



تأثیر پارامترهای حرکتی پرداخت کاری به روش سایشی مغناطیسی بر روی سطح محدب و مقعر آلومینیوم آلیاژی

سید علیرضا رسولی^{1*}، مهرداد وحدتی²، امیر احسان جابری³

1- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

2- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

* ملایر، صندوق پستی 6571995863، s.a.rasouli@malayeru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۳ آذر 1400

داوری اولیه: ۱۲ دی 1400

پذیرش: ۲۴ بهمن 1400

کلیدواژگان:

پرداخت کاری سایشی مغناطیسی

آلیاژسازی مکانیکی

پارامترهای حرکتی

سطح آزاد

آلومینیوم آلیاژی

طراحی آزمایش

نیاز روز افزون به سطح پرداخت شده در صنایع و ناتوانی روش‌های سنتی در بسیاری موارد منجر به تحولات زیادی در زمینه فرایندهای تولید و پرداخت قطعات شده است. در روش‌های سنتی به دلیل اینکه ابزار مورد استفاده برای پرداخت صلب است، در مورد قطعاتی با منحنی‌های خاص قابلیت تطبیق با شکل قطعه‌کار را ندارد و حتی در برخی موارد سبب آسیب دیدن قطعه‌کار می‌شود. برای پرداخت این سطوح نیاز به پرداخت به صورت دستی می‌باشد. این گونه پرداخت اغلب وقت‌گیر و هزینه‌بر است. بنابراین نیاز به روش‌های جدیدی احساس می‌شود که قابلیت پرداخت سطوح به اشکال هندسی و همچنین جنس‌های مختلف را داشته باشد. در این راستا استفاده از میدان مغناطیسی به‌طور عمومی در کنترل فرایند و به‌طور خاص در پرداخت کاری مورد توجه واقع شده است. از جمله روش‌هایی که در میدان مغناطیسی برای کنترل براده‌برداری استفاده می‌شود، پرداخت کاری سایشی مغناطیسی است. در این فرایند، پارامترهای متعددی بر صافی سطح نهایی قطعه تأثیر گذارند. این پارامترها بصورت کلی، شامل ویژگی‌های مربوط به شرایط ماشین‌کاری (پارامترهای حرکتی)، خصوصیات قطعه‌کار و ویژگی‌های پودر ساینده هستند. با توجه به تفاوت قرارگیری سر کروی آهنربا در مقابل زوایای گوناگون قطعه کار، در این مقاله سعی شده است تأثیر پارامترهای حرکتی فرایند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر سطوح محدب و مقعر آلومینیوم آلیاژ (غیر فرومغناطیس) بررسی شود. این پارامترها شامل سرعت دورانی، سرعت خطی، فاصله برس ساینده تا قطعه‌کار (گپ)، چگالی شار مغناطیسی و زاویه انحنا می‌باشد. برای این منظور از آهنربای سر کروی استفاده شده و پودر مورد استفاده از روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه شده است. همچنین، از استراتژی حرکتی رستر صفر درجه دو طرفه برای مسیر حرکت ابزار، استفاده شده است از روش آماری (پاسخ سطح) جهت طراحی آزمایشات استفاده شده است. با توجه به نتایج آنالیز واریانس، مشخص شد که تمامی فاکتورهای اصلی، مؤثر بوده، و همچنین، تغییرات زبری در سطح محدب بیشتر از سطح مقعر قطعه‌کار، می‌باشد. در سطح محدب، با افزایش زاویه انحنا (30 تا 90 درجه)، تغییرات زبری کاهش پیدا می‌کند، و با افزایش چگالی شار مغناطیسی، تغییرات زبری سطح افزایش می‌یابد، در حالی که، در سطح مقعر با گذشت از چگالی شار مغناطیسی 0/53 تسلا، پیشرفت تغییرات زبری متوقف می‌شود. نحوه تأثیر سرعت پیشروی در سطح محدب و مقعر قطعه‌کار یکسان می‌باشد، و با افزایش سرعت دورانی از 125 تا 2000 (دور بر دقیقه)، تغییرات زبری سطح مقعر قطعه‌کار 57 درصد، افزایش می‌یابد.

The effect of machining parameters of magnetic abrasive finishing on freeform surfaces of alloyed aluminum

Seyed Alireza Rasouli^{1*}, Mehrdad Vahdati², Amir Ehsan Jaberi²

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

2- Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nassir-Al-Deen Toosi (K. N. Toosi) University of Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Malek ashtar University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 6571995863 Malayer, Iran, s.a.rasouli@malayeru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 14 December 2021

First Decision: 2 January 2022

Accepted: 13 February 2022

Keywords:

Magnetic abrasive finishing

Mechanical alloying

Machining parameters

Free surface

Aluminum alloy

Experimental design

Abstract

Growing demand for the finished surfaces in industries and disability of traditional methods have led to numerous changes in manufacturing and finishing processes of the parts in many cases. In traditional methods, since the finishing equipment is rigid, it cannot be used for the parts with special curves and it is unadaptable to the workpiece, and even in some cases it damages the workpiece. For such parts, the manual finishing is required. Manual finishing is usually time consuming and costly. Thus, the need to new methods that are able to finish the surfaces with various shapes and materials, is sensed. In this regard, using the magnetic field is taken into account publicly for process control, and specifically for finishing processes. One of the methods using in the magnetic field for controlling the chip removal is magnetic abrasive finishing. In this method, several parameters affect on the final roughness of the surface. These parameters include properties of machining conditions, workpiece properties, and abrasive powder properties. The present paper describes the effect of the machining parameters of the MAF process on the convex and concave surface of aluminum alloy experimentally. These parameters include rotational velocity, linear velocity, abrasive brush distance to the workpiece (gap), magnetic flux density, and angle of curvature. For this purpose, a spherical head magnet was used and the powder used was prepared by mechanical alloying method. Also, the two-way zero-degree raster movement strategy is used for the tool movement path. The experiment was designed using minitab software. According to the results of analysis of variance, it was found that all the main factors are effective. Also, the roughness changes on the convex surface are more than the concave surface. On the convex surface, the roughness decrease with increasing curvature angle, and, with increasing magnetic flux density, there is an increase in surface roughness changes, while on the concave surface, by increasing the magnetic flux density over 0.53 Tesla, the progression of roughness changes has been stopped. The effect of velocity on the convex and concave surfaces of the workpiece is the same, and with increasing rotational speed from 125 to 2000 (rpm), the roughness changes of the concave surface of the workpiece increase by 57%.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Seyed Alireza Rasouli, Mehrdad Vahdati, Amir Ehsan Jaberi, The effect of machining parameters of magnetic abrasive finishing on freeform surfaces of alloyed aluminum, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 11, pp. 63-75, 2022 (in Persian)

1- مقدمه

در فرایند پرداخت کاری با ذرات ساینده مغناطیسی، پارامترهای متعددی بر صافی سطح نهایی قطعه تأثیر می‌گذارند. این پارامترها شامل ویژگی‌های مربوط به شرایط ماشین‌کاری (پارامترهای حرکتی)، خصوصیات قطعه‌کار و یا ویژگی‌های پودر ساینده هستند. اصولاً سطوحی که نیاز است صافی سطح مطلوبی داشته باشند، از لحاظ انحنای سطح به سه دسته: سطوح یک بعدی یا تخت، سطوح دوبعدی نظیر استوانه‌ها و سطوح سه بعدی نظیر حفره قالب‌ها، تقسیم می‌شوند. در پژوهش حاضر، پرداخت کاری سایشی مغناطیسی روی سطوح آزاد دوبعدی، بررسی می‌شود.

1-1- پیشینه پژوهش

پرداخت کاری سایشی مغناطیسی برای اولین بار در اتحاد جماهیر شوروی سابق در سال 1938 معرفی شد. کیم و چو در سال 1997 به مطالعه پرداخت کاری سطوح آزاد دوبعدی توسط روش MAF پرداختند. البته نتایج این پژوهش در سال 2007 تحت عنوان دیگری منتشر شد [2]. چن و همکارانش در سال 2004 پرداخت کاری دو نوع سطح مقعر و محدب را توسط روش MAF مطالعه کردند [3]. وحدتی و رسولی، پارامترهای مؤثر در فرایند MAF بر سطح مقعر آلومنیوم آلیاژی، را بررسی نمودند [4]. در سال 2007 چینگ لین تین و همکارانش در یک تحقیق تجربی سطوح آزاد فولاد زنگ نزن SUS304 را با استفاده از روش MAF پرداخت کاری کردند [5]. یان هون دینگ و همکارانش در سال 2008 به طراحی و ساخت ابزارهای جدید جهت استفاده در فرایند MAF سطوح تخت و انحنادار پرداختند [6]. ساتوآ و همکاران، ابزار جدید سر کروی توپی را معرفی نموده و پارامتر نیرو و صافی سطح را بررسی نمودند [7]. چی سوآل و همکاران، به مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند MAF پرداختند [8]. همچنین، خطری و یادوا، فرایند MAF بر سطح تخت را با استفاده از تحلیل اجزای محدود بررسی نمودند [9].

سانگ و همکاران، فرایند MAF را برای ورق آلیاژی فولاد کم کربن-کروم، بکار بردند [10]. ناگدو و همکاران، ابزار جدیدی برای استفاده از فرایند MAF بر روی آلومنیوم 6061، معرفی نمودند [11]. سان و همکاران، توسط ماشین ابزار دارای سه پایه و محورهای موازی مجازی با پنج درجه آزادی به بررسی فرایند MAF بر سطوح انحنادار پرداختند [12]. این ماشین ابزار مخصوص جهت بررسی فرایند پرداخت کاری سطوح آزاد ساخته شد و هزینه فعالیت را نسبت به استفاده از ماشین‌های کنترل عددی کاهش میداد. چوپانی و همکاران، اثر پارامترهای گپ،

پرداخت کاری یکی از فرایندهای دقیق تولید است که با توجه به کاربرد آن به شیوه‌های گوناگونی انجام می‌پذیرد. یک سطح با کیفیت خوب، منجر به کاهش اصطکاک، افزایش مقاومت سایشی، بهبود مقاومت خستگی و خوردگی می‌شود. در روش‌های سنتی، ابزارهای پرداخت کاری موجود دارای محدودیت ابعادی و شکلی هستند و نمی‌توانند هر نوع تماس مکانیکی را با قطعه‌کار برقرار نمایند، در چنین فرایندهای پرداختی، که ابزار از صلابت بالا برخوردار می‌باشد، رسیدن به صافی سطح مطلوب به دلیل عدم دسترسی، عملاً میسر نیست، همچنین، در مواردی نظیر پرداخت تجهیزات پزشکی، به دلیل اصطکاک موجود بین ابزار و قطعه، دما بطور موضعی افزایش می‌یابد و موجب به وجود آمدن عیوب ساختاری در قطعه‌کار می‌شود. بنابراین استفاده از روشی که قابلیت پرداخت سطوح با شکل‌های مختلف هندسی را دارا باشد و از انعطاف‌پذیری مطلوبی، به منظور تطابق، برخوردار باشد باعث کاهش اثرات مخرب ناشی از تماس‌های فیزیکی می‌شود. در چنین فرایندهایی (روش‌های جدید)، حصول صافی سطح در حد نانومتر دور از انتظار نمی‌باشد.

فرایند پرداخت کاری با ذرات ساینده مغناطیسی¹ (MAF) جزء جدیدترین فرایندهای پیشرفته ماشین‌کاری محسوب می‌گردد که برای پرداخت سطوح تخت و انحنادار قطعات مغناطیسی و غیر مغناطیسی، قابل استفاده می‌باشد. در این فرایند، ابزار برشی مورد استفاده، مخلوطی از ذرات فرومغناطیس و ذرات ساینده می‌باشد. ذرات مغناطیسی در امتداد خطوط میدان مغناطیسی بین قطب‌های آهن‌ربا به یکدیگر متصل شده و یک برس مغناطیسی انعطاف‌پذیر² تشکیل می‌دهند. در اثر نیروی عمودی وارده از طرف میدان مغناطیسی به ذرات ساینده، این ذرات در داخل قطعه نفوذ کرده و با حرکت نسبی بین قطعه‌کار و ذرات ساینده، عملیات باربرداری در مقیاس میکرو/نانو صورت می‌پذیرد. شکل 1 مکانیزم حاکم بر فرایند MAF را نشان می‌دهد.

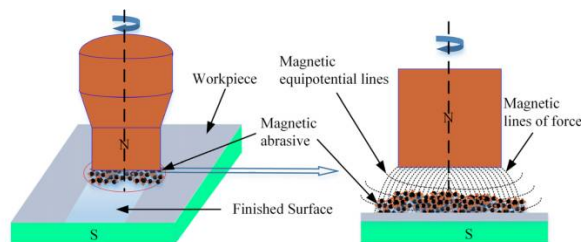


Fig. 1 Schematic of the magnetic abrasive finishing process [1]

شکل 1 نمایش کلی فرایند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی [1]

¹ Magnetic Abrasive Finishing (MAF)

² Flexible Magnetic Brush

سطح محدب و مقعر آلومینیوم آلیاژی بصورت تجربی بررسی شده است. این پارامترها شامل سرعت دورانی، سرعت خطی، فاصله برس ساینده تا قطعه کار (گپ¹)، چگالی شار مغناطیسی و زاویه انحنای می باشد. برای این منظور از آهنربای سر کروی استفاده شده و پودر مورد استفاده از روش آلیاژ سازی مکانیکی تهیه شده است.

2- مواد و آزمایش‌ها

با توجه به مکانیزم فرایند MAF، تجهیزات مورد نیاز شامل: نحوه طراحی و ساخت قطعات کار، میدان مغناطیسی، پودر سایشی مغناطیسی و نحوه تهیه آن و سایر تجهیزات آزمایشگاهی شامل ماشین ابزار و تجهیزات اندازه‌گیری، طبقه بندی شده است.

2-1- قطعه کار

برای طراحی قطعه کار از نرم افزار سالیدورک نسخه 2020 استفاده شده است. شکل 2 قطعه طراحی شده را نشان می‌دهد. در راستای ضخامت قطعه کار تغییری در انحنای ایجاد نشده است. در شکل 2 زوایایی که خط مماس بر سطح با محور عمود تشکیل می‌دهد، نشان داده شده است. محور عمود، محور دورانی ابزار (آهنربا) در فرایند می‌باشد.

در ناحیه شیب‌دار، زاویه در حدود 125 درجه می‌باشد و در ناحیه مقعر نیز از 90° تا 120° زاویه خط مماس بر سطح با محور عمود، تغییر پیدا می‌کند. آهنربا همیشه بر سطح افق عمود است. به دلیل استحکام بالا و کاربرد وسیع در صنعت، جهت ساخت قطعه از آلیاژ آلومینیم 7075 و برای ماشینکاری قطعه کار، از ماشین ابزار فرز سی‌ان‌سی² سه محوره FMP45 استفاده شده است. جدول 2 خواص مکانیکی آلومینیم 7075 را نشان می‌دهد.

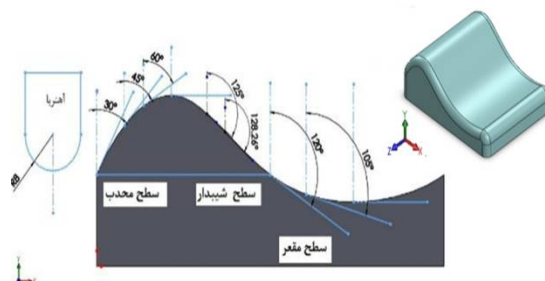


Fig. 2 Determining the angles of convex, concave and sloping surfaces
شکل 2 تعیین زوایای سطوح محدب، مقعر و شیب‌دار

سرعت دورانی قطعه کار استوانه‌ای و نوع ساینده در فرایند پرداخت کاری ساینده مغناطیسی، بر زبری سطح بیرونی قطعات استوانه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن C440، را بررسی نمودند [13]. جی‌آو و همکاران، به منظور بهبود صافی سطح در سطح داخلی سوراخ قطعه کار آلومینیم 7075، به بهینه‌سازی فرایند MAF پرداختند [14]. مجیدناهی و کدهوم، تأثیر روانکار پودر سایشی را بر سطح تخت آلیاژ برنج، به منظور بهینه‌سازی ریزساختار سطح، بررسی نمودند [15]. بارمن و داس، پارامتر نیروی میدان مغناطیسی را با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش مورد ارزیابی قرار دادند [16]. خلاصه‌ای از فعالیت های صورت گرفته بر سطوح آزاد در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 خلاصه‌ی پیشینه پژوهش‌های انجام شده بر سطوح آزاد

Table 1 Summary of research history on free surfaces

نویسنده	سال	خلاصه
لیه دای یانگ [5]	2007	بررسی تأثیر فاکتورهای مؤثر بر فرایند MAF بر سطح آزاد مقعرشکل با شعاع انحنای بزرگ (نعلبکی شکل) توسط روش تاگوچی
جین [7]	2013	بررسی فرایند MAF بر سطوح شبه-استوانه برنجی- بررسی تأثیر فاکتورهای مؤثر بر میزان نیروی عمودی، نیروی برشی و تغییرات زبری توسط تحلیل واریانس و روش سطح پاسخ- استخراج مدل رگرسیون جهت خروجی های مذکور- استفاده از کنترل عددی- گپ- سرعت پیشروی- درصد آهن- مس
آنرای [17]	1996	انجام فرایند بر سطوح انحنای دار پس از فرایند فرزکاری و واسپارک توسط کنترل عددی- مقایسه شرایط سطوح مذکور
بان هون دینگ [6]	2008	انجام فرایند MAF بر سطوح تخت و انحنادار- ساخت ابزار های جدید مغناطیسی بصورت مدار باز و بسته و بررسی عملکرد آن‌ها بر سطوح تخت و منحنی - مقایسه عملکرد MAF با شرایط و ابزار یکسان بر سطوح محدب- مقعر- استفاده از کنترل عددی
سان [12]	2004	انجام فرایند MAF بر سطوح آزاد با ماشین ابزار 5 درجه آزادی محورهای مجازی موازی- بررسی تأثیر گپ و درصد ذرات آهن بر عملکرد فرایند

با توجه به مقالات فوق مشخص است که بر روی سطوح محدب و مقعر با زوایای متفاوت فرایند MAF بررسی نشده است. جهت کاربردی شدن انجام فرایند MAF بر سطوح قطعات صنعتی مخصوصاً قالب‌ها و قطعات دارای سطوح آزاد بررسی پارامترها و رسیدن به شرایط بهینه لازم می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است به این موارد پرداخته شود.

2-1- شرح مسئله

در پژوهش حاضر، تأثیر پارامترهای حرکتی فرایند MAF، بر

¹ Gap
² CNC

2-2- میدان مغناطیسی

پودرهای استفاده شده به همراه مقادیر و ثوابت در نظر گرفته شده برای آلیاژسازی مکانیکی در جدول 4 آورده شده است.

جدول 4 پارامترهای فرایند آلیاژسازی مکانیکی

توضیح	ورودی‌های آزمایش
نوع آسیاب	گلوله‌ای
سرعت آسیاب کاری	250 دور بر دقیقه
جنس گلوله‌ها	فولادهای سخت شده با کروم
ابعاد گلوله‌ها (mm)	5,10,20
اتم‌سفر آسیاب کاری	آرگون
دمای آسیاب کاری	دمای محیط
پودر های استفاده شده	پودر آهن (400#)+ساینده (800#)
مقدار پودر های استفاده شده	پودر آهن (45g)+ساینده (15g)
نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر	5 برابر (300gr)
زمان آسیاب کاری	1 ساعت (20 دقیقه اجرا-10 دقیقه توقف فرایند)
ساینده	SIC

با توجه به استراتژی انتخابی و زوایای انحنای سطح در سطوح محدب و مقعر و توزیع چگالی شار مغناطیسی، آهن‌ربای سر کروی با جنس ئنودیم-یر-آهن استفاده شده است [4]. جدول 3 مشخصات مغناطیسی آهن‌ربای استفاده شده را نشان می‌دهد. از فرایند اسپارک جهت ساخت آهن‌ربا سرکروی به قطر 16 میلی‌متر استفاده شده است (شکل 3).

جدول 2 خواص فیزیکی، مکانیکی و مغناطیسی قطعه استفاده شده

کد آلیاژ	چگالی (kg/m ³)	سختی (HB)	تنش تسلیم (Mpa)	تنش نهایی (MPa)	مدول یانگ (Gpa)	ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی at 1.6kA/m
AL 7075	2700	150	430	241	68/9	1/0002 (پارامغناطیسی)



Fig 3 Spark machined magnet with its fixture

شکل 3 آهن‌ربای اسپارک شده به همراه فیکسچر

2-5- فیکسچر¹

استفاده از فیکسچر آهنی جهت نگهداری قطعه کار، باعث تمرکز شار مغناطیسی و افزایش چگالی شار مغناطیسی می‌شود. به جهت سهولت در ساخت فیکسچرها، از چوب (ام‌دی اف²) استفاده شده است. همچنین، جهت ایجاد تمرکز و افزایش چگالی شار مغناطیسی از آهن‌ربای دائمی در زیر قطعه کار استفاده شده است. در شکل 4 فیکسچر مورد استفاده به همراه آهن‌رباهای زیرین قطعه کار نشان داده شده است.



Fig. 4 Fixture for holding workpiece with magnets under the workpiece

شکل 4 فیکسچر نگهداری قطعه کار به همراه آهن‌ربای زیر قطعه کار

جدول 3 مشخصات مغناطیسی آهن‌ربای استفاده شده در آزمایش

آهن‌ربا	B _r (KG)	H _c (kA/m)	(BH) _{max} (kJ/m ³)
گرید N35	12-11/7	860	277-263

2-3- اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی

برای بررسی چگالی شار از اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی توسط دستگاه تسلا متر PHWVE (در محدوده 0 تا 2 تسلا و با دقت 0/01) استفاده شده است.

2-4- پودر سایشی

پودر سایشی ترکیبی از ذرات ساینده و ذرات مغناطیسی به همراه روانکار است. در این پژوهش از کاربید سیلیسیم و آهن به عنوان ذره ساینده و ذره مغناطیسی، به ترتیب، استفاده شده است. برای تهیه پودر از روش آلیاژسازی مکانیکی استفاده شده است.

2-6- اندازه‌گیری زبری و نرخ براده برداری

خروجی‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش تغییرات زبری

¹ Fixture² MDF

3- طراحی آزمایش

در طراحی آزمایش‌ها بر سطوح محدب و مقعر، از روش سطح پاسخ استفاده شده است. جدول 5 پارامترها و سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد. نرم افزار مینی‌تب نسخه 18، برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین بدست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. با توجه به قابلیت اطمینان 95 درصد در آزمایش‌های مهندسی، مقدار P کمتر از 0/05 به منظور تعیین اثر ترم‌های مدل در نظر گرفته می‌شود. به تعبیر دیگر، پارامترهای مؤثر با اطمینان 95 درصد بر پاسخ خروجی مؤثر می‌باشند. پس از انجام آنالیز واریانس و با استفاده از آزمون F-test و با توجه به مقادیر p-value کمتر از 0/05 پارامترهای مؤثر بر میزان تغییرات زبری سطح مشخص می‌گردند. کفایت مدل توسط، پارامتر R^2 (ضریب تعیین) و R^2_{adjusted} (ضریب تعیین تعدیل شده)، آزمون عدم برازش، نمودار احتمال نرمال و تحلیل مانده‌ای (باقی‌مانده‌ها) بررسی شده است.

جدول 5 پارامترها و سطوح آن‌ها

Table 5 Parameters and their levels

پارامترها	علامت	سطوح پارامترها				
		2	1	0	-1	-2
چگالی شار مغناطیسی (تسلا)	B	0/7	0/6	0/5	0/4	0/3
گپ (mm)	G	3	2/5	2	1/5	1
سرعت دورانی (rpm)	R	1800	1400	1000	600	200
سرعت پیشروی (mm/min)	F	25	20	15	10	5
راوبه انحنا	A	-60	90	60	45	30

لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها اولیه پس از تحلیل نتایج آزمایش‌ها توسط آنالیز واریانس مشخص گردید که تمامی فاکتورها مؤثر می‌باشند، البته میزان تأثیر آنها متفاوت است..

4- نتیجه و بحث

4-1- سطح محدب

4-1-1- نتایج

در ادامه به تحلیل نتایج ناشی از بررسی تأثیر پارامترهای حرکتی فرایند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر سطح محدب قطعه کار پرداخته می‌شود. با توجه به این‌که آزمایش‌ها بدون تکرار بوده، جهت تشخیص فاکتورهای مؤثر، از نمودار نرمال تأثیرات استاندارد شده استفاده شده است. با توجه به آنالیز واریانس مشخص است که تمامی فاکتورهای اصلی مؤثر می‌باشند. در ادامه و پس از حذف حداقل یکی از ترم‌های

سطح و نرخ براده‌برداری می‌باشند. برای اندازه‌گیری این مقادیر، از دو دستگاه زبری سنج تماسی پرتابل 3+ surtronic و ثابت Perthometer Mahr M3 استفاده شده است. برای افزایش دقت، در سه نقطه اندازه‌گیری انجام شده و مابین خروجی‌ها میانگین گرفته شده است. جهت افزایش دقت، در 3 نقطه اندازه‌گیری انجام شده و مابین خروجی‌ها میانگین گرفته شده است. اندازه‌گیری قبل و پس از فرایند در مکان یکسان انجام گرفته است. این کار به افزایش دقت در نتایج کمک می‌کند. با توجه به این‌که دستگاه اندازه‌گیری به میز CNC متصل نمی‌باشد، جهت ثابت نگه داشتن نقاط اولیه و ثانویه اندازه‌گیری از شابلون استفاده شده است. بر روی شابلون مربع‌های کوچکی برش زده شده (5×5) و پس از قرار گرفتن بر سطح قطعه کار، اندازه‌گیری در همان مربع‌های توخالی انجام شده است. بمنظور شکل‌پذیری شابلون از انحنای سطح قطعه کار جهت تهیه آن از مواد پلاستیکی استفاده شده است. در شکل 5 نشان داده شده است.

2-7- استراتژی حرکتی ابزار

برای انجام آزمایش‌ها، از استراتژی حرکتی رستر صفر درجه دو طرفه (موافق و مخالف) برای مسیر حرکت ابزار استفاده شده است. شکل 6 مسیر حرکت ابزار را با استفاده از این استراتژی نشان می‌دهد.



Fig. 5 Template prepared to measure surface roughness

شکل 5 شابلون تهیه شده جهت اندازه‌گیری زبری سطح

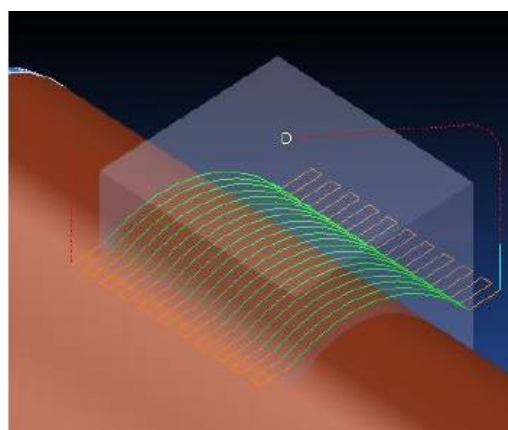


Fig. 6 Two-way raster strategy

شکل 6 استراتژی رستر دو طرفه

با در نظر داشتن مقادیر $R=80\%/53$ و $R-sq=88\%/11$ و همچنین پراکندگی مناسب توزیع باقی مانده‌ها با توجه به شکل 6، می‌توان دقت خوب و مناسب مدل‌سازی صورت گرفته را مشاهده نمود. همچنین، عدم برازش نیز غیرمؤثر می‌باشد که موارد ذکر شده فوق را تأیید می‌نماید. با توجه به تفاوت میزان تغییرات زبری در جهات مختلف در محدوده مورد ارزیابی، 5 بار اندازه‌گیری انجام شده و میزان میانگین محاسبه شده است. از طرف دیگر با حذف برخی داده‌هایی که باقی مانده بیشتری نسبت به سایر داده‌ها دارند میتوان ضریب تعیین را افزایش داد.

جدول 6 نتایج آنالیز واریانس آزمایش‌های انجام شده به روش سطح پاسخ پس از حذف ترم‌های غیرمؤثر در سطح محدب قطعه‌کار

Table 6 Results of analysis of variance of the experiments performed by the response surface method after removing the ineffective terms in the convex surface of the workpiece

ترم‌ها	درجات آزادی	جمع مربعات SS	میانگین مربعات MS	مقدار F	مقدار P
مدل	8	3088/72	386/09	8/21	0/000
خطی	5	2376/95	479/19	10/20	0/000
سرعت دورانی (RPM)	1	362/15	362/15	7/71	0/0104
گپ (GAP)	1	319/86	319/86	6/81	0/015
چگالی شار مغناطیسی (MFD)	1	282/75	282/75	6/02	0/021
نرخ پیشروی (Feed)	1	237/66	237/66	5/06	0/033
زاویه انحراف (Angle)	1	1174/12	1174/12	25/11	0/000
مجذور	2	692/77	346/385	7/37	0/003
GAP×GAP	1	166/16	166/16	4/28	0/042
Angle×Angle	1	526/61	526/61	11/21	0/002
خطا	24	1127/44	46/97		
عدم برازش	19	953/34	50/17	1/44	0/295
خطای کلی	5	174/10	34/82		
مجموع	32	4216/06			

$R-sq(adj)=80\%/53$ $R-sq = 88\%/11$

4-1-2- بحث

در این بخش با توجه به مدل منطبق شده بر داده‌های آزمایش‌ها و در نظر گرفتن ترم‌های مؤثر در مدل، نقش پارامترهای اصلی تبیین می‌گردند. در شکل 9 اثر ترم‌های اصلی بر تغییرات زبری سطح آورده شده است.

با توجه به شکل 7، مشخص است که با افزایش زاویه انحناء،

غیرمؤثر، آنالیز واریانس مجدد انجام می‌گیرد. خروجی نتایج آنالیز در جدول 6 آورده شده است. شکل 7 نمودار نرمال اثرات استاندارد شده در سطح محدب قطعه‌کار را، نشان می‌دهد. مقادیر اصلاح شده پس از حذف پارامترهای غیرمؤثر در جدول 6 آورده شده است. شکل 8، نمودار احتمال نرمال و توزیع باقی مانده‌ها در سطح محدب قطعه‌کار، را نشان می‌دهد.

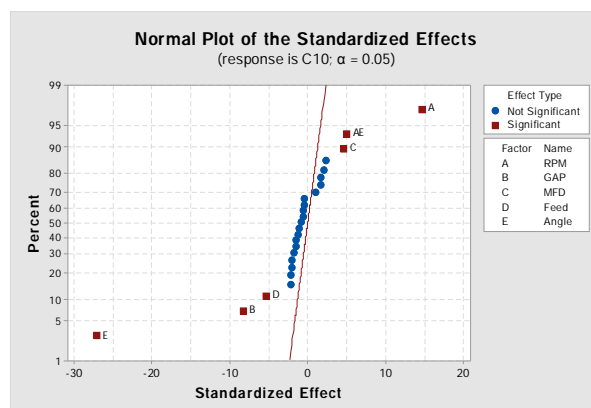


Fig. 7 Normal plot of the standardized effects in the convex surface of the workpiece

شکل 7 نمودار نرمال اثرات استاندارد شده در سطح محدب قطعه‌کار

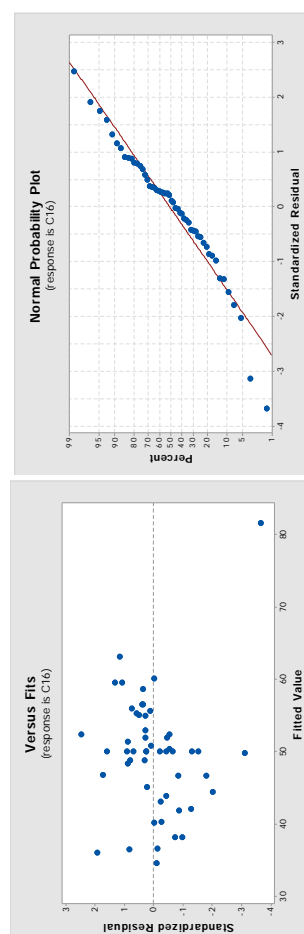


Fig. 8 Plot of normal probability and distribution of residues in the convex surface of the workpiece

شکل 8 نمودار احتمال نرمال و توزیع باقی مانده‌ها در سطح محدب قطعه‌کار

تغییرات زبری سطح مشاهده می‌شود. گپ بسیار کم باعث صلابت بیش از حد جاروبک ساینده و فشردگی بیش از حد ذرات بر سطح قطعه کار می‌گردد و این فشردگی باعث چسبندگی ذرات بر سطح نیز می‌شود. عدم فعالیت ذرات ساینده و ایجاد خراش‌های عمیق ناشی از نفوذ بیش از حد ذرات ساینده، باعث کاهش کیفیت سطح می‌گردد. در گپ 2 میلی‌متر شاهد بیشترین تغییر زبری سطح هستیم. افزایش بیش از حد گپ باعث کاهش چگالی شار مغناطیسی و در نتیجه فشار پرداخت کاری شده، جاروبک از استحکام کافی برخوردار نمی‌باشد و به همین علت تغییرات زبری کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است مانند سایر پارامترها، تغییر در میزان گپ در طول زمان انجام فرایند بسیار ضروری می‌باشد.

با توجه با جنس غیرفرومغناطیس قطعه کار و همچنین فاصله‌ی زیاد مابین سطح قطعه کار و آهن‌ربا با قطب مخالف، نیاز به چگالی شار مغناطیسی بیشتری می‌باشد. این افزایش چگالی باعث افزایش استحکام جاروبک و نیروی لازم جهت نفوذ مناسب ذرات بر سطح قطعه کار می‌گردد. با توجه به مقادیر چگالی شار مغناطیسی استفاده شده در آزمایش‌ها، افزایش چگالی شار مغناطیسی باعث افزایش کارآمدی فرایند می‌شود. لازم به ذکر است که، تأثیر پدیده‌هایی مانند: نشت شار مغناطیسی، افت چگالی شار مغناطیسی به مرور زمان، و همچنین افزایش حرارت، بر چگالی شار مغناطیسی نمی‌توان نادیده گرفت.

با افزایش نرخ پیشروی و کاهش زمان انجام فرایند، تغییرات زبری سطح کاهش پیدا می‌کند. با توجه به میزان سطوح گپ و چگالی شار مغناطیسی، میزان نفوذ ذرات بیش از مقدار بحرانی عمق برش می‌باشد و در نتیجه با پدیده‌ی اثر اندازه مواجه نیستیم. به همین علت، میزان افزایش نرخ پیشروی باعث کاهش انجام فرایند میکرو برش بر سطح قطعه کار شده و تغییرات زبری سطح کاهش می‌یابد.

در ادامه و توسط تحلیل رگرسیون، مدل ریاضی بر مبنای ترم‌های مؤثر و به صورت کد نشده در رابطه (1)، استخراج شده است.

$$\Delta RA = 61.087 + 0.0425.RPM + 16.9.GAP + 0.78.MFD + 0.425.Feed - 1.087.Angle - 8.23.GAP.GAP - 0.00895.Angle.Angle \quad (1)$$

4-2- مقعر

4-2-1- نتایج

خروجی آنالیز واریانس انجام شده بر سطح مقعر قطعه کار در

تغییرات زبری کاهش می‌یابد. برای بررسی این مهم، باید ناحیه‌ی مؤثر سطح نیم‌کره‌ی آهن‌ربا در مطابقت با سطح قطعه کار بررسی گردد.

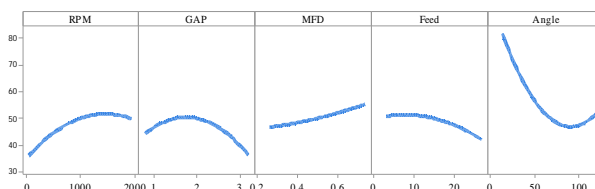


Fig. 9 Effect of main terms on the amount of roughness changes in the convex surface of the workpiece

شکل 9 اثر ترم‌های اصلی بر میزان تغییرات زبری سطح محدب قطعه کار

در نواحی با زاویه انحناء کم، سطوحی از نیم‌کره‌ی آهن‌ربا که دارای چگالی شار مغناطیسی و سرعت دورانی بیشتری نسبت به سایر سطوح نیم‌کره‌ی آهن‌ربا می‌باشند، فرایند MAF را بر سطح قطعه کار انجام می‌دهند و به همین علت تغییرات زبری بیشتر می‌باشد. اما در سطوح با زاویه انحناء 60 و 90 درجه، نواحی پایینی نیم‌کره‌ی آهن‌ربا با سرعت دورانی و چگالی شار مغناطیسی کمتر نسبت به سایر سطوح آهن‌ربا در تماس با قطعه کار می‌باشند که باعث کاهش کارایی فرایند MAF می‌شود. در سطوح با کیفیت مناسب، کاهش سرعت ممکن است باعث ایجاد خراش ناخواسته بر سطح گردد. واضح است که در زاویه انحناء 90 درجه، که قسمت قله‌ی سطح محدب قطعه کار قرار دارد، کمترین میزان تغییرات زبری سطح را دارا می‌باشد.

با افزایش سرعت دورانی، تعداد برخورد ذرات ساینده با سطح قطعه کار در زمان یکسان افزایش داشته و در نتیجه تغییرات زبری سطح افزایش پیدا می‌کند. کاهش ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک و کاهش نیروهای پرداخت کاری در برخورد هر ذره‌ی ساینده با سطح قطعه کار باعث کاهش زبری سطح می‌گردد. در پودرهای غیر یکپارچه و در چگالی شار مغناطیسی و گپ ثابت، با افزایش بیش از حد سرعت دورانی و در پی آن افزایش نیروی گریز از مرکز، ذرات ساینده از سطح جاروبک جدا شده و در نتیجه تعداد ذرات ساینده کاهش و روند افزایش تغییرات زبری سطح متوقف می‌شود. همچنین با توجه به کاهش تعداد ذرات ساینده، نیروی وارده بر ذرات ساینده‌ی باقی‌مانده افزایش یافته و ممکن است باعث نفوذ بیش از حد ساینده بر سطح گشته و کیفیت سطح کاهش یابد.

با افزایش گپ تغییرات زبری افزایش پیدا می‌کند. البته روند این افزایش دائمی نبوده و پس از عبور از مقدار بهینه، کاهش

همین امر باعث می‌شود در شرایط یکسان، چگالی شار بیشتری بر ذرات ساینده مغناطیسی اعمال گردد و در نتیجه با افزایش سرعت برشی، امکان حفظ ذرات ساینده بر سطح قطعه کار وجود دارد، و شکل خطوط میدان نیز تغییر نمی‌کند. به همین علت، با افزایش سرعت برشی افزایش تغییرات زبری سطح مشاهده می‌شود.

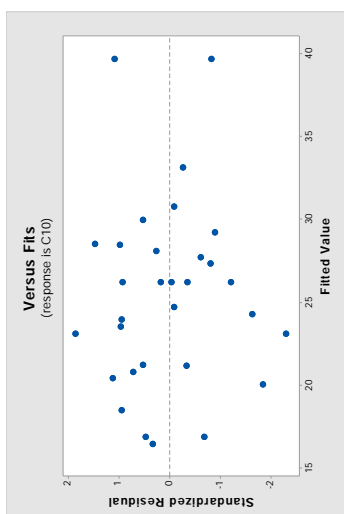
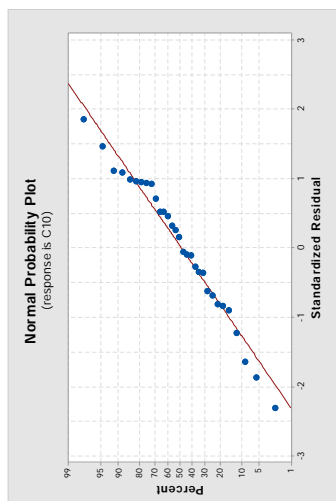


Fig. 10 Distribution of residues and normal probability in the concave surface of the workpiece

شکل 10 توزیع باقی‌مانده‌ها و احتمال نرمال در سطح مقعر قطعه کار

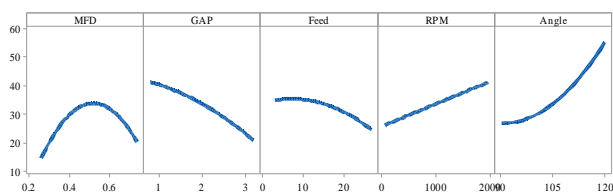


Fig. 11 The main parameters effects the amount of surface roughness changes in the concave surface of the workpiece

شکل 11 نحوه‌ی تأثیر پارامترهای اصلی بر میزان تغییرات زبری سطح در سطح مقعر قطعه کار

جدول 7 آورده شده است. همچنین، در شکل 10 نمودارهای احتمال نرمال و توزیع باقی‌مانده‌ها آورده شده است. پراکندگی مناسب باقی‌مانده و غیر مؤثر بودن عدم برازش مدل نشان دهنده‌ی کیفیت مدل بوده، و مقادیر $R-sq=91/31$ و $R-sq(adj)=85/04\%$ نیز نشان دهنده‌ی دقت مناسب مدل می‌باشد.

جدول 7 نتایج آنالیز واریانس پس از حذف ترم‌های غیر مؤثر در سطح مقعر قطعه کار

Table 7 Results of analysis of variance after removal of ineffective terms in the concave surface of the workpiece

ترم‌ها	درجات آزادی	جمع مربعات SS	میانگین مربعات MS	F مقدار	P مقدار
مدل	9	1063/98	118/22	19/41	0/000
خطی	5	812/68	162/536	26/68	0/000
چگالی شار مغناطیسی (MFD)	1	28/03	28/03	4/60	0/040
گپ (GAP)	1	274/05	274/05	45	0/000
نرخ پیشروی (Feed)	1	243/97	243/97	40/06	0/000
سرعت دورانی (RPM)	1	225/58	225/58	37/04	0/000
زاویه انحراف (Angle)	1	41/05	41/05	6/74	0/016
مجذور	2	60/835	30/425	4/99	0/015
MFD×MFD	1	33/43	33/43	5/46	0/028
Angle×Angle	1	27/405	27/405	4/5	0/04
تداخل دوتایی	2	190/47	95/235	15/63	0/000
GAP×RPM	1	66/26	66/26	10/88	0/003
Feed×RPM	1	124/21	124/21	20/39	/0001
خطا	23	140/81	6/09		
عدم برازش	14	125/29	8/949	2/1	0/553
خطای کلی	5	15/53	3/882		
مجموع	32	1204/79			
					$R-sq(adj)=85\%/04$
					$R-sq = 91\%/31$

4-2-2- بحث

در شکل 11 نحوه‌ی تأثیر پارامترهای اصلی بر میزان تغییرات زبری سطح آورده شده است.

در سطح مقعر با افزایش زاویه‌ی انحناء تغییرات زبری سطح افزایش پیدا می‌کند. مشابه سطح محدب، میزان تغییرات به ناحیه‌ی مؤثر سطح نیم‌کره‌ی آهن‌ریا در تماس با سطح قطعه کار وابسته می‌باشد. در مقایسه با سطح محدب، فاصله‌ی مابین سطح قطعه کار و آهن‌ریا قطب مخالف در زیر قطعه کار کمتر می‌باشد.

با توجه به شکل 11 مشخص است که در گپ‌های اندک افزایش سرعت برشی باعث افزایش تغییرات زبری سطح و در گپ بالا این روند معکوس می‌باشد. در گپ کم با توجه به نفوذ مناسب، هرچه سرعت برشی بیشتر باشد، تغییر شکل پلاستیک کمتر بوده و در نتیجه شاهد کاهش زبری هستیم. از طرف دیگر، با کاهش گپ میزان چگالی شار مغناطیسی نیز افزایش پیدا کرده و نیروی مغناطیسی اعمالی توانایی غلبه بر نیروی گریز از مرکز را دارا می‌باشد. در حالی که در گپ‌های بالا به علت کاهش میزان چگالی شار مغناطیسی، در سرعت‌های برشی زیاد، شاهد پرتاب شدن ذرات ساینده و به موجب آن، کاهش تعداد ذرات ساینده هستیم. این روند منجر به کاهش تغییرات زبری سطح می‌گردد، که در شکل 11 به خوبی مشهود می‌باشد.

در سرعت‌های دورانی بالا با افزایش میزان سرعت پیشروی، کاهش تغییرات زبری مشاهده می‌شود. کاهش زمان تماس و طول تماس ذرات ساینده با پستی و بلندی‌های سطح قطعه کار، موجب این کاهش می‌گردد. در صورتی که در سرعت‌های برشی پایین، افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش تغییرات زبری سطح می‌شود. در سرعت‌های برشی پایین تغییر شکل پلاستیک (پدیده شخم زنی) بیشتر مشاهده می‌شود. به همین دلیل، با کاهش سرعت پیشروی، روند تغییر شکل‌های پلاستیکی جانبی و تشکیل پلیسه، سرعت بیشتری می‌گیرد. به همین دلیل، در سرعت‌های برشی پایین، جهت رسیدن به زبری سطح مناسب، افزایش میزان سرعت پیشروی توصیه می‌گردد. با توجه به اهمیت بررسی زاویه انحناء، نحوه تأثیر هر پارامتر بر تغییرات زبری در زوایای انحناء مختلف، در شکل 13 آورده شده است.

همچنین با افزایش سرعت پیشروی و گپ، کاهش میزان تغییرات زبری مشاهده می‌شود. از آنجا که در سطح مقعر ناحیه پایینی سطح نیم‌کره‌ی آهن‌ربا، چگالی شار مغناطیسی کمتری نسبت به سایر سطوح نیم‌کره‌ی آهن‌ربا فعالیت دارد، با افزایش گپ همین مقدار نیز کاهش یافته و در نتیجه کارایی فرایند کاهش می‌یابد. افزایش بیش از حد چگالی شار مغناطیسی و تشکیل حلقه بسته با آهن‌ربا با قطب مخالف در زیر قطعه کار باعث صلابت بیش از حد جاروبک شده و شاهد کاهش کارایی فرایند باشیم. میزان کم چگالی شار مغناطیسی نیز باعث عدم استحکام کافی جاروبک می‌گردد، در نتیجه میزان بهینه‌ی چگالی شار مغناطیسی 0/5 تسلا می‌باشد.

3-2-4- تداخل اثر پارامترها بر تغییرات زبری

با توجه به مقادیر F-Value در جدول 6، مشخص است که تداخل اثر پارامترهایی گپ- سرعت برشی و سرعت پیشروی- سرعت برشی بر تغییرات زبری سطح، مؤثر می‌باشند. در شکل 12 به نحوه تأثیر این تداخل‌ها اشاره شده است. لازم به ذکر است، مقادیر سایر پارامترها در سطوح میانه در نظر گرفته شده است.

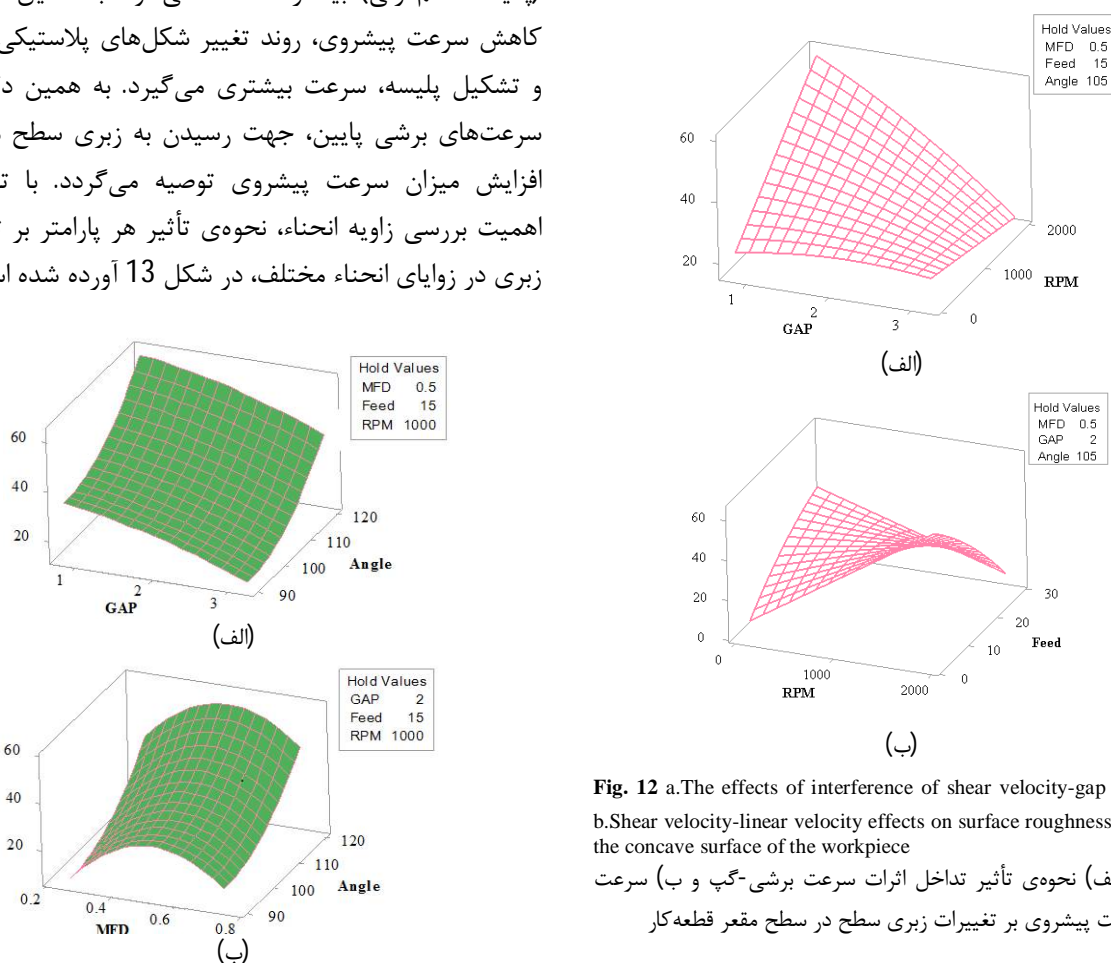


Fig. 12 a. The effects of interference of shear velocity-gap effects and b. Shear velocity-linear velocity effects on surface roughness changes in the concave surface of the workpiece

شکل 12 الف) نحوه تأثیر تداخل اثرات سرعت برشی-گپ و ب) سرعت برشی- سرعت پیشروی بر تغییرات زبری سطح در سطح مقعر قطعه کار

و خطوط ناشی از فرایند فرزکاری بر سطح دیده می‌شود. شیارهای با عمق و ارتفاع زیاد و به صورت غیر یکنواخت در شکل مشاهده می‌شود. در شکل مشخص است که عرض شیارها کاهش پیدا کرده، و برخی از خطوط نیز از بین رفته است.

جدول 8 مقادیر بهینه‌ی پارامترها به همراه نتایج آزمایش‌های تأیید مدل

Table 8 Optimal values of the parameters along with the results of the model validation tests

مقادیر بهینه	پیش‌بینی	مقدار	MFD	GAP	Feed	RPM	Angle
پارامترها	تغییرات	اندازه‌گیری	اختلاف	شده			
مقادیر بهینه		78/5	0/52	0/81	3/1	1963	90
آزمایش 1		54/7	74/3	0/5	0/8	3	1963
آزمایش 2		59/9	70/2	0/5	0/8	3	1963
آزمایش 3		54/3	70/1	0/5	0/8	3	1963

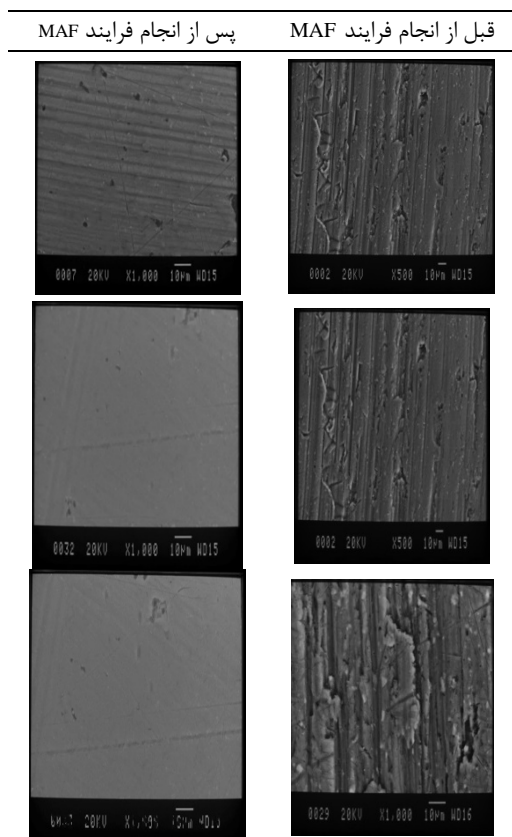


Fig. 14 Scan electron microscope images before and after the MAF process

شکل 14 تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری قبل و پس از انجام فرایند MAF

4-4- مقایسه‌ی تأثیر پارامترهای حرکتی بین سطح محدب و مقعر در ادامه مابین نحوه‌ی تأثیر پارامترها بر سطوح محدب و مقعر قطعه‌کار مقایسه صورت گرفته است که نمودارهای واقع در

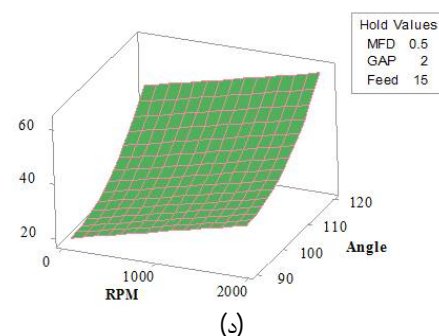
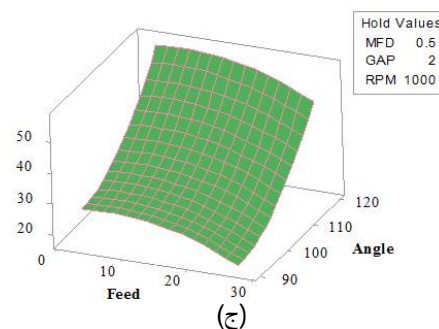


Fig. 13 Affect of the parameters of a.Gap, b.Magnetic field, c.Progress velocity, and d. Shear velocity, related to the angles of curvature in the concave surface of the workpiece

شکل 13 نحوه‌ی تأثیر پارامترهای الف) گپ ب) میدان مغناطیسی ج) سرعت پیشروی و د) سرعت برشی، نسبت به زاویه‌ی انحناء در سطح مقعر قطعه‌کار

با توجه به شکل 12، مشخص است که روند تأثیرگذاری پارامترها در زوایای انحناء گوناگون یکسان و فقط مقادیر آن متفاوت می‌باشد. در ادامه و با استفاده از تحلیل رگرسیون، مدل ریاضی پیش‌بینی کننده تغییرات زبری سطح مقعر قطعه‌کار، توسط پارامترها و ترم‌های مؤثر و به صورت کد نشده در رابطه (2)، به دست آمده است.

$$\begin{aligned} \Delta RA = & 28.2 + 83.1.MFD + 6.91.GAP + 3.14.Feed \\ & + 0.034.RPM - 3.74.Angle - 121.2.MFD.MFD \\ & + 0.003283.Angle.Angle - 0.00679.GAP.RPM \\ & - 0.0025.Feed.RPM \end{aligned} \quad (2)$$

3-4- آزمایش بهینه

مقادیر بهینه پارامترها، با حد مطلوبیت 1 برای زوایای انحناء 90 و 120 درجه، در جدول 7 آورده شده است. جهت تأیید مدل حاصل، 3 آزمایش با تنظیم پارامترها بر اساس مقادیر بهینه حاصل از نرم‌افزار انجام شده است. مقادیر پیش‌بینی شده و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در جدول 8 آورده شده است. بیشینه‌ی اختلاف 19/6 درصد می‌باشد.

همچنین، برای بررسی کیفی نتایج، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، از سطح قطعه‌کار نمونه بهینه، قبل و بعد از فرایند عکس‌برداری شده است. در شکل 14 شیارها

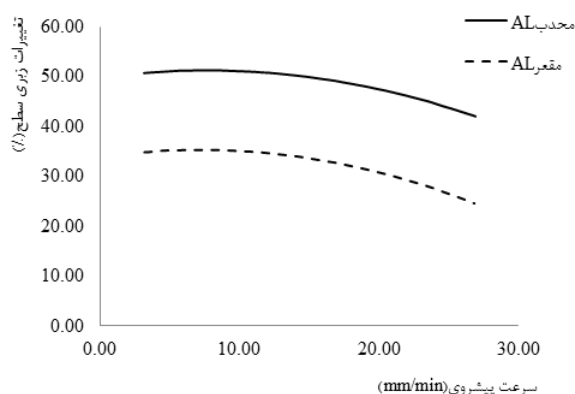


Fig. 18 Comparison of the effect of forward velocity between the convex and concave regions of the workpiece

شکل 18 مقایسه‌ی نحوه‌ی تأثیر سرعت پیشروی بین نواحی محدب و مقعر قطعه‌کار

در سطح مقعر با افزایش سرعت برشی، تغییرات زبری سطح افزایش می‌یابد. در حالی‌که، در سطح محدب با گذشت از سرعت 1500 دور بر دقیقه، توقف در پیشرفت تغییرات زبری مشاهده می‌شود. در شرایط یکسان، با توجه به فاصله‌ی بین سطح قطعه‌کار تا آهن‌ربا با قطب مخالف در زیر قطعه‌کار، می‌توان نتیجه گرفت که، چگالی شار مغناطیسی ناشی از مدار بسته بین آهن‌رباها در سطح مقعر بیشتر می‌باشد، و در نتیجه توانایی غلبه بر نیروی گریز از مرکز در این سطح نیز بیشتر است. بنابراین، افزایش بیش از حد چگالی شار مغناطیسی باعث صلابت بیش از حد جاروبک ساینده مغناطیسی شده و شاهد کاهش کارایی فرایند MAF بر سطوح مقعر خواهیم بود. برخلاف روند مذکور، کمترین میزان گپ باعث بیشترین تغییرات زبری سطح مقعر شده است، در حالیکه، در سطح محدب همین مقدار نتیجه‌ی مناسب، حاصل نمی‌شود، علت این مورد را می‌توان چنین تفسیر نمود که، در تقابل سطح نیم‌کره‌ی آهن‌ربا با سطوح قطعه‌کار در سطح مقعر، نیمه‌ی پایینی نیم‌کره با چگالی کمتر در تماس می‌باشد. افزایش فاصله باعث کاهش بیش از حد چگالی شار مغناطیسی در این سطوح می‌گردد، در حالیکه در سطوح محدب نیمه‌ی میانی و بالایی نیم‌کره‌ی آهن‌ربا با چگالی شار مغناطیسی بالاتر فرایند MAF را انجام می‌دهد. به همین دلیل، از فاصله‌ی بیش از حد کم گپ نتیجه‌ی مناسبی بر سطح محدب حاصل نمی‌شود. همچنین با توجه به نوع زوایا در سطح محدب و در فاصله‌ی اندک گپ، شاهد توقف و فشردگی پودر در ناحیه‌ی مابین سطح نیم‌کره‌ی آهن‌ربا و سطح قطعه‌کار هستیم. توقف فعالیت پودر باعث کاهش کارایی فرایند می‌شود. پیرامون سرعت پیشروی نیز در هر دو سطح یک روند مشاهده می‌شود. نکته‌ی بسیار مهم، افزایش بیشتر تغییرات زبری سطح در

شکل‌های 15 تا 18 بیانگر این موضوع می‌باشند. در این مقایسه، تفاوت زوایای انحناء در سطح محدب و مقعر حائز اهمیت است.

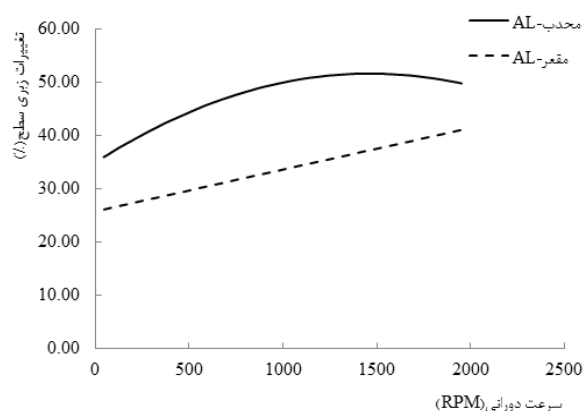


Fig. 15 Comparison of the effect of rotational velocity between the convex and concave regions of the workpiece

شکل 15 مقایسه‌ی نحوه‌ی تأثیر سرعت دورانی بین نواحی محدب و مقعر قطعه‌کار

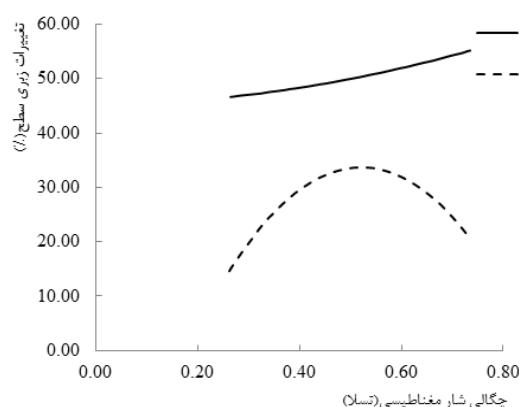


Fig. 16 Comparison of the effect of magnetic flux density between the convex and concave regions of the workpiece

شکل 16 مقایسه‌ی نحوه‌ی تأثیر چگالی شار مغناطیسی بین نواحی محدب و مقعر قطعه‌کار

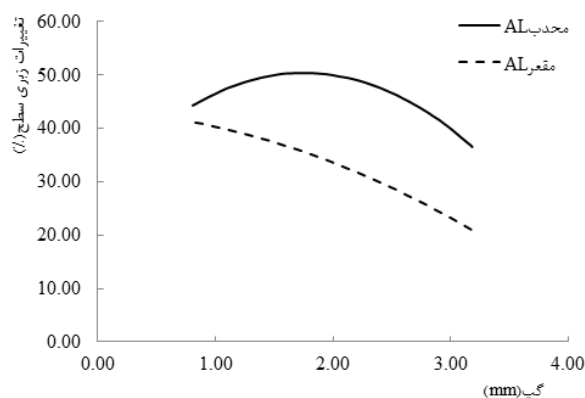


Fig. 17 Comparison of the effect of chat between the convex and concave regions of the workpiece

شکل 17 مقایسه‌ی نحوه‌ی تأثیر گپ بین نواحی محدب و مقعر قطعه‌کار

- با افزایش سرعت برشی از 500 تا 2000 (دور بر دقیقه)، بر سطح محدب قطعه کار، تغییرات زبری سطح افزایش می‌یابد.
 - با افزایش سرعت دورانی از 125 تا 2000 (دور بر دقیقه)، تغییرات زبری سطح مقعر قطعه کار 57 درصد، افزایش می‌یابد.
 - در سطح مقعر قطعه کار، با افزایش چگالی شار مغناطیسی در ابتدا تغییرات زبری افزایش و در ادامه کاهش می‌یابد. مقدار بهینه چگالی شار مغناطیسی بر سطح مقعر قطعه کار 0/51 تسلا می‌باشد.

- در سطح مقعر قطعه کار، با افزایش گپ از 1 تا 3 میلی‌متر، تغییرات زبری کاهش می‌یابد.
 - در سطح مقعر قطعه کار، با افزایش سرعت پیشروی از 5 تا 25 (میلی‌متر/دقیقه)، تغییرات زبری سطح، کاهش می‌یابد.

6- مراجع

- [1] C. Qian, Z. Fan, Y. Tian, Y. Liu, J. Han, and J. Wang, "A review on magnetic abrasive finishing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 112, No. 3, pp. 619-634, 2021.
- [2] J.-d. Kim and I.-h. Noh, "Magnetic polishing of three dimensional die and mold surfaces," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, No. 1, pp. 18-23, 2007.
- [3] H. Chen, Y. Zhang, and W. Yan, "The technology of finishing process of die space based upon magnetic abrasive finishing," in *Key engineering materials*, 2004, Vol. 259, pp. 657-661: Trans Tech Publ.
- [4] M. Vahdati and S. Rasouli, "Evaluation of parameters affecting magnetic abrasive finishing on concave freeform surface of Al alloy via RSM method," *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2016, 2016.
- [5] C.-T. Lin, L.-D. Yang, and H. M. Chow, "Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, pp. 122-130, 2007.
- [6] Y. H. Ding, X. G. Yao, X. X. Wang, and S. C. Yang, "Study on the performances of the ferromagnetic poles based on the curved surface magnetic abrasive finishing," in *Key engineering materials*, 2008, Vol. 359, pp. 365-368: Trans Tech Publ.
- [7] C. S. Sathua, V. Jain, J. Ramkumar, and A. Sidpara, "Analysis of forces and surface roughness in magnetic abrasive finishing with a ball-end tool," *International Journal of Precision Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 131-142, 2013.
- [8] S. Jayswal, V. Jain, and P. Dixit, "Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 477-490, 2005.

ناحیه‌ی محدب نسبت به سطح مقعر می‌باشد، که این مورد نیز به میزان زوایای انحناء سطح در ناحیه‌ی مقعر و محدب و همچنین تفاوت در میزان زبری اولیه در این سطوح، بستگی دارد. انجام فرایند MAF با کارایی بالا در زوایای انحناء 30 و 45 درجه در سطح محدب و زبری اولیه‌ی بیش از حد زاویه‌ی 105 درجه‌ی ناحیه مقعر از جمله دلایل ایجاد این تفاوت می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

- تغییرات زبری بر سطح محدب بیشتر از سطح مقعر می‌باشد. در سطح محدب با افزایش زاویه انحناء، تغییرات زبری کاهش پیدا می‌کند، در حالی که در سطح مقعر با افزایش زاویه انحناء از 90 تا 120 درجه، تغییرات زبری افزایش می‌یابد. در هر دو سطح کمترین مقدار تغییرات زبری در زاویه انحناء 90 درجه حاصل می‌شود.

- با بررسی پارامترهای حرکتی بر سطح مقعر قطعه کار مشخص شد که با افزایش سرعت برشی، تغییرات زبری سطح افزایش می‌یابد. در حالیکه، در سطح محدب با گذشت از سرعت 1500 دور بر دقیقه، توقف در پیشروی تغییرات زبری اتفاق می‌افتد.

- کمترین میزان گپ (0/8 میلی‌متر) باعث بیشترین تغییرات زبری (45/85 درصد) بر سطح مقعر قطعه کار شده است، در حالیکه، در سطح محدب همین مقدار نتیجه مناسب حاصل نمی‌شود. بهینه تغییرات زبری (50/36 درصد) بر سطح محدب قطعه کار در گپ 1/75 میلی‌متر حاصل می‌شود.

- بر سطح محدب قطعه کار با افزایش چگالی شار مغناطیسی، افزایش تغییرات زبری سطح رخ داده است، در حالی که، در سطح مقعر با گذشت از چگالی شار مغناطیسی 0/53 تسلا، توقف در پیشرفت تغییرات زبری، رخ می‌دهد.

- نحوه تأثیر سرعت پیشروی در سطح محدب و مقعر قطعه کار یکسان می‌باشد. با افزایش سرعت پیشروی، تغییرات زبری کاهش می‌یابد.

- با افزایش سرعت پیشروی از 5 تا 25 (میلی‌متر/دقیقه) بر سطح محدب قطعه کار، تغییرات زبری تا 20/3 درصد کاهش می‌یابد.

- با افزایش گپ بر سطح محدب قطعه کار، ابتدا شاهد افزایش تغییرات زبری، و در ادامه افزایش گپ، شاهد کاهش تغییرات هستیم. مقدار بهینه گپ 1/66 میلی‌متر می‌باشد.

- با افزایش چگالی شار مغناطیسی از 0/3 تا 0/7 تسلا، تغییرات زبری سطح از 46/55 به 55/28 درصد افزایش می‌یابد.

- [13] Y. Choopani, M. Khajehzadeh, M. Razfar, Optimization of Parameters Affecting Magnetic Abrasive Finishing Process Using Response Surface Method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, ol. 52, No. 10, pp. 41-50, 2019. (in Persian)
- [14] A. Jiao, G. Zhang, B. Liu, and W. Liu, "Study on improving hole quality of 7075 aluminum alloy based on magnetic abrasive finishing," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, p. 1687814020932006, 2020.
- [15] A. M. Nahy and A. H. Kadhum, "Optimizing the micro-hardness of a surface by magnetic abrasive finishing," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 870, No. 1, p. 012018: IOP Publishing.
- [16] A. Barman and M. Das, "Simulation and experimental investigation of finishing forces in magnetic field assisted finishing process," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, No. 11, pp. 1223-1232, 2018.
- [17] "Magnetic abrasive automatic polishing of curved surface.pdf."
- [9] A. Khatri and V. Yadava, "Finite Element Simulation of Plane Magnetic Abrasive Finishing," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2006, Vol. 47748, pp. 353-362.
- [10] G. Song, B. Poudel, P. Kwon, H. Chung, Z. Detweiler, and G. Quan, "Development of Magnetic-Field Assisted Finishing (MAF) Process for Chromium-Alloyed Low Carbon Steel Sheet Metal," in *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2021, Vol. 85079, p. V002T06A025: American Society of Mechanical Engineers.
- [11] L. Nagdeve, K. Dhakar, and H. Kumar, "Development of novel finishing tool into Magnetic Abrasive Finishing process of Aluminum 6061," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 35, No. 10, pp. 1129-1134, 2020.
- [12] Y. P. Sun, S. X. Yuan, B. F. Feng, G. Cai, J. Shi, and G. F. Hu, "Research on Magnetic Abrasive Finishing for the Free Form Surface of Mould by 5-DOF Parallel Virtual Axis Machine Tool," *Key Engineering Materials*, Vol. 259-260, pp. 631 - 635, 2003.