ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):15-19.

Investigating the Effect of Different Parameters on the Material Removal Rate in Magnetorheological Polishing

ARTICLEINFO

Authors
Taheri M.[1*],
Ghane F.[1]

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

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

How to cite this article
Taheri M, Ghane F. Investigating the effect of different parameters on the material removal rate in Magnetorheological Polishing. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):15-19.

ABSTRACT

Magnetorheological polishing is an optimized mechanism for accurate surface polishing. By using this structure change, the common problems of payment, such as creating the aggregate structure of abrasives, have been solved. In this regard, studying and checking process parameters will be a solution to increase efficiency and best performance. In this research, the parameters of magnetic pole rotation speed, workpiece rotation speed, turning radius, gap, and machining time have been investigated. Using the regression equation of the chipping rate, the parameters have been analyzed by a statistical sensitivity analysis using the Sobol method. The obtained results state that the rotation speed of the magnetic pole at 37% and the rotation speed of the workpiece at about 30% are considered the most effective parameters, and the turning radius at 15% and the machining gap at 16% are considered as the next parameters. Machining time is known to be the least influential parameter in this process by 1%. Based on this, the effect of time parameters on this process can be ignored.

Keywords Effect, Material Removal Rate, Magnetorheological Polishing

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۵-۱۹

مطالعه‌ی اثرگذاری پارامترهای مختلف بر نرخ براده‌برداری پرداخت مگنتورئولوژیکال

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها
معین طاهری[1*]
فرشته قانع[1]

[1] دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

*** نویسنده مسئول**
آدرس: دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
m-taheri@modares.ac.ir

چکیده

پرداخت مگنتورئولوژیکال یک مکانیزم بهینه‌سازی شده در جهت پرداخت دقیق سطوح شناخته می‌شود. با استفاده از این تغییر ساختار مشکلات رایج پرداخت همانند ایجاد ساختار تجمعی ساینده‌ها برطرف گردیده است. در این راستا مطالعه و بررسی پارامترهای فرآیند، راهکاری در جهت افزایش راندمان و بهترین عملکرد خواهد بود. در این پژوهش پارامترهای سرعت چرخش قطب مغناطیسی، سرعت چرخش قطعه‌کار، شعاع دوران، شکاف و زمان ماشین‌کاری مورد بررسی قرارگرفته است. با استفاده از معادله رگرسیون نرخ براده‌برداری، پارامترها به‌وسیله‌ی آنالیز حساسیت آماری به روش سوبل تحلیل گردیده است. نتایج به‌دست‌آمده بیان می‌کنند که سرعت چرخش قطب مغناطیسی با ۳۷ درصد و سرعت چرخش قطعه‌کار در حدود ۳۰ درصد به‌عنوان مؤثرترین پارامترها و شعاع دوران با ۱۵ درصد و شکاف ماشین‌کاری با ۱۶ درصد به‌عنوان پارامترهای بعدی در نظر گرفته می‌شوند. زمان ماشین‌کاری با ۱ درصد کم تأثیرترین پارامتر در این فرآیند شناخته می‌شود. بر این اساس می‌توان از اثر پارامتر زمان بر این فرآیند چشم‌پوشی کرد.

کلیدواژه‌ها اثرگذاری، نرخ براده‌برداری، پرداخت مگنتورئولوژیکال

۱- مقدمه

در دنیای امروز با پیشرفت چشمگیر توسعه و بهبود خواص انواع مواد، نیاز به کیفیت سطح مناسب ابزار و وسایل در حال افزایش است. البته باید اذعان داشت که نه‌تنها کیفیت سطح بلکه افزایش راندمان نهایی فرآیندها نیز موردتوجه خواهد بود. پرداخت مگنتورئولوژیکال یک روش پردازش سطح ترکیبی با استفاده از الکترومغناطیس[۱]، دینامیک سیالات[۲]، شیمی تحلیلی[۳]، پردازش فناوری است که محققان قادر بوده‌اند آن را توسعه دهند. پرداخت مگنتورئولوژیکال خوشه‌ای[۴] شیوه‌ای نوین برای پولیش سطوح باکیفیت سطح بالا به کار می‌رود. این فرآیند ترکیبی از پرداخت مغناطیسی و مکانیزم خوشه‌ای است. سیال مغناطیسی[۵] و ساینده‌های میکرونی[۶] از اجزای اصلی این فرآیند شناخته می‌شوند.

وو و همکاران [1] بر مبنای کاربرد گسترده پرداخت فوق دقیق، پرداخت سطح شیشه کی ۹[۷] با فرآیند پرداخت مغناطیسی توسعه‌یافته را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش با استفاده از یک سینی جدید مغناطیسی و تحریک میدان مغناطیسی متناوب فرکانس پایین، سطح ماده مذکور پرداخت‌شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در سرعت‌های چرخشی متفاوت نشان داده‌اند که نرخ بهبود زبری سطح[۸] و نرخ براده‌برداری[۹] در سرعت چرخشی ۳۰ دور بر دقیقه افزایش یافته است. همچنین در سرعت چرخشی ۸۰۰ دور بر دقیقه با خروج توده مایع از سطح پردازش، نرخ براده‌برداری کاهش‌یافته است. نتایج تجربی نشان داده است که این فرآیند می‌تواند کیفیت سطح با صافی فوق‌العاده دقیق را محقق کند.

ژنگ و همکاران [2] روشی نوین از پرداخت مغناطیسی سطح شیشه بوروسیلیکات[۱۰] را موردبررسی قرار داده‌اند. برای توسعه روش پرداخت، یک آزمایش‌کننده رفت و برگشتی طراحی‌شده است که در تأمین یکنواخت مایع برای پرداخت و دست‌یابی به صافی سطح مؤثر است. در این فرآیند مکانیزم پرداخت شیشه بوروسیلیکات با تجزیه‌وتحلیل مورفولوژی سطح[۱۱] و مشخصات سطح مورد ارزیابی قرارگرفته است. نتایج حاصل از این روش بیان می‌کنند که اگرچه پرداخت سطح به‌خوبی انجام‌شده است اما راندمان حاصل به دلیل پایداری ضعیف سیال، افزایش نیافته است.

قوس و همکاران [3] پارامترهای مؤثر بر پرداخت سیلیکون کریستالی[۱۲] را بررسی کرده‌اند. آن‌ها بیان نموده‌اند که برخلاف روش‌های پرداخت سنتی، پرداخت مغناطیسی، قابل‌استفاده در مقیاس نانو برای انواع مواد شکننده خواهد بود. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داده اس که شکاف کاری[۱۳] و سرعت چرخ[۱۴] از پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند هستند.

وحدتی و کلخوران [4] پرداخت سطوح لنز کروی[۱۵] و عوامل مؤثر بر صافی سطح را مورد مطالعه قرار داده‌اند و بر مبنای آزمایش‌ها پارامترهای مؤثر و معادله رگرسیون[۱۶] را استخراج کرده‌اند.

پان و همکاران [5] عملکرد نرخ براده‌برداری مکانیزم خوشه‌ای[۱۷] سیلیکون تک کریستال[۱۸] با میدان مغناطیسی پویا[۱۹] را تحلیل کرده‌اند و مدل براده‌برداری را بر اساس مکانیک سیالات و معادله پرستون به دست آورده‌اند. در این مقاله نشان داده‌شده است که نتایج نظری به‌طور مطلوب با نتایج تجربی مطابقت دارد.

کیم و همکاران [6] با توجه به نرخ کم براده‌برداری پرداخت مغناطیسی با سیال، روشی نوین با استفاده از الکترومغناطیس را ارائه کرده‌اند. در آزمایش‌های متعدد سرعت چرخ، میدان مغناطیسی، مدت‌زمان پرداخت و میزان سیال محتوی پودر آهن کربونیل[۲۰] را بررسی کرده‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند که بر اساس نتایج، عمق پرداخت و میزان پودر آهن کربونیل از پارامترهای مؤثر در میزان نرخ براده‌برداری هستند.

زی و همکارانش [7] با استفاده از ورق فولادی ضدزنگ اس یو اس ۳۰۴[۲۱] تأثیرات تغییرات میدان مغناطیسی متناوب را بررسی کرده‌اند. در ابتدا رابطه بین چگالی شار مغناطیسی[۲۲] و نیروی نهایی استخراج گردیده و در نهایت اثرات تغییر حالت جریان بر چگالی شار مغناطیسی، نیروی پرداخت و ویژگی‌های پرداخت از طریق آزمایش مقایسه گردیده است.

زو و همکاران [8] با توسعه مطالعات قبلی در زمینه پارامترهای مهم، پرداخت سرامیک آلومینا[۲۳] با میدان مغناطیسی فرکانس پایین را مورد آزمایش قرار داده‌اند. اهداف اصلی در این فرآیند بررسی تاثیر قطر ذرات و فرکانس میدان مغناطیسی متناوب بر میزان نیروی پرداخت، همچنین تحلیل اهم پارامترها بوده است. آن‌ها تشریح نموده‌اند که سطح حاصل دارای زبری سطح مناسب بوده است.

چن و کای [9] پارامترهای فرآیند پرداخت مغناطیسی خوشه‌ای در مدل حرکت سیاره‌ای[۲۴] تجزیه‌وتحلیل کرده‌اند. آن‌ها علت ارتقای

[1] Electromagnetism
[2] Fluid dynamics
[3] Analytical chemistry
[4] Cluster magnetorheological finishing (CMRF)
[5] Magnetic fluid
[6] Micron abrasives
[7] K9 glass
[8] Surface roughness (Ra)
[9] Material removal rate (MRR)
[10] Borosilicate glass
[11] Surface morphology
[12] crystal silicon
[13] Machining gap
[14] Wheel speed
[15] Optical Lenses
[16] Regression equations
[17] Material removal of cluster mechanism
[18] Single crystal silicon
[19] Dynamic magnetic fields
[20] Carbonyl iron (CI)
[21] SUS304 stainless steel
[22] Magnetic flux density
[23] Alumina ceramic
[24] Planet motion model

فرآیند را اجتماع مواد ساینده و راندمان پایین پولیش دانسته‌اند. در این مقاله با استفاده از نتیجه آزمایش‌ها، روابط بین زبری سطح، نرخ براده‌برداری و پارامترهای فرآیند با استفاده از معادله رگرسیون خطی چندگانه مورد بررسی قرارگرفته است.

ژانگ و همکارانش [10] با توجه به کاهش کیفیت و کارایی پرداخت مغناطیسی برای قطعات مقعر، فناوری پرداخت مغناطیسی با لیزر[۲۵] را پیشنهاد کرده‌اند. در این راستا بیان‌شده است که در فرآیند پولیش مغناطیسی به کمک لیزر، اثرات کوپل لیزر، میدان مغناطیسی و تنش، تأثیر قابل توجهی در کیفیت پرداخت دارد و ضروری است تحقیقات بیشتری درزمینه‌ی پرداخت مغناطیسی با لیزر انجام گردد.

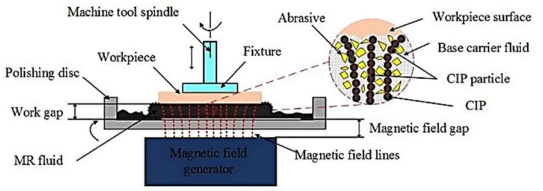
نی و همکاران [11] با در نظر گرفتن اهمیت مولد میدان مغناطیسی در راندمان پرداخت و کیفیت سطح، نحوه‌ی آرایش آهنربا در مولد را تحلیل کرده‌اند. در این پژوهش، رابطه بین آرایش آهنربا، نحوه‌ی توزیع چگالی شار مغناطیسی با استفاده از یک مدل ریاضی بررسی گردیده است. همچنین حالت‌های مختلفی از قرارگیری آهنربا شبیه‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفته است.

منگ و همکاران [12] ساختار جدیدی برای پرداخت با استفاده از الگوی فیلوتاکتیک[۲۶] پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها بیان داشته‌اند که اهداف این کار افزایش راندمان همچنین صافی سطح ویفر[۲۷] بوده است. در مراحل آزمایش زوایای متعدد فیلوتاکتیک و نحوه قرارگیری قطب‌های مغناطیسی موردبررسی قرارگرفته است.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، در این تحقیق تأثیر کمی و دقیق پارامترهای مؤثر بر پرداخت مگنتورئولوژیکال خوشه‌ای مورد تحلیل قرار گرفته است. سرعت چرخش قطب مغناطیسی، سرعت چرخش قطعه‌کار، شعاع دوران، شکاف و زمان ماشین‌کاری از پارامترهای مورد بررسی می‌باشند. روش آنالیز حساسیت آماری سوبل برای تجزیه‌وتحلیل تأثیرگذاری پارامترها مورداستفاده قرارگرفته است.

۲- مدل‌سازی

پرداخت مگنتورئولوژیکال خوشه‌ای شیوه‌ای نوین برای از بین بردن خلل و فرج سطحی قطعه‌کار و رسیدن به زبری سطح مدنظر است. در این فرآیند سیال دارای ذرات مغناطیسی در ابعاد نانو با ذرات ساینده به صورت یک سوسپانسیون کلوییدی 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 فرآیند را می‌توان در سه قسمت اصلی مولد میدان مغناطیسی، کنترلر و پایه پرداخت خلاصه کرد.



شکل ۱) شمای کلی پرداخت مگنتورئولوژیکال خوشه‌ای سیاره‌ای [13]

به‌طورکلی در این مکانیم ذرات مغناطیسی و مواد افزودنی مخلوط با سیال تحت فرآیند رئولوژیکی ذرات دارای خاصیت مغناطیسی می‌شوند و به‌صورت زنجیر مغناطیسی تجمع می‌کنند. در ادامه ذرات ساینده توسط زنجیرها جذب می‌شوند، با تقویت میدان مغناطیسی ساختار زنجیری به‌صورت خوشه‌ای تغییر شکل می‌یابد.

ساختارهای شامل ساینده تحت‌فشار عمودی در سطح قطعه‌کار جاسازی می‌شوند. در مرحله بعد با جریان یافتن سیال، همراه با جداشدن ذرات ساینده قسمت‌های برجسته سطوح نیز براده‌برداری می شوند.

در این بخش با هدف مدل‌سازی فرآیند از معادلات بیان شده در مرجع [9] استفاده شده است.

معادله نرخ براده‌برداری بر اساس معادله پرستون تعریف شده است:

$$MRR = C_P P V = C'_P \tau v \quad (۱)$$

معادله ضریب پرستون اصلاح شده بر اساس شرایط اصطکاک و تغییرات نسبی بیان شده است:

$$C'_P = \frac{K H_0^2}{\mu E} C_P \quad (۲)$$

معادله نرخ جریان ماده با توجه بر شکاف ماشین کاری تعریف گردیده است:

$$u(Z) = \frac{1}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial \zeta}(Z^2 - Zh) + \frac{Z(V_\zeta - V_1 \cos\Omega)}{h} + V_1 \cos\Omega \quad (۳)$$

معادله تنش تسلیم برشی کلی سیال پرداخت در حالت تسلیم به صورت معادله‌ی ۴ تعیین گردیده است:

$$\tau = \tau(B) + \eta_0 \dot{\gamma} = \tau(B) + \eta \frac{\partial u(Z)}{\partial Z} \quad (۴)$$

معادله تنش تسلیم برشی سیال پرداخت در شرایط مغناطیسی به صورت معادله‌ی ۵ تعیین گردیده است:

$$\tau(B) = \frac{32\pi\chi^2 B^2}{3\mu_0(1+\chi)^2(1+\sqrt{6c})^2} K_C \sin\lambda \quad (۵)$$

در نهایت با جایگزینی معادلات (۳)، (۴) و (۵) در معادله (۱)، معادله‌ی نرخ براده‌برداری در پرداخت خوشه‌ای در حالت تسلیم بدین صورت بیان گردیده است:

$$MRR = C'_P V_\zeta \left[\frac{32\pi\chi^2 B^2 K_C \sin\lambda}{3\mu_0(1+\chi)^2(1+\sqrt{6c})^2} + \eta_0 \dot{\gamma}(V_\zeta - V_1 \cos\Omega)\frac{(3h\hat{h}_0 - 2\hat{h}_0^2)}{h^3}\right] \quad (۶)$$

۳- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت یکی از روش‌های تحلیل آماری مناسب برای بررسی اثرات تغییر پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی در یک مدل چند متغیره است. این روش می‌تواند به دو صورت از طریق معادله رگرسیون و تحلیل واریانس قابلیت اجرا داشته

[25] Laser-assisted magnetorheological polishing
[26] Phyllotactic pattern
[27] Wafer

باشد. برتری این روش بررسی پارامترهای خروجی و ورودی به صورت همزمان است.

در این مقاله سعی بر آن بوده است تا با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل پارامترهای ورودی و خروجی در معادله با دقتی مضاعف مورد بررسی قرار گیرند.

از معادله رگرسیون نرخ براده‌برداری و زبری سطح تعریف شده در مرجع شماره [9] به عنوان مدل آماری برای آنالیز حساسیت سوبل تعیین گردیده است:

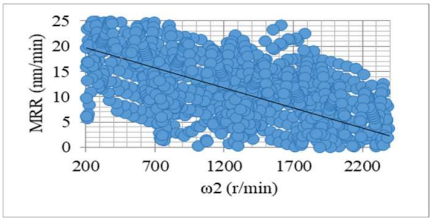
$$\begin{aligned} MRR &= 25.9207 - 19.846h_0 + 0.047\omega_1 - 7.6906 \times 10^{-3}\omega_2 + \\ &0.2813\rho_1 - 3.5565 \times 10^{-2t} \\ Ra &= 0.298 + 0.574h_0 - 1.234 \times 10^{-3}\ \omega_1 + 2.929 \times 10^{-4}\ \omega_2 - \\ &0.004\rho_1 - 2.789 \times 10^{-3t} \end{aligned} \quad (۷)$$

سرعت چرخشی قطب‌های مغناطیسی ω_1، سرعت چرخشی قطعه‌کارω_2 ، شعاع چرخش ρ_1 ، زمان ماشین‌کاری t و شکاف ماشین‌کاری h_0 به عنوان پارامترهای ورودی و نرخ براده‌برداری و زبری سطح به عنوان پارامترهای خروجی تعیین گردیده است.

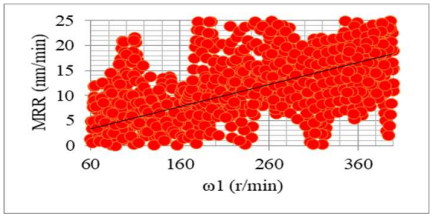
۴- بحث و نتایج

در این قسمت با استفاده از آنالیز حساسیت آماری سوبل تأثیر پارامترهای اصلی موجود در فرآیند پرداخت مگنتورئولوژیکال خوشه‌ای بر میزان نرخ براده‌برداری موردبررسی قرارگرفته است.

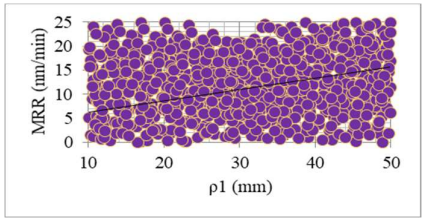
اثرات پارامترهای سرعت چرخش قطب مغناطیسی، سرعت چرخش قطعه‌کار، شعاع دوران، شکاف و زمان ماشین‌کاری بر مقدار کمی نرخ براده‌برداری در شکل ۲ در نمودارهای (الف تا ث) تصویر گردیده است.



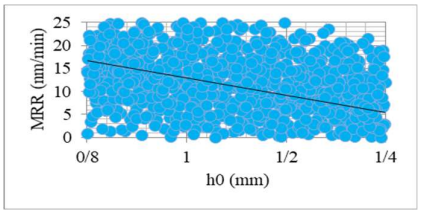
(الف)



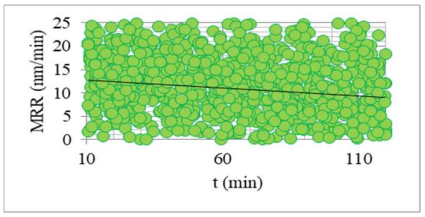
(ب)



(پ)



(ت)



(ث)

شکل ۲) تأثیرات پارامترهای مختلف بر نرخ براده‌برداری، الف) سرعت چرخش قطب‌های مغناطیسی، ب) سرعت چرخش قطعه‌کار، پ) شعاع چرخش، ت) شکاف ماشین‌کاری، ث) زمان ماشین‌کاری

نمودار ۲-الف تأثیر پارامتر ورودی سرعت چرخش قطب‌های مغناطیسی بر میزان براده‌برداری را نشان داده است. بر اساس این نمودار سرعت چرخش قطب‌های مغناطیسی نسبتی مستقیم با میزان براده‌برداری دارد. طبق برآورد آزمایش‌ها با افزایش سرعت چرخش قطب‌ها، در اثر پیدایش چگالی شار قوی، کرنش برشی سیال مغناطیسی افزون می‌شود.

با توجه به نمودار ۲-ب نسبتی خطی از میزان اثرگذاری سرعت چرخش قطعه‌کار بر نرخ براده‌برداری مشاهده می‌شود. با استناد بر نتایج به‌دست‌آمده می‌توان تبیین نمود که با افزایش سرعت چرخش قطعه‌کار شانس برخورد ذرات ساینده به سطح قطعه کاهش خواهد یافت. این پارامتر به‌طور مشابه تأثیر مستقیم با نرخ براده‌برداری خواهد داشت.

اثر شعاع چرخش با نسبت افزایش خطی بر میزان براده‌برداری در نمودار ۲-پ قابل‌مشاهده است.

در نمودار۲-ت مشاهده می‌گردد که افزایش شکاف ماشین‌کاری سبب کاهش نرخ براده‌برداری خواهد بود. کاهش شکاف ماشین‌کاری موجب فشردگی سیال پرداخت شده و درنتیجه افزایش برخورد ذرات ساینده را موجب شده است.

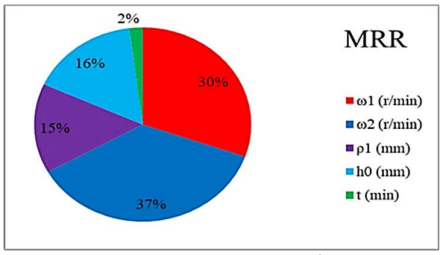
تأثیر ناچیز زمان ماشین‌کاری بر مقدار نرخ براده‌برداری در نمودار۲-ث مشاهده گردیده است. نتایج و شواهد بیان می‌کنند که افزایش زمان انجام فرآیند با افزایش محدود مقدار براده‌برداری همراه است.

نتیجه کلی حاصل از پژوهش صورت گرفته در شکل ۳ نمایش داده‌شده است. با توجه به این نمودار این‌چنین دریافت گردیده است که سرعت چرخش قطعه‌کار بیشترین مقدار اثر بر براده‌برداری با تخصیص ۳۷ درصد از کل مقدار را دارا است. همچنین با اختلافی ناچیز سرعت چرخش قطب‌های مغناطیسی در حدود ۳۰ درصد بیشترین تأثیر را نسبت به زمان، شعاع

چرخش و شکاف ماشین‌کاری دارد. بر این اساس می‌توان اظهار داشت اثر این دو پارامتر بر فرآیند پرداخت نسبتاً یکسان خواهد بود.

دو پارامتر شعاع چرخش و شکاف ماشین‌کاری با حدود ۱۵ و ۱۶ درصد دارای، درصد تأثیر نسبتاً مشابه بر فرآیند خواهد بود. پارامتر زمان با تأثیر ناچیز از کل مجموعه، در پایین‌ترین مرتبه از مؤثرترین پارامترهای ورودی بر میزان نرخ براده‌برداری است.

بر مبنای دیدگاه مقایسه‌ای بین دو نمودار گرافیکی و شیب خطوط در نمودارهای شکل ۲ می‌توان بیان نمود که آنالیز حساسیت آماری صورت گرفته بر پارامترهای پرداخت مغناطیسی دارای صحت و دقت کافی بوده است.



شکل ۳) مقایسه تأثیرات پارامترهای مختلف بر نرخ براده‌برداری

۵- جمع‌بندی

به‌منظور بهبود کارایی و دستیابی به بهترین کیفیت سطح موردنظر با بهره‌گیری از فرآیند پرداخت مغناطیسی خوشه‌ای باید اهم پارامترهای مؤثر بر این مکانیزم موردبررسی قرار گیرند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار مینی تب داده‌های آزمایشات و نتایج حاصل بررسی و سپس تأثیر هر پارامتر بر فرآیند براده‌برداری مورد آنالیز قرارگرفته است

شامل سرعت چرخش قطب مغناطیسی، سرعت چرخش قطعه‌کار، شعاع دوران، شکاف و زمان ماشین‌کاری با استفاده از آنالیز حساسیت آماری به روش سوبل موردتحقیق قرارگرفته‌اند. بر اساس نتایج این آنالیز مهم‌ترین نکات به شرح ذیل می‌باشند :

سرعت چرخش قطب‌های مغناطیسی و قطعه‌کار با تأثیر نسبتاً یکسان در جایگاه پراهمیت‌ترین پارامتر این فرآیند خواهند بود و به ترتیب شعاع چرخش و شکاف ماشین‌کاری پارامترهای مؤثر پس از اهم پارامترها خواهد بود. در پایین‌ترین رتبه در مقایسه با سایر پارامترها زمان 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 پارامترو فاکتورهای موجود در این فرآیند را با استفاده از روش‌های آنالیز حساسیت تحلیل کرد.

مراجع

1- Wu J, Yin S, Yang S, Guo Y. Study on magnetorheological nano-polishing using low-frequency alternating magnetic field. Advances in Mechanical Engineering. 2020; 12(1):1687814019900721.

2- Zhang P, Dong YZ, Choi HJ, Lee CH, Gao YS. Reciprocating magnetorheological polishing method for borosilicate glass surface smoothness. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2020; 84:243-251.

3- Ghosh G, Dalabehera RK, Sidpara A. Parametric study on influence function in magnetorheological finishing of single crystal silicon. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019; 100:1043-1054.

4- Vahdati M, Nano-Metric Enhancement of Surface Roughness of Silicon Nitride balls (Si3N4) by Chemical Mechanical Polishing (CMP), Mechanical Engineering University of Tabriz. 2019; 50(2):253-260. (in persian)

5- Pan J, Guo M, Yan Q, Zheng K, Xiao X. Research on material removal model and processing parameters of cluster magnetorheological finishing with dynamic magnetic fields. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019; 100:2283-2297.

6- Kim BC, Chung JH, Cho MW, Ha SJ, Yoon GS. Magnetorheological fluid polishing using an electromagnet with straight pole-piece for improving material removal rate. Journal of Mechanical Science and Technology. 2018; 32:3345-3350.

7- Xie H, Zou Y. Study on the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field—discussion on the influence of current waveform variation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021; 114:2471-2483.

8- Zou Y, Xie H, Dong C, Wu J. Study on complex micro surface finishing of alumina ceramic by the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018; 97:2193-2202.

9- Cai T. Investigations on Process Parameters of Cluster Magnetorheological Polishing in a planet motion model (2023).

10- Zhang Z, Geng K, Qiao G, Zhang J. The heat flow coupling effect of laser-assisted magnetorheological polishing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021; 114:591-603.

11- Nie M, Cao J, Li J, Fu M. Magnet arrangements in a magnetic field generator for magnetorheological finishing. International Journal of Mechanical Sciences. 2019; 161:105018.

12- Meng N, Jianguo C, Yueming L, Jianyong L. Influence of magnets' phyllotactic arrangement in cluster magnetorheological effect finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018; 99:1699-1712.

13- Xu J, Li J, Liu Y. Investigation on the normal force in cluster magnetorheological-porous foam finishing process. Tribology International. 2021; 157:106911.

14- 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; 237(9):1339-1352.