



## مطالعه تجربی تاثیر اندازه ذرات ساینده و سختی قطعه کار در فرآیند جریان ساینده مغناطیسی

محمدرضا شبگرد<sup>1\*</sup>، فرزاد عربزاده تبریز<sup>2</sup>، احد قلی پور<sup>3</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز

\*تبریز، صندوق پستی 16471 - 51664، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 اردیبهشت 1395

پذیرش: 15 تیر 1395

ارائه در سایت: 24 مرداد 1395

کلید واژگان:

جریان ساینده

جریان ساینده مغناطیسی

زبری سطح

نرخ براده برداری

فولاد H13

### چکیده

ماشین کاری با جریان ساینده (AFM) یک فرآیند نسبتاً جدید با نرخ براده برداری کم برای پلیسه‌گیری، برداشت لایه‌های سفید و پرداختکاری قطعات صنعتی با شکل پیچیده در میان فرآیندهای غیر سنتی می‌باشد که عمل پرداختکاری در آن، از طریق جریان یک ترکیب ویسکو الاستیک حامل ذرات ساینده تحت فشار پیستون بر روی سطح مورد نظر صورت می‌گیرد. در این پژوهش فرآیند ماشینکاری جریان ساینده در پرداخت کاری فولاد ابزار گرم کار H13 مورد بررسی قرار گرفته و با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی حول قطعه کار سعی در افزایش نرخ براده برداری و صافی سطح شده است و تاثیر شدت میدان مغناطیسی، مش ذرات ساینده و سختی قطعه کار بعنوان پارامترهای ورودی فرآیند بر روی خروجی‌های فرآیند شامل زبری سطح و نرخ براده برداری مطالعه شده است. همچنین مدل رگرسیونی نرخ براده برداری و زبری سطح توسعه داده شده و آنالیز واریانس آنها نیز انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش مش ذرات ساینده سبب کاهش زبری سطح و نرخ براده برداری می‌گردد، از طرفی افزایش شدت میدان مغناطیسی موجب زیاد شدن نرخ برداشت ماده و بهبود صافی سطح می‌گردد. همچنین با افزایش سختی قطعه کار نرخ براده برداری شده کاهش یافته و در شرایط یکسان پرداخت، صافی سطح بدست آمده نیز بیشتر می‌شود.

## Experimental study of the effects of abrasive particle size and work piece hardness in Magnetic abrasive flow Machining

Mohammad Reza Shabgard<sup>1\*</sup>, Farzam Arabzadeh Tabriz<sup>1</sup>, Ahad Gholipoor<sup>2</sup>

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

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 51664-16471, Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 May 2016

Accepted 05 July 2016

Available Online 14 August 2016

#### Keywords:

Abrasive flow  
magnetic abrasive flow  
Surface roughness  
material removal  
H13 steel

### ABSTRACT

Abrasive flow machining (AFM) is a relatively new process with low material removal ratio for deburring, removing recast layers and finishing industrial components with complex shapes among non-conventional machining processes. In this process, the finishing is handled by flowing the composition of viscoelastic and abrasive particles on workpiece surface, under the pressure of piston. In this research, the abrasive flow machining process of H13 tool steel by applying an external magnetic field around the workpiece to improve the material removal ratio and surface roughness has been investigated and the effect of magnetic field intensity, abrasive particles mesh and the hardness of workpiece as the input parameters on the process outputs including surface roughness and material removal ratio was studied. Also, the regression model of MRR and surface roughness was developed and variance analysis was performed. Results of experiments indicated that increase in abrasive-particles mesh leads to decrease in surface roughness and material removal ratio and increase in magnetic field intensity causes material removal ratio to increase and surface roughness to decrease. Also, the material removal ratio is decreased with increasing workpiece hardness and in the same condition better surface finish was achieved in the case of harder workpiece.

### 1- مقدمه

ماشین‌کاری با جریان ساینده<sup>1</sup> یکی از فرآیندهای ماشین‌کاری غیرسنتی می‌باشد که اخیراً توسعه یافته است. این فرآیند توانایی بسیار بالایی در

پرداخت کاری قطعات با شکل پیچیده و سطوح غیرقابل دسترس دارد. همچنین از این روش برای پلیسه‌گیری، برداشت لایه‌های دوباره منجمد شده<sup>2</sup>، شعاع تراشی لبه‌ها و غیره استفاده می‌شود. کیفیت بالای پرداخت

<sup>2</sup> Recast Layers

<sup>1</sup> Abrasive Flow Machining (AFM)

امیژن<sup>7</sup> و مدل سازی تصادفی از مراحل فرآیند مکانیزم فرآیند را مطالعه کردند [5,4]. لاولس و همکاران به بررسی تاثیر فرآیند جریان ساینده روی زبری سطوحی که به روش های مختلف از جمله تراش کاری، فرز کاری، سنگ زنی و وایرکات ماشین کاری شده بودند پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شرایط اولیه سطح تاثیر عمده ای در قابلیت فرآیند جریان ساینده دارد [6]. جین چگالی دانه های فعال را با شمارش تعداد ذرات در واحد سطح قسمت های مختلف ترکیب ساینده که به صورت تصادفی انتخاب کرده بود مورد بررسی قرار داد و همچنین یک تحلیل تئوری برای ارزیابی نیروهای موثر بر روی یک ذره ی ساینده براساس تئوری سایش ارائه نمود [7]. راجندرا و ویجی از شبکه عصبی برای مدل سازی و انتخاب بهینه پارامترهای ورودی فرآیند پرداخت کاری با جریان ساینده استفاده کردند و اثر سرعت متوسط پیستون، غلظت ذرات ساینده، اندازه متوسط ذرات ساینده و تعداد سیکل را بر روی نرخ برداشت ماده و صافی سطح مطالعه نمودند [8]. جین و همکاران از ترکیب دو دینامومتر دیسکی برای اندازه گیری نیروهای محوری و شعاعی استفاده کردند و تاثیر سه پارامتر قابل کنترل فشار اکستروژن، غلظت ذرات ساینده و اندازه ذرات را روی پارامترهای خروجی از جمله چگالی ذرات فعال، نیروهای براده برداری، برداشت ماده و زبری سطح مطالعه کردند [9]. کمال و همکاران یک محیط نگهدارنده جدید براساس حامل های ویسکوالاستیک در فرآیند پرداخت کاری به روش جریان ساینده استفاده کردند و خواص مرتبط با ویژگی های این ماده جدید را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها به این نتیجه رسیدند که دما، نرخ برش، مدت زمان خزش و همچنین فرکانس، تاثیر عمده ای بر روی خواص سیالیت محیط نگهدارنده دارد [10]. کندا و همکاران یکپارچگی سطوح ایجاد شده بعد از پرداخت کاری به کمک فرآیند جریان ساینده را مطالعه کردند. نتایج آن ها نشان داد که می توان توسط این فرآیند سطوح منظم و یکپارچه ای را به وجود آورد [11]. لیانگ و همکاران با مطالعه فرآیند پرداخت کاری به روش جریان ساینده به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان ماشین کاری، دمای خمیر ساینده افزایش می یابد و در نتیجه ویسکوزیته خمیر ساینده کاهش می یابد که باعث کاهش نرخ براده برداری از روی سطح قطعه کار می شود. آن ها ثابت کردند که برای جلوگیری از کاهش تاثیر گذاری فرایند، ترکیب اولیه خمیر ساینده باید ویسکوزیته بیشتری داشته باشد [12]. جونز و هال فرآیند پرداخت کاری با جریان ساینده را با اعمال امواج التراسونیک به ترکیب ساینده در ماشین کاری حفره کور اصلاح کردند [13]. گرانا و همکاران برای دستیابی به زبری سطح پایین در فرآیند پرداخت کاری با جریان ساینده، نیروهایی که باعث براده برداری از سطح قطعه کار می شوند را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که نیروهای شعاعی و محوری که از طرف پیستون های هیدرولیک و ذرات ساینده بر سطح قطعه کار وارد می شوند، باعث برداشت ماده و پرداخت سطح قطعه کار می شود [14]. جین و جها تاثیر اعمال میدان مغناطیسی در فرآیند جریان ساینده مغناطیسی را بر روی صافی سطح نهایی فولاد ضد زنگ پس از انجام این فرآیند بررسی کردند. مطابق نتایج این محققان، بدون استفاده از میدان مغناطیسی، تغییرات قابل ملاحظه ای در صافی سطح ملاحظه نشد، در حالی که در شرایط یکسان، صافی سطح قطعه کار با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش شدت آن، به تدریج افزایش می یابد [15]. با توجه به این مسئله که تغییر در خواص رئولوژیکی<sup>8</sup> ترکیب ساینده با اعمال نیروی خارجی مغناطیسی امکان پذیر است، جین و همکاران، این مورد را به عنوان یک خاصیت بسیار

سطح و ایجاد تفرانس های بسته برای طیف گسترده ای از قطعات، از مزایای ماشین کاری با این فرآیند می باشند. در فرآیند جریان ساینده یک ترکیب نیمه جامد پایه پلیمری حامل ذرات ساینده تحت فشار ناشی از دو پیستون که در مقابل هم قرار گرفته اند، از سطح قطعه کار عبور می کند. این ترکیب همانند یک ابزار سنگ زنی تغییر شکل پذیر و بدون هیچ گونه محدودیت خاص، عمل می کند. همچنین ابزاربندی مناسب برای محدود کردن و هدایت این ترکیب به محل مورد نظر روی قطعه کار، از اهمیت ویژه ای در پرداخت کاری قطعات برخوردار است [1].

در فرآیند پرداخت با جریان ساینده، ذرات ساینده به سطح کار نفوذ کرده و نیروی محوری ایجاد شده مواد را به صورت میکروبراده هایی از سطح قطعه جدا می کند. مطابق "شکل 1" در طول این فرآیند یکی از روابط (1) یا (2)، حاکم است [2]:

$$F_a \geq F_{req} \quad (1)$$

$$F_a \leq F_{req} \quad (2)$$

در روابط بالا،  $F_a$  نیروی محوری موثر بر روی یک ذره ساینده و  $F_{req}$  نیروی مورد نیاز برای برداشت ماده به صورت میکرو براده از روی قطعه می باشد.  $F_{req}$  را می توان از رابطه (3) به دست آورد:

$$F_{req} = \tau_s \times A_p \quad (3)$$

در رابطه (3)،  $\tau_s$  مقاومت برشی قطعه کار و  $A_p$  مساحت منطقه ی نفوذ ذرات ساینده می باشد. اگر  $F_a > F_{req}$  باشد مواد به صورت میکرو براده هایی از سطح جدا می شود. زمانی که  $F_a = F_{req}$  برداشت ماده در حال آغاز شدن است. به منظور سهولت درک، این نیروها در "شکل 1" رسم شده اند.

در فرآیند جریان ساینده مغناطیسی<sup>1</sup> نیروی  $F_r$  ناشی از دو عامل فشار اکستروژن و نیروی مغناطیسی اعمالی در حول قطعه می باشد. نیروی مغناطیسی اعمال شده روی ذرات پودر آهن را می توان از رابطه (4) محاسبه نمود [3].

$$F_{mag} = m\mu_0\chi_m H \nabla H \quad (4)$$

در رابطه (4)،  $m$  جرم یک ذره پودر آهن،  $\mu_0^2$  نفوذپذیری مغناطیسی در فضای آزاد<sup>3</sup>،  $\chi_m$  میزان تاثیر پذیری جرمی ذرات مغناطیسی<sup>4</sup>،  $H$  شدت میدان مغناطیسی<sup>5</sup> و  $\nabla H$  گرادیان شدت میدان مغناطیسی<sup>6</sup> می باشند. در این جا فرض بر این است که نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات مغناطیس به ذرات ساینده منتقل می شود.

ویلیام و راجوکار با مانیتورینگ فرآیند جریان ساینده به روش آکوستیک

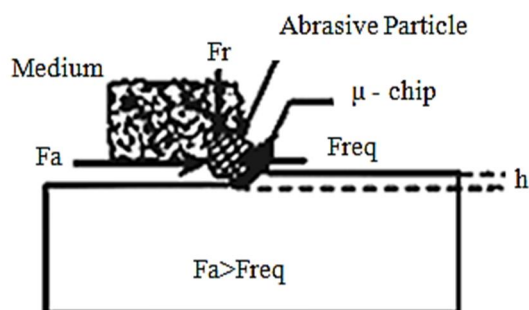


Fig. 1 Machining forces in the AFM [2]

شکل 1 نیروهای براده برداری در فرآیند AFM [2]

<sup>1</sup> Magnetic Abrasive Flow Machining (MAFM)

<sup>2</sup> Mass of an Iron Powder

<sup>3</sup> Permeability in Free Space

<sup>4</sup> Mass Susceptibility of the Magnetic Particle

<sup>5</sup> Magnetic Field Intensity

<sup>6</sup> Gradient of the Magnetic Field Intensity

<sup>7</sup> Acoustic Emission

<sup>8</sup> Rheological

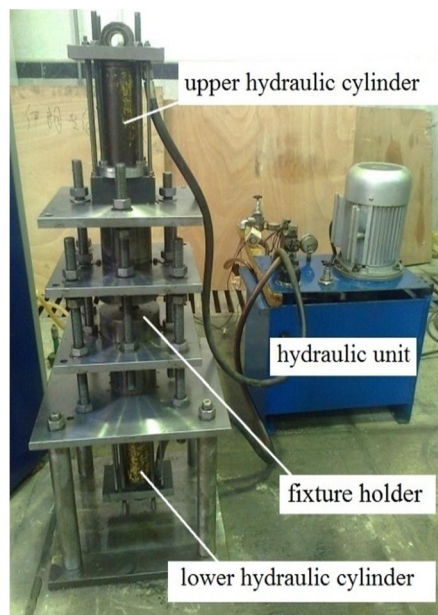


Fig. 2 MAFM machine

شکل 2 دستگاه جریان ساینده مغناطیسی

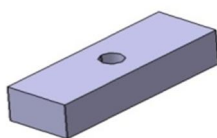


Fig. 3 The workpiece used at experiments

شکل 3 قطعه کار مورد استفاده در آزمایش‌ها

موقعیت مناسب و هم چنین موقعیت‌دهی به آهنرباها به صورتی که بیشترین تمرکز خطوط میدان بر روی سطح قطعه کار قرار گیرد، استفاده شده است. بدین منظور همواره آهنرباها به گونه‌ای قرار گرفتند که قطب N و S مقابل یکدیگر باشند، "شکل 4" نمایی از فیکسچر مذکور را نشان می‌دهد.

#### 4-2- میدان مغناطیسی

به منظور ایجاد میدان مغناطیسی حول قطعه کار، از سه سری آهنربای ثابت نئودیمیوم<sup>1</sup> استفاده شد. آهنربای نئودیمیوم دارای مقاومت مغناطیسی بسیار بالاتری نسبت به دیگر آهنرباها است که در عمل آن را به یک آهنربای دائمی با طیف وسیعی از کاربردهای گوناگون تبدیل کرده است. سایز کوچک و در عین حال قدرت بالای آن خصوصیاتی است که استفاده از این نوع آهنربا را در کارهای حساس با عملکردی مناسب ممکن کرده است.

#### 5-2- ترکیب ساینده

ترکیب ساینده مغناطیسی از سه بخش اصلی ویسکوالاستیک، ذرات ساینده و ذرات مغناطیس تشکیل یافته است. این ترکیب با درصد وزنی 20 درصد پودر آهن به منظور ایجاد خاصیت مغناطیسی در ترکیب، 20 درصد پودر سیلیکون کاربرد به عنوان ساینده و 60 درصد ترکیب ویسکوالاستیک مخلوط شد. بخش ویسکو الاستیک وظیفه حمل و انتقال ذرات ساینده را روی سطح قطعه کار بین دو پیستون دارد و لازم به ذکر است که بخش ویسکو الاستیک خود

مهم در کنترل نیروهای پرداخت کاری در فرآیند پرداخت با جریان ساینده مغناطیسی معرفی کردند. آن‌ها همچنین به بررسی و مطالعه تجربی تاثیر فشار اکستروژن و تعداد سیکل‌های ماشین کاری در تغییرات صافی سطح فولاد ضد زنگ پرداخت کاری شده با این فرآیند پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش فشار اکستروژن و تعداد سیکل‌های ماشین کاری صافی سطح قطعه کار افزایش می‌یابد [16]. کورشاد و همکاران تاثیر سختی قطعه کار را در فرآیند جریان ساینده مغناطیسی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که لایه سفید تشکیل شده بر روی قطعه کار توسط فرآیند وایرکات، به خوبی توسط فرآیند جریان ساینده زدوده می‌شود [17]. سینگ و شان [18]، تاثیر چگالی شار مغناطیسی، نرخ جریان مدیوم و تعداد سیکل‌ها به عنوان متغیرهای مستقل را بر روی زبری سطح و نرخ براده برداری در فرآیند جریان ساینده مغناطیسی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با اعمال میدان مغناطیسی به فرآیند ساینده مغناطیسی زبری سطح و نرخ براده برداری بهبود می‌یابد. داس و همکاران [19]، نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات ساینده، ناشی از میدان مغناطیسی خارجی را در فرآیند پرداخت جریان ساینده مغناطیسی محاسبه کردند و یک مدل ریاضی برای تخمین زبری سطح و مقدار برداشت ماده به دست آوردند. کورشاد و همکاران [20]، مقدار سختی قطعه کار را در فرآیند جریان ساینده بررسی کردند و نتایج ارائه دادند که نشان داد لایه سفید تشکیل شده روی قطعه کار توسط فرآیند وایرکات به خوبی توسط فرآیند جریان ساینده زدوده می‌شود.

در این پژوهش فرآیند پرداخت کاری با جریان ساینده در حضور میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت و تاثیر شدت میدان مغناطیسی، اندازه ذرات ساینده و سختی قطعه کار به عنوان پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح به دست آمده بررسی شد.

## 2- تجهیزات آزمایش

### 1-2- دستگاه پرداخت با جریان ساینده مغناطیسی

"شکل 2" دستگاه پرداخت کاری با جریان ساینده مغناطیسی را نشان می‌دهد که برای انجام آزمایش‌ها طراحی و ساخته شده است. این دستگاه از دو واحد عمده تشکیل شده است، واحد ابزاربندی به منظور گیره‌بندی قطعه کار و ایجاد میدان مغناطیسی حول قطعه کار و همچنین تأمین یک محفظه برای نگهداری و عبور جریان ذرات ساینده از سطح قطعه به منظور انجام عملیات پرداخت کاری و بخش دوم واحد هیدرولیک، که نیروهای لازم برای پرداخت کاری را تأمین می‌کند. بخش هیدرولیک از پمپ هیدرولیک، گیج فشار و دو پیستون در مقابل هم تشکیل شده است که نیروی لازم برای عبور ترکیب ساینده از سطح قطعه کار و انجام عمل پرداخت کاری را فراهم می‌آورند.

### 2-2- قطعه کار

قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه که در "شکل 3" نشان داده شده است، از جنس فولاد گرم کار H13، در ابعاد (25 mm × 8 mm × 7 mm) می‌باشد. به منظور موقعیت دهی مناسب قطعه کار در داخل فیکسچر سوراخی رزوه دار بر روی قطعه ایجاد شد. فولاد ابزار H13 پرمصرف ترین فولاد گرم کار سخت شونده در هواسفت که از آن در ساخت قالب‌های دایکاست، قالب‌های تزریق پلاستیک و قالب‌های فورجینگ استفاده می‌گردد.

### 3-2- ابزاربندی

در این مطالعه، از یک فیکسچر غیرمغناطیس برای گیره‌بندی قطعه کار در

<sup>1</sup> Neodymium magnet

جدول 2 پارامترهای ثابت، مقادیر و نوع آنها

Table 2 Constant parameters and values and type of them

| پارامترهای ثابت      | نوع - مقدار         |
|----------------------|---------------------|
| ذرات ساینده          | سیلیکون کارباید SIC |
| ذرات مغناطیس #       | پودر آهن 240        |
| جنس قطعه             | H13 steel           |
| فشار (MPa)           | 3.5                 |
| زمان هر سیکل (s)     | 1.2                 |
| زمان کل پرداخت (min) | 60                  |

قطعه کار را بعد از فرآیند جریان ساینده مغناطیسی نشان می دهند.

#### 4- نتایج و بحث

##### 4-1- تاثیر اندازه ذرات ساینده بر روی نرخ براده برداری در شدت

###### میدانها و سختیهای مختلف قطعه کار

"شکل 5 و 6" به ترتیب نتایج مربوط به تاثیر اندازه ذرات ساینده بر روی نرخ براده برداری در شدت میدانهای مختلف را برای قطعات با سختی 35 راکول سی<sup>3</sup> و 55 راکول سی نشان می دهد. مطابق هر دو "شکل 5 و 6"، با افزایش مش ذرات ساینده (کوچکتر شدن اندازه ذره) نرخ براده برداشته شده کاهش می یابد و این در حالی است که در این شکلها بین مش ذرات ساینده و شدت میدان مغناطیسی تداخلی هر چند ناچیز نیز دیده می شود. یعنی تاثیر اندازه ذرات ساینده بر نرخ براده برداری به شدت میدان مغناطیسی نیز تا حدی وابسته است. به عنوان مثال در مورد سختی 35 راکول سی قطعه کار، تاثیر شدت میدان مغناطیسی در مش ذرات ساینده 120، بیشتر از دو حالت دیگر است.

اگر ذرات ساینده به صورت کره ای با شعاع  $r$  در نظر گرفته شوند و  $d$  مسافت طی شده توسط هر ذره در طول یک برش باشد، حجم براده برداشته شده به ازای هر ذره در طول یک برش ( $V_g$ ) با فرض این که حجم برداشته شده نیم کره باشد، طبق رابطه (7) با توان دوم شعاع ذره ساینده متناسب است. رابطه (7) نشانگر این مسئله است که با کوچکتر شدن اندازه ذره ساینده مقدار بار برداشته شده کاهش می یابد.

$$V_g = \left(\frac{1}{2}\pi r^2\right) d \quad (7)$$

همچنین در "شکل های 5 و 6"، منحنیها رفتار یکنواختی را با تغییر در شدت میدان مغناطیسی نشان می دهند. بدین صورت که با افزایش شدت میدان مغناطیسی نرخ براده برداشته شده افزایش می یابد. اعمال میدان مغناطیسی حول قطعه باعث ایجاد یک نیروی شعاعی مضاعف عمودی می شود، طبق رابطه (4) مشاهده می شود که نیروی ناشی از یک میدان مغناطیسی با شدت میدان مغناطیسی و گرادیان شدت میدان مغناطیسی رابطه مستقیم دارد از این رو با افزایش شدت میدان مغناطیسی در جهت عمود بر سطح قطعه، نیروی شعاعی وارد بر ذرات ساینده بیشتر شده و باعث نفوذ بیشتر این ذرات در سطح قطعه می شود در نتیجه براده بزرگتری از سطح قطعه جدا شده و باعث افزایش نرخ براده برداری می شود.

"شکل های 7، 8 و 9"، تاثیر سختی قطعه کار را بر روی نرخ براده برداری در مش ذرات مختلف براساس شدت میدان نشان می دهند. این نمودارها نشانگر این مسئله هستند که نرخ براده برداری در هر نقطه برای قطعه کار با سختی 35 راکول سی بیشتر از مقدار نرخ براده برداری برای قطعه کار متناظر

از دو ماده پارافین<sup>1</sup> و گریس<sup>2</sup> به ترتیب با درصد وزنی 80 و 20 درصد تشکیل شده است.

#### 3- طراحی آزمایشها

با توجه به انجام تستهای اکتشافی و مرور تحقیقات سایر محققان [17,15,9,8]، شار مغناطیسی، مش ذرات ساینده و سختی قطعه کار (که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته اند) به عنوان متغیرهای ورودی و سطوح آنها، مطابق جدول 1 در نظر گرفته شد. سایر پارامترهای ورودی فرآیند شامل فشار اکستروژن، سیکل ماشین کاری، طول کورس، ویسکوزیته خمیر ساینده، جنس ذرات ساینده، جنس قطعه کار و جهت بافت سطحی، ثابت در نظر گرفته شده است. فشار اکستروژن به طور متوسط 3.5 مگاپاسگال می باشد. زمان یک سیکل کامل (رفت و برگشت) 1.2 ثانیه تنظیم شد و زمان کل پرداخت کاری برای تمام قطعات یک ساعت در نظر گرفته شد. برای بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی (زبری سطح و نرخ براده برداری) فرآیند جریان ساینده مغناطیسی، 18 تست به صورت فول فاکتوریل طراحی شده است. در جدول 2 مقادیر پارامترهای ورودی و سطوح آنها آورده شده است.

آزمایشهای انجام گرفته به منظور بررسی اثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی، مش ذرات ساینده و سختی قطعه کار بر روی زبری سطح ( $R_a$ ) و نرخ براده برداری (MRR) می باشد. درصد تغییرات در زبری سطح از رابطه (5) محاسبه می شود:

$$\Delta R_a = \frac{R_{a1} - R_{a2}}{R_{a1}} \times 100 \quad (5)$$

در رابطه (5)،  $R_{a1}$  برابر با زبری اولیه قطعه کار و  $R_{a2}$  زبری قطعه کار بعد از پرداختکاری می باشد.

همچنین نرخ براده برداری از رابطه (6) محاسبه می شود:

$$MRR = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100 \quad (6)$$

در رابطه (6)،  $w_1$  و  $w_2$  به ترتیب وزن اولیه قطعه کار و وزن نهایی

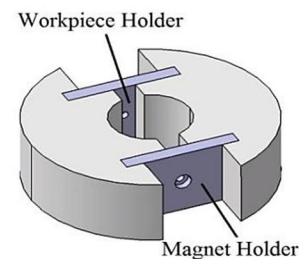


Fig 4. The fixture used at this investigation

شکل 4 فیکسچر مورد استفاده در این مطالعه

جدول 1 پارامترهای متغیر و مقادیر آنها

Table 1 Variable parameters and their values

| مقدار       | متغیرهای ورودی       |
|-------------|----------------------|
| 0.2-0.4-0.6 | شار مغناطیسی T       |
| 90-120-150  | اندازه ذرات ساینده # |
| 35-55       | سختی قطعه کار HRC    |

<sup>1</sup> paraffin  
<sup>2</sup> grease

<sup>3</sup> Rockwell C Hardness

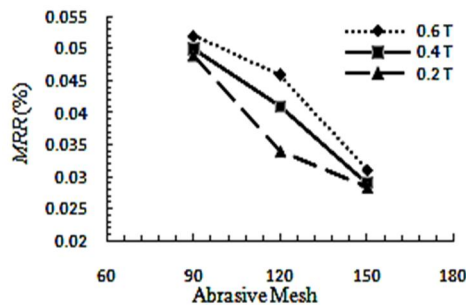


Fig. 5 The effect of size of abrasive particles on the material removal rate in different field intensity (workpiece hardness: 35 HRC)

شکل 5 تاثیر اندازه ذرات ساینده بر روی نرخ براده برداری در شدت میدان‌های مختلف (سختی قطعه کار: 35 راکول سی)

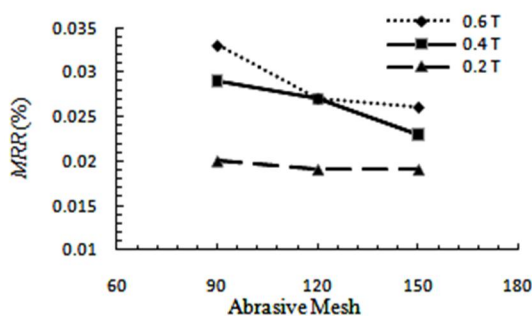


Fig. 6 The effect of size of abrasive particles on the material removal rate in different field intensity (workpiece hardness: 55 HRC)

شکل 6 تاثیر اندازه ذرات ساینده بر روی نرخ براده برداری در شدت میدان‌های مختلف (سختی قطعه کار: 55 راکول سی)

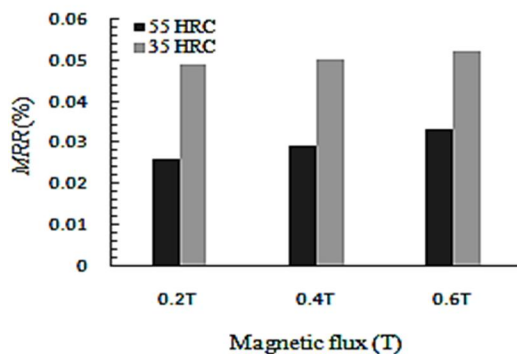


Fig. 7 Effect of magnetic field strength on the material removal ratio of workpieces on different hardness (mesh=90)

شکل 7 تاثیر تغییرات شدت میدان مغناطیسی بر روی نرخ براده برداری در قطعه کار با سختی متفاوت (مش: 90)

سطح بهتر می‌شود.

همچنین مطابق "شکل 10" بین اندازه ذرات ساینده و شدت میدان مغناطیسی تداخلی نیز دیده می‌شود، یعنی این دو فاکتور در تاثیرگذاری بر زبری سطح قطعه کار اثر متقابل دارند. به عبارت دیگر تاثیر اندازه ذرات ساینده بر زبری سطح به شدت میدان مغناطیسی نیز تا حدی وابسته است و تغییر در سطح یکی از فاکتورها موجب تغییر اثر فاکتور دیگر بر زبری سطح می‌شود.

همچنین "شکل‌های 10 و 11"، نشانگر این مسئله هستند که با افزایش شدت میدان مغناطیسی صافی سطح افزایش می‌یابد. علت این امر ناشی از

با سختی 55 راکول سی می‌باشد. علت این امر آن است که در شرایط یکسان با کاهش سختی نفوذ ذرات در سطح قطعه بیشتر می‌شود به طوری که براده بزرگتری ایجاد می‌شود که نتیجه‌ی آن، بیشتر شدن نرخ براده برداری برای قطعه با سختی کمتر می‌باشد.

#### 4-1-1- آنالیز واریانس و مدلسازی رگرسیونی نرخ براده برداری

آنالیز واریانس برای طراحی آزمایش انجام شده در مورد نرخ براده برداری فرآیند جریان ساینده مغناطیسی در جدول 3 آورده شده است. با توجه به این جدول، که مقدار P value را برای پارامترهای ورودی فرآیند (A) مش ذرات ساینده، B سختی قطعه کار و C شدت میدان مغناطیسی) و اثرات متقابل بین پارامترهای ورودی نشان می‌دهد، فاکتوری که دارای مقدار P value کمتر از 0.05 است، دارای اهمیت بوده و سایر موارد از لحاظ آماری فاقد اهمیت هستند. بدین ترتیب خود پارامترهای ورودی و فقط اثر متقابل فاکتورهای A و B (A×B) از لحاظ آماری دارای اهمیت است.

معادله رگرسیونی توسعه داده شده برای نرخ براده برداری و با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب در این تحقیق، مطابق رابطه (8) و مقدار  $R^2$  آن برابر با 94.3 % می‌باشد. آنالیز واریانس مربوط به این رگرسیون نیز در جدول 4 آورده شده است.

مطابق جدول 4 که نشان دهنده مقدار P برای رگرسیون انجام شده برای نرخ براده برداری است ( $P=0$ )، رگرسیون انجام شده قابل قبول است.

(8)  $MRR = 0.0847 - 0.000213A - 0.000763B + 0.0190C$   
در رابطه (8)، A مش ذرات ساینده، B سختی قطعه کار و C شدت میدان مغناطیسی است.

#### 4-2- تاثیر اندازه ذرات ساینده بر روی زبری سطح در شدت

##### میدان‌ها و سختی‌های مختلف قطعه کار

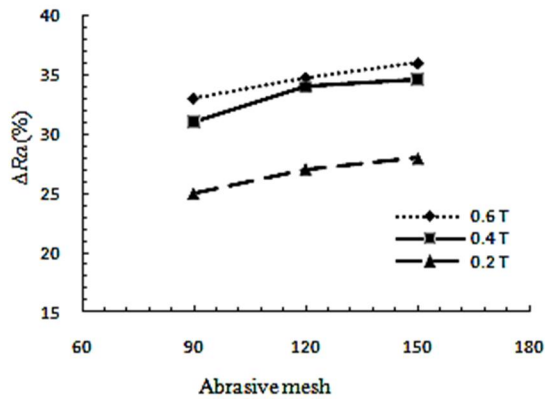
"شکل‌های 10 و 11" به ترتیب نتایج مربوط به تاثیر اندازه ذرات ساینده بر روی زبری سطح در شدت میدان‌های مختلف را برای قطعات با سختی 35 راکول سی و 55 راکول سی نشان می‌دهند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود با افزایش مش ذرات ساینده و متعاقباً کاهش اندازه ذرات ساینده مقدار درصد کاهش زبری سطح افزایش می‌یابد، علت این امر طبق رابطه‌ی (7) ناشی از کاهش حجم براده برداشته شده به ازاء هر کدام از ذرات ساینده با کوچکتر شدن اندازه‌ی ذرات می‌باشد که باعث ایجاد یک سطح یکنواخت‌تر با صافی

جدول 3 آنالیز واریانس برای طراحی آزمایش انجام شده در مورد نرخ براده برداری

| Source         | DF | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS  | F     | P     |
|----------------|----|---------|---------|---------|-------|-------|
| A              | 1  | 0.00104 | 0.00104 | 0.00104 | 164.2 | 0.000 |
| B              | 2  | 0.00048 | 0.00048 | 0.00024 | 38.28 | 0.002 |
| C              | 2  | 0.00017 | 0.00017 | 0.00008 | 13.97 | 0.016 |
| A×B            | 2  | 0.00019 | 0.00019 | 0.00009 | 15.50 | 0.013 |
| A×C            | 2  | 0.00001 | 0.00001 | 0.00007 | 1.16  | 0.401 |
| B×C            | 4  | 0.00001 | 0.00001 | 0.00005 | 0.72  | 0.623 |
| Residual Error | 4  | 0.00002 | 0.00002 | 0.00006 |       |       |
| Total          | 17 | 0.00197 |         |         |       |       |

جدول 4 آنالیز واریانس رگرسیون نرخ براده برداری

| Source         | DF | SS       | MS       | F     | P     |
|----------------|----|----------|----------|-------|-------|
| Regression     | 3  | 0.001711 | 0.000570 | 30.49 | 0.000 |
| Residual Error | 14 | 0.000261 | 0.000018 |       |       |
| Total          | 17 | 0.001972 |          |       |       |

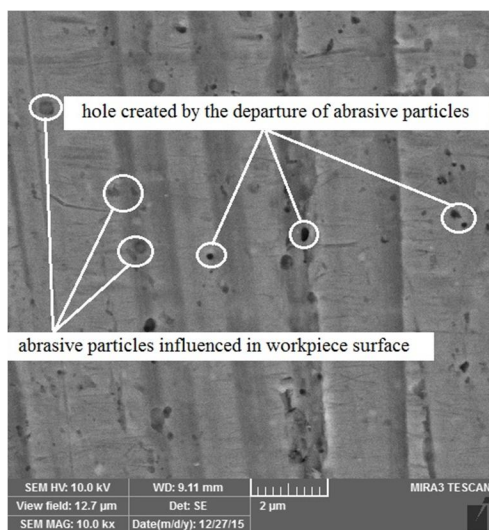


**Fig. 11** The Effect of abrasive particle size on the surface roughness in different field intensity (workpiece hardness: 55 HRC)

شکل 11 تاثیر اندازه ذرات ساینده بر روی زبری سطح در شدت میدان‌های مختلف (سختی قطعه کار: 55 راکول سی)

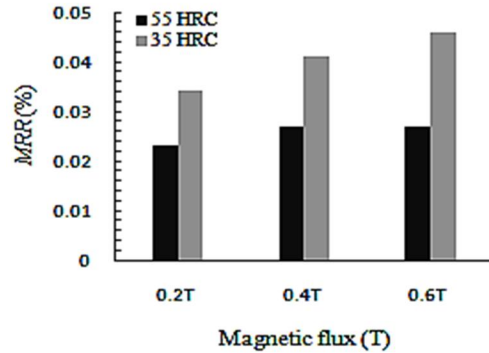
با توجه به "شکل 12" مشاهده می شود که نفوذ ذرات ساینده در سطح قطعه و شکسته شدن این ذرات به ذرات کوچکتر و ماندگاری برخی از این ذرات در سطح مذکور، باعث تخریب سطح قطعه کار و افزایش میزان زبری سطح می شود. این پدیده با کاهش سختی قطعه کار بیشتر اتفاق می افتد و همان طوری که در "شکل های 13، 14 و 15" نیز مشاهده می شود، صافی سطح به دست آمده بعد از پرداخت کاری برای قطعه ای سخت تر بهتر از قطعه ای نرم تر می باشد. همچنین نفوذ ذرات ساینده در قطعات سخت کمتر بوده و براده کوچکتری تولید می کنند که این عامل نیز موجب بیشتر شدن صافی سطح قطعات سخت تر بعد از پرداخت کاری می باشد.

"شکل 16a"، تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح قطعه کار را قبل از فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده و شکل های 16b و 16c، تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح قطعه کار را بعد از فرآیند پرداخت کاری جریان ساینده برای سختی های متفاوت قطعه کار با بزرگنمایی هزار برابر نشان می دهد. این تصاویر نشان دهنده تاثیر مطلوب این فرآیند در پرداخت فولاد H13 می باشد. همچنین مشاهده می شود که در یک مش و شدت میدان



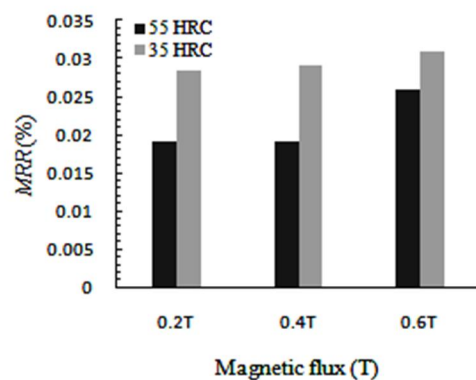
**Fig. 12** SEM image of the surface of the workpiece with 35 HRC (H=0.6T, mesh=150)

شکل 12 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح قطعه کار با سختی 35 راکول سی (مش: 150؛ شدت میدان مغناطیسی: 0.6 تسلا)



**Fig. 8** Effect of magnetic field strength on the material removal ratio of workpieces on different hardness (mesh=120)

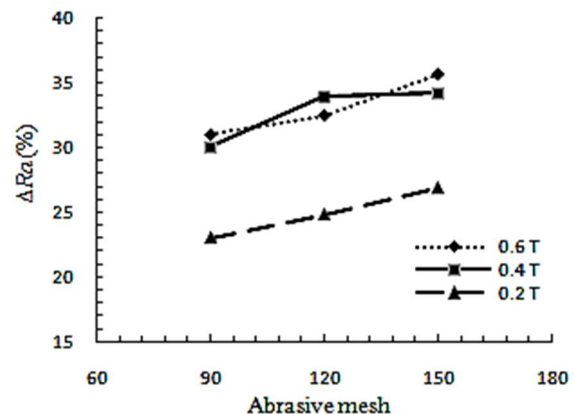
شکل 8 تاثیر تغییرات شدت میدان مغناطیسی بر روی نرخ براده برداری در قطعه کار با سختی متفاوت (مش: 120)



**Fig. 9** Effect of magnetic field strength on the material removal ratio of workpieces on different hardness (mesh=150)

شکل 9 تاثیر تغییرات شدت میدان مغناطیسی بر روی نرخ براده برداری در قطعه کار با سختی متفاوت (مش: 150)

افزایش بازده فرآیند با افزایش شدت میدان مغناطیسی در حذف ناهمواری های سطح قطعه می باشد زیرا طبق رابطه (4)، نیروی شعاعی ناشی از میدان مغناطیسی با شدت و گرادیان میدان رابطه مستقیم دارد به همین دلیل با افزایش شدت میدان مغناطیسی نیروی شعاعی افزایش می یابد که نتیجه آن بزرگ شدن عمق و مساحت منطقه نفوذ و سهولت حذف ناهمواری های سطح قطعه می باشد.



**Fig. 10** The Effect of abrasive particle size on the surface roughness in different field intensity (workpiece hardness: 35 HRC)

شکل 10 تاثیر اندازه ذرات ساینده بر روی زبری سطح در شدت میدان های مختلف (سختی قطعه کار: 35 راکول سی)

جدول، فاکتوری که دارای مقدار P value کمتر از 0.05 است (پارامترهای ورودی) دارای اهمیت بوده و سایر موارد (اثرات متقابل فاکتورها) از لحاظ آماری فاقد اهمیت هستند.

معادله رگرسیونی توسعه داده شده برای زبری سطح، مطابق رابطه (9) و مقدار  $R^2$  آن برابر با 93.9% می باشد. آنالیز واریانس مربوط به این رگرسیون نیز در جدول 6 آورده شده است.

$$R_a = 12.5 - 0.0616A - 0.0639B + 20.1C \quad (9)$$

در رابطه (9)، A مش ذرات ساییده، B سختی قطعه کار و C شدت میدان مغناطیسی است.

مطابق جدول 6 که نشان دهنده مقدار P برای رگرسیون انجام شده برای زبری سطح است ( $P=0$ )، رگرسیون انجام شده در حد قابل قبولی است.

### 5- نتیجه گیری

در این مطالعه فرآیند پرداخت کاری جریان ساییده مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر شدت میدان مغناطیسی، اندازه ذرات ساییده و سختی قطعه کار بر روی نرخ براده برداری و زبری سطح به دست آمده بررسی شد و

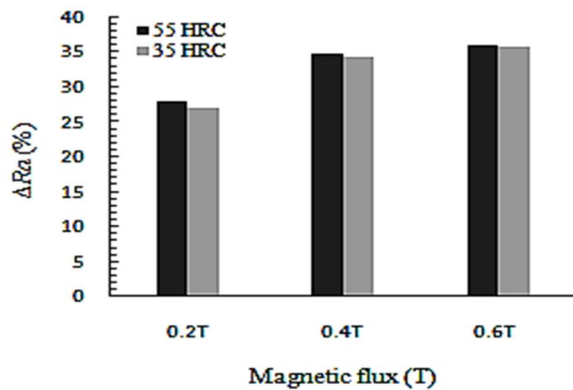


Fig. 15 Effect of magnetic field strength on the surface roughness of workpieces on different hardness (mesh=150)

شکل 15 نمودار مقایسه ای بررسی تاثیر تغییرات شدت میدان بر روی زبری سطح در قطعه کار با سختی متفاوت (مش: 150)

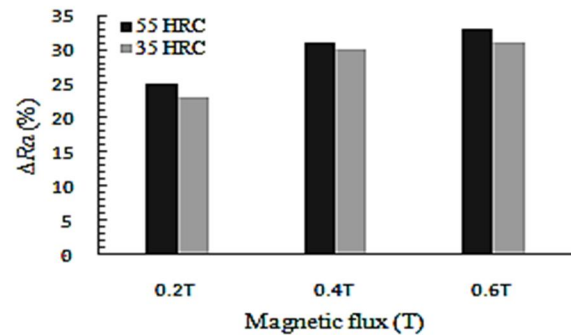


Fig. 13 Effect of magnetic field strength on the surface roughness of workpieces on different hardness (mesh=90)

شکل 13 نمودار مقایسه ای بررسی تاثیر تغییرات شدت میدان بر روی زبری سطح در قطعه کار با سختی متفاوت (مش: 90)

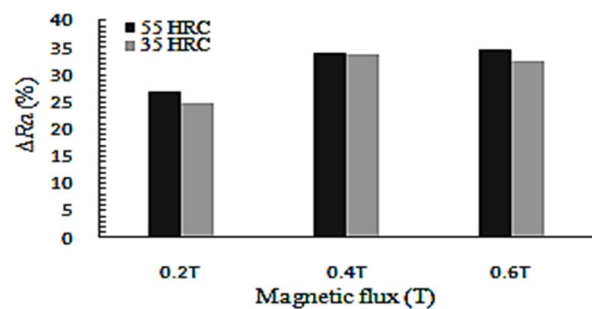


Fig. 14 Effect of magnetic field strength on the surface roughness of workpieces on different hardness (mesh=120)

شکل 14 تاثیر تغییرات شدت میدان بر روی زبری سطح در قطعه کار با سختی متفاوت (مش: 120)

مغناطیسی ثابت با افزایش سختی قطعه کار از 35 راکول سی به 55 راکول سی، صافی سطح به دست آمده برای قطعات پرداخت شده بهبود می یابد.

### 4-2-1- آنالیز واریانس و مدل سازی رگرسیونی زبری سطح

آنالیز واریانس برای طراحی آزمایش انجام شده در مورد زبری سطح فرآیند جریان ساییده مغناطیسی در جدول 5 آورده شده است. با توجه به این

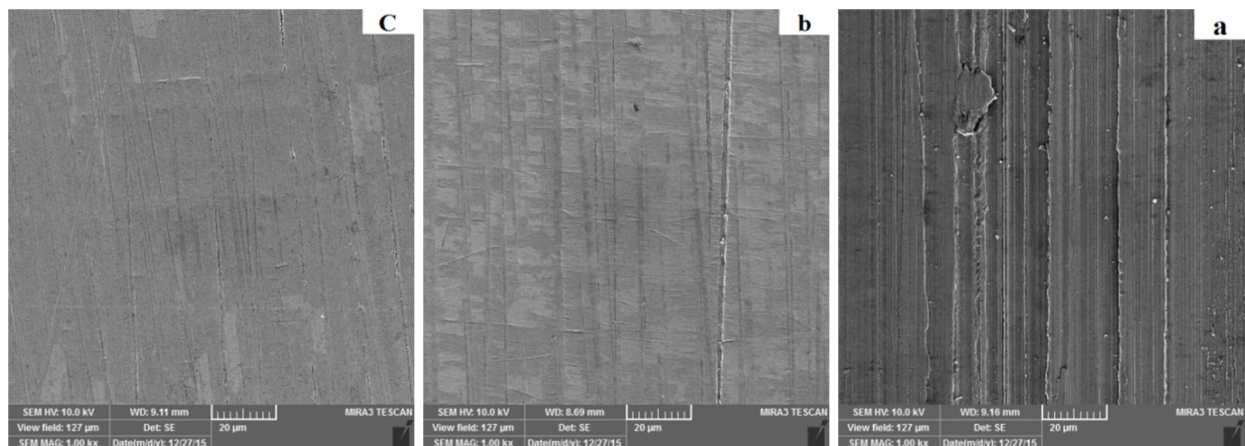


Fig. 16 a) SEM image of the surface before MAFM process in 1000X b) SEM image of workpiece surface with 35 HRC after MAFM in 1000X (mesh=150, H=0.6) c) SEM image of workpiece surface with 55 HRC after MAFM in 1000X (mesh=150, H=0.6)

شکل 16 a) تصویر SEM از سطح قطعه با بزرگنمایی 1000 برابر قبل از فرآیند MAFM برای قطعه با سختی 35 راکول سی (مش: 150 و شدت میدان مغناطیسی: 0.6 تسلا) b) تصویر SEM از سطح قطعه با بزرگنمایی 1000 برابر بعد از فرآیند MAFM برای قطعه با سختی 35 راکول سی (مش: 150 و شدت میدان مغناطیسی: 0.6 تسلا) c) تصویر SEM از سطح قطعه با بزرگنمایی 1000 برابر بعد از فرآیند MAFM برای قطعه با سختی 55 راکول سی (مش: 150 و شدت میدان مغناطیسی: 0.6 تسلا)

112, 2015. (in Persian فارسی)

- [2] M. Ravi Sankar, J. Ramkumar, V. K. Jain, Experimental investigation and mechanism of material removal in nano finishing of MMCs using abrasive flow finishing (AFF) process, *Wear*, Vol. 266, No. 7, pp. 688-698, 2009.
- [3] A. W. Strading, The physics of open-gradient dry magnetic separation, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 39, No. 2, pp. 1-18, 1993.
- [4] R. E. Williams, K. P. Rajurkar, Performance characteristics of abrasive flow machining, *Society of Manufacturing Engineers*, pp. 898-906, 1989.
- [5] R. E. Williams, K. P. Rajurkar, Stochastic modelling and analysis of abrasive flow machining, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, No. 1, pp. 74-81, 1992.
- [6] T. R. Loveless, R. E. Williams, K. P. Rajurkar, A study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 133-151, 1994.
- [7] R. K. Jain, *Modeling and simulation of abrasive flow machining process*, PhD Thesis, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 1999.
- [8] R. K. Jain, V. K. Jain, Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 108, No. 1, pp. 62-67, 2000.
- [9] V. K. Gorana, V. K. Jain, G. K. Lal, Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 3, pp. 201-211, 2004.
- [10] K. K. Kar, N. L. Ravikumar, P. B. Tailor, J. Ramkumar, D. Sathiyamoorthy, Performance evaluation and rheological characterization of newly developed butyl rubber based media for abrasive flow machining process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, No. 4, pp. 2212-2221, 2009.
- [11] J. Kenda, F. Pusavec, G. Kermouche, J. Kopac, Surface integrity in abrasive flow machining of hardened tool steel AISI D2, *Procedia Engineering: first CIRP Conference on Surface Integrity*, Vol. 19, No. 1, pp. 172-177, 2011.
- [12] L. Fang, J. Zhao, K. Sun, D. Zheng, D. Ma, Temperature as sensitive monitor for efficiency of work in abrasive flow machining, *Wear*, Vol. 266, No. 7, pp. 678-687, 2009.
- [13] A. R. Jones, J. B. Hull, Ultrasonic flow polishing, *Ultrasonics*, Vol. 36, No. 1, pp. 97-101, 1998.
- [14] V. K. Gorana, V. K. Jain, G. K. Lal, Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 3, pp. 201-211, 2004.
- [15] S. Jha, V. K. Jain, Design and development of the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 10, pp. 1019-1029, 2004.
- [16] S. Jha, V. K. Jain, R. Komanduri, Effect of extrusion pressure and number of finishing cycles on surface roughness in magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, No. 7, pp. 725-729, 2007.
- [17] K. Govil, O. Eyericioglu, M. Veyzel Cakir, Hardness effects on abrasive flow machining, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 59, No. 10, pp. 626-631, 2013.
- [18] S. Singh, H. S. Shan, Development of magneto abrasive flow machining process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 1, pp. 953-959, 2002.
- [19] M. Das, V. K. Jain, P. S. Ghoshdashtidar, Analysis of magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 1, pp. 613-621, 2008.
- [20] K. Gov, O. Eyericioglu, M. V. Cakir, Hardness Effects on Abrasive Flow Machining, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 59, No. 10, pp. 626-631, 2013.

جدول 5 آنالیز واریانس برای طراحی آزمایش انجام شده در مورد زبری سطح

Table 5 Analysis of variance of surface roughness design of experiments

| Source         | DF | Seq SS  | Adj SS | Adj MS | F     | P     |
|----------------|----|---------|--------|--------|-------|-------|
| A              | 1  | 7.361   | 7.361  | 0.7.36 | 43.24 | 0.003 |
| B              | 2  | 41.861  | 41.861 | 20.93  | 122.9 | 0.000 |
| C              | 2  | 233.63  | 233.63 | 116.81 | 686.1 | 0.000 |
| A×B            | 2  | 1.039   | 1.039  | 0.520  | 3.05  | 0.157 |
| A×C            | 2  | 1.407   | 1.407  | 0.704  | 4.13  | 0.106 |
| B×C            | 4  | 2.384   | 2.384  | 0.596  | 3.50  | 0.126 |
| Residual Error | 4  | 0.681   | 0.681  | 0.170  |       |       |
| Total          | 17 | 288.365 |        |        |       |       |

جدول 6 آنالیز واریانس رگرسیون زبری سطح

Table 6 Analysis of variance of surface roughness regression model

| Source         | DF | SS      | MS    | F     | P     |
|----------------|----|---------|-------|-------|-------|
| Regression     | 3  | 242.491 | 80.83 | 24.67 | 0.000 |
| Residual Error | 14 | 45.874  | 3.277 |       |       |
| Total          | 17 | 288.365 |       |       |       |

نتایج زیر بدست آمد:

- با افزایش شدت میدان مغناطیسی از 0.2 تا 0.6 تسلا، به دلیل افزایش نیروی شعاعی، درصد بهبود سطح قطعه کار بیشتر می شود.
- افزایش شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش نرخ براده برداری می شود. این تغییرات برای مش ثابت با کاهش سختی قطعه کار افزایش می یابد.
- افزایش مش ذرات ساینده باعث افزایش درصد بهبود سطح و کاهش نرخ براده برداری می شود.
- با افزایش سختی قطعه کار از 35 راکول سی تا 55 راکول سی به دلیل کاهش نفوذ ذرات ساینده به سطح قطعه کار نرخ براده برداری کمتر شده و سطح یکنواخت تر با کیفیت بالاتر به دست می آید.

## 6- مراجع

- [1] M. R. Shabgard, B. Karamzadeh, R. Alizadegan, A. Gholipour, Experimental study of finishing of AISI H13 hot work steel using Abrasive Flow Finishing (AFF) process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 106-