمان بر این فرایند چشم‌پوشی کرد.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

شایسته بشیری^۱
محمد خلیلی^{۱*}

^۱ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

m-khalili@araku.ac.ir

کلیدواژه‌ها زبری سطح، پرداخت مگنتورئولوژیکال، روش آماری سوبل

۱- مقدمه

روش پرداخت خوشه‌ای مغناطیسی رئولوژیکی یک روش پیشرفته در صنعت قطعات فلزی است که جهت کاهش نرخ زبری سطح قطعات استفاده می‌شود. این روش شامل استفاده از فیلدهای مغناطیسی قوی و اصلاح شکل مغناطیسی جریان بر روی قطعات است. برخلاف روش‌های سنتی پرداخت که برای کاهش نرخ زبری سطح از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی استفاده می‌کنند، روش پرداخت خوشه‌ای مغناطیسی رئولوژیکی از فعالیت مغناطیسی جهت اصلاح ساختار داخلی قطعات استفاده می‌کند.

اثر روش پرداخت خوشه‌ای مغناطیسی بر نرخ زبری سطح قطعات مطالعه‌ای است که توجه زیادی در سال‌های اخیر به آن شده است. به‌طور کلی، این روش توانایی کاهش نرخ زبری سطح قطعات را دارد و از جمله عوامل مؤثر بر بهبود کیفیت و دقت قطعات در صنایع خودروسازی، هواپیماسازی و صنعت عمومی است.

لو و همکارانش به مایع مغناطیسی (MRF^۱) به دلیل برخی از مزایای خاص آن در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های ماشین‌کاری دقیق مدرن توجه ویژه‌ای کردند. کاربردهای فعلی مانند ماشین‌کاری تجهیزات کمکی و تجهیزات پرداخت سطحی که از MRF استفاده می‌کنند توسط آنها بررسی شده است. به‌ویژه، برخی از ساختارهای دقیق تجهیزات مورد بررسی قرار گرفته و محدودیت‌های نسبی بر اساس ویژگی‌های MRF تجزیه و تحلیل شده‌اند. در نهایت، باتوجه به تجهیزات فعلی، مزایا و نقص‌ها به طور خلاصه گزارش شده و روند درحال توسعه ماشین‌کاری دقیق مدرن با MRF مورد بحث قرار گرفته است [۱].

لی و همکارانش درباره زبری سطح و میزان حذف مواد (MRR^۲) که دو شاخص مهم در طول فرایند سنگ‌زنی هستند تحقیق کردند. اولی کیفیت سطح را تعیین می‌کند؛ درحالی‌که دومی به طور مستقیم کارایی سنگ‌زنی را منعکس می‌کند. دو شاخص به طور هم‌زمان و متفاوت با تبدیل آنها به یک هدف جامع با استفاده از روش هدف وزنی مورد توجه قرار گرفته و یک مدل پیش‌بینی برای هر هدف جامع با هر ترکیب مختلف زبری سطح و ضریب وزن MRR ایجاد شده است. ارزش بهینه اندازه ساینده، نیروی تماس، سرعت خطی کمربند و سرعت تغذیه در شرایط مختلف سنگ‌زنی با استفاده از طراحی کامپوزیت مرکزی (CCD^۳) همراه با تجزیه و تحلیل سطح پاسخ به دست آمده است. نتایج تجربی آنها نشان داد که هدف جامع می‌تواند به طور مؤثر

به‌عنوان یک شاخص برای کنترل عملکرد سنگ‌زنی و بهبود فرایند بهینه‌سازی استفاده شود [۲].

لو و همکارانش یک دستگاه جدید پرداخت مغناطیسی خوشه‌ای (MRP^۴) با یک میدان مغناطیسی متشکل از شش مغناطیس دائمی منحنی و یک عنصر محدود مغناطیسی استاتیک برای بهبود کیفیت سطح شیشه نوری و بررسی مکانیسم حذف مواد تجزیه و تحلیل طراحی کردند. با تجزیه و تحلیل نیروها و رفتارهای حرکتی ذرات ساینده منفرد در طول فرایند پرداخت، یک مدل حذف جدید توسعه یافت و اثرات پارامترهای اصلی بر مکانیسم حذف مواد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که MRP خوشه‌ای متقابل برای ۱۲۰ دقیقه قادر به دستیابی به زبری سطحی ۲/۷ نانومتر، بود که بهبود قابل توجهی در کار ایجاد کرد [۳].

لو و همکارانش چهار نوع روش پرداخت مغناطیسی برای مطالعه تجربی مقایسه‌ای مورد استفاده قرار دادند و یک آزمایش تک عاملی بر روی پارامترهای فرایندی مانند قطر سوراخ و شکاف سوراخ در دیسک پرداخت محدود جمعی و فرکانس و دامنه شکاف متغیر قطعه کار انجام دادند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های میدان جریان و درجه ساختار پودرهای آهن کربونیل در منطقه پردازش می‌تواند توسط دیسک پرداخت محدود جمعی و حرکت شکاف متغیر متقابل قطعه کار کنترل شود و نیروی پرداخت پد بر روی سطح قطعه کار افزایش می‌یابد. در همین حال، حذف خراش اکستروژن ذرات ساینده و به‌روزرسانی کشش مجدد را می‌توان تحقق بخشید. در مقایسه با پرداخت مغناطیسی سنتی، میزان حذف مواد ۱۵۴/۶٪ افزایش یافته و زبری سطح ۶۷/۱٪ کاهش یافته است. فشار دینامیکی کلی تشکیل شده توسط دیسک پرداخت محدود جمعی و شکاف متغیر متقابل قطعه کار می‌تواند نیروی اعمال شده توسط پد پرداخت روی سطح قطعه کار را کنترل کند و کارایی پرداخت و کیفیت سطح را بهبود بخشد [۴].

ما و همکارانش به بررسی بیشتر شبیه‌سازی عددی و ویژگی‌های حذف مواد در طول فرایند MRSTP^۵ پرداخته و یک دستگاه تولید میدان مغناطیسی را طراحی کرده و توسعه داده‌اند. مدل توزیع میدان مغناطیسی به ماژول دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۶) وارد شد تا محیط پرداخت مورد نظر را تولید کند. مشخص شد که فشار بر روی سطح قطعه کار با افزایش سرعت چرخش قطعه کار کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که با افزایش سرعت جریان شار MRSTP افزایش می‌یابد. افزایش مداوم تنش برشی بر روی سطح قطعه کار، با افزایش سرعت چرخش قطعه کار و سرعت جریان شار MRSTP مشاهده شد. بر اساس ویژگی‌های فشار پرداخت، یک

⁴ Magnetorheological polishing

⁵ Magnetorheological shear thickening polishing

⁶ Computational fluid dynamics

¹ Magnetorheological fluid

² Material removal rate

³ Central Composite Designs

حرکت تنش اصطکاکی روی حلقه را تعیین می‌کند. به طور خاص، زبرترین نمونه، ضریب اصطکاک پایین و بهترین مقاومت در برابر سایش را نشان می‌دهد، درحالی‌که صافترین نمونه عملکرد تریبولوژیکی بدتری را نشان می‌دهد [۹].

لی و همکارانش یک مطالعه تجربی به منظور بررسی اثر زبری سطح بر عملکرد اتصالات آلیاژی Invar 36 جوش داده شده با لیزر انجام دادند. چهار سطح زبر از ۰/۱۲ میکرومتر تا ۲/۸۴ میکرومتر با ضربه‌زدن پنوماتیکی به دست آمد. آنها پارامترهای مختلفی را مانند ریز سختی، ریزساختار، منافذ و... را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش زبری سطح می‌تواند به طور قابل توجهی نفوذ جوش را به دلیل افزایش جذب لیزر بهبود بخشد. اما منجر به دانه‌های درشت و نرم شدن مفاصل نیز می‌شود. برای سطوح صاف، تولید تخلخل زمانی که گرمای ورودی زیاد بود، تقریباً اجتناب‌ناپذیر بود، اما سطوح ناصاف با زبری سطح مناسب (مثلاً ۲/۱۴ میکرومتر) می‌توانند به طور مؤثری تخلخل جوش را از بین ببرند و اتصالات بدون نقص را به دست آورند. علاوه بر این، هنگامی که زبری سطح ۲/۱۴ میکرومتر بود، خواص مکانیکی اتصال نیز ایده‌آل‌ترین بود. این معیارها به طور قابل توجهی بهتر از نتایج گزارش شده قبلی بودند که نشان‌دهنده اثربخشی زبری سطح مناسب برای بهبود عملکرد اتصالات جوش داده شده با لیزر است. [۱۰].

صمدی و همکارانش به بررسی پارامترهای مختلف در پرداخت‌کاری با ذرات ساینده Al_2O_3 و SiC با استفاده از میدان مغناطیسی در مقیاس نانو پرداخته‌اند. آن‌ها بیان نموده‌اند که پرداخت‌کاری با استفاده از میدان مغناطیسی در مقیاس نانو ($NMAF^{\text{®}}$)، روشی جدید برای پرداخت سطح با زبری در حد نانو به صورت فرایند مکانیکی بوده و از طریق سایش پودر ذرات ساینده به عنوان ابزار، انجام می‌گیرد و در آن نیروی مورد نیاز برای حرکت ذرات ساینده توسط میدان مغناطیسی که خود دارای حرکت نسبی با قطعه کار است تأمین می‌شود. این روش برای پرداخت قطعات فلزی غیرمغناطیسی و یا قطعات غیرفلزی قابل استفاده است. از ویژگی‌های خاص این روش کاهش تنش‌های حرارتی به قطعه کار و نداشتن محدودیت در پرداخت‌کاری سطوحی از قطعه است که به دلیل شکل هندسی، توانایی انجام کار ابزارهای معمول بر روی آنها دشوار است. صمدی و همکارانش با استفاده از مکانیزم نانو پرداخت‌کاری، پرداخت سطوح خارجی استوانه‌ای از جنس سوپرآلیاژ اینکونل را بررسی کرده‌اند؛ به صورتی که کیفیت سطح در مقیاس نانو ارتقا می‌یابد [۱۱].

مدل برای نرخ حذف مواد (MRR) در فرایند MRSTP ایجاد شد. در این راستا، یک سری از آزمایش‌های MRSTP بر روی آلومینیوم ۶۰۶۱ انجام شد و زبری سطح ۷۹.۰ (Sa) نانومتر به دست آمد که بیش از ۷۷٪ بهبود یافت [۵].

ژو و همکارانش یک ابزار پرداخت و یک روش کنترل لرزش مبتنی بر MR^۷ را برای بهبود ثبات و کاهش لرزش در طول ماشین‌کاری ارائه کرده‌اند. در این راستا، یک اثر نهایی پرداخت با دمپر مبتنی بر MR و مکانیزم فنر مغناطیسی طراحی شده و مدل میرایی و سفتی توسعه داده شده و در ادامه یک مدل دینامیکی ارتعاش ایجاد شده و ویژگی‌های ارتعاش به طور نظری تجزیه و تحلیل شده است. برای حفظ نیروی تماس طبیعی و کاهش ارتعاش ابزار پرداخت، یک کنترل‌کننده ارتعاش مبتنی بر نیروی پرداخت با جبران گرانش پیشنهاد شده است. دامنه ارتعاش اندازه‌گیری شده و نیروی برش تخمین زده شده به عنوان بازخورد در کنترل‌کننده برای حفظ نیروی تماس مورد نظر استفاده شده است. در نهایت، آزمایش‌های پرداخت برای تأیید امکان استراتژی پیشنهادی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نوسانات نیروی پرداخت را میرا کرده و ارتعاش را کاهش داده و حداکثر دامنه ارتعاش ۴۵٪ کاهش می‌یابد و زبری سطح ۵۷/۹٪ بهبود می‌یابد [۶].

ذبیحی و همکارانش، تأثیر قدرت و جهت میدان مغناطیسی کمکی بر نرخ حذف ماده و زبری سطح در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی تحت تأثیر میدان مغناطیسی را بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که تغییرات قدرت میدان مغناطیسی کمکی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نرخ حذف ماده و زبری سطح داشته باشد. علاوه بر این، تغییر جهت میدان مغناطیسی کمکی نیز می‌تواند منجر به بهبود زبری سطح و نرخ حذف ماده شود. نتایج کار آنها می‌تواند در بهبود عملکرد فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی تحت تأثیر میدان مغناطیسی کمکی مورد استفاده قرار گیرد [۷].

میزبانی و همکارانش در مطالعه‌ای اثر میدان مغناطیسی بر زبری سطح قطعه کار در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی ماده مرکب آلومینیوم ۴۱۳ تقویت شده با آلومینا، در دو حالت با حضور میدان مغناطیسی و بدون وجود میدان مغناطیسی را مورد بررسی و مقایسه قرار داده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده کاهش زبری سطح ماشین‌کاری شده تا ۳۲ درصد در حضور میدان مغناطیسی است [۸].

لی و همکارانش تأثیر سیال مغناطیسی بر مکانیسم سایش جفت‌های آب‌بندی تحت زبری سطوح مختلف از دیدگاه تحلیل نظری و سیال مگنتورئولوژیکی را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، اثبات شده است که زبری الگوی

⁸ Nano Magnetic Abrasive Finishing

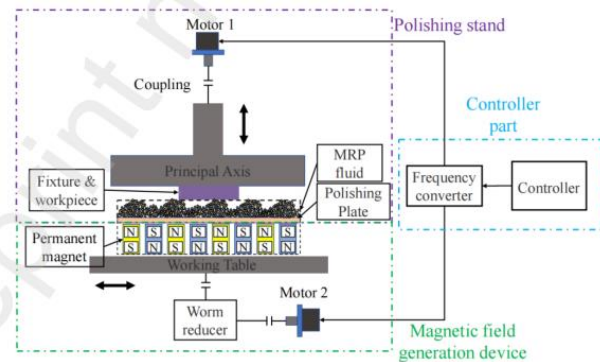
⁷ Magnetorheological

۲- روش تحقیق

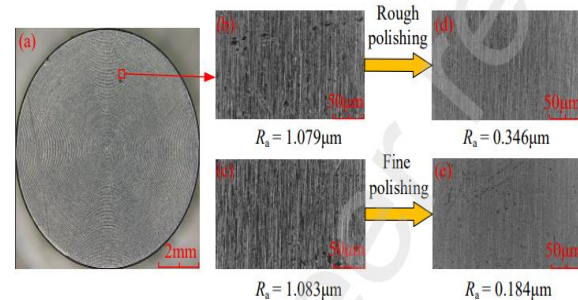
در این بخش ابتدا به مدل‌سازی سیستم MRP و سپس به آنالیز حساسیت به روش سوئل پرداخته شده است.

۲-۱- مدل‌سازی سیستم MRP

پرداخت مگنتورئولوژیکال خوشه‌ای شیوه‌ای نوین برای ازبین‌بردن خلل‌و فرج سطحی قطعه کار و رسیدن به زبری سطح مدنظر است. در این فرایند سیال دارای ذرات مغناطیسی در ابعاد نانو با ذرات ساینده به‌صورت یک سوسپانسیون کلونیدی در معرض یک مولد مغناطیسی قرار می‌گیرد. با یک تغییر رئولوژیکی در ساختار خوشه‌ای نانوذرات و ساینده‌ها قادر به براده‌برداری خواهند بود. اجزای اصلی این فرایند را می‌توان در سه قسمت اصلی مولد میدان مغناطیسی، کنترلر و پایه پرداخت خلاصه کرد.



شکل ۱) نمودار شماتیک سیستم خوشه‌ای [۱۲]



شکل ۲) مقایسه تصویر اسکن نوری قبل و بعد از پرداخت [۱۲]

۲-۲- آنالیز حساسیت سوئل

حساسیت در مدل‌سازی مجموعه‌ای از روش‌هایی است که برای ارزیابی تأثیر تغییرات در پارامترها روی خروجی سیستم استفاده می‌شود. هدف از استفاده از روش‌های حساسیت، شناخت دقیق ترکیباتی از ورودی‌هایی است که بیش‌ترین تأثیر بر خروجی دارند و در نتیجه، توسعه برنامه‌های بهینه‌سازی و بهبود نتایج مدل را امکان‌پذیر می‌کند.

روش‌های حساسیت می‌توانند به چند دسته تقسیم شوند:

۱. روش‌های آماری: در این دسته از روش‌ها، از روش‌های آماری برای اندازه‌گیری و تحلیل تأثیر تغییرات پارامترها بر خروجی استفاده می‌شود. مثال‌هایی از این روش‌ها عبارت‌اند از ضریب حساسیت معیاری، ضریب تغییر ریاضی، و آزمون تفاوت میانگین.

۲. روش‌های ریاضیاتی: در این دسته از روش‌ها، تحلیل حساسیت بر اساس معادلات ریاضی و مفاهیم ریاضی انجام می‌شود. مثال‌هایی از روش‌های رویکرد ریاضی عبارت‌اند از اشتقاق جزئی، روش‌های خطی ساده و خطی‌سازی.

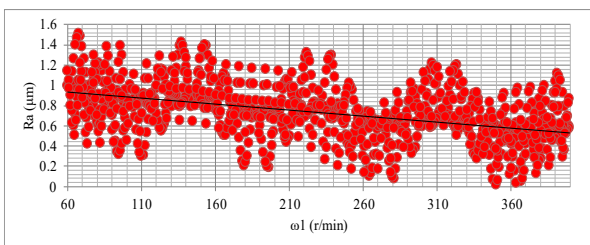
۳. روش‌های ترسیمی: در این دسته، حساسیت به‌وسیله تغییرات در نمودارها و نمایش‌های گرافیکی اندازه‌گیری می‌شود. از روش گرافیکی به‌طور کلی برای نشان‌دادن تغییرات پاسخ‌های خروجی تحت تأثیر متغیرهای ورودی‌ها استفاده می‌شود.

روش حساسیت سوئل^۹ یکی از روش‌های ترسیمی حساسیت است. در این روش، با تغییر یک پارامتر به‌صورت خطی، تغییر در خروجی موردنظر به‌صورت تغییرات عمودی و افقی در نمودار باریکه نشان داده می‌شود. این روش برای تخمین حساسیت نسبی و محدود به تغییر یک پارامتر استفاده می‌شود.

۳- نتایج

در این بخش با استفاده از روش تحلیل آماری، تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی به‌صورت جداگانه و دقیق بر روی زبری سطح بررسی شده است.

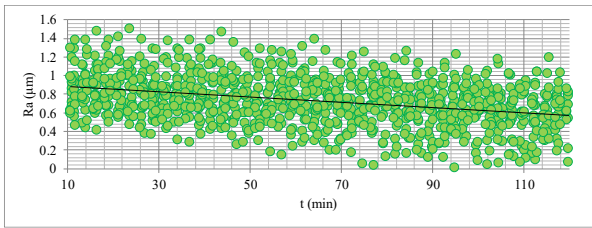
در شکل ۳ تأثیر افزایش سرعت چرخشی قطب مغناطیسی بر روی زبری سطح بررسی شده و مشاهده گردیده که با افزایش سرعت چرخشی قطب مغناطیسی، زبری سطح کاهش یافته است، زیرا با افزایش سرعت چرخش، اصطکاک بین قطب مغناطیسی و محیط اطراف آن کاهش می‌یابد. این کاهش اصطکاک باعث کاهش حرارت و سایش بین سطح قطب مغناطیسی و محیط می‌شود که منجر به کاهش نرخ زبری سطح می‌شود.



شکل ۳) تأثیرات سرعت چرخش قطب‌های مغناطیسی بر زبری سطح

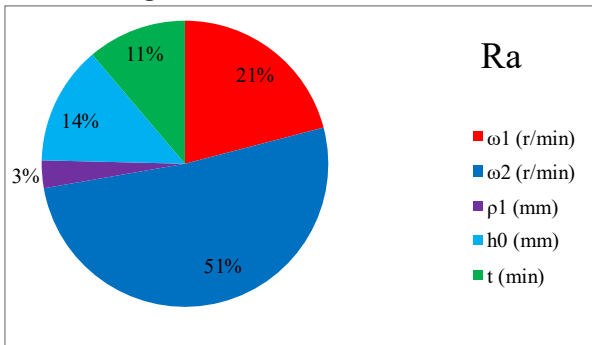
⁹ Sobol

در شکل ۷ نیز مشاهده شد که افزایش زمان سبب کاهش زبری سطح می‌شود.



شکل ۷) تأثیرات زمان ماشین‌کاری بر زبری سطح

شکل ۸ نشان می‌دهد که به ترتیب سرعت چرخشی قطعه کار با ۵۱ درصد، سرعت چرخشی قطب مغناطیسی با ۲۱ درصد، شکاف ماشین‌کاری با ۱۴ درصد و زمان با ۱۱ درصد و شعاع دوران با ۳ درصد بیشترین تا کمترین تأثیر را روی زبری سطح داشته‌اند.



شکل ۸) مقایسه تأثیرات پارامترهای مختلف بر زبری سطح

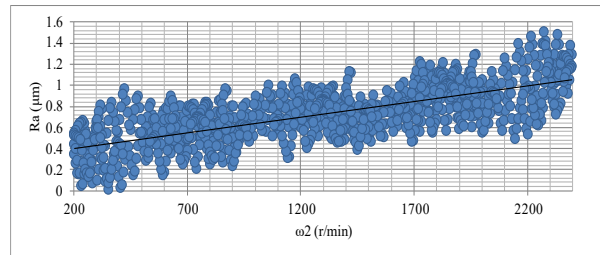
۴- جمع‌بندی

به‌منظور بهبود کارایی و دستیابی به بهترین کیفیت سطح با بهره‌گیری از فرایند پرداخت مغناطیسی خوشه‌ای باید اهم پارامترهای مؤثر بر این مکانیزم مورد بررسی قرار گیرند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزارهای متلب و مینی‌تب، داده‌های آزمایش‌ها و نتایج حاصل بررسی و سپس تأثیر هر پارامتر بر فرایند براده‌برداری مورد بررسی قرار گرفته است.

سرعت چرخش قطب‌های مغناطیسی و قطعه کار در جایگاه پراهمیت‌ترین پارامتر این فرایند خواهند بود و به ترتیب شکاف ماشین‌کاری و زمان ماشین‌کاری پارامترهای مؤثر پس از آن خواهد بود. در پایین‌ترین رتبه در مقایسه با سایر پارامترها شعاع چرخش از اهمیت کمی برخوردار خواهد بود.

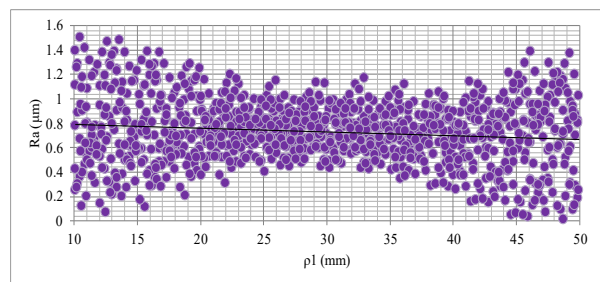
به‌منظور دستیابی به افزایش راندمان پرداخت مغناطیسی و کیفیت سطح همراه با زبری سطح مطلوب در تحقیقات آتی می‌توان سایر پارامترها و فاکتورهای موجود در این فرایند را با استفاده از سایر روش‌های آنالیز حساسیت مورد بررسی و تحلیل قرار داد.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت چرخشی قطعه کار، میزان زبری سطح افزایش داشته است؛ زیرا با افزایش سرعت چرخش، نیروهایی که به دلیل نیروی گرانش وارد می‌شوند نیز افزایش می‌یابد. این نیروها باعث جدا شدن ذرات ریز و ناهمواری‌های سطحی می‌شوند و نرخ زبری سطح را افزایش می‌دهند.



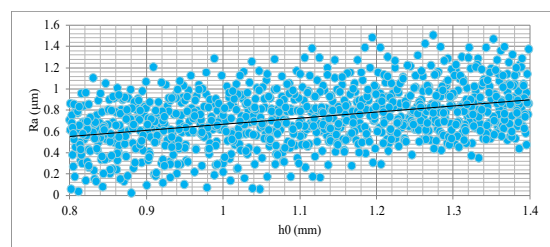
شکل ۴) تأثیرات سرعت چرخش قطعه کار بر زبری سطح

باتوجه به شکل ۵، تغییرات شعاع دوران و تأثیرات آن بر زبری سطح به این شکل است که تغییرات شعاع دوران تأثیری بر روی زبری سطح نداشته است و با افزایش شعاع دوران، زبری سطح بدون تغییر مانده است و می‌توان از تأثیر آن چشم‌پوشی کرد.



شکل ۵) تأثیرات شعاع چرخش بر زبری سطح

در شکل ۶ مشاهده می‌گردد که میزان تغییرات شکاف ماشین‌کاری بر زبری سطح اثر افزایشی داشته است، به دلیل این‌که با افزایش شکاف ماشین‌کاری، انحرافات سطحی قطعه نیز افزایش می‌یابد. این انحرافات می‌توانند ناهمواری‌ها و نقاط برجسته را در سطح قطعه ایجاد کنند که نرخ زبری سطح را افزایش می‌دهد.



شکل ۶) تأثیرات شکاف ماشین‌کاری بر زبری سطح

مراجع

- 7- Zabihi SS, Haghghi SE, Soleimanimehr H, Maghsoudpour A. Effects of auxiliary magnetic field strength and direction on material removal rate and surface roughness in magnetic field-assisted electrical discharge machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023 Apr 1;41:446-52.
- 8- Mizbani A, Mirmohammadsadeghi SE, Mokhtarian A. Study of the effect of magnetic field on the surface roughness of the workpiece in electric discharge machining of Al2O3-reinforced A413 composite. *Advanced Processes in Materials Engineering*. 2023 May 22;17(1):83-95.
- 9- Li S, Xiu S, Song W, Sun C, Yang H. Research on the wear characteristics of magnetorheological fluid in sealing interface considering the interaction between surface roughness and magnetic particles. *Tribology International*. 2023 Jul 1;185:108496.
- 10- Li Y, Wang F, Liu H, Yang L, Zhang P, Wang Y, Li H. Effect of surface roughness on the performances of laser-welded Invar 36 alloy joints. *Optics & Laser Technology*. 2023 Jul 1;162:109307.
- 11- Samadi MR, Khoshanjam A, Khoshanjam K. The Effects of Angular Velocity and Combination of AlO₂ and SiC Abrasive Particle by Use of NMAF Method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Aug 23;8(6):26-33.
- 12- Xu J, Li J, Liu Y. Investigation on the normal force in cluster magnetorheological-porous foam finishing process. *Tribology International*. 2021 May 1;157:106911.
- 1- Lu H, Hua D, Wang B, Yang C, Hnydiuk-Stefan A, Królczyk G, Liu X, Li Z. The roles of magnetorheological fluid in modern precision machining field: a review. *Frontiers in Materials*. 2021 May 12;8:678882.
- 2- Li F, Xue Y, Zhang Z, Song W, Xiang J. Optimization of grinding parameters for the workpiece surface and material removal rate in the belt grinding process for polishing and deburring of 45 steel. *Applied Sciences*. 2020 Sep 10;10(18):6314.
- 3- Lu M, Zhuang X, Zhou J, Lin J, Li W. A novel reciprocating cluster magnetorheological polishing device: design and investigation of removal model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2023 Jul;237(9):1339-52.
- 4- Luo B, Li Y, Yan Q, Chai J, Song W, Lan X. Cluster magnetorheological global dynamic pressure planarization processing of single crystal sapphire. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023 Jul 25:1-6.
- 5- Ma Z, Tian Y, Qian C, Ahmad S, Fan Z, Sun Z. Modeling and simulation of material removal characteristics in magnetorheological shear thickening polishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023 Sep;128(5):2319-31.
- 6- Xu D, Hu T. Modelling and vibration control of magnetorheological-based polishing tool for robotic polishing process. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023 Jul 15;195:110290.