ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir



## بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر روی سطوح آزاد ...

## مهرداد وحدتی<sup>1\*</sup>، سید علیرضا رسولی<sup>2</sup>

1 - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشجوى دكترى، مهندسى مكانيك، دانشگاه صنعتى خواجەنصيرالدين طوسى، تهران

\* تهران، صندوق پستی vahdati@kntu.ac.ir ،19395-1999

طلاعات مقاله	چکیدہ
ناله پژوهشی کامل ریافت: 16 دی 1394 .برش: 22 اسفند 1394 ائه در سایت: 10 اردیبهشت 1395	تلاش محققین در صنایع برای به دست آوردن سطوح دقیق و باکیفیت بالا منجر به ابداع روش های 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
<i>بید واژگان:</i> داخت کاری سایشی مغناطیسی طوح آزاد ش سطح یاسخ	– 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 نیم کره جهت نصب بر سطح تخت آهنربا و همچنین اسپارک آهنربا بهصورت منحنی ازجمله اقداماتی است که در طی فرآیند انجام آزمایش ها مینت گذشته است طراح آندانی جام تن مینین ماج باسخت باشد مینان گی بر می ترون می مناطر ایش می میترد. می میشروی و مقدار بود بر روی سطوح آزاد قطعاتی مینت گذشته است طراح آندانی جام تن مینین اسپارک آهنربا بهصورت منحنی ازجمله اقداماتی است که در طی فرآیند انجام آزمایش ها
، یک سے پہ تے بینہسازی بینہسازی	صورت ترقیه است. طراحی ازمایش ها مبتی بر روش شطح پاسخ میباشد. میران کنیه سرخت دورانی و ترخ پیشروی موتر اساخته 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 1.3μm و 0.2 رسیده است. البته در بعضی نقاط زبری μm 0.80 نیز اندازهگیری شده است.

### Study of effective factors on magnetic abrasive finishing on freeform surface

### Mehrdad Vahdati<sup>\*</sup>, 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** Abstract Original Research Paper The attempts of researchers in industries to obtain accurate and high quality surfaces led to the invention Received 06 January 2016 of new methods of finishing. Magnetic abrasive finishing (MAF) is a relatively new type of finishing in Accepted 12 March 2016 which the magnetic field is used to control the abrasive tools. Applications such as the surface of molds Available Online 20 April 2016 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 Keywords: aluminum is examined. This method is obtained through combination of magnetic abrasive process and Magnetic abrasive finishing Control Numerical Computer (CNC). The use of simple hemisphere for installation on the flat area of Freeform response surface method the magnets as well as magnets' spark in curve form is a measure done during testing of the simulation experiments. The design of experiments is based on response surface methodology. The gap, the optimization 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

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، رابطه بسیار نزدیکی مابین دقت ماشین کاری، زبری سطح و طول عمر محصولات وجود دارد [1]. کیفیت سطح تأثیر بسیار چشمگیری در طول عمر دستهای از محصولات دارد. برای نمونه می توان به قالبها اشاره کرد. معمولا قالبها دارای سطوحی با منحنیهای سهبعدی و نسبتا پیچیده هستند. به طورکلی پرداخت کاری سطوح آزاد دارای محدودیتهایی می باشد. امروزه این فرآیند به صورت دستی و با اتکا به تخصص اپراتور صورت می پذیرد. فرآیند دستی کارایی بسیار کمی دارد و به شدت به فاکتورهای نیروی انسانی وابسته است. میزان براده برداری و کیفیت سطح در سطوح قالبها و قطعه کارهایی با سطوح پیچیده به ندرت یکسان و یکنواخت می باشد [2].

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

کنترل مناسب بر میزان نیروهای وارده بر ذرات و عدم ایجاد میکروتر کهای سطحی، از جمله مزایایی است که باعث رشد به کارگیری این فرآیند شده است [4]. در شکل 1 شماتیکی از فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی (MAF) بر سطوح منحنی دیده میشود [5]. همچنین از آنجا که لایههای انجماد مجدد<sup>1</sup> ناشی از فرآیندهای تخلیه الکتریکی مکان بسیار مناسبی جهت ایجاد و رشد میکرو ترکها میباشد با این روش میتوان به سادگی 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 µ1 و کمتر میباشد، درنتیجه فرایند مذکور تلورانس ابعادی و هندسی قطعه کار را دچار تغییر نمی کند.

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 امکان پذیر می گردد. در نتیجه با کنترل اتوماتیک پارامترهای فرآیند می توان به سطحی باکیفیت بسیار مناسب و با یکنواختی بالا در سطح قطعه کار 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<sup>2</sup>304 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 قطعه کار و آهنربا فاکتورهای مؤثر بر مقدار کاهش زبری سطح هستند. مقدار گب 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]. قطعه کار 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

### 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 اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی توسط دستگاه تسلامتر<sup>3</sup> (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 اندازه گیری ابزارهای گوناگون، طراحی و ساخت قطعه کار، طراحی آزمایشها، انتخاب فاکتورهای مناسب، مدلسازی و بهینهسازی پرداخته شده است.

### 1-3- 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 فرآیند سایشی مغناطیسی سطوح تخت و سطوح آزاد، آهنربا حرکت دورانی استفاده کرد. جهت این امر از اسلیپ رینگی<sup>4</sup> به همراه زغال استفاده میشود. جهت کاهش دمای سیمپیچها در طول مدت استفاده نیاز به سیستم خنک مواردی مانند حجم کمتر و نصب راحت و آسان و قیمت مناسب از آهنربای درایی آزمایش ها با توجه به

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

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].

<sup>3-</sup> Tesla meter

<sup>4-</sup> Slip ring

سر گرد<sup>1</sup> استفاده شود. سر کروی این ابزارها باعث عبور از سطوح منحنی بدون برخورد مى گردد. البته قطر اين ابزارها معمولا تا محدوده 20 ميلىمتر میباشد. جهت فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی باید سر آهنرباها نیز به حالت نیم کره گردد. این امر از دو طریق امکان پذیر است. نیم کرههایی آهنی متناسب با قطر آهنربا به یکی از طرفین آهنربا نصب میگردد. در شکل 2 نیم کرههای آهنی و فیکسچر آهنربا دیده میشوند.

جهت عبور بهتر میدان مغناطیسی باید از موادی با ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی<sup>2</sup> 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 نیم کره، آزمایش و شبیهسازی صورت گرفته است.

در فرآیند شبیهسازی نیم کره آهنی با شعاع 8 میلیمتر به آهنربا استوانهای با قطر 16 و ارتفاع 20 میلیمتر ابعاد اضافه شده است. لازم به ذکر است با توجه به این که ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی آهن نسبت به شدت میدان تغییر پیدا میکند؛ و از آنجا که شدت میدان آهنربا مذکور خیلی بیشتر از (A\_PER\_M) میباشد، ضریب نفوذ نسبی آهن مورد استفاده نزدیک به 2400 می باشد. ایجاد انحنا بر روی سطح آهن ربا اقدام دیگری است که صورت گرفته است. ماشینکاری و فرآیند تخلیه الکتریکی<sup>3</sup> ازجمله اقداماتی هستند که جهت ایجاد آهنربای بهصورت نیم کره میتوان از آنها







Fig. 3 spark machined magnet with its fixture شکل 3 آهن ربای اسیارک شده به همراه فیکسچر

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

از شکل 5 و 6 جهت مقایسه تأثیر نیم کره آهنی و آهنربای نیم کره بر میزان چگالی شار مغناطیسی از نتایج شبیهسازی میتوان استفاده کرد. چگالی شار مغناطیسی از فاصله 2 میلیمتری از سطح نیم کره به صورت 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

شكل 4 مدل دوبعدى و سەبعدى شبيەسازى 1)قطعه كار 2) آهنربا N35 3) أهنربا كروى 4) فيكسچر أهنربا 5)نيم كره أهنى 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 نیم کره بهصورت خطی (شبیهسازی)

5- Spark

<sup>1-</sup> Ball nose

<sup>2-</sup> Relative permeability 3- Electro discharge machining(EDM)



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 نیم کره بهصورت دایرهای (شبیهسازی)

جهت تائید نتایج شبیهسازی، اندازه گیری توسط دستگاه تسلامتر از فاصله 2 میلیمتری سطح نیم کره صورت گرفته است که نحوه اندازه گیری و نتایج در شکلهای 7 و 8 آورده شده است. جنس تمامی تجهیزات مورد استفاده در آزمایشهای اندازهگیری چگالی شار مغناطیسی، غیرفرو مغناطیس (آلومینیوم) می باشد. مسیر اندازه گیری مانند شبیه سازی به صورت خطی و دایرهای میباشد. با مقایسه شکلهای 6 و 8 واضح است که روند نتایج اندازه گیری با شبیه سازی مطابقت دارد. مقادیر متوسط چگالی شار مغناطیسی در شبیهسازی و اندازه گیری در جدول 1 آورده شده است. در شکل 9 نحوه قرارگیری پودر ساینده در اطراف آهنربای نیم کره نشان داده شده است. طبق نتایج اندازه گیری و شبیهسازی واضح است که چگالی شار مغناطیسی در اطراف آهنربای نیم کره بیشتر از نیم کره آهنی میباشد. به همین علت مقدار پودر نگهداشته شده در اطراف آهنربای نیمکره و یکنواختی توزیع آن مناسب میباشد. نیم کره آهنی در سرعتهای دورانی بالا پودر را نمی تواند 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 درصورتی که جنس مقابل نیم کره آهنی و آهنربا فرو مغناطیس باشد رفتار منحنیهای نیمدایره بافاصله از آنها تغيير خواهد كرد.



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

شکل 7 اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی بافاصله 2 میلیمتر از سطح نیم کره آهنی



Fig. 8 measuring magnetic flux density at 2 mm from the surface of hemisphere in circular direction شکل 8 اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی در فاصله 2 میلی متر از سطح نیم کره

جدول 1 مقادیر متوسط اندازه گیری و شبیه سازی چگالی شار مغناطیسی Table 1 average measured and simulated magnetic flux density

ميزان اختلاف (%)	فاصله mm 2 – خط افقی (شبیهسازی)	فاصله mm 2– خط افقی (اندازہ گیری)	ميزان اختلاف (%)	فاصله mm 2– شعاعی (شبیهسازی)	فاصله mm 2 – شعاعی (اندازهگیری)	حالات
25	0.18	0.14	22	0.26	0.21	نيمكره آهنى
23	0.32	0.26	15	0.42	0.36	آهنربا نيمكره
-						

### 2-3- قطعه کار

بەصورت دايرەاي

قطعه کار توسط دستور فریفورم<sup>1</sup> نرمافزار سالیدورک<sup>2</sup> مدلسازی شده است. بر روی هر نمونه تعدادی از آزمایش ها صورت می گیرد. 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 شیب های نسبتا



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

شکل 9 نحوه قرار گیری پودر ساینده مغناطیسی در آهنربا نیم کره

<sup>1-</sup> freeform 2- solidworks

ملايم و تند وجود دارد كه در شكل 10 ديده مى شود. جهت ماشين كارى قطعه مذكور از ماشين فرز سي ان سي<sup>1</sup> 3 محوره استفاده شده است. جي کدهای $^2$  مربوطه توسط نرمافزار پاورمیل $^3$  جهت مراحل خشن کاری و پرداختكارى استخراج شده است. جنس قطعهكار آلومينيوم 7075 مىباشد. پارامترهای ماشین کاری در مرحله پرداخت کاری 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 قطعه کار پرداخته شده است. در شکل 11 اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی بر روی سطح مدل مذكور نشان داده شده است.

### 3-3- شرايط انجام آزمايشها

جهت انجام فرآیند پرداختکاری سایشی مغناطیسی، همانند قسمت ماشین کاری از طریق نرمافزار پاورمیل جی کدهای مربوط به حرکت استخراج می گردد. از استراتژی پرداخت کاری استفاده شده و مقدار ضخامت باقیمانده را برابر گپ موردنظر تعریف میکنیم. سرعت دورانی کلگی و نرخ پیشروی ازجمله فاکتورهایی هستند که بهراحتی در نرمافزار تعیین می گردند. همچنین مقدار استپاور<sup>4</sup> 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 گرفته شده است. مابقی فاکتور ها مانند سرعت دورانی، نرخ





شكل 10 مدل قطعهكار به همراه آهنربای سرگرد



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

شکل 11 اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی مابین آهنربا و سطح قطعه کار

پیشروی و گپ متغیر می باشند که در قسمت بعد معرفی می گردند. لازم به ذکر است با تعریف ضخامت 1 میلیمتر، در طول مسیر فاصله نزدیکترین نقطه سطح نیم کره به سطح آزاد 1 میلی متر باقی می ماند. در نتیجه ممکن است فاصله سایر نواحی در محدودهای بیشتر از این مقدار باشد. در شکلهای 12 و 13 مسير انجام فرآيند و فاصله مدنظر كه از نرمافزار پاور ميل 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 پرداخت کاری در استون<sup>5</sup> به مدت 20 دقیقه نگهداری شده و سیس توسط دستگاه زبری سنج مدل سارترونیک $^{6}$  با طول کات آف $^{7}$  0.8 و طبق استاندارد 0274:1998 اندازه گیری انجام می شود. در هر محدوده اندازه-گیری چندین بار تکرار شده و از خروجیها میانگین گرفته میشود. همان طور که مشخص است سطح قطعه کار دارای زبری یکنواختی نبوده و نواحی مختلف زبری های گوناگونی دارند. در شکل 14 سطح قطعه کار و در شکل 15 نحوه اندازه گیری زبری سطح قطعه کار نشان داده شده است. لازم به ذکر است در هنگام اندازه گیری باید پروب دستگاه بر مسیر عبوری عمود باشد. با توجه به سطوح آزاد قطعه کار، باید قطعه کار در جهات مختلف چرخانده شود.





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

شكل 13 فاصله بين ابزار سرگرد با سطح قطعهكار

<sup>1-</sup> cnc 2- G code

<sup>3-</sup> powermill 4- Step over

<sup>5-</sup> acetone 6- Surtronic +3

<sup>7-</sup> cut off

### بررسی پارامترهای مؤثر در فر آیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر روی سطوح آزاد



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 اندازه گیری زبری سطح با چرخش قطعهکار

همچنین جهت انجام آزمایشها از پودر سایشی مغناطیسی ترکیبی استفاده شده است. پودر آهن با مش 400 و پودر ساينده اكسيد آلومينيوم با مش 1200 با نسبت وزنى 3 به 1 (آهن نسبت به ساينده) توسط مخلوطكن مكانيكي به مدت 20 دقيقه همزده شده و يكنواختي مناسبي پيدا ميكند. جهت اتصال بهتر ذرات ساینده و مغناطیسی و عدم جدایش آنها در سرعتهای بالا از مقداری روان کار SAE30 (نسبت وزنی 5%) استفاده می شود. روان کار علاوه بر نقش خنک کنندگی و کاهش اصطکاک باعث می شود همان طور 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 روان کار باعث نفوذ ذرات آهن در سطح قطعه کار می گردد. همچنین با حرکت دورانی آهنربا در مدت زمان کمی بهسرعت پودر ساینده از پودر مغناطیسی جدا می گردد. تأثیر عدم استفاده از روان کار در شکل 16 نشان داده شده است. با در نظر گرفتن فاصله 2 میلیمتر از سطح آهنربای سرگرد تا سطح قطعه کار مقدار حجم فضای موجود محاسبه گردیده و با اندازه گیری حجم محاسبه شده مقدار پودر موردنیاز، 2 گرم در نظر گرفته شده است. ثابتهای مربوط به آزمایش در جدول 2 آورده شده است.

آزمايشھ	ثابتهای	مدول 2
---------	---------	--------

1

		•
Table 2 co	onstants in experiments	

<b>İ</b>	
مقدار	پارامتر
AL7075	جنس قطعه کار
مش 1200	سایز ذره ساینده
مش 400	سايز ذره آهن
اكسيد آلومينيوم	ذره ساينده
3.1	نسبت تركيب
SAE30	روان کار
%5	نسبت درصد روان کار در پودر
N35	نوع آهنربا



**شکل 16** عدم استفاده از روان کار در طی فرآیند

### <sup>1</sup>-4- روش سطح پاسخ

طراحی مناسب میتواند تعداد آزمایشها را کاهش دهد. در روشهای مرسوم طراحي آزمايش مانند طراحي فاكتوريال<sup>2</sup>با افزايش تعداد پارامترها، تعداد آزمایشها افزایش پیدا می کند. انجام آزمایشهای زیاد زمانبر بوده و هزینه بالایی را تحمیل می کند. روش سطح پاسخ از جمله روش های ریاضی و آماری است که برای مدلسازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می گیرد، استفاده می شود [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 می شود. 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 می شود. در این 30 آزمایش بهغیراز آزمایش مربوط به نقطه مرکزی<sup>3</sup>، هیچ آزمایش دیگری تکرار نمی شود. در این تحقیق یکی از روش های استاندارد طراحی به کمک پاسخ سطح با عنوان طراحی مرکب مرکزی<sup>4</sup> مورد استفاده قرار گرفته شده است. روش طراحی مرکب مرکزی شامل نقاط زیر است:

نقاط فاكتورى (نقاط مكعبى)

<sup>1-</sup> Response surface method(RSM)

<sup>2-</sup> Factorial3- Center point

<sup>4-</sup> Central composite design(CCD)

- و نقاط محوری (نقاط ستارهای)
  - نقاط مرکزی

نقاطی که در قسمت فاکتوری (که قسمت تخمین عبارات برهم کنشی مدل درجه دوم برازش شده را برعهده دارد) قرار دارند، می توانند دارای مقادیر بین 1 و 1- باشند. نقاط واقع در قسمت محوری، وظیفه تخمین عبارات درجهدو در مدل رگرسیونی درجهدو را بر عهده دارند.  $\alpha$  فاصلهی محوری می باشد و انتخاب مقدار آن بسیار اهمیت دارد. نقاط مرکزی علاوه بر این که تخمینی داخلی از خطا را ارائه می کنند، در تخمین عبارات درجهدو نیز شرکت دارند. خروجی مهم مدنظر در طراحی آزمایش درصد تغییرات صافی سطح می باشد که طبق رابطه (1) به دست می آید.

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

در این مقاله اثر متغیرهای سرعت دورانی کلگی (سرعت برشی)، نرخ پیشروی، مقدار گپ و مقدار پودر بررسی شده است. قطعه کار به 8 قسمت مساوی تقسیم شده است. در هر قسمت یک آزمایش با تنظیمات مجزا انجام میشود. از آنجا که مسیر تمامی آزمایش ها 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 قطعه کار مجدد ماشین کاری شده و اندازه گیری مجدد صورت می گیرد. جهت انجام هر آزمایش از پودر جدید استفاده میشود. در کل طول قطعه کار فرآیند صورت می گیرد ولی در مقاله حاضر تنها تغییر زبری سطح ناحیه مقعر بررسی شده است. در شکل 17 نحوه انجام فرآیند بر سطح قطعه کار نشان داده شده است.

### 1-4-3- مدل رياضي

اولین قدم در استفاده از روش سطح پاسخ یافتن رابطه ریاضی موجود بین پاسخ آزمایش و مجموعه متغیرهای ورودی آزمایش به صورت 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. مدل سازی ریاضی برای آزمایش به شکل یک معادله رگرسیون خطی درجه دو ایجاد خواهد شد که این معادله آماری از نقاط داده ای جدول عبور کرده و یا در نزدیکترین حالت نسبت به آنها قرار می گیرد.



شکل 17 نحوه انجام فرآیند پرداختکاری سایشی مغناطیسی

نرمافزار مینی تب<sup>1</sup> 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 می شود.

با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته به روش سطح پاسخ برای تعداد 4 فاکتور و تعیین 2= ۵ 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

iput factors	ment m	experi	arues or	coueu v	Table 5
فاكتورهاى ورودى	-α	-1	0	1	α
مقدار پودر (gr <b>)</b> (	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 (rpm) R	100	600	1100	1600	2100

	<b>دول 4</b> ازمایشهای انجام شده و مقادیر
le 4 performed experiments	and their values

	سرعت	· · · · · · ·	. 1	<u>.</u>	
$\Delta Ra(\%)$	دورانی	لرح پیسروی (mm/min)	<u>پ</u>	ليد (محر ايد (محر)	شماره
	(rpm)	(1111/1111)	(میلیمىر)	ساينده (درم)	
35.61	-1	-1	-1	-1	1
40.59	-1	-1	-1	1	2
35.39	-1	-1	1	-1	3
37.32	-1	-1	1	1	4
42.11	-1	1	-1	-1	5
32.96	-1	1	-1	1	6
37.30	-1	1	1	-1	7
30.87	-1	1	1	1	8
52.76	1	-1	-1	-1	9
57.02	1	-1	-1	1	10
42.19	1	-1	1	-1	11
45.58	1	-1	1	1	12
43.62	1	1	-1	-1	13
40.50	1	1	-1	1	14
32.84	1	1	1	-1	15
30.34	1	1	1	1	16
39.46	0	0	0	-2	17
40.58	0	0	0	2	18
45.87	0	0	-2	0	19
31.99	0	0	2	0	20
47.62	0	-2	0	0	21
37.30	0	2	0	0	22
35.11	-2	0	0	0	23
45.55	2	0	0	0	24
40.56	0	0	0	0	25
46.06	0	0	0	0	26
43.48	0	0	0	0	27
41.03	0	0	0	0	28
40.27	0	0	0	0	29
41.57	0	0	0	0	30
38.07	0	0	0	0	31

1- Minitab

Tah

### 4- تفسير، تحليل دادهها و نتايج آزمايش

با توجه نتایج بهدست آمده برای تغییرات زبری سطح، تحلیل و اصلاح مدل-سازی 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 ماشین کاری بهصورت رابطه (2) خواهد بود:

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

همچنین 8.63%=R - Sq مدل و 84.50%= (Adj) است که نشاندهنده دقت خوب مدلسازی به روش سطح پاسخ به کاررفته می باشد و همچنین نمودارهای مربوط به تحلیل و پراکندگی باقیمانده ها در شکل 18 آمده است که مناسب و منطبق هستند. عدم انطباق مدل نیز غیر مؤثر شده است.

### 1-4- اثر پارامترھاى مۇثر

برای تحلیل دقیق اثر پارامترهای مؤثر در فرآیند انجام شده میبایست بهدقت اثر فاکتور اصلی و برهم کنشهای 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 اصلاح شده **Table 5** regression model coefficients and lack of fit in primary and modified models

		a modelis	mounie	innai y and
ترم ها	مدلسازي اوليه		اصلاحشده	
	Р	ضريب 	Р	ضريب
	مقدار	معادله	مقدار	معادله
		ر گرسيون		رگرسيون
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	-



**شکل 18** نمودارهای مربوط به توزیع باقیماندهها

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

### 1-4-1 اثر فاصله بين سطح قطعهكار 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.





طبق تحقیقات گذشته در فرآیند سایشی مغناطیسی سطوح تخت کاهش بیش از حد گپ، باعث ایجاد خراش بر روی سطح قطعه کار می گردد. در سطوح منحنی از آنجا که مسیر انتخابی طوری انتخاب شده است که حداقل فاصله از سطح قطعه کار 1 میلی متر باشد بسیاری از نقاط سطح کروی آهن با با سطح قطعه کار فاصله بیشتری را ایجاد می کنند. به همین خاطر در سطوح مقعر مورد آزمایش کاهش گپ باعث رسیدن به زبری سطح کمتر و سطحی با کیفیت مطلوب تر می گردد. لازم به ذکر است گپ با توجه به ضریب معادله ر گرسیون بیشترین تأثیر را در میزان تغییرات زبری سطح دارا می باشد.

### 2-1-4- اثر نرخ پیشروی

بهطورکلی در فرآیندهای ماشین کاری مواد هر چه نرخ پیشروی کمتر باشد به سطح مطلوب تری می توان رسید. فرآیند پرداخت کاری 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 قطعه کار کاهش می یابد. همچنین نرخ پیشروی بالا تغییر شکل و جدایش میکرو برادههای ناشی از فرآیند را تغییر داده و باعث زبری بیشتر سطح می گردد. همچنین در نرخ پیشروی پایین پودرهای ساینده در محل تماس خود با سطح قطعه کار زمان بیشتری برای انجام فرآیند در اختیار دارند. لازم به ذکر است که کاهش نرخ پیشروی نیز زمان ماشین کاری را افزایش داده و هزینههای تولید را افزایش خواهد داد. در شکل 20 تأثیر نرخ پیشروی نشان داده شده است.

### 4-1-3- اثر فاكتور سرعت برشى

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. همان طور که دیده می شود با افزایش سرعت برشی تا rpm 1600 تغییرات زبری سطح در حال افزایش می باشد ولی ادامه افزایش سرعت برشی باعث کاهش کیفیت سطح می گردد. با افزایش بیش از حد سرعت، نیروی گریز از مرکز بر نیروی مغناطیسی غلبه کرده و باعث پرتاب شدن ذرات ساینده می گردد. کاهش ذرات ساینده باعث کاهش کیفیت سطح می گردد. لازم به ذکر است برهم کنش فاکتورهای سرعت دورانی و گپ و



Fig. 20 The effect of feed rate

سرعت دورانی و نرخ پیشروی نیز در روند فرآیند مؤثر هستند. در شکلهای 22 و 23 اثر این برهم کنشها نشان دادهشده است. همان طور که در شکلهای مذکور دیده میشود در نرخ پیشروی پایین با افزایش سرعت می توان به تغییرات زبری سطح در محدوده مناسبی رسید و دیگر محدودیت افزایش سرعت دورانی وجود ندارد. طبق شکل 23 در کمترین فاصله بین سطح قطعه کار و آهنربا می توان به نتایج مناسبی رسید.







Fig. 22 Interaction effect of cutting speed and feed rate شکل 22 اثر برهم کنش فاکتورهای سرعت برشی و نرخ پیشروی





شكل 20 اثر فاكتور اصلى نرخ پيشروى

### 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 قطعه کار باقی خواهد ماند. در شکل 25 این رخداد نشان داده شده است.

### 4-2- ارائه بهترين حالت انجام آزمايشها

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- نتیجه گیری

در این پژوهش، ضمن شبیهسازی و اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی آهنربای نیم کره و نیم کره 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 باقیماندہ پودر اضافی بر روی سطح قطعہ کار

Table 6 opti	mum re	sults		، بھینەسازى	<b>جدول 6</b> نتايج
تغییرات زبری متوسط (%)	سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	گپ (میلیمتر)	مقدار پودر ساینده (گرم)	بهينەسازى
81.75	2100	10	0.5	1.75	نرمافزار
68.1	2100	10	0.5	1.75	آزمايش



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 نیم کره، از این ابزار جهت انجام فرآیند استفاده میشود. رفتار آهنربای نیم کره در مقابل سطح مقعر و مقدار چگالی شار مغناطیسی وارد بر سطح نیز به دست آمد.

اختلاف بین مقادیر شبیهسازی و اندازه گیری چگالی شار مغناطیسی از 15% تا 26% تغییر میکند. مقادیر شبیهسازی از مقادیر اندازه گیری بیشتر میباشد. میزان متوسط چگالی شار مغناطیسی وارد بر سطح قطعه کار آلومینیومی در فاصله 2 میلی متری 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 می گردد. طبق اثر برهم کنش متقابل نرخ پیشروی با سرعت برشی و گپ با سرعت برشی محدودیت افزایش سرعت برشی نیز برطرف می گردد. با کاهش گپ و نرخ پیشروی سرعت برشی را میتوان در سطح بالا انتخاب کرد. مقدار پودر ساینده بر میزان نتایج چندان اثرگذار نمی باشد که البته سطح بالای آن نتایج بهتری دارد. مدل رگرسیون پیشنهادی تطابق مناسبی با نتایج دارا می باشد. شرایط بهینه پیشنهادی آزمایش گپ mm 5.0، نرخ پیشروی دارا می باشد. شرایط دورانی 2100rpm و مقدار 1.75gr می باشد. طبق 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.

شبیهسازی باعث بهبود 80% نتایج می گردد. در آزمایش های انجام شده طبق سطوح پیشنهادی، میزان تغییرات 68% به دست آمد. مقدار خطا نزدیک

به 12% مى باشد كه نسبتا نتيجه قابل قبولى است.

در سطوح مقعر قطعه کار زبری سطح از 1.3μm به 0.2 μm رسیده است. البته در بعضی نقاط زبری 0.08μm نیز اندازه گیری شده است.

### 6-مراجع

- V. Jain, Magnetic field assisted abrasive based micro-/nanofinishing, *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