مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1395، دوره 16، شماره 4، ص‌ص 248-258

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی بر روی سطوح آزاد

مهرداد وحدتی[1*]، سید علیرضا رسولی[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران
2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 19395-1999، vahdati@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 دی 1394
پذیرش: 22 اسفند 1394
ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:
پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی
سطوح آزاد
روش سطح پاسخ
شبیه‌سازی
بهینه‌سازی

چکیده

تلاش محققین در صنایع برای به دست آوردن سطوح دقیق و باکیفیت بالا منجر به ابداع روش‌های جدید پرداخت‌کاری شده است. پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی نوع نسبتا جدیدی از پرداخت‌کاری است که در آن از میدان مغناطیسی برای کنترل ابزار ساینده استفاده می‌شود. ازجمله قطعاتی که نیاز به صافی سطح بسیار بالایی دارند سطوح قالب می‌باشد. معمولا این نوع قطعات دارای سطوح آزاد می‌باشند. در مقاله حاضر به بررسی پارامترهای فرآیند سایشی مغناطیسی من جمله میزان گپ، سرعت دورانی کلگی، نرخ پیشروی و مقدار پودر بر روی سطوح آزاد قطعاتی از جنس آلومینیوم پرداخته‌شده است. این روش از ترکیب فرآیند سایشی مغناطیسی با برنامه‌نویسی کنترل عددی به دست می‌آید. استفاده از نیم‌کره جهت نصب بر سطح تخت آهن‌ربا و همچنین اسپارک آهن‌ربا به‌صورت منحنی ازجمله اقداماتی است که در طی فرآیند انجام آزمایش‌ها صورت گرفته است. طراحی آزمایش‌ها مبتنی بر روش سطح پاسخ می‌باشد. میزان گپ، سرعت دورانی و نرخ پیشروی مؤثر شناخته شده و معادله رگرسیون حاکم بر فرآیند نیز استخراج گردیده است. نحوه تأثیر شدت میدان مغناطیسی نیز توسط نرم‌افزار المان محدود ماکسول به‌دست‌آمده است. در سطوح مقعر قطعه کار زبری سطح از 1.3µm به 0.2 µm رسیده است. البته در بعضی نقاط زبری 0.08 µm نیز اندازه‌گیری شده است.

Study of effective factors on magnetic abrasive finishing on freeform surface

Mehrdad Vahdati*, Seyed Alireza Rasouli

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, vahdati@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 January 2016
Accepted 12 March 2016
Available Online 20 April 2016

Keywords:
Magnetic abrasive finishing
Freeform
response surface method
simulation
optimization

ABSTRACT

The attempts of researchers in industries to obtain accurate and high quality surfaces led to the invention of new methods of finishing. Magnetic abrasive finishing (MAF) is a relatively new type of finishing in which the magnetic field is used to control the abrasive tools. Applications such as the surface of molds are parts which require very high surface smoothness. Usually this type of part has freeform. In this study, the effect of magnetic abrasive process parameters on freeform surfaces of parts made of aluminum is examined. This method is obtained through combination of magnetic abrasive process and Control Numerical Computer (CNC). The use of simple hemisphere for installation on the flat area of the magnets as well as magnets' spark in curve form is a measure done during testing of the experiments. The design of experiments is based on response surface methodology. The gap, the rotational speed of the spindle and the feed rate are found influential and regression equations governing the process are also determined. The impact of intensity of the magnetic field is obtained using the finite element software of Maxwell. Results show that in concave areas of the surface, generally speaking, the surface roughness decreases to 0.2 µm from its original 1.3 µm roughness. However, in some points the lowest surface roughness of 0.08 µm was measured.

1- مقدمه

رابطه بسیار نزدیکی مابین دقت ماشین‌کاری، زبری سطح و طول عمر محصولات وجود دارد [1]. کیفیت سطح تأثیر بسیار چشمگیری در طول عمر دسته‌ای از محصولات دارد. برای نمونه می‌توان به قالب‌ها اشاره کرد. معمولا قالب‌ها دارای سطوحی با منحنی‌های سه‌بعدی و نسبتا پیچیده هستند. به‌طورکلی پرداخت‌کاری سطوح آزاد دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. امروزه این فرآیند به‌صورت دستی و با اتکا به تخصص اپراتور صورت می‌پذیرد. فرآیند دستی کارایی بسیار کمی دارد و به‌شدت به فاکتورهای نیروی انسانی وابسته است. میزان براده برداری و کیفیت سطح در سطوح قالب‌ها و قطعه کارهایی با سطوح پیچیده به‌ندرت یکسان و یکنواخت می‌باشد [2].

از طرف دیگر، از جمله فرآیندهای پرداخت‌کاری که در طی سالیان جدید پیشرفت کرده است فرآیند پرداخت‌کاری سایشی تحت کنترل نیروهای مغناطیسی می‌باشد. جاروبک ساینده مغناطیسی که با اعمال میدان مغناطیسی شکل می‌گیرد، بسیار منعطف بوده و شکل هر سطحی را به خود می‌گیرد. در این فرآیند ابزار صلب نبوده و دارای پوشش نیست که لازم باشد برای هر انحنایی ابزار مربوط به آن ساخته شود. سایز در حد میکرون ذرات ساینده و شکل‌پذیری آن‌ها امکان دسترسی جاروبک ساینده را به هر سطح پیچیده و مشکلی فراهم می‌کند [3]. خود تیز شوندگی، تطابق بسیار بالا، افزایش بسیار ناچیز دما در طی فرآیند نسبت به سایر روش‌های مشابه،

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Vahdati, S. A. Rasouli, Study of effective factors on magnetic abrasive finishing on freeform surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 248-258, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

کنترل مناسب بر میزان نیروهای وارده بر ذرات و عدم ایجاد میکروترک‌های سطحی، از جمله مزایایی است که باعث رشد به‌کارگیری این فرآیند شده است [4]. در شکل 1 شماتیکی از فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی (MAF) بر سطوح منحنی دیده می‌شود [5]. همچنین از آن‌جا که لایه‌های انجماد مجدد[1] ناشی از فرآیندهای تخلیه الکتریکی مکان بسیار مناسبی جهت ایجاد و رشد میکرو ترک‌ها می‌باشد با این روش می‌توان به‌سادگی این لایه را از سطوح قالب زدود [6]. لازم به ذکر است با توجه به نیروی بسیار کم وارد بر ذره ساینده (در حدود میکرو نیوتن و کمتر)، میزان عمق نفوذ ذره ساینده در حدود 1µ و کمتر می‌باشد، درنتیجه فرایند مذکور تلورانس ابعادی و هندسی قطعه‌کار را دچار تغییر نمی‌کند.

با تلفیق سیستم کنترل عددی کامپیوتری و پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی، شکل برس ساینده به‌راحتی متناسب با انحناهای سه‌بعدی سطوح قالب تغییر پیدا می‌کند و پرداخت‌کاری سطوح پیچیده امکان‌پذیر می‌گردد. در نتیجه با کنترل اتوماتیک پارامترهای فرآیند می‌توان به سطحی باکیفیت بسیار مناسب و با یکنواختی بالا در سطح قطعه‌کار رسید [7].

در مطالعات و کارهای تحقیقاتی و صنعتی گذشته فرآیند سایشی مغناطیسی بیشتر بر روی قطعه کارهایی با سطوح تخت و استوانه‌ای (داخلی– خارجی) انجام‌شده است [8]. چینگ تین و همکارانش توسط روش تاگوچی به بررسی پارامترهایی مانند سرعت دورانی کلگی، سرعت پیشروی، مقدار روان کار، گپ و مقدار ساینده بر روی سطح قطعه کاری از جنس فولاد زنگ نزن 304[2] و با انحنای بسیار کم پرداختند. آن‌ها توانستند توسط فرآیند مذکور زبری سطح را از 0.158µm به 0.102µm برسانند [9]. در طی آنالیز آزمایش‌ها متوجه شدند که مقدار ساینده، سرعت پیشروی و فاصله بین سطح قطعه‌کار و آهن‌ربا فاکتورهای مؤثر بر مقدار کاهش زبری سطح هستند. مقدار گپ بیشترین تأثیر را داشته و مقدار بهینه آن بین 1 تا 2 میلی‌متر می‌باشد. شاهویایی ین و شینمورا به بررسی اثر ارتعاشات بر فرآیند پرداخت‌کاری سطوح منحنی با انحنای بسیار کم پرداخته‌اند [10]. قطعه‌کار را در جهت‌های عمودی، افقی و ترکیبی با دامنه بسیار پایین و فرکانس بسیار بالا مرتعش کرده و تأثیر آن را بر میدان مغناطیسی، فشار وارده بر ذرات ساینده و کارایی فرآیند بررسی کرده‌اند. ارتعاش در مسیر عمودی و افقی قطعه کار بیشترین تأثیر را در کاهش زبری متوسط سطح دارا می‌باشد. جیونگ دی کیم و همکارانش روش جدیدی را جهت پرداخت‌کاری سطوح قالب ابداع کردند[11]. در تکنیک ایجاد شده نیاز به ماشین‌های کنترل عددی نبوده و با

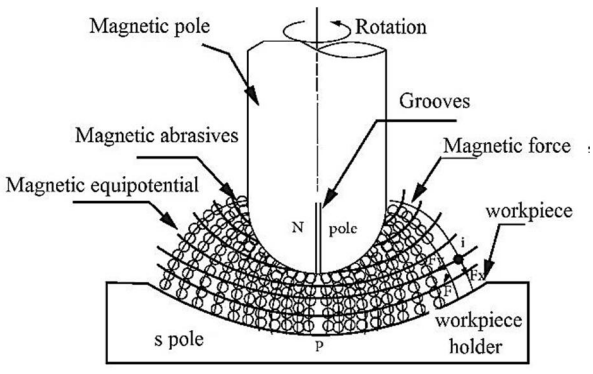

Fig. 1- schematic of MAF process

شکل 1 شماتیک فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی

استفاده از غلطک‌هایی آهن‌ربا بافاصله ثابتی مسیر منحنی را طی کرده و فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی انجام می‌شود. لازم به ذکر است که قطعه‌کارهای مورد آزمایش دارای انحنای محدب و مقعر با شیب اندک می‌باشند. زانک و همکارانش نیز در سال 2000 به بررسی تئوری منحنی‌های نرب در سطوح آزاد و تأثیر آن‌ها بر فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی پرداخته‌اند [12]. دینگ و همکارانش پارامتر زمان و تأثیر آن بر کاهش زبری سطوح محدب و مقعر را بررسی کرده‌اند [13]. ماساهیرو آنزای نیز به بررسی فرآیند بر روی سطوح قالب اسپارک شده پرداخته و توانستند ضخامت لایه انجماد مجدد را تا حد مناسبی کاهش دهند [14].

2- شرح مسئله

با بررسی پیشینه تحقیقات معلوم شد که تاکنون فرآیند سایشی مغناطیسی در سطوح قالب با شیب زیاد مدل‌سازی نشده است. جهت بررسی فاکتورهای مؤثر بر میزان کاهش زبری متوسط سطح، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند از روش سطح پاسخ استفاده شده است. لازم به ذکر است که جهت اطمینان از مقدار نیروی وارده بر ذرات ساینده از طرف ذرات مغناطیسی، شبیه‌سازی و اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی توسط دستگاه تسلامتر[3] (مدل PHVWE در محدوده 2-0 تسلا) و نرم‌افزار المان محدود ماکسول انجام شده است.

3-روش حل

در این قسمت به طراحی و ساخت ابزار، شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ابزارهای گوناگون، طراحی و ساخت قطعه کار، طراحی آزمایش‌ها، انتخاب فاکتورهای مناسب، مدل‌سازی و بهینه‌سازی پرداخته شده است.

3-1- ابزار

میدان مغناطیسی موردنیاز فرآیند از طریق آهن‌ربای الکتریکی و یا آهن‌ربای دائمی ایجاد می‌شود. تولید میدان مغناطیسی متغیر و همچنین جدایش راحت و آسان پودرهای ساینده از سطح آهن‌ربا الکتریکی از مزایایی این نوع آهن‌ربا می‌باشد [15]. از طرف دیگر جهت تولید میدان مغناطیسی بالا 0.2 تسلا، مقدار سیم‌پیچ‌ها در حدود 3000 دور و قطر هسته بیشتر از 30 میلی متر می‌باشد [16]. این ابعاد فضای زیادی را اشغال می‌کند. همچنین در فرآیند سایشی مغناطیسی سطوح تخت و سطوح آزاد، آهن‌ربا حرکت دورانی دارد. به همین خاطر از سیم جهت انتقال انرژی به سیم‌پیچ‌ها نمی‌توان استفاده کرد. جهت این امر از اسلیپ رینگی[4] به همراه زغال استفاده می‌شود. جهت کاهش دمای سیم‌پیچ‌ها در طول مدت استفاده نیاز به سیستم خنک کاری می‌باشد. با توجه به مشکلات مذکور، در این آزمایش‌ها با توجه به مواردی مانند حجم کمتر و نصب راحت و آسان و قیمت مناسب از آهن‌ربای دائمی استفاده شده است.

در فرآیند سایشی مغناطیسی سطوح تخت با توجه به حرکت دورانی ابزار از آهن‌ربای استوانه‌ای جهت تولید میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. واضح است در پرداخت‌کاری سطوح آزاد با توجه به انحنای سطوح از آهن‌رباهای تخت نمی‌توان استفاده کرد. در صورت استفاده از آهن‌ربای تخت در طول مسیر با توجه به رعایت فاصله مابین آهن‌ربا و سطح قطعه‌کار (در حدود 2 میلی‌متر) مابین قطعه‌کار و آهن‌ربا برخورد به وجود می‌آید. در این فرآیند نیز باید همانند ماشین‌کاری سطوح آزاد در مرحله پرداخت‌کاری از ابزارهایی

1- Recast layer
2- Stainless steel
3- Tesla meter
4- Slip ring

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

سرگرد[1] استفاده شود. سر کروی این ابزارها باعث عبور از سطوح منحنی بدون برخورد می‌گردد. البته قطر این ابزارها معمولا تا محدوده 20 میلی‌متر می‌باشد. جهت فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی باید سر آهن‌رباها نیز به حالت نیم‌کره گردد. این امر از دو طریق امکان‌پذیر است. نیم‌کره‌هایی آهنی متناسب با قطر آهن‌ربا به یکی از طرفین آهن‌ربا نصب می‌گردد. در شکل 2 نیم‌کره‌های آهنی و فیکسچر آهن‌ربا دیده می‌شوند.

جهت عبور بهتر میدان مغناطیسی باید از موادی با ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی[2] بالا استفاده گردد. از بین این نوع مواد، تنها دست‌یابی به آهن نسبتا خالص(99.8%) امکان داشت. جهت اطمینان از چگالی شار عبوری از نیم‌کره، آزمایش و شبیه‌سازی صورت گرفته است.

در فرآیند شبیه‌سازی نیم‌کره آهنی با شعاع 8 میلی‌متر به آهن‌ربا استوانه‌ای با قطر 16 و ارتفاع 20 میلی‌متر ابعاد اضافه‌شده است. لازم به ذکر است با توجه به این‌که ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی آهن نسبت به‌شدت میدان تغییر پیدا می‌کند؛ و از آن‌جا که شدت میدان آهن‌ربا مذکور خیلی بیشتر از (A_PER_M)400 می‌باشد، ضریب نفوذ نسبی آهن مورد استفاده نزدیک به 2400 می‌باشد. ایجاد انحنا بر روی سطح آهن‌ربا اقدام دیگری است که صورت گرفته است. ماشین‌کاری و فرآیند تخلیه الکتریکی[3] ازجمله اقداماتی هستند که جهت ایجاد آهن‌ربای به‌صورت نیم‌کره می‌توان از آن‌ها

Fig. 2 Hemispheres made of 99.8% pure iron

شکل 2 نیم‌کره‌هایی از جنس آهن خالص (99.8%)

Fig. 3 spark machined magnet with its fixture

شکل 3 آهن‌ربای اسپارک شده به همراه فیکسچر

1- Ball nose
2- Relative permeability
3- Electro discharge machining(EDM)

تجاری 35N ماشین‌کاری با مشکلاتی مواجه است و سطح یکنواختی را ایجاد استفاده کرد. با توجه به ترد بودن آهن‌ربای زینتری نئودیم-آهن-بر[4] با کد نمی‌کند. استفاده از فرآیند اسپارک[5] سطح نسبتا بهتری را ایجاد می‌کند. در شکل 3 آهن‌ربای اسپارک شده به همراه فیکسچر آهن‌ربا دیده می‌شود. مدل شبیه‌سازی‌شده دوبعدی و سه‌بعدی در شکل 4 نشان داده شده است.

از شکل 5 و 6 جهت مقایسه تأثیر نیم‌کره آهنی و آهن‌ربای نیم‌کره بر میزان چگالی شار مغناطیسی از نتایج شبیه‌سازی می‌توان استفاده کرد. چگالی شار مغناطیسی از فاصله 2 میلی‌متری از سطح نیم‌کره به‌صورت خطی(زیر سطح آهن ربا و بصورت افقی) و دایره‌ای(مطابق با انحنای نیم کره و بصورت نیم دایره در زیر سطح آهن ربا) برداشته شده است (شکل 5 و 6). لازم به ذکر است جنس قطعه‌کار مقابل سر کروی، آلومینیوم (غیر فرومغناطیس) درنظر گرفته شده است.

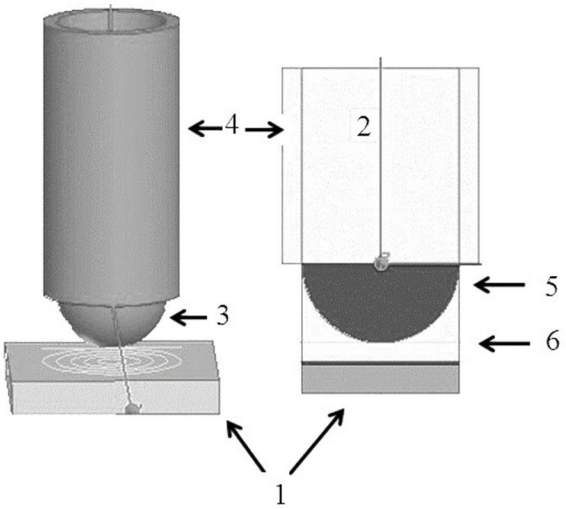

Fig. 4 2D and 3D simulation models: 1)work piece, 2) magnet, 3) spherical magnet, 4)magnet fixture, 5) iron hemisphere, 6)air

شکل 4 مدل دوبعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی 1)قطعه کار 2) آهن‌ربا N35 3) آهن‌ربا کروی 4) فیکسچر آهن‌ربا 5)نیم‌کره آهنی 6) هوا

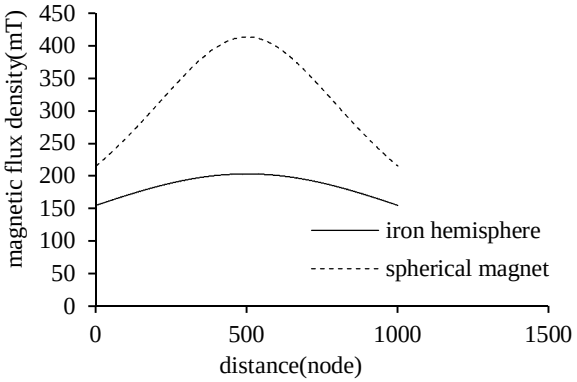

Fig. 5 magnetic flux density distribution at 2 mm distance from the surface in linear direction based on simulation results

شکل 5 توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله 2 میلی‌متر از سطح نیم‌کره به‌صورت خطی (شبیه‌سازی)

4- NdFeB
5- Spark

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

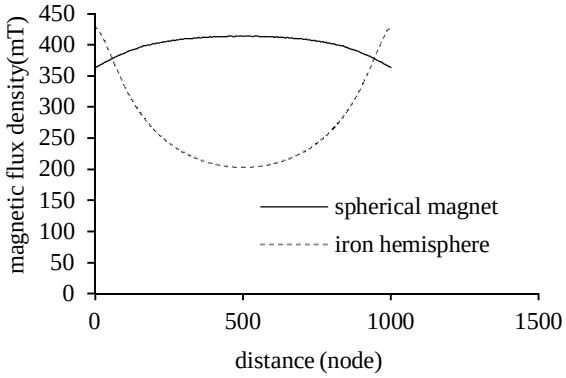

Fig. 6 magnetic flux density distribution at 2 mm distance from the surface in circular direction based on simulation results

شکل 6 توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله 2 میلی‌متر از سطح نیم‌کره به‌صورت دایره‌ای (شبیه‌سازی)

جهت تائید نتایج شبیه‌سازی، اندازه‌گیری توسط دستگاه تسلامتر از فاصله 2 میلی‌متری سطح نیم‌کره صورت گرفته است که نحوه اندازه‌گیری و نتایج در شکل‌های 7 و 8 آورده شده است. جنس تمامی تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی، غیرفرو مغناطیس (آلومینیوم) می‌باشد. مسیر اندازه‌گیری مانند شبیه‌سازی به‌صورت خطی و دایره‌ای می‌باشد. با مقایسه شکل‌های 6 و 8 واضح است که روند نتایج اندازه‌گیری با شبیه‌سازی مطابقت دارد. مقادیر متوسط چگالی شار مغناطیسی در شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در جدول 1 آورده شده است. در شکل 9 نحوه قرارگیری پودر ساینده در اطراف آهن‌ربای نیم‌کره نشان داده شده است. طبق نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی واضح است که چگالی شار مغناطیسی در اطراف آهن‌ربای نیم‌کره بیشتر از نیم‌کره آهنی می‌باشد. به همین علت مقدار پودر نگه‌داشته شده در اطراف آهن‌ربای نیم‌کره و یکنواختی توزیع آن مناسب می‌باشد. نیم‌کره آهنی در سرعت‌های دورانی بالا پودر را نمی‌تواند نگاه دارد. به علت نیروهای گریز از مرکز و بیشتر بودن چگالی شار مغناطیسی در گوشه‌ها، بیشتر پودر در آن ناحیه جمع شده و قسمت پایینی کره آهنی نسبتا خالی می‌باشد. البته درصورتی‌که جنس مقابل نیم‌کره آهنی و آهن‌ربا فرو مغناطیس باشد رفتار منحنی‌های نیم‌دایره بافاصله از آن‌ها تغییر خواهد کرد.

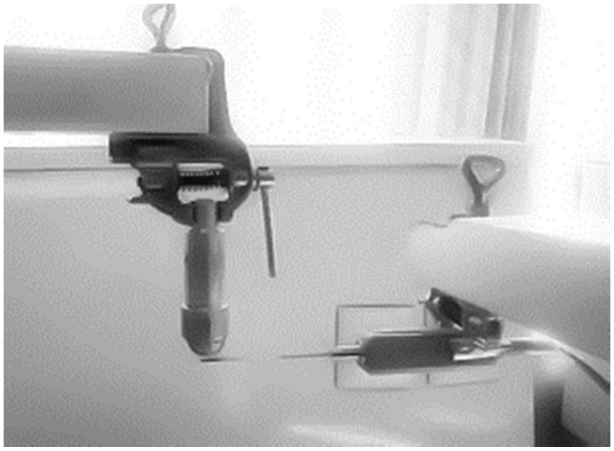

Fig. 7 measuring magnetic flux density at 2 mm from the surface of iron hemisphere

شکل 7 اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی بافاصله 2 میلی‌متر از سطح نیم‌کره آهنی

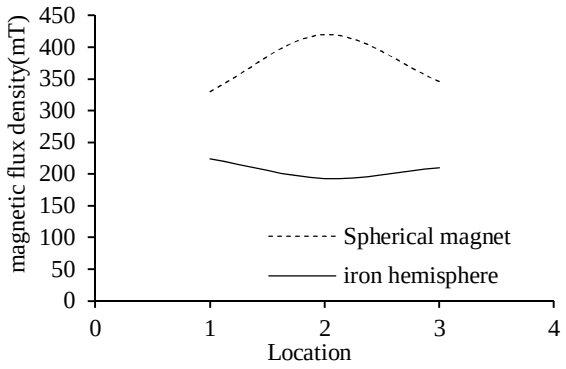

Fig. 8 measuring magnetic flux density at 2 mm from the surface of hemisphere in circular direction

شکل 8 اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی در فاصله 2 میلی‌متر از سطح نیم‌کره به‌صورت دایره‌ای

جدول 1 مقادیر متوسط اندازه‌گیری و شبیه‌سازی چگالی شار مغناطیسی

Table 1 average measured and simulated magnetic flux density

حالات	فاصله 2 mm – شعاعی (اندازه‌گیری)	فاصله2mm – شعاعی (شبیه‌سازی)	میزان اختلاف(%)	فاصله 2 mm – افقی (اندازه‌گیری)	فاصله 2 mm – افقی (شبیه‌سازی)	میزان اختلاف(%)
نیم‌کره آهنی	0.21	0.26	22	0.14	0.18	25
آهن‌ربا نیم‌کره	0.36	0.42	15	0.26	0.32	23

3-2- قطعه‌کار

قطعه‌کار توسط دستور فری‌فورم[1] نرم‌افزار سالیدورک[2] مدل‌سازی شده است. بر روی هر نمونه تعدادی از آزمایش‌ها صورت می‌گیرد. به همین علت جهت یکسان بودن مسیر فرآیند در بعد سوم، دارای انحنا و پیچیدگی نمی‌باشد. لازم به ذکر است که در مدل مذکور، نواحی محدب و مقعر با شیب‌های نسبتا

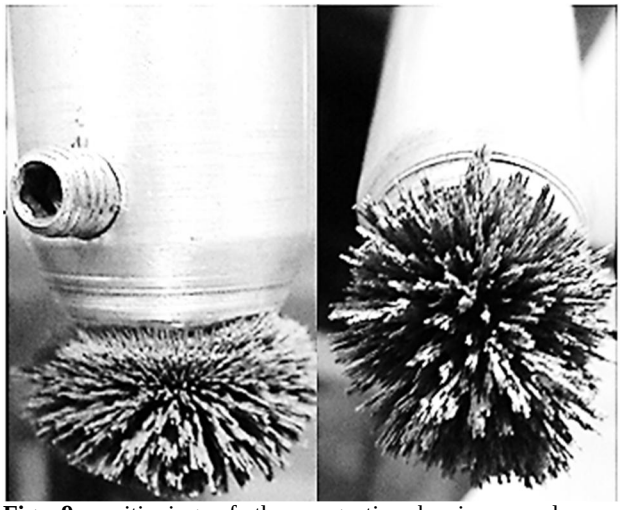

Fig. 9 positioning of the magnetic abrasive powder on hemispherical magnet

شکل 9 نحوه قرارگیری پودر ساینده مغناطیسی در آهن‌ربا نیم‌کره

1- freeform
2- solidworks

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

ملایم و تند وجود دارد که در شکل 10 دیده می‌شود. جهت ماشین‌کاری قطعه مذکور از ماشین فرز سی ان سی[1] 3 محوره استفاده شده است. جی کدهای[2] مربوطه توسط نرم‌افزار پاورمیل[3] جهت مراحل خشن‌کاری و پرداخت‌کاری استخراج شده است. جنس قطعه‌کار آلومینیوم 7075 می‌باشد. پارامترهای ماشین‌کاری در مرحله پرداخت‌کاری در طول فرآیند ثابت بوده، اما متوسط زبری سطح پایانی با توجه به نوع انحنا متفاوت می‌باشد. در این مطالعه به بررسی فرآیند بر روی ناحیه مقعر سطح قطعه‌کار پرداخته شده است. در شکل 11 اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی بر روی سطح مدل مذکور نشان داده شده است.

3-3- شرایط انجام آزمایش‌ها

جهت انجام فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی، همانند قسمت ماشین‌کاری از طریق نرم‌افزار پاورمیل جی کدهای مربوط به حرکت استخراج می‌گردد. از استراتژی پرداخت‌کاری استفاده‌شده و مقدار ضخامت باقیمانده را برابر گپ موردنظر تعریف می‌کنیم. سرعت دورانی کلگی و نرخ پیشروی ازجمله فاکتورهایی هستند که به‌راحتی در نرم‌افزار تعیین می‌گردند. همچنین مقدار استپ‌اور[4] در هر مرحله قابل‌تغییر است. استپ‌اور مقدار جابه‌جایی ابزار پس از طی مسیر یکسان می‌باشد. در این آزمایش‌ها مقدار استپ اور برابر با 0.1 mm در نظر گرفته‌شده است. مابقی فاکتورها مانند سرعت دورانی، نرخ

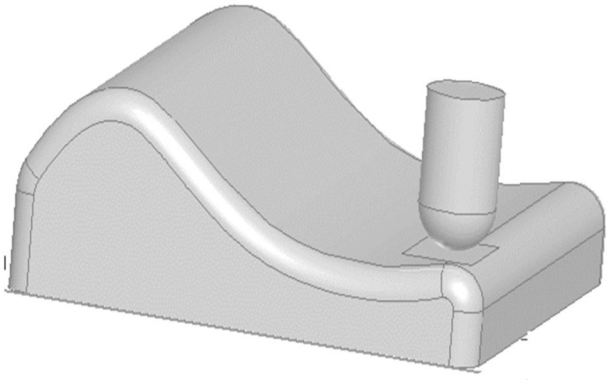

Fig. 10 model of work piece with magnet with hemispherical head

شکل 10 مدل قطعه‌کار به همراه آهن‌ربای سرگرد

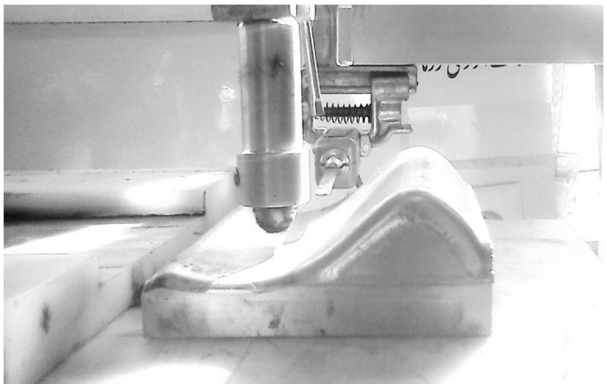

Fig. 11 measuring magnetic flux density between magnet and work piece surface

شکل 11 اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی مابین آهن‌ربا و سطح قطعه‌کار

1- cnc
2- G code
3- powermill
4- Step over

پیشروی و گپ متغیر می‌باشند که در قسمت بعد معرفی می‌گردند. لازم به ذکر است با تعریف ضخامت 1 میلی‌متر، در طول مسیر فاصله نزدیک‌ترین نقطه سطح نیم‌کره به سطح آزاد 1 میلی‌متر باقی می‌ماند. در نتیجه ممکن است فاصله سایر نواحی در محدوده‌ای بیشتر از این مقدار باشد. در شکل‌های 12 و 13 مسیر انجام فرآیند و فاصله مدنظر که از نرم‌افزار پاور میل استخراج گردیده، نشان داده شده است. خروجی بسیار مهم فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی تغییر میزان زبری متوسط سطح می‌باشد که هرقدر این میزان بیشتر باشد کارآمدی روش بالاتر خواهد بود. قبل از انجام آزمایش‌ها، سطح حاصل از پرداخت‌کاری در استون[5] به مدت 20 دقیقه نگهداری شده و سپس توسط دستگاه زبری سنج مدل سارترونیک[6] با طول کات آف[7] 0.8 و طبق استاندارد 0274:1998 اندازه‌گیری انجام می‌شود. در هر محدوده اندازه‌گیری چندین بار تکرار شده و از خروجی‌ها میانگین گرفته می‌شود. همان‌طور که مشخص است سطح قطعه‌کار دارای زبری یکنواختی نبوده و نواحی مختلف زبری‌های گوناگونی دارند. در شکل 14 سطح قطعه‌کار و در شکل 15 نحوه اندازه‌گیری زبری سطح قطعه‌کار نشان داده شده است. لازم به ذکر است در هنگام اندازه‌گیری باید پروب دستگاه بر مسیر عبوری عمود باشد. با توجه به سطوح آزاد قطعه‌کار، باید قطعه‌کار در جهات مختلف چرخانده شود.

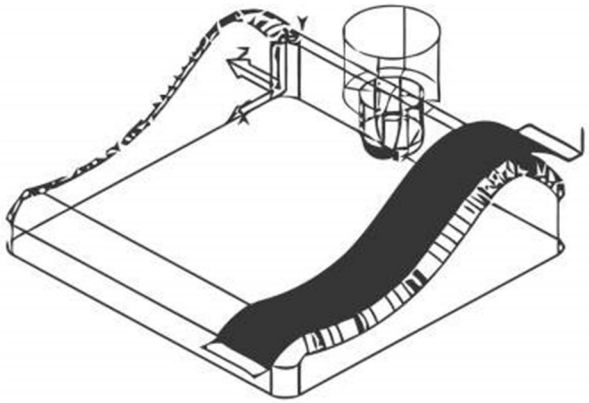

Fig. 12 path of finishing process

شکل 12 مسیر انجام آزمایش‌ها

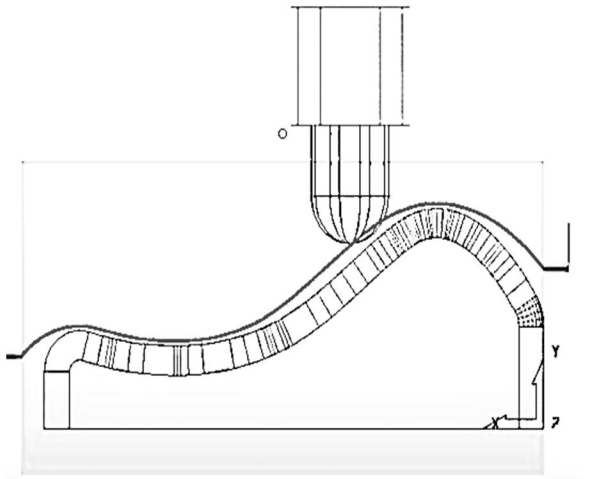

Fig. 13 distance between hemispherical head tool and work piece surface

شکل 13 فاصله بین ابزار سرگرد با سطح قطعه‌کار

5- acetone
6- Surtronic +3
7- cut off

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

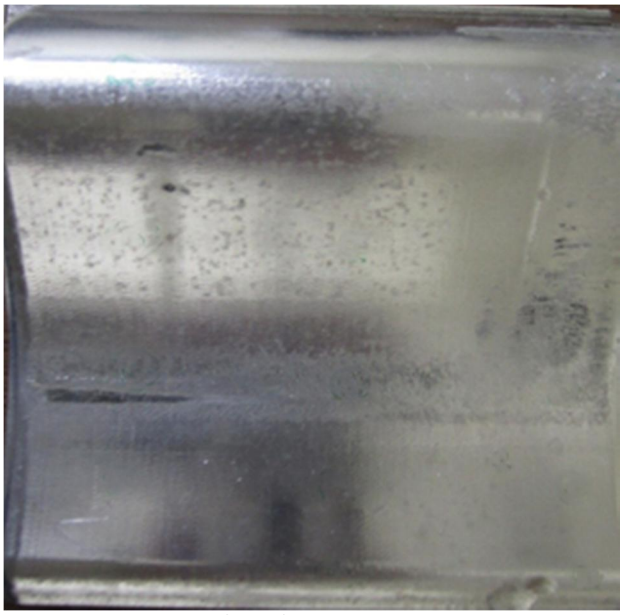

Fig. 14 work piece surface after machining

شکل 14 سطح قطعه‌کار پس از ماشین‌کاری

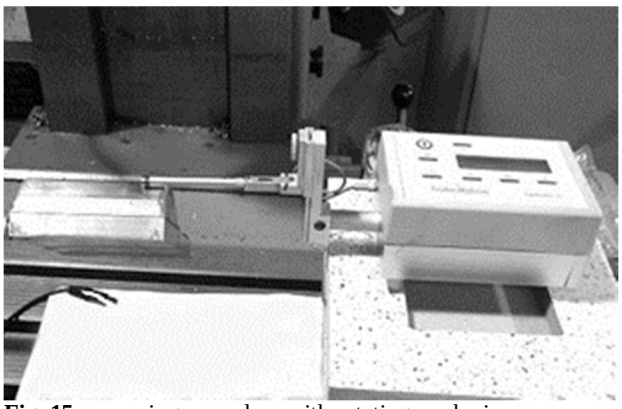

Fig. 15 measuring procedure with rotating work piece

شکل 15 نحوه اندازه‌گیری زبری سطح با چرخش قطعه‌کار

همچنین جهت انجام آزمایش‌ها از پودر سایشی مغناطیسی ترکیبی استفاده شده است. پودر آهن با مش 400 و پودر ساینده اکسید آلومینیوم با مش 1200 با نسبت وزنی 3 به 1 (آهن نسبت به ساینده) توسط مخلوط‌کن مکانیکی به مدت 20 دقیقه همزده شده و یکنواختی مناسبی پیدا می‌کند. جهت اتصال بهتر ذرات ساینده و مغناطیسی و عدم جدایش آن‌ها در سرعت‌های بالا از مقداری روان کار SAE30 (نسبت وزنی 5%) استفاده می‌شود. روان‌کار علاوه بر نقش خنک‌کنندگی و کاهش اصطکاک باعث می‌شود همان‌طور که ذرات آهن به علت نیروی مغناطیسی به هم متصل شده‌اند، ذرات ساینده و آهن نیز به همدیگر متصل شوند. لازم به ذکر است عدم وجود روان‌کار باعث نفوذ ذرات آهن در سطح قطعه‌کار می‌گردد. همچنین با حرکت دورانی آهن‌ربا در مدت زمان کمی به‌سرعت پودر ساینده از پودر مغناطیسی جدا می‌گردد. تأثیر عدم استفاده از روان‌کار در شکل 16 نشان داده شده است. با در نظر گرفتن فاصله 2 میلی‌متر از سطح آهن‌ربای سرگرد تا سطح قطعه‌کار مقدار حجم فضای موجود محاسبه گردیده و با اندازه‌گیری حجم محاسبه‌شده مقدار پودر موردنیاز، 2 گرم در نظر گرفته شده است. ثابت‌های مربوط به آزمایش در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2 ثابت‌های آزمایش‌ها

Table 2 constants in experiments

پارامتر	مقدار
جنس قطعه کار	AL7075
سایز ذره ساینده	مش 1200
سایز ذره آهن	مش 400
ذره ساینده	اکسید آلومینیوم
نسبت ترکیب	3.1
روان کار	SAE30
نسبت درصد روان کار در پودر	%5
نوع آهن‌ربا	N35

Fig. 16 process without applying lubricant

شکل 16 عدم استفاده از روان کار در طی فرآیند

3-4- روش سطح پاسخ[1]

طراحی مناسب می‌تواند تعداد آزمایش‌ها را کاهش دهد. در روش‌های مرسوم طراحی آزمایش مانند طراحی فاکتوریال[2] با افزایش تعداد پارامترها، تعداد آزمایش‌ها افزایش پیدا می‌کند. انجام آزمایش‌های زیاد زمان‌بر بوده و هزینه بالایی را تحمیل می‌کند. روش سطح پاسخ از جمله روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود [17]. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک مسئله را مدل‌سازی کرده به‌صورت یک معادله ریاضی درآورد. در این روش، از تعداد آزمایش‌های ثابتی با توجه به سطوح و عوامل استفاده می‌شود. در حالت فاکتوریال کامل (حالت عمومی)، اگر 4 عامل وجود داشته باشد که در 3 سطح تغییر کنند، تعداد حالت‌های آزمایش در کل برابر با 81 خواهند بود. با استفاده از روش سطح پاسخ تنها 30 حالت از 81 حالت ممکن در نظر گرفته می‌شود. در این 30 آزمایش به‌غیراز آزمایش مربوط به نقطه مرکزی[3]، هیچ آزمایش دیگری تکرار نمی‌شود. در این تحقیق یکی از روش‌های استاندارد طراحی به کمک پاسخ سطح با عنوان طراحی مرکب مرکزی[4] مورد استفاده قرار گرفته شده است. روش طراحی مرکب مرکزی شامل نقاط زیر است:

- نقاط فاکتوری (نقاط مکعبی)

1- Response surface method(RSM)
2- Factorial
3- Center point
4- Central composite design(CCD)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

- نقاط محوری (نقاط ستاره‌ای)
- نقاط مرکزی

نقاطی که در قسمت فاکتوری (که قسمت تخمین عبارات برهم‌کنشی مدل درجه دوم برازش شده را برعهده دارد) قرار دارند، می‌توانند دارای مقادیر بین 1 و 1- باشند. نقاط واقع در قسمت محوری، وظیفه تخمین عبارات درجه‌دو در مدل رگرسیونی درجه‌دو را بر عهده دارند. α فاصله‌ی محوری می‌باشد و انتخاب مقدار آن بسیار اهمیت دارد. نقاط مرکزی علاوه بر این‌که تخمینی داخلی از خطا را ارائه می‌کنند، در تخمین عبارات درجه‌دو نیز شرکت دارند. خروجی مهم مدنظر در طراحی آزمایش درصد تغییرات صافی سطح می‌باشد که طبق رابطه (1) به دست می‌آید.

$$\Delta Ra(\%) = \frac{intial\ roughness\ surface - finish\ roughness\ surface}{intial\ roughness\ surface} \times 100 \quad (1)$$

در این مقاله اثر متغیرهای سرعت دورانی کلگی (سرعت برشی)، نرخ پیشروی، مقدار گپ و مقدار پودر بررسی شده است. قطعه‌کار به 8 قسمت مساوی تقسیم شده است. در هر قسمت یک آزمایش با تنظیمات مجزا انجام می‌شود. از آن‌جا که مسیر تمامی آزمایش‌ها یکسان است، با توجه به میزان استپاور و نرخ پیشروی، زمان یک دور کامل فرآیند هر آزمایش متفاوت است. پس از انجام 8 آزمایش توسط ابزار سرگرد، کل سطح قطعه‌کار مجدد ماشین‌کاری شده و اندازه‌گیری مجدد صورت می‌گیرد. جهت انجام هر آزمایش از پودر جدید استفاده می‌شود. در کل طول قطعه‌کار فرآیند صورت می‌گیرد ولی در مقاله حاضر تنها تغییر زبری سطح ناحیه مقعر بررسی شده است. در شکل 17 نحوه انجام فرآیند بر سطح قطعه‌کار نشان داده شده است.

3-4-1- مدل ریاضی

اولین قدم در استفاده از روش سطح پاسخ یافتن رابطه ریاضی موجود بین پاسخ آزمایش و مجموعه متغیرهای ورودی آزمایش به‌صورت تقریبی است. در این تحقیق آزمایش‌ها بر پایه طراحی مرکب مرکزی بنا شده‌اند. متغیرهای مورد بحث در این آزمایش مطابق جدول 3 در 5 سطح و به همراه مقادیر آن‌ها آورده شده‌اند. مدل‌سازی ریاضی برای آزمایش به شکل یک معادله رگرسیون خطی درجه‌دو ایجاد خواهد شد که این معادله آماری از نقاط داده‌ای جدول عبور کرده و یا در نزدیک‌ترین حالت نسبت به آن‌ها قرار می‌گیرد.

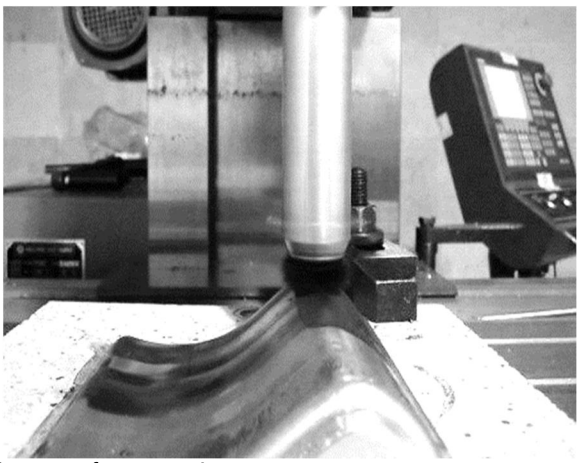

Fig. 17 Performing MAF process

شکل 17 نحوه انجام فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی

نرم‌افزار مینی تب[1] نسخه 16، برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین به دست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. برای تحلیل آماری نتایج از آنالیز واریانس استفاده می‌شود.

با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته به روش سطح پاسخ برای تعداد 4 فاکتور و تعیین α= 2 تعداد 30 آزمایش برای رسیدن به هدف به دست آمد که به همراه مقادیر به‌دست آمده درصد تغییرات زبری سطح در جدول 4 ارائه شده است. برای جلوگیری از خطاهای احتمالی آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی انجام شده‌اند و از انجام آزمایش‌ها به ترتیب جدول خودداری شده است.

جدول 3 مقادیر کد شده فاکتورهای ورودی آزمایش

Table 3 coded values of experiment input factors

فاکتورهای ورودی	-α	-1	0	1	α
مقدار پودر M (gr)	0.35	0.7	1.05	1.4	1.75
گپ G (mm)	0.5	1	1.5	2	2.5
سرعت پیشروی F (mm/min)	10	20	30	40	50
سرعت دورانی کلگی R (rpm)	100	600	1100	1600	2100

جدول 4 آزمایش‌های انجام شده و مقادیر

Table 4 performed experiments and their values

شماره	مقدار پودر ساینده (گرم)	گپ (میلی‌متر)	نرخ پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	ΔRa(%)
1	-1	-1	-1	-1	35.61
2	1	-1	-1	-1	40.59
3	-1	1	-1	-1	35.39
4	1	1	-1	-1	37.32
5	-1	-1	1	-1	42.11
6	1	-1	1	-1	32.96
7	-1	1	1	-1	37.30
8	1	1	1	-1	30.87
9	-1	-1	-1	1	52.76
10	1	-1	-1	1	57.02
11	-1	1	-1	1	42.19
12	1	1	-1	1	45.58
13	-1	-1	1	1	43.62
14	1	-1	1	1	40.50
15	-1	1	1	1	32.84
16	1	1	1	1	30.34
17	-2	0	0	0	39.46
18	2	0	0	0	40.58
19	0	-2	0	0	45.87
20	0	2	0	0	31.99
21	0	0	-2	0	47.62
22	0	0	2	0	37.30
23	0	0	0	-2	35.11
24	0	0	0	2	45.55
25	0	0	0	0	40.56
26	0	0	0	0	46.06
27	0	0	0	0	43.48
28	0	0	0	0	41.03
29	0	0	0	0	40.27
30	0	0	0	0	41.57
31	0	0	0	0	38.07

1- Minitab

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

4- تفسیر، تحلیل داده‌ها و نتایج آزمایش

با توجه نتایج به‌دست آمده برای تغییرات زبری سطح، تحلیل و اصلاح مدل‌سازی و حذف عوامل غیر مؤثر، جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم بر مسئله به‌صورت کد شده برای خروجی در جدول 5 آمده است. لازم به ذکر است که متغیرهایی در فرآیند مؤثر هستند که مقدار p به‌دست‌آمده با توجه به قابلیت اطمینان 95 درصد برای آن‌ها از 0.05 کمتر باشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول آنالیز واریانس و اصلاح مدل، معادله رگرسیون منطبق شده با مدل به‌صورت غیر کد شده برای خروجی برحسب متغیرهای ورودی ماشین‌کاری به‌صورت رابطه (2) خواهد بود:

$$\Delta Ra(\%)=41.06 -3.37G-3.19F+2.3533R-1.2529R^2-2.23M \times F-2.03G \times R-2.78F \times R \quad (2)$$

همچنین $\mathbf{R-Sq}$=%88.63 مدل و $\mathbf{R-Sq(adj)}$=%84.50 است که نشان‌دهنده دقت خوب مدل‌سازی به روش سطح پاسخ به‌کاررفته می‌باشد و همچنین نمودارهای مربوط به تحلیل و پراکندگی باقیمانده‌ها در شکل 18 آمده است که مناسب و منطبق هستند. عدم انطباق مدل نیز غیر مؤثر شده است.

4-1- اثر پارامترهای مؤثر

برای تحلیل دقیق اثر پارامترهای مؤثر در فرآیند انجام شده می‌بایست به‌دقت اثر فاکتور اصلی و برهم‌کنش‌های مؤثر فاکتورها را مورد تحلیل قرار داد که در این بخش به اثر هر یک از فاکتورها پرداخته خواهد شد. در تحلیل نمودارهای

جدول 5 ضرایب مدل رگرسیون و عدم انطباق در مدل اولیه و اصلاح‌شده

Table 5 regression model coefficients and lack of fit in primary and modified models

ترم ها	مدل‌سازی اولیه		اصلاح‌شده	
	P مقدار	ضریب معادله رگرسیون	P مقدار	ضریب معادله رگرسیون
عدد ثابت	0.000	41.57	0.00	41.06
مقدار پودر	0.722	-0.18	0.709	-0.18
گپ	0.00	-3.37	0.00	-3.37
نرخ پیشروی	0.00	-3.19	0.00	-3.19
سرعت دورانی	0.00	2.35	0.00	2.35
مقدار پودر ×مقدار پودر	0.512	-0.31	-	-
گپ×گپ	0.229	-0.58	-	-
نرخ پیشروی×نرخ پیشروی	0.53	0.29	-	-
سرعت دورانی ×سرعت دورانی	0.013	-1.30	0.04	-1.25
مقدار پودر×گپ	0.95	-0.03	-	-
مقدار پودر ×نرخ پیشروی	0.003	-2.23	0.001	-2.23
مقدار پودر×سرعت دورانی	0.30	0.66	-	-
گپ ×نرخ پیشروی	0.81	-0.14	-	-
گپ×سرعت دورانی	0.005	-2.03	0.002	-2.03
نرخ پیشروی×سرعت دورانی	0.00	-2.78	0.00	-2.78
عدم انطباق	0.553	-	0.655	-

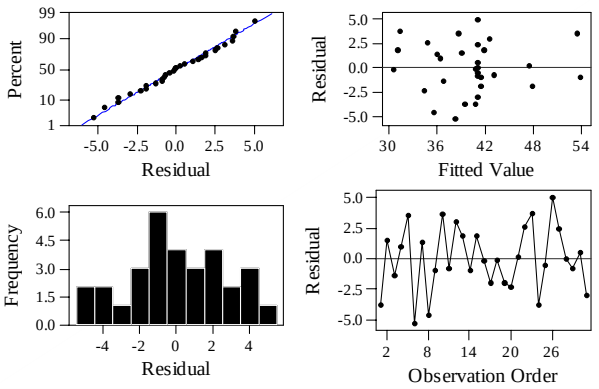

Fig. 18 diagrams for Residual distribution

شکل 18 نمودارهای مربوط به توزیع باقیمانده‌ها

اثر برهم‌کنش فاکتورهای مؤثر، سایر متغیرها در حالت تعادل آزمایش‌ها (نقطه مرکزی) در نظر گرفته شده‌اند.

4-1-1- اثر فاصله بین سطح قطعه‌کار و آهن‌ربا (گپ)

چگالی شار مغناطیسی ناشی از آهن‌ربای دائم با فاصله گرفتن از سطح آهن‌ربا کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل 19 دیده می‌شود با کاهش گپ تغییرات زبری سطح بیشتر خواهد شد. هر چه فاصله کمتر باشد نیروی مغناطیسی اعمالی بر ذرات مغناطیسی بیشتر و در نتیجه استحکام جاروبک ساینده مغناطیسی بیشتر خواهد شد. از طرف دیگر با افزایش گپ نیروی مغناطیسی نمی‌تواند بر نیروی گریز از مرکز ناشی از حرکت دورانی غلبه کند. در نتیجه بسیاری از ذرات ساینده از اطراف آهن‌ربا پرتاب شده و با کاهش تعداد ذرات ساینده کارآمدی فرآیند نیز کاهش پیدا می‌کند. مخصوصا این پدیده در پودرهای ترکیبی نسبت به پودرهای زینتر شده بیشتر اتفاق می‌افتد. در کمترین فاصله ممکن نیز با توجه به چگالی شار ناشی از نوع و سایز آهن‌ربا نیروهای اعمالی در حدود دهم و صدم میکرو نیوتن می‌باشند.

میکرو نیروهای وارد بر ذرات ساینده فرآیند میکرو براده‌برداری را به‌خوبی انجام داده و با توجه به سایز ریز ذرات ساینده مورد استفاده مقدار نفوذ در سطح کار در حدود دهم و صدم میکرون می‌باشد؛ و در نتیجه به‌راحتی می‌توانند هرگونه پستی و بلندی را از بین برده و باعث ایجاد پستی و بلندی‌های جدید در سطح قطعه‌کار نگردد.

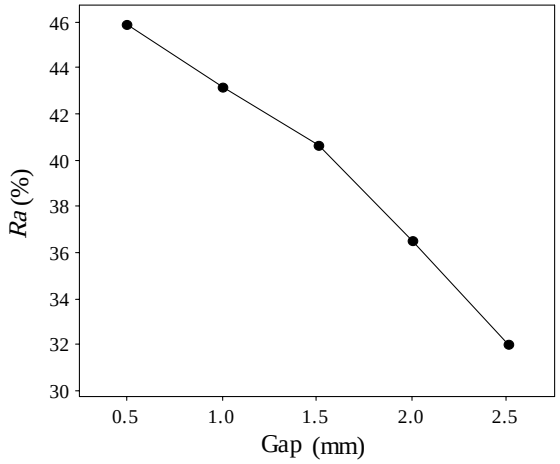

Fig. 19 The effect of magnet-work piece gap

شکل 19 اثر فاصله بین سطح قطعه‌کار و آهن‌ربا (گپ)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

طبق تحقیقات گذشته در فرآیند سایشی مغناطیسی سطوح تخت کاهش بیش‌ازحد گپ، باعث ایجاد خراش بر روی سطح قطعه‌کار می‌گردد. در سطوح منحنی از آن‌جا که مسیر انتخابی طوری انتخاب شده است که حداقل فاصله از سطح قطعه‌کار 1 میلی‌متر باشد بسیاری از نقاط سطح کروی آهن‌ربا با سطح قطعه‌کار فاصله بیشتری را ایجاد می‌کنند. به همین خاطر در سطوح مقعر مورد آزمایش کاهش گپ باعث رسیدن به زبری سطح کمتر و سطحی با کیفیت مطلوب‌تر می‌گردد. لازم به ذکر است گپ با توجه به ضریب معادله رگرسیون بیشترین تأثیر را در میزان تغییرات زبری سطح دارا می‌باشد.

4-1-2- اثر نرخ پیشروی

به‌طورکلی در فرآیندهای ماشین‌کاری مواد هر چه نرخ پیشروی کمتر باشد به سطح مطلوب‌تری می‌توان رسید. فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی نیز از این قاعده مستثنی نیست. بالا بودن نرخ پیشروی، نیروهای برشی و ارتعاشات ذره ساینده را افزایش داده و در نتیجه کیفیت سطح قطعه‌کار کاهش می‌یابد. همچنین نرخ پیشروی بالا تغییر شکل و جدایش میکرو براده‌های ناشی از فرآیند را تغییر داده و باعث زبری بیشتر سطح می‌گردد. همچنین در نرخ پیشروی پایین پودرهای ساینده در محل تماس خود با سطح قطعه‌کار زمان بیشتری برای انجام فرآیند در اختیار دارند. لازم به ذکر است که کاهش نرخ پیشروی نیز زمان ماشین‌کاری را افزایش داده و هزینه‌های تولید را افزایش خواهد داد. در شکل 20 تأثیر نرخ پیشروی نشان داده شده است.

4-1-3- اثر فاکتور سرعت برشی

ضریب رگرسیون سرعت دورانی نسبتا برابر با ضریب نرخ پیشروی است با این تفاوت که سرعت برشی در سطوح بالا تأثیر مناسبی بر کاهش زبری سطح دارد. به علت تغییر رفتار پلاستیکی ماده در سرعت‌های برشی بالا، نیروهای برشی کمتر می‌شود؛ و به همین علت کیفیت سطح با افزایش سرعت بهبود می‌یابد.

در شکل 21 تأثیر سرعتک برشی یا همان سرعت دورانی کلگی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش سرعت برشی تا rpm 1600 تغییرات زبری سطح در حال افزایش می‌باشد ولی ادامه افزایش سرعت برشی باعث کاهش کیفیت سطح می‌گردد. با افزایش بیش از حد سرعت، نیروی گریز از مرکز بر نیروی مغناطیسی غلبه کرده و باعث پرتاب شدن ذرات ساینده می‌گردد. کاهش ذرات ساینده باعث کاهش کیفیت سطح می‌گردد. لازم به ذکر است برهم‌کنش فاکتورهای سرعت دورانی و گپ و

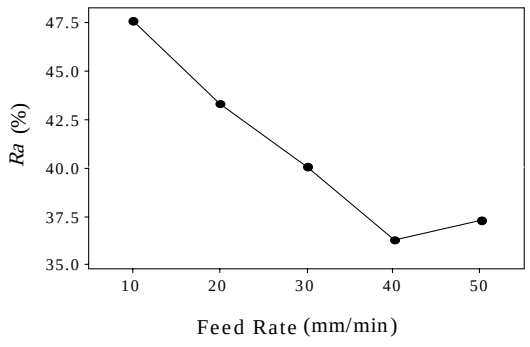

Fig. 20 The effect of feed rate

شکل 20 اثر فاکتور اصلی نرخ پیشروی

سرعت دورانی و نرخ پیشروی نیز در روند فرآیند مؤثر هستند. در شکل‌های 22 و 23 اثر این برهم‌کنش‌ها نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور دیده می‌شود در نرخ پیشروی پایین با افزایش سرعت می‌توان به تغییرات زبری سطح در محدوده مناسبی رسید و دیگر محدودیت افزایش سرعت دورانی وجود ندارد. طبق شکل 23 در کمترین فاصله بین سطح قطعه‌کار و آهن‌ربا می‌توان به نتایج مناسبی رسید.

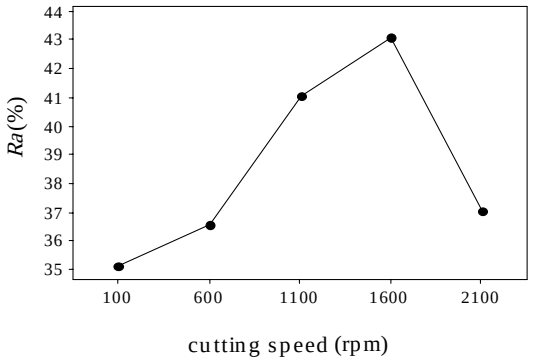

Fig. 21 The effect of cutting speed (rpm)

شکل 21 اثر فاکتور سرعت برشی (دور در دقیقه)

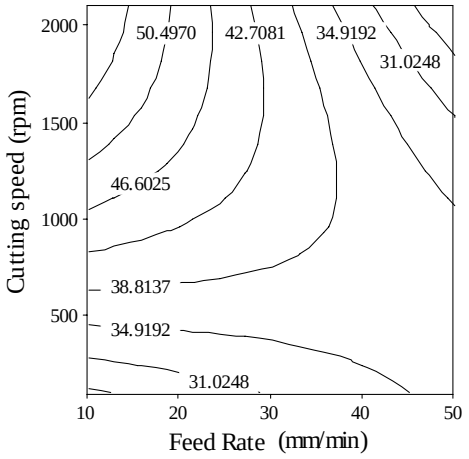

Fig. 22 Interaction effect of cutting speed and feed rate

شکل 22 اثر برهم‌کنش فاکتورهای سرعت برشی و نرخ پیشروی

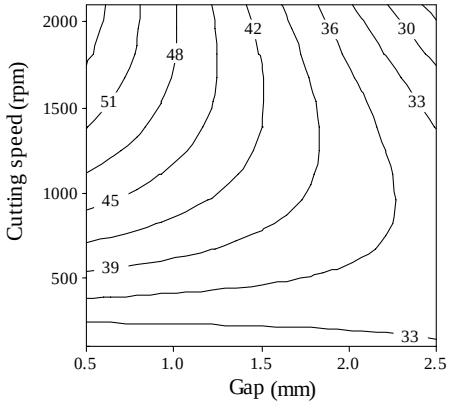

Fig. 23 Interaction effect of cutting speed and gap

شکل 23 اثر بر هم کنش فاکتورهای سرعت برشی و گپ

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

4-1-4- اثر مقدار پودر

با توجه به جدول آنالیز واریانس و طبق شکل 24 این فاکتور در فرآیند مؤثر نبوده و افزایش بیش‌ازحد پودر تأثیری در تغییرات زبری سطح ندارد. البته آهن‌ربا در گپ تعریف شده، حجم محدودی از پودر ترکیبی را می‌تواند جابه‌جا نمایند. در غیر این صورت با توجه به چسبندگی پودر ترکیبی ساینده مغناطیسی به علت وجود روان‌کار مقداری از آن بر روی قطعه‌کار باقی خواهد ماند. در شکل 25 این رخداد نشان داده شده است.

4-2- ارائه بهترین حالت انجام آزمایش‌ها

با توجه نتایج بیان شده از تحلیل نمودارها و مدل‌سازی ریاضی حاکم بر آزمایش، نرم‌افزار نیز یک پیشنهاد بهینه را معرفی و مقدار بیشینه تغییرات زبری سطح را پیش‌بینی می‌کند. ملاحظه می‌شود همان نتایجی که از تحلیل آزمایش‌ها بیان شده، با دقت بسیار خوبی تائید و می‌توان به تغییرات زبری سطح بیش از 68% دست یافت. نتایج مذکور در جدول 6 آورده شده است. در شکل 26 تأثیر فرآیند بر روی سطح قطعه‌کار نشان داده شده است.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن شبیه‌سازی و اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی آهن‌ربای نیم‌کره و نیم‌کره آهنی، ابزار مناسب جهت انجام فرآیند ساخته شد.

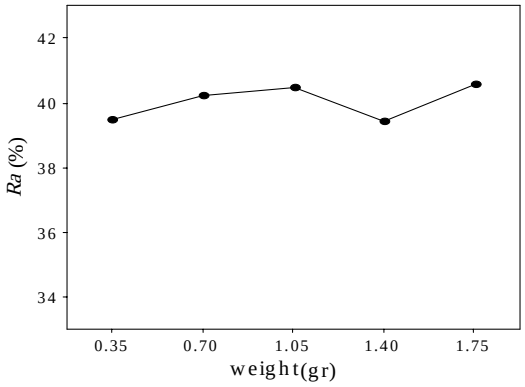

Fig. 24 The effect of amount of powder

شکل 24 اثر فاکتور اصلی مقدار پودر

Fig. 25 remained powder on the work piece surface

شکل 25 باقیمانده پودر اضافی بر روی سطح قطعه‌کار

جدول 6 نتایج بهینه‌سازی

Table 6 optimum results

بهینه‌سازی	مقدار پودر ساینده (گرم)	گپ (میلی‌متر)	نرخ پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	تغییرات زبری متوسط (%)
نرم‌افزار	1.75	0.5	10	2100	81.75
آزمایش	1.75	0.5	10	2100	68.1

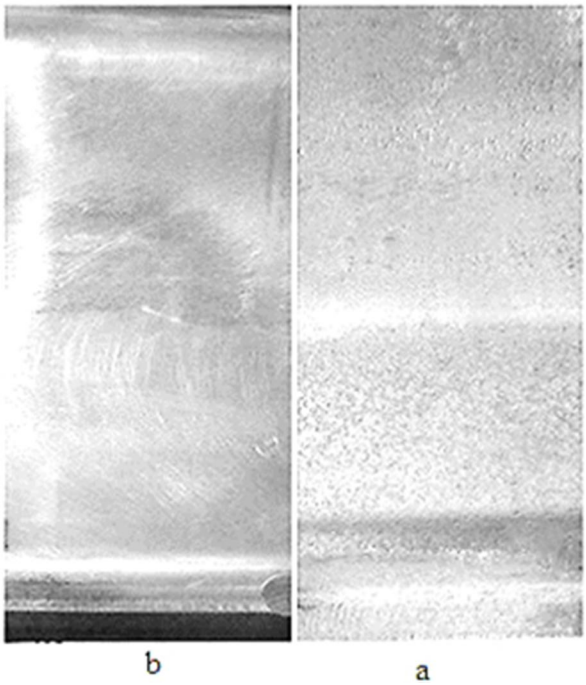

Fig. 26 work piece surface a)before MAF and b) after MAF

شکل 26 الف) قبل از انجام فرآیند ب) بعد از انجام فرآیند

با توجه به پراکندگی مناسب‌تر و مقدار بیشتر آهن‌ربای نیم‌کره، از این ابزار جهت انجام فرآیند استفاده می‌شود. رفتار آهن‌ربای نیم‌کره در مقابل سطح مقعر و مقدار چگالی شار مغناطیسی وارد بر سطح نیز به دست آمد.

اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی از 15% تا 26% تغییر می‌کند. مقادیر شبیه‌سازی از مقادیر اندازه‌گیری بیشتر می‌باشد. میزان متوسط چگالی شار مغناطیسی وارد بر سطح قطعه‌کار آلومینیومی در فاصله 2 میلی‌متری از سطح آهن‌ربا 0.36 تسلا می‌باشد.

طبق نتایج آنالیز واریانس، گپ بیشترین تأثیر را بر میزان تغییرات زبری سطح دارد. هرچقدر گپ کمتر باشد میزان تغییرات بیشتر خواهد بود.

طبق ضرایب رگرسیون تقریبا اثر نرخ پیشروی و سرعت برشی برابر هستند. البته نرخ پیشروی کمتر و سرعت برشی بیشتر باعث ایجاد نتایج مطلوب می‌گردد. طبق اثر برهم‌کنش متقابل نرخ پیشروی با سرعت برشی و گپ با سرعت برشی محدودیت افزایش سرعت برشی نیز برطرف می‌گردد. با کاهش گپ و نرخ پیشروی سرعت برشی را می‌توان در سطح بالا انتخاب کرد. مقدار پودر ساینده بر میزان نتایج چندان اثرگذار نمی‌باشد که البته سطح بالای آن نتایج بهتری دارد. مدل رگرسیون پیشنهادی تطابق مناسبی با نتایج دارا می‌باشد. شرایط بهینه پیشنهادی آزمایش گپ 0.5 mm، نرخ پیشروی 10 mm/min، سرعت دورانی 2100rpm و مقدار 1.75gr می‌باشد. طبق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]

شبیه‌سازی باعث بهبود 80% نتایج می‌گردد. در آزمایش‌های انجام شده طبق سطوح پیشنهادی، میزان تغییرات 68% به دست آمد. مقدار خطا نزدیک به 12% می‌باشد که نسبتا نتیجه قابل‌قبولی است.

در سطوح مقعر قطعه‌کار زبری سطح از 1.3µm به 0.2 µm رسیده است. البته در بعضی نقاط زبری 0.08µm نیز اندازه‌گیری شده است.

6-مراجع

[1] V. Jain, Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 20, pp. 6022-6038, 2009.

[2] S. M. Ji, Y. M. Xu, G. D. Chen, M. S. Jin, Comparative study of magnetic abrasive finishing in free-form surface based on different polishing head, *Materials Science Forum*, Vol. 675, No. 1, pp. 593-596, 2011.

[3] S. Jha, V. Jain, *Nanofinishing techniques*, *Micromanufacturing and nanotechnology*, pp. 171-195, Berlin: Springer, 2006.

[4] D. K. Singh, V. Jain, V. Raghuram, Parametric study of magnetic abrasive finishing process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 149, No. 1, pp. 22-29, 2004.

[5] B. Girma, S. S. Joshi, M. Raghuram, R. Balasubramaniam, An experimental analysis of magnetic abrasives finishing of plane surfaces, *Machining science and Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 323-340, 2006.

[6] B. H. Yan, G.W. Chang, J. H. Chang, R.-T. Hsu, Improving electrical discharge machined surfaces using magnetic abrasive finishing, *Machining science and technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 103-118, 2004.

[7] H. Chen, Y. Zhang, W. Yan, The technology of finishing process of die space based upon magnetic abrasive finishing, *Key engineering materials*, Vol.259, No. 1, pp. 657-66, 2004.

[8] R. S. Mulik, P. M. Pandey, Magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 5-8, pp. 501-515, 2011.

[9] C. T. Lin, L. D. Yang, 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, No. 1, pp. 122-130, 2007.

[10] S. Yin, T. Shinmura, A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 4, pp. 383-390, 2004.

[11] I. h. Noh, Magnetic polishing of three dimensional die and mold surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, No. 1-2, pp. 18-23, 2007.

[12] M. D. Zhang, M. Lv, H. Chen, Theoretical research on polishing free-form surface with magnetic abrasive finishing, *Key engineering materials* , Vol. 392, No. 1, pp. 404-408, 2009.

[13] Y. H. Ding, X .G. Yao, X. X. Wang, S. C. Yang, Study on the performances of the ferromagnetic poles based on the curved surface magnetic abrasive finishing, *Key engineering materials*, Vol. 359, No. 1, pp. 365-368, 2009.

[14] M. Anzai, T. Yoshida, T. Nakagawa, Magnetic abrasive automatic polishing of curved surface, *Riken Review*, Vol. 1, No. 1, pp. 15-16, 1996.

[15] L. D. Yang, C. T. Lin, H. M. Chow, Optimization in MAF operations using taguchi parameter design for AISI304 stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 42, No. 5-6, pp. 595-605, 2009.

[16] Y. M. Hamad, Improvement of surface roughness quality for stainless steel 420 plate using magnetic abrasive finishing method, *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, Vol. 6, No. 4 , pp. 19-56, 2010.

[17] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, PP. 200-320, New York: John Wiley, 2008.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.4.8.7]