



## بررسی پارامترهای مؤثر بر میزان براده برداری در فرایند ماشینکاری به کمک سیال ساینده با محور چرخان

مجتبی اسماعیلیان<sup>1</sup>، امیرحسین آقابابایی<sup>2</sup>، سیدمحمدحسین سیدکاشی<sup>3\*</sup>، منصور اصغری<sup>1</sup>

1- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175-376، seyedkashi@birjand.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 مرداد 1394

پذیرش: 01 شهریور 1394

ارائه در سایت: 05 اسفند 1394

کلید واژگان:

ماشین کاری با سیال ساینده

براده برداری

محور چرخان

شبیه سازی عددی

ماشین کاری با سیال ساینده یک روش جدید ماشین کاری سطوح فلزی است که سطوح و لبه های قطعات صنعتی پیچیده یا بسیار کوچک را با کیفیت بسیار بالا و تolerانس بسته پرداخت می کند. در این روش، یک سیال که شامل ذرات ساینده می باشد، از روی سطح قطعه کار یا درون آن به صورت رفت و برگشتی عبور می کند. طی این فرایند، به مرور سطح قطعه کار به صافی مطلوب خواهد رسید. مشکل عمده در استفاده از این روش، پایین بودن نرخ براده برداری و در نتیجه زمان زیاد مورد نیاز برای انجام فرایند است. در این پژوهش، به شبیه سازی فرایند ماشین کاری به کمک سیال ساینده در نرم افزار فلوئنت با استفاده از مدل فاز گسسته پرداخته شده و برای افزایش نرخ براده برداری از نیروی گریز از مرکز اعمال شده توسط محور چرخان استفاده شده است. شبیه سازی برای براده برداری دیواره داخلی یک لوله انجام گرفت. تأثیر پارامترهای سرعت چرخش محور، میزان کسر جرمی ذرات ساینده و تعداد سیکل براده برداری بر مقدار براده برداری بررسی شد. همچنین به کمک روش سطح پاسخ، یک سری آزمایش طراحی گردید و با استفاده از روش آنالیز واریانس به بررسی اثر پارامترهای ورودی و نیز اثرهای تعاملی آنها بر روی میزان براده برداری پرداخته شد. در نهایت یک معادله رگرسیون عمومی برای پیش بینی میزان براده برداری در این فرایند بر اساس پارامترهای مؤثر ارائه گردید.

## Investigation into the effective parameters of material removal rate in centrifugal force assisted abrasive flow machining

Mojtaba Esmailian<sup>1</sup>, Amir Hosein Aghababaei<sup>2</sup>, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi<sup>3\*</sup>, Mansour Asghari<sup>1</sup>

1- Mechanical and Aerospace Engineering Department, Malek-e-Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Isfahan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\* P.O.B. 97175-376, Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 28 July 2015

Accepted 23 August 2015

Available Online 24 February 2016

#### Keywords:

Abrasive flow machining

Material removal

Rotating rod

Simulation

### ABSTRACT

Abrasive flow machining is a new method of metal surface machining which polishes the surfaces and edges of complex or small industrial parts with high quality and close tolerances. In this method, a fluid containing abrasive particles passes on the surface or inside of the work-piece in a reciprocating way. During the process, the work-piece reaches the desired surface roughness over time. The main problem in using this method is the low removal rate, and thus longer leadtime to carry out the process. In this study, abrasive flow machining process is simulated in Fluent software using discrete phase model, and then to increase the rate of material removal, centrifugal force imposed by the rotating rod is applied. Simulation was performed for the material removal of inner wall of a pipe. Moreover, the influence of the axis rotational speed parameters, the mass fraction of abrasive particles and number of removal cycles on material removal rates were evaluated. Also, based on the response surface method, a series of experiments were designed, and the effects of input parameters and their interactive effects on the rate of material removal were evaluated by analysis of variance method. Finally, a regression model is provided to predict the removal rate in the process according to the effective parameters.

### 1- مقدمه

پیچیده و بسیار کوچک نیازمند پرداخت سطح بسیار خوب هستند که ماشین های مرسوم در انجام آنها ناتوان هستند، به طوری که بسیاری از قطعات و قالب هایی که برای اکستروژن قطعات آلومینیوم یا پلاستیک هستند، به صورت دستی صیقل داده می شوند [2,1].

پرداخت کاری نهایی اجزای پیچیده و دقیق، از فرایندهایی است که با روش های مرسوم نیازمند زمان و هزینه زیاد بوده و در عین حال کنترل پذیری کمی دارند. با وجود استفاده گسترده از ماشین ها در صنعت، بعضی از قطعات

Please cite this article using:

M. Esmailian, A.H. Aghababaei, S.M.H. Seyedkashi, M. Asghari, Investigation into the effective parameters of material removal rate in centrifugal force assisted abrasive flow machining, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 39-45, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

آن‌ها به سمت دیواره داخلی لوله می‌شود. نتیجه این کار افزایش نرخ براده‌برداری و در نتیجه کاهش زمان پرداخت کاری خواهد بود.

والیا و همکاران [12] بر روی براده‌برداری با محور چرخان آزمایش‌هایی انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش تأثیر پارامترهایی همچون شکل و سرعت چرخش محور، فشار کاری سیستم، تعداد سیکل‌ها و اندازه ذرات ساینده را بر نرخ براده‌برداری بررسی کردند. ایشان از محورهایی به اشکال مربع، مستطیل، مثلث و نیز محور زبانه‌دار استفاده کردند و نشان دادند که با افزایش تعداد سیکل براده‌برداری، مقدار براده‌برداری نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت چرخش محور مرکزی، نرخ براده‌برداری به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر شکل محور مرکزی بر مقدار براده‌برداری و نیز صافی سطح را نشان دادند. در شکل 2 اشکال مختلفی که در آزمایش برای محور مرکزی انتخاب شده‌اند، مشاهده می‌شوند.

والیا و همکاران [13] به بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی همچون سرعت چرخش محور مرکزی، فشار سیستم و اندازه دانه‌ها در ماشین کاری با ذرات ساینده با استفاده از روش تاگوچی<sup>4</sup> پرداختند. ردی و همکاران [14] آزمایش‌هایی بر روی آلیاژ آلومینیوم با استفاده از روش براده‌برداری با محور چرخان انجام دادند و با استفاده از روش سطح پاسخ مدلی‌هایی را برای پیش‌بینی مقدار براده‌برداری ارائه دادند.

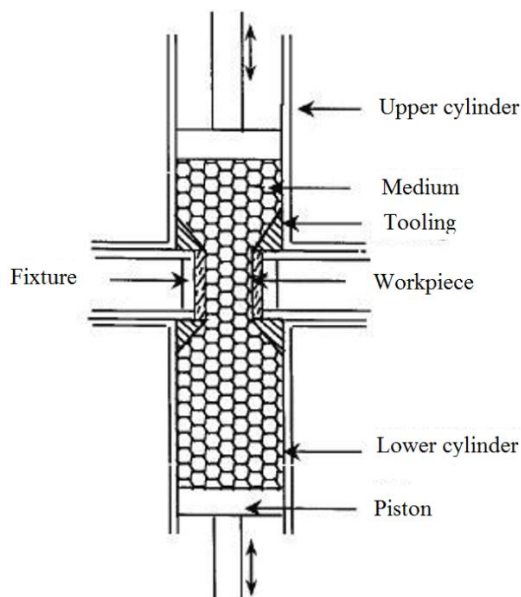


Fig. 1 Schematic of abrasive flow machining process

شکل 1 نمایی از دستگاه براده‌برداری با سیال ساینده

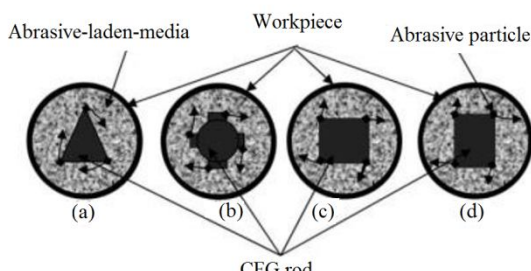


Fig. 2 Different shapes of CFG rod used in Walia's experiments [12]

شکل 2 اشکال مختلف مورد استفاده محور چرخان در آزمایش [12]

نیاز به پرداخت سطوح اجسام پیچیده و ساخته شده از مواد پیشرفته، از عواملی بودند که باعث شدند پژوهشگران به ماشین‌کاری‌های نوین مانند ماشین‌کاری با سیال ساینده روی بیاورند [3]. ماشین‌کاری با سیال ساینده<sup>1</sup> یکی از روش‌های پیشرفته پرداخت سطوح است که به‌وسیله آن می‌توان مناطقی را از قطعه که دسترسی به آن سخت است، ماشین‌کاری کرد [5,4].

در این روش یک سیال ویسکوز که حاوی ذرات ساینده است، به داخل قطعه کار تزریق شده و توسط دو سیلندر بالا و پایین می‌شود. با برخورد ذرات ساینده به سطح، براده‌برداری صورت می‌گیرد. در این روش، در هر جایی که سیال از آن عبور کند، حتی در کوچک‌ترین راهگاه‌ها که دسترسی به آن دشوار است، براده‌برداری صورت می‌گیرد. در شکل 1 نمایی از دستگاه ماشین‌کاری با سیال ساینده نشان داده شده است. سیال با ذرات ساینده به‌عنوان یک ابزار پرداخت قابل‌انعطاف عمل می‌کند. با دانستن و کنترل کردن پارامترهای فرایند، می‌توان مدلی‌هایی ارائه داد که برای پیش‌بینی فرایند پرداخت‌کاری قابل‌استفاده بوده و نتایج قابل‌اعتمادی ارائه کند تا در تولید قطعات هزینه‌ها را کاهش دهد. تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه براده‌برداری با استفاده از سیال ساینده صورت گرفته که در ادامه به تعدادی از تحقیقات آزمایشگاهی و مدلی‌های عددی ارائه شده اشاره شده است.

کومار [6] به بررسی تحلیلی و تجربی ماشین‌کاری با ذرات ساینده پرداخت. در این کار وی میزان براده‌برداری در قطعات متقارن محوری را بررسی و مدلی برای پیش‌بینی نرخ براده‌برداری ارائه داد. جین و همکارانش [7] به بررسی براده‌برداری در مواد نرم و ترد پرداختند و مدلی برای پیش‌بینی میزان براده‌برداری هرکدام ارائه کردند. جین و همکاران [8] به بررسی ماشین‌کاری با سیال ساینده پرداختند و مدلی ریاضی برای پیش‌بینی میزان نرخ براده‌برداری ارائه کردند.

مازور و همکاران [9] نرخ خوردگی ایجاد شده توسط ذرات ساینده در شیر کنترل توربین بخار را به کمک نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی کرده و به کمک بهینه‌سازی هندسه‌ی شیر کنترل، حدود 50 درصد میزان خوردگی را کاهش دادند.

شی مینگ و همکاران [10] خوردگی در یک کانال را به کمک مدل فاز گسسته در نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی کردند. آن‌ها در این شبیه‌سازی یک کانال U-شکل را به‌صورت سه‌بعدی مدل کردند و از روغن‌موتور به‌عنوان سیال حامل و ذرات کاربید سیلیسیم به‌عنوان ذرات ساینده و از مدل پرستون<sup>2</sup> برای مدل‌سازی براده‌برداری استفاده کردند.

ژانگ و همکاران [11] به بررسی خوردگی در یک زانویی در نرم‌افزار فلونت و با استفاده از مدل فاز گسسته پرداختند. آن‌ها از مدل خوردگی E/CRC<sup>3</sup> و در شبیه‌سازی‌های خود از سیال هوا و آب استفاده کردند و جنس زانویی را نیز فولاد در نظر گرفتند.

یکی از نوآوری‌هایی که در زمینه ماشین‌کاری با سیال ساینده صورت گرفته، اعمال نیروی گریز از مرکز به ذرات ساینده است که باعث می‌شود سرعت برخورد ذرات ساینده و نیز تعداد ذرات برخوردی به سطح افزایش یافته و در نتیجه نرخ براده‌برداری از سطح افزایش یابد. یکی از روش‌های اعمال نیروی گریز از مرکز به ذرات، چرخش سیال ساینده است. در این روش با قرار دادن یک محور در مرکز سیال و دوران این محور، به سیال چرخش داده شده و این چرخش باعث اعمال نیروی گریز از مرکز به ذرات ساینده و هدایت

1. Abrasive flow machining  
2. Preston  
3. Erosion/Corrosion Research Center

4. Taguchi method

### 1-2- تبادل مومنتم

مومنتم منتقل شده از فاز پیوسته به فاز گسسته با محاسبه تغییر مومنتم یک ذره گذرنده از هر حجم کنترل محاسبه می‌شود. این تغییر مومنتم به‌وسیله رابطه (1) محاسبه می‌شود.

$$F = \Sigma \left( \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{(u_p - u)}{24} + F_{other} \right) m_p \Delta t \quad (1)$$

که در این رابطه  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $\rho_p$  چگالی ذرات،  $d_p$  قطر ذرات،  $C_D$  ضریب درگ،  $F_{other}$  نیروهای بین فازی،  $\dot{m}_p$  شار جرمی ذرات و  $\Delta t$  گام زمانی است. این تبادل مومنتم به‌صورت یک چشمه مومنتم در محاسبات فاز پیوسته لحاظ می‌شود.

### 2-2- تبادل جرم

تبادل جرم از فاز گسسته به فاز پیوسته به‌وسیله مقادیر تغییر جرم یک ذره عبوری از هر حجم کنترل مدل مورد نظر محاسبه می‌گردد. تغییر جرم به‌وسیله رابطه (2) بیان می‌شود.

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,o}} m_{p,o} \quad (2)$$

در رابطه (2)  $m_{p,o}$  دبی جرمی اولیه ذرات،  $m_p$  جرم اولیه ذره و  $\Delta m_p$  تغییر جرم ذره است. این تبادل جرم به‌صورت یک چشمه در محاسبات فاز پیوسته (معادله بقای جرم) لحاظ می‌شود.

### 2-3- نرخ براده‌برداری

برای مدل‌سازی مقدار براده‌برداری از مدل E/CRC استفاده شده است. این مدل که بر اساس تئوری انرژی بهینه‌سازی شده است، ضریب شکل ذرات و همچنین سختی سطح مورد براده‌برداری را نیز در نظر می‌گیرد. این مدل به‌وسیله رابطه (3) تعریف می‌شود.

$$ER = C(BH)^{-0.59} F_s v_p^n \sum_{i=1}^5 A_i \quad (3)$$

که در این رابطه  $ER$  نسبت براده‌برداری است که به‌صورت مقدار ماده‌ی براده‌برداری شده از سطح تقسیم بر جرم ذرات برخوردی است. با ضرب این نسبت در جرم ذرات برخوردی، مقدار نرخ براده‌برداری به‌دست می‌آید. همچنین،  $BH$  سختی برینل سطح و  $F_s$  ضریب شکل ذرات ساینده است. این ضریب برای ذرات تیز برابر با یک، برای ذرات تقریباً گرد برابر با نیم و برای ذرات کروی برابر با 0.2 است.  $v_p$  سرعت ذرات برخوردی و  $\theta$  زاویه برخورد در مقیاس رادیان،  $n=2.41$  و  $C=2.17 \times 10^{-7}$  ضرایب ثابت هستند. مقادیر  $A_i$  در جدول 1 آورده شده است [11].

جدول 1 مقادیر ضرایب مورد استفاده در رابطه (3)

ضریب مقدار	$A_5$	$A_4$	$A_3$	$A_2$	$A_1$
	1.42	-6.33	10.93	-10.11	5.40

### 3- مدل‌سازی و حل عددی

در پروژه حاضر با استفاده مدل فاز گسسته در نرم‌افزار فلوئنت به شبیه‌سازی براده‌برداری با ذرات ساینده در لوله پرداخته شد که توسط یک محور چرخان در مرکز لوله، سیال و ذرات ساینده به سمت دیواره داخلی لوله فرستاده می‌شوند. جین [7] با بررسی فرایند براده‌برداری، یک مدل ریاضی را برای پیش‌بینی نرخ براده‌برداری در فرایند AFM ارائه داد و با نتایج تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش جین [18] مقایسه کرد. شبیه‌سازی حاضر بر اساس آزمایش جین صورت گرفته و نتایج حل عددی با مقادیر به‌دست‌آمده توسط

والیا و سینگ [15] بر روی براده‌برداری با محور چرخان تحقیقاتی انجام دادند و پارامترهای مؤثر بر روی این فرایند را بررسی کردند. در این تحقیق آن‌ها بر روی تأثیر شکل محور چرخان و سرعت محور و تعداد سیکل‌های فرایند کار کرده و با استفاده از روش تاگوچی نحوه‌ی تأثیر این پارامترها را بر روی نرخ براده‌برداری بررسی کردند. برار و همکاران [16] به ماشین‌کاری با ذرات ساینده به کمک میله چرخان ماریچ پرداختند. در این کار از یک میله ماریچ به‌عنوان محور مرکزی چرخان استفاده کردند و با استفاده از نتایج آزمایش و روش تاگوچی به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در ماشین‌کاری با میله ماریچ پرداختند. نمایی از فرایند براده‌برداری با محور چرخان ماریچ در شکل 3 آورده شده است.

در ادبیات تحقیق نشان داده شد که براده‌برداری با سیال ساینده و با استفاده از محور چرخان بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته ولی شبیه‌سازی عددی این فرایند تاکنون انجام نشده است. شناخت دقیق فرایند براده‌برداری و پیش‌بینی تأثیر پارامترهای مختلف بر آن، قبل از انجام تست‌های تجربی اهمیت بسیاری دارد. با دانستن و کنترل کردن پارامترهای مؤثر در فرایند، می‌توان مدل‌هایی ارائه داد که نتایج را به‌خوبی پیش‌بینی کرده و برای بسیاری از فرایندهای پرداخت‌کاری قابل استفاده باشد. به همین منظور در این مقاله، مدل‌سازی فرایند براده‌برداری با ذرات ساینده انجام شده و اعتبارسنجی آن با داده‌های تجربی انجام گرفته است. سپس با قرار دادن محور چرخان، تأثیر چرخش محور بر افزایش نرخ براده‌برداری بررسی گردید. با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، تأثیر پارامترهای سرعت دورانی، تعداد سیکل‌ها و نسبت جرمی ذرات ساینده بر روی میزان براده‌برداری بررسی شد و در نهایت یک مدل رگرسیون عمومی برای پیش‌بینی این مقدار ارائه گردید.

### 2- معادلات حاکم

برای مدل کردن براده‌برداری با سیال ساینده از مدل فاز گسسته استفاده می‌شود. در این مدل از روش اوپلری-لاگرانژی<sup>1</sup> برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود که در آن سیال حامل به‌عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته شده و معادلات ناویر استوکس برای آن حل می‌شود، درحالی‌که فاز گسسته به روش لاگرانژی با دنبال کردن هر جزء فاز گسسته در طول خط مسیر، حل می‌شود [17].

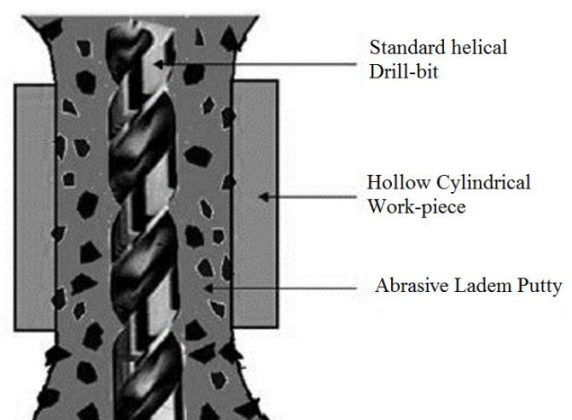


Fig. 3 Schematic of helical AFM process

شکل 3 نمای فرایند براده‌برداری با محور چرخان ماریچ

1. Euler-Lagrange

شرایط شبیه‌سازی همانند حالت قبل است با این تفاوت که فقط محور چرخان به آن اضافه شده است و با سرعت 2 رادیان بر ثانیه به گردش در می‌آید. نتایج شبیه‌سازی با محور چرخان نیز در جدول 4 آورده شده است.

این نتایج نشان‌دهنده تأثیر زیاد چرخش محور مرکزی بر روی نرخ براده برداری است که باعث می‌شود براده برداری با محور چرخان یک گزینه ایده‌آل برای انجام براده برداری با ذرات ساینده باشد که می‌توان با انجام تعداد سیکل‌های کمتر، به میزان قابل توجهی نرخ براده برداری را افزایش داد.

برای بررسی بیشتر تأثیر محور چرخان، با استفاده از روش سطح پاسخ آزمایش‌هایی طراحی شدند تا تأثیر پارامترهای مهم بر روی میزان براده برداری بررسی شوند. با توجه به این که تعداد پارامترهای مؤثر در فرآیند براده برداری زیاد می‌باشند، با بررسی مطالعات قبلی و نیز شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، مشاهده شد که پارامترهای سرعت دورانی محور چرخان، تعداد سیکل‌های آزمایش و نسبت جرمی ذرات ساینده تأثیر چشمگیری بر روی براده برداری داشته و به همین علت این سه پارامتر مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی مطالعات قبلی در زمینه براده برداری با محور چرخان، مقادیر مورد استفاده برای سرعت دورانی مقادیر 2، 6 و 10 رادیان بر ثانیه، نسبت جرمی ذرات ساینده به سیال حامل نیز مقادیر 21%، 33% و 45% و همچنین تعداد سیکل‌های براده برداری نیز مقادیر 2، 4 و 6 انتخاب شد. همچنین به منظور مطمئن بودن از استقلال حل از گام زمانی، شبیه‌سازی با گام‌های زمانی 0.1 ثانیه، 0.04 ثانیه و 0.02 ثانیه انجام شد که نتایج حل در دو حالت 0.04 و 0.02 به اندازه مطلوب به هم نزدیک بود. به همین جهت در این تحقیق از گام زمانی 0.04 برای انجام شبیه‌سازی استفاده شد. مقادیر پارامترهای مورد بررسی و نیز نتیجه شبیه‌سازی برحسب کیلوگرم بر مترمربع در جدول 5 آورده شده است.

جدول 4 مقایسه نتایج شبیه‌سازی با محور چرخان و بدون محور

شرح کار	براده برداری ( $g \cdot 10^{-4}$ )
شبیه‌سازی بدون محور	14.69
شبیه‌سازی با محور چرخان	952.23

جدول 5 مقادیر پارامترها و مقادیر به دست آمده با شبیه‌سازی

شماره آزمایش	درصد جرمی	تعداد سیکل	سرعت دورانی	مقدار براده برداری ( $Kg/m^2$ )
1	33%	4	6	0.03040764
2	33%	6	2	0.0179
3	45%	4	10	0.0829427
4	33%	6	10	0.114345
5	21%	2	6	0.004080
6	33%	2	2	0.002498
7	21%	6	6	0.035972
8	45%	4	2	0.013576
9	33%	2	10	0.11751
10	21%	4	10	0.038701
11	21%	4	2	0.06388
12	45%	2	6	0.008609
13	33%	4	6	0.030524
14	33%	4	6	0.030470
15	45%	6	6	0.07594

آزمایش [18] و همچنین با مدل جین [7] مقایسه شد. برای مدل‌سازی مقدار براده برداری از مدل E/CRC استفاده شده که ذرات ساینده به صورت کروی در نظر گرفته شده است.

قطعه کار به صورت استوانه‌ای به قطر 30 میلی‌متر و ارتفاع 12 میلی‌متر انتخاب شده است. جنس قطعه کار از برنج و سیال حامل نیز خمیر پایه سیلیکونی<sup>1</sup> است. مشخصات مدل‌سازی قطعه و شرایط آزمایش در جدول 2 آورده شده است.

در جدول 3 نتایج شبیه‌سازی انجام شده با مدل ارائه شده توسط جین و نیز نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شده است که نشان‌دهنده تطابق خوب نتیجه به دست آمده از حل عددی با آزمایش است.

سیس با قرار دادن یک محور چرخان در مرکز لوله، اثر چرخش محور بر براده برداری مورد بررسی قرار می‌گیرد. محور چرخان با مقطع مربع به ضلع 12 میلی‌متر است. شبکه مورد استفاده یک شبکه سازمان یافته است که در شکل 4 نمایش داده شده است. با بررسی شبکه‌هایی با تعداد المان‌های 100000، 160000 و 240000 میزان براده برداری برحسب کیلوگرم بر مترمربع به ترتیب اعداد 0.0342 و 0.0387 و 0.0387 به دست آمد که به همین دلیل شبکه‌ای با 160 هزار المان برای ادامه شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول 2 مشخصات مدل‌سازی در حالت بدون محور چرخان

پارامتر	شرح
جنس قطعه کار	Brass
قطر قطعه کار	30mm
ارتفاع قطعه کار	12mm
سرعت جریان محوری	0.677 cm/s
تعداد سیکل	50
سیال حامل	خمیر پایه سیلیکونی
ذرات ساینده	کاربید سیلیسیم
اندازه ذرات ساینده	100 micron
چگالی ذرات ساینده	3.21 gr/cm <sup>3</sup>
درصد جرمی ذرات ساینده	45%

جدول 3 مقایسه نتایج شبیه‌سازی با آزمایش و مدل تجربی

شرح کار	براده برداری ( $g \cdot 10^{-4}$ )
آزمایش جین [18]	18.88
مدل جین [7]	12.18
شبیه‌سازی کار حاضر	14.69

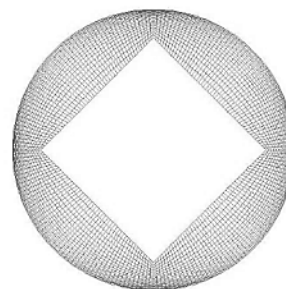


Fig. 4 The generated mesh for numerical analysis

شکل 4 شبکه مورد استفاده برای حل عددی

1. Silicon-based putty

4- نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روش آنالیز واریانس<sup>1</sup> و به کمک نرم‌افزار مینی‌تب<sup>2</sup> تحلیل آماری شده و میزان تأثیر هر یک از پارامترها و اثرات تعاملی آن‌ها بر روی براده‌برداری مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 5 نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی‌مانده آورده شده است. با توجه به توزیع مقادیر باقی‌مانده‌ها در شکل 5، صحت فرض نرمال بودن برای داده‌های آزمایش‌های انجام شده تایید می‌شود.

در شکل‌های 6 تا 8 نیز تأثیر پارامترهای ورودی بر مقدار براده‌برداری آورده شده است. در شکل 6 تأثیر نسبت جرمی ذرات ساینده و تعداد سیکل براده‌برداری آورده شده است و با توجه به شکل 6 می‌توان دریافت که تأثیر افزایش نسبت جرمی با افزایش تعداد سیکل افزایشی است. در شکل 7 نیز تأثیر پارامترهای نسبت جرمی ذرات ساینده و تعداد سیکل براده‌برداری آورده شده است و همان‌طور که در شکل مشخص است در این حالت نیز تأثیر افزایش نسبت جرمی با افزایش سرعت دورانی افزایشی است. در شکل 8 تأثیر پارامترهای سرعت دورانی محور چرخان و تعداد سیکل براده‌برداری آورده شده است و همان‌طور که در شکل مشخص است در این حالت نیز تأثیر افزایش تعداد سیکل با افزایش سرعت دورانی افزایشی است. با توجه به این که در همه حالات تأثیر متقابل پارامترهای ورودی افزایشی است، در نتیجه اثرات متقابل تأثیر چندانی بر روی اثرات اصلی ندارند و در نتیجه اثرات اصلی به اعتبار خود باقی هستند.

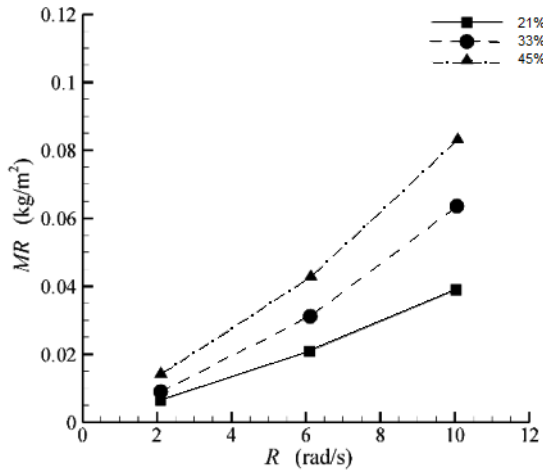


Fig. 7 Effect of rotational speed and abrasive concentration on material removal

شکل 7 نمودار تأثیر نسبت جرمی و سرعت دورانی محور چرخان بر مقدار براده‌برداری

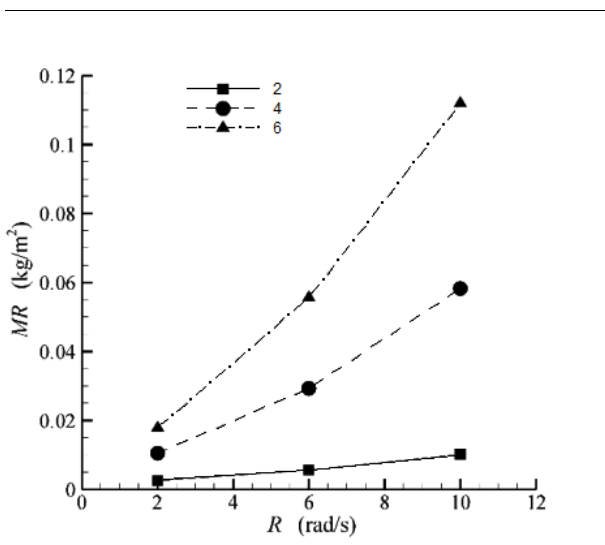


Fig. 8 Effect of rotational speed and number of cycles on material removal

شکل 8 نمودار تأثیر تعداد سیکل و سرعت دورانی محور چرخان بر مقدار براده‌برداری

این نتیجه‌گیری از بررسی خروجی نمودارهای اثرات متقابل نیز به دست آمده که به دلیل تعداد زیاد نمودارها از ارائه آن‌ها خودداری شده است. در شکل 9 میزان تأثیر پارامتر نسبت جرمی ذرات ساینده بر نرخ براده‌برداری آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، در بازه‌ی مورد بررسی افزایش نسبت جرمی ذرات ساینده، باعث افزایش میزان براده‌برداری شده به طوری که با افزایش 57 درصدی و 114 درصدی نسبت جرمی ذرات ساینده، مقدار براده‌برداری نیز به ترتیب 6 درصد و 113 درصد افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش تعداد ذرات ساینده و در نتیجه افزایش تعداد برخورد ذرات ساینده به قطعه‌کار می‌باشد.

در شکل 10 میزان تأثیر پارامتر تعداد سیکل بر نرخ براده‌برداری آورده شده است. مشخص است که با افزایش تعداد سیکل براده‌برداری نیز زمان فرایند براده‌برداری افزایش یافته و به همین دلیل مقدار براده‌برداری افزایش یافته است. در این حالت با دو و سه برابر شدن تعداد سیکل براده‌برداری، مقدار براده‌برداری نیز به ترتیب 2.84 و 5.53 برابر شده است.

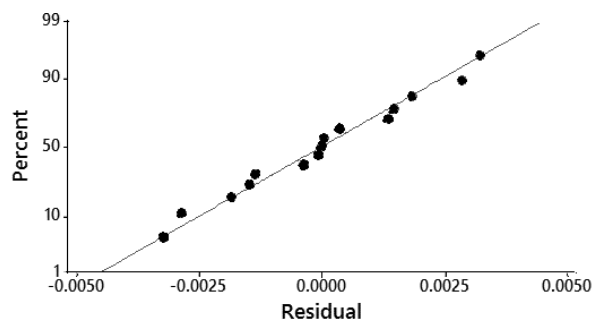


Fig. 5 Normal probability plot

شکل 5 نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی‌مانده

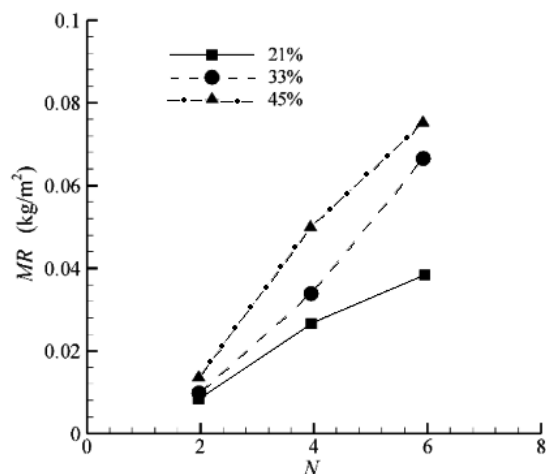


Fig. 6 Effect of number of cycles and abrasive concentration on material removal

شکل 6 نمودار تأثیر نسبت جرمی و تعداد سیکل براده‌برداری بر مقدار براده‌برداری

1. ANOVA  
2. Minitab

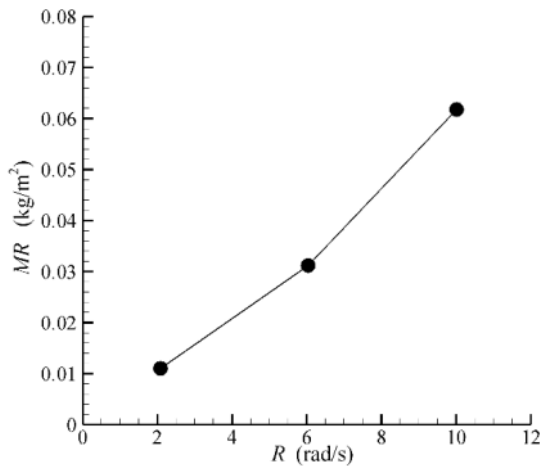


Fig. 11 Effect of rotational speed on material removal

شکل 11 نمودار مقدار براده‌برداری بر حسب سرعت دورانی محور

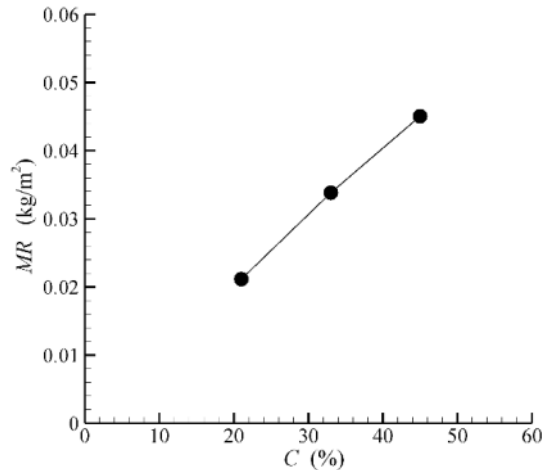


Fig. 9 Effect of abrasive concentration on material removal

شکل 9 نمودار مقدار براده‌برداری بر حسب درصد جرمی ذرات ساینده

### 5- نتیجه‌گیری

ماشین‌کاری با سیال ساینده یکی از روش‌های پیشرفته پرداخت سطح است که برای قطعات پیچیده صنعتی کاربرد فراوانی دارد. به دلیل پایین بودن میزان براده‌برداری و زمان‌بر بودن این فرایند، استفاده از نیروی گریز از مرکز، به منظور بالا بردن نرخ براده‌برداری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این تحقیق، ابتدا شبیه‌سازی فرایند ماشین‌کاری با سیال ساینده در داخل یک لوله، انجام گرفت و نتیجه آن با مقادیر تجربی تحقیقات قبلی راستی‌آزمایی گردید. در ادامه با قرار دادن یک محور چرخان در مرکز لوله، تأثیر چرخش محور بر میزان براده‌برداری بررسی شد. بر اساس نتایج بدست آمده، نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش محور، باعث افزایش بیش از 64 برابری مقدار براده‌برداری می‌شود.

در ادامه با استفاده از روش سطح پاسخ، آزمایش‌هایی طراحی شد و تأثیر پارامترهای سرعت چرخش محور، تعداد سیکل براده‌برداری و درصد جرمی ذرات ساینده بر میزان براده‌برداری مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با افزایش 57 درصدی و 114 درصدی نسبت جرمی ذرات ساینده، مقدار براده‌برداری نیز به ترتیب 60 درصد و 113 درصد افزایش می‌یابد. همچنین با سه برابر شدن سرعت چرخش محور، مقدار براده‌برداری 2.84 برابر و با پنج برابر شدن سرعت چرخش محور، مقدار براده‌برداری 5.56 برابر شده است. در نهایت با افزایش تعداد سیکل براده‌برداری نیز مقدار براده‌برداری افزایش یافته است. در این حالت با دو و سه برابر شدن تعداد سیکل براده‌برداری، مقدار براده‌برداری نیز به ترتیب 2.84 و 5.53 برابر شده است. در انتها یک مدل رگرسیونی بر اساس پارامترهای مؤثر ارائه گردید که می‌تواند میزان براده‌برداری در فرایند ماشین‌کاری با ذرات ساینده را پیش‌بینی کند.

### 6- مراجع

- [1] H.-J. Tzeng, B.-H. Yan, R.-T. Hsu, Y.-C. Lin, Self-modulating abrasive medium and its application to abrasive flow machining for finishing micro channel surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, No. 11-12, pp. 1163-1169, 2007.
- [2] C. Valente, J. Oliveira, A new approach for tool path control in robotic deburring operations, *ABCM Symposium Series in Mechanitronics*, Vol. 1, pp. 124-133, 2004.
- [3] V. K. Jain, *Advanced machining processes*, Second Edition, New Dehli: Allied publishers, 2004.
- [4] T. Loveless, R. Williams, K. Rajurkar, A study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces, *Journal of Materials*

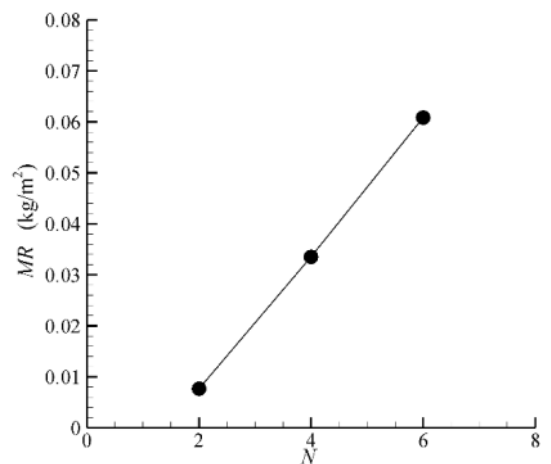


Fig. 10 Effect of number of cycles on material removal

شکل 10 نمودار مقدار براده‌برداری بر حسب تعداد سیکل براده‌برداری

در شکل 11 میزان تأثیر پارامتر سرعت چرخش محور بر نرخ براده‌برداری آورده شده است. با افزایش سرعت دورانی، سرعت ذرات ساینده برخوردی به قطعه‌کار افزایش یافته است. همچنین به دلیل وجود سرعت شعاعی، ذرات به سمت دیواره قطعه‌کار رانده شده که این عمل باعث افزایش تعداد برخورد ذرات ساینده به قطعه‌کار می‌شود و به همین دلیل میزان براده‌برداری افزایش می‌یابد که این نتیجه با انتظارات تطابق دارد. با سه برابر شدن سرعت چرخش محور، مقدار براده‌برداری 2.84 برابر و با پنج برابر شدن سرعت چرخش محور، مقدار براده‌برداری 5.56 برابر شده است.

ضریب  $R^2$  که ضریب همبستگی است برای این نتایج مقدار 96.09 درصد به دست آمد که نشان‌دهنده این است که معادله‌ی به‌دست‌آمده از طریق نرم‌افزار تطابق خوبی با داده‌ها دارد. مدل رگرسیونی عمومی به‌دست‌آمده برای میزان براده‌برداری بر حسب کیلوگرم بر مترمربع، به‌صورت رابطه (4) است.

$$MR = 0.0701 - 0.001512C - 0.01686N - 0.01469R + 0.000325R \times R + 0.000369C \times N + 0.000193C \times R + 0.002725N \times R \quad (4)$$

در رابطه (4)،  $C$  نشانگر درصد جرمی ذرات ساینده،  $N$  نشانگر تعداد سیکل و  $R$  نشان‌دهنده سرعت دورانی محور است. همان‌طور که در رابطه فوق آمده است، پارامترهای سرعت چرخش و تعداد سیکل بیشترین تأثیر را داشته و نیز مشخص است که تعاملات دوتایی بین پارامترها تأثیر کمتری دارد.

- [12] R. Walia, H. Shan, P. Kumar, Abrasive flow machining with additional centrifugal force applied to the media, *Machining science and technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 341-354, 2006.
- [13] R. Walia, H. Shan, P. Kumar, Parametric optimization of centrifugal force-assisted abrasive flow machining (CFAAFM) by the Taguchi method, *Materials and manufacturing processes*, Vol. 21, No. 4, pp. 375-382, 2006.
- [14] M. K. Reddy, A. Sharma, P. Kumar, Some aspects of centrifugal force assisted abrasive flow machining of 2014 Al alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 7, pp. 773-783, 2008.
- [15] R. Singh, R. S. Walia, Study the Effects of Centrifugal Force on Abrasive Flow Machining Process, *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 34-39, 2012.
- [16] B. Brar, R. Walia, V. Singh, M. Sharma, A Robust Helical Abrasive Flow Machining (HLX-AFM) Process, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, Vol. 94, No. 1, pp. 21-29, 2013.
- [17] A. Fluent, 12.0 Theory Guide, *Ansys Inc*, Vol. 5, 2009.
- [18] V. Jain, S. Adsul, Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 7, pp. 1003-1021, 2000.
- [5] L. Rhodes, Abrasive flow machining: a case study, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 28, No. 1-2, pp. 107-116, 1991.
- [6] TR. Kumar, *Theoretical and experimental investigations into abrasive flow machining process* Thesis, Mach Tech Thesis, I. I. T. Kanpur, 1998.
- [7] R. K. Jain, V. K. Jain, P. Dixit, Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 12, pp. 1903-1923, 1999.
- [8] N. Jain, V. Jain, S. Jha, Parametric optimization of advanced fine-finishing processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, No. 11-12, pp. 1191-1213, 2007.
- [9] Z. Mazur, R. Campos-Amezcuca, G. Urquiza-Beltrán, A. García-Gutiérrez, Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop valve of a steam turbine, *Applied thermal engineering*, Vol. 24, No. 13, pp. 1877-1891, 2004.
- [10] S. Ji, F. Xiao, D. Tan, Analytical method for softness abrasive flow field based on discrete phase model, *Science China Technological Sciences*, Vol. 53, No. 10, pp. 2867-2877, 2010.
- [11] Y. Zhang, B. S. McLaury, S. A. Shirzai, Effects of Multiple Impacts and Size Distribution of Particles on Erosion Predictions Using CFD, *ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 2007, pp. 405-412.