



شبیه‌سازی عددی فرایند ماشین‌کاری با سیال ساینده به کمک نیروی گریز از مرکز

مجتبی اسماعیلیان¹، محمدعلی نوارچیان²، حسین امیرآبادی^{3*}

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

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، hamirabadi@birjand.ac.ir

کلیدواژگان

چکیده

ماشین‌کاری با سیال ساینده

نیروی گریز از مرکز

شبیه‌سازی عددی

نرخ براده‌برداری

پرداخت‌کاری به کمک سیال ساینده یکی از روش‌های براده‌برداری نوین جهت صیقل‌دهی سطوح خارجی، لب‌ها و قسمت‌های داخلی قطعه‌های صنعتی با تolerانس‌های بسته و کیفیت عالی محسوب می‌شود. در این فرایند یک سیال ویسکوز که حاوی ذرات ساینده می‌باشد تحت فشار از اطراف و یا داخل قطعه مورد نظر به صورت رفت و برگشتی عبور داده می‌شود و طی آن به مرور سطح قطعه کار، به صافی سطح مطلوب خواهد رسید. یکی از موانع در کاربرد صنعتی این روش، پایین بودن نرخ براده‌برداری است. برای رفع این مشکل، استفاده از نیروی گریز از مرکز جهت افزایش نرخ براده‌برداری توسط محققان پیشنهاد شده است. در این پژوهش فرایند ماشین‌کاری با سیال ساینده به کمک نیروی گریز از مرکز توسط نرم‌افزار ANSYS CFX شبیه‌سازی شده است. سپس به کمک روش سطح پاسخ طراحی آزمایش انجام شده و به منظور بررسی اثر پارامترهای سرعت دورانی قطعه کار، تعداد سیکل و فشار اکستروژن و همچنین جهت بررسی اثرهای تعاملی آن‌ها بر روی میزان براده‌برداری از روش آنالیز واریانس استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، سرعت دورانی قطعه کار و تعداد سیکل نسبت به فشار اکستروژن تأثیر بیشتری بر میزان براده‌برداری دارد. در نهایت یک معادله رگرسیون جهت پیش‌بینی میزان براده‌برداری در این فرایند بر اساس پارامترهای مؤثر ارائه شده است.

Numerical simulation of centrifugal force assisted abrasive flow machining

Mojtaba Esmailian¹, Mohammad Ali Navarchian¹, Hossein Amirabadi^{2*}

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

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

*P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran. hamirabadi@birjand.ac.ir

Keywords

Abrasive flow machining
Centrifugal force
Numerical simulation
Material removal rate

Abstract

Abrasive flow machining is one of the modern processes for polishing external surfaces, edges and internal surfaces of industrial parts with close tolerances and superior quality. In this method a viscose fluid which includes abrasive grains, will pass through internal and external features under pressure in a reciprocating motion wherein work piece surface gradually achieves desired surface quality. Low removal rate is one of its restrictions in industrial application. Accordingly, to overcome this drawback, application of centrifugal force is proposed by researchers to improve the removal rate. In this research abrasive flow machining assisted with centrifugal force has been simulated by ANSYS CFX. Next, using response surface method, design of experiment is done, and variance analysis method is applied to investigate the effect of rotational velocity parameters of work piece, number of cycles and extrusion pressure and also their interaction effects on material removal rate. According to the results, the rotational velocity of work piece and numbers of cycles has a greater effect on the material removal rate than extrusion pressure. In this process, a regression equation is introduced for predicting the material removal rate.

1- مقدمه

هزینه پایین را دارد و اغلب به منظور کاهش زمان و هزینه پرداخت‌کاری، پس از پرداخت اولیه سطوح جهت پرداخت نهایی، از AFM استفاده می‌شود. این روش، جزء روش‌های براده‌برداری نوین به شمار می‌آید که علاوه بر بهبود کیفیت سطح، سبب بالا رفتن مقاومت خستگی مکانیکی و حرارتی قطعات تحت تنش می‌شود. در روش AFM همان‌طور که در

پرداخت‌کاری نهایی اجزای پیچیده و دقیق از فرایندهایی است که نیازمند زمان و هزینه زیاد می‌باشد و در حدود 10-15 درصد از کل هزینه تولید را شامل می‌شود [1]. پرداخت‌کاری با سیال ساینده (AFM)¹، پتانسیل تولید قطعات با دقت بالا و

¹ Abrasive Flow Machining

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Esmailian, M. A. Navarchian, H. Amirabadi, Numerical simulation of centrifugal force assisted abrasive flow machining, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 70-79, 2016 (in Persian)

با افزایش میزان درصد حجمی ذرات ساینده در ماده حامل، نرخ باربرداری افزایش و کیفیت سطح بهبود می‌یابد و در بین پارامترها، نسبت حجمی ذرات ساینده، اندازه آن‌ها و تعداد سیکل‌ها بیش‌ترین تأثیر را بر نرخ باربرداری دارند.

گورونا و همکارانش [8] یک مدل تئوری از نیروی وارد شده بر هر یک از دانه‌های ساینده را گسترش دادند تا مکانیزم پرداخت در فرایند AFM را مطالعه نمایند. سپس مدل بدست آمده را با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه کردند. پتری و همکارانش [9] از روش شبکه عصبی برای ایجاد مدل فرایند AFM استفاده نموده و سه الگوریتم شبکه عصبی جهت پرداخت، باربرداری از سطح با یک جریان دایره‌ای و باربرداری از سطح با یک مسیر جریان غیر دایره‌ای معرفی کرده و چند مدل برای پیش‌بینی پرداخت سطح و تغییرات ابعادی بدست آوردند. این مدل‌ها با یک الگوریتم جستجوی ابتکاری بهینه شدند تا پارامترهای تنظیمی ماشین‌کاری برای فرایند پرداخت با جریان مواد ساینده انتخاب شود.

لام و همکارش [10, 11] از مدل‌سازی شبکه عصبی تصحیح کننده سری^۲ جهت پرداخت چندراشه^۳ های ورود هوا به موتور اتومبیل استفاده نمودند. آن‌ها از این مدل برای پیش‌بینی زمان توقف فرایند (زمانی که در سطح مورد نظر از لحاظ کیفیت و میزان زبری به مقدار مناسب رسیده باشد) بهره گرفتند.

شبرگرد و همکارانش [12] فرایند پرداخت کاری فولاد گرم- کار AISI H13 را به روش جریان ساینده، به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و با انجام آزمایش‌هایی تأثیر پارامترهای فشار اکستروژن، غلظت و اندازه ذرات ساینده را بر روی میزان برداشت ماده و میزان زبری مورد مطالعه قرار دادند.

یکی از نوآوری‌هایی که در زمینه AFM صورت گرفته است، اعمال نیروی گریز از مرکز، به قطعه کار و سیال ساینده می‌باشد. در این روش، علاوه بر حرکت رفت و برگشتی سیال، خود قطعه کار نیز با یک سرعت دورانی می‌چرخد. دوران قطعه کار موجب اعمال نیروی گریز از مرکز به سیال ساینده و در نتیجه افزایش سرعت و چگالی ذرات ساینده می‌شود، که این تغییرات باعث بالا رفتن نرخ براده‌برداری خواهد شد. استفاده از نیروی گریز از مرکز در فرایند AFM در کارهای تجربی مورد بررسی قرار گرفته‌است، ولی بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که، تحقیقات صورت گرفته تا کنون، شامل شبیه‌سازی فرایند AFM به همراه نیروی گریز از مرکز نمی‌باشد.

شکل 1 شماتیک دستگاه ماشین‌کاری با سیال ساینده نشان داده شده است، یک سیال ویسکوز که شامل ذرات ساینده می‌باشد تحت فشار از اطراف و یا داخل قطعه مورد نظر به صورت رفت و برگشتی عبور می‌نماید و طی این فرایند به مرور سطح قطعه کار، به صافی مطلوب خواهد رسید [2].

ماشینی کردن جریان ساینده برای اولین بار در جهان، توسط شرکت اکسترودهون^۱ آمریکا در سال 1960 صورت گرفت [3]. تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه AFM صورت گرفته که در ادامه به تعدادی از تحقیقات مرتبط با نحوه مدل‌سازی ریاضی، شبیه‌سازی عددی، مدل‌سازی شبکه عصبی و کارهای تجربی اشاره شده است.

رهوداس و همکارانش به طور تجربی اصول پایه فرایند AFM را بررسی و پارامترهای کنترلی آن را مشخص کردند [4-6]. آن‌ها مشاهده کردند وقتی ماده به طور ناگهانی تحت فشاری درون یک مسیر محدود و مشخص قرار گیرد، ویسکوزیته آن به طور موقتی افزایش می‌یابد و مقدار سایش حین فرایند به طراحی ابزار، فشار اکستروژن، ویسکوزیته ماده و حجم جریان ماده بستگی دارد. همه این پارامترها به نوعی تعداد ذرات در تماس با سطح قطعه کار و نیروی وارد شونده بر هر ذره ساینده را تغییر می‌دهند.

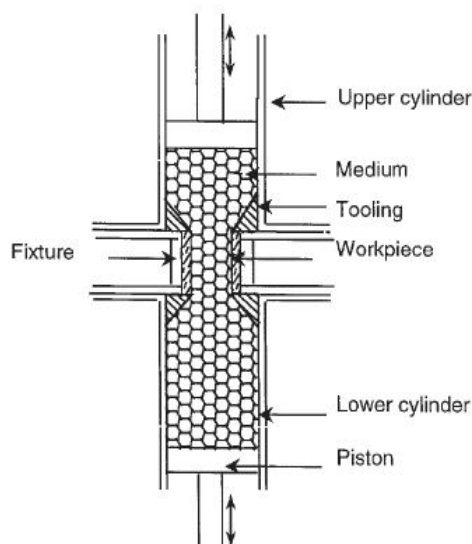


Fig. 1 Schematic of abrasive flow machining process [2]

شکل 1 نمایی از دستگاه ماشین‌کاری با سیال ساینده [2]

چین و همکارش [7] گزارش کردند، زبری سطح اولیه و سختی قطعه کار بر نرخ باربرداری در فرایند AFM تأثیر گذارند.

² Cascade-Correlation neural network

³ Manifold

¹ Extrude Hone

فشار وارده از طرف ذرات ساینده به دیواره قطعه‌کار، از جمله پارامترهایی است که می‌تواند نرخ براده‌برداری و سرعت پرداخت سطح را به میزان زیادی تحت تأثیر قرار دهد. در فرایندهای پرداخت‌کاری سطوح داخلی، اعمال نیروی گریز از مرکز به سیال ساینده، باعث افزایش سرعت برخورد ذرات با دیواره جسم و افزایش فشار وارد بر دیواره می‌شود که نتیجه آن، افزایش چشم‌گیر نرخ براده‌برداری و سرعت پرداخت سطح می‌گردد [6]. برای ایجاد نیروی گریز از مرکز راه‌های متنوعی وجود دارد که یکی از آن‌ها چرخش خود قطعه‌کار است. این روش باعث می‌شود که ذرات ساینده در حین برخورد با سطح قطعه‌کار مسیر مارپیچی را طی نمایند، به این طریق طول تماس دانه سایشی فعال در قطعه‌کار افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 2 قابل مشاهده است، قطعه‌کار به کمک موتور و جعبه‌دنده، قابلیت دوران با سرعت‌های مختلف را دارد.

3- تئوری حل و معادلات حاکم

در فرایند AFM سیال ساینده در اثر فشار اکستروژن (P)، در داخل قطعه‌کار با سرعت رفت و برگشتی Va حرکت می‌کند و موجب اعمال نیروی محوری Fa به سطح قطعه‌کار می‌گردد، (شکل‌های 3- الف و 4- الف). در اثر رفتار ویسکوالاستیک² سیال عامل یک نیروی شعاعی Fr نیز بر سطح قطعه‌کار وارد می‌شود، (شکل‌های 3- ب و 4- ب). نیروهای Fa و Fr با فشار اکستروژن (P) و ویسکوزیته سیال عامل متناسب‌اند.

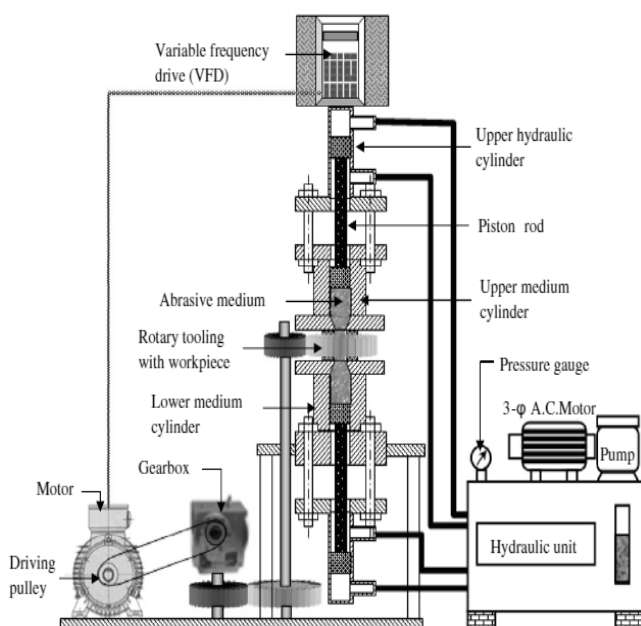


Fig. 2 A schematic from CFAAFM process equipment [2]

شکل 2 نمای از دستگاه و تجهیزات فرایند CFAAFM [2]

والیا و همکارانش [13,14] پارامترهای مؤثر بر فرایند AFM را بهینه‌سازی و مدلی جهت ساخت دستگاه AFM ارائه کردند. آن‌ها همچنین در تحقیقی دیگر [15] با ارائه مدل تحلیلی برای فرایند AFM تحت نیروی گریز از مرکز به بررسی اثر سرعت دورانی قطعه، اندازه ذرات ساینده و تعداد سیکل‌های فرایند بر صافی سطح نهایی پرداختند.

سانکار و همکارانش [2] به بررسی تجربی فرایند پرداخت سطح و مقایسه نتایج در دو حالت قطعه‌کار چرخان و قطعه‌کار ثابت و نیز به بررسی اثر فشار سیال و تعداد سیکل‌های فرایند بر صافی سطح نهایی پرداختند و یک مدل ریاضی جهت پیش‌بینی میزان براده‌برداری و صافی سطح نهایی برای فرایند AFM ارائه کردند. شناخت بهتر فرایند و امکان پیش‌بینی نتیجه کار قبل از انجام تست‌های تجربی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در بیشتر پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده است برای بدست‌آوردن میزان براده‌برداری در فرایند AFM از آزمایش‌های تجربی استفاده شده است که نیاز به هزینه و زمان زیادی دارد. در تعداد محدودی از کارهای عددی انجام شده میزان براده‌برداری مستقیماً از حل عددی محاسبه نشده است، بلکه از روابط مربوط به فرایندهایی نظیر سنگ‌زنی استفاده می‌شود و متغیرهای مورد نیاز این روابط از حل عددی بدست آمده‌اند. در حالی که هدف از این پژوهش، محاسبه میزان براده‌برداری در فرایند AFM، با در نظر گرفتن نیروی گریز از مرکز، از حل عددی می‌باشد. بدین منظور ابتدا فرایند AFM مدل و نتیجه آن با داده‌های تجربی موجود اعتبارسنجی شده، سپس با اضافه نمودن نیروی گریز از مرکز به کمک دوران قطعه‌کار، تأثیر این نیرو بر افزایش نرخ براده‌برداری مشاهده می‌شود. در ادامه با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ سعی خواهد شد تأثیر پارامترهای ورودی شامل سرعت دورانی، فشار اکستروژن و تعداد سیکل‌ها بر میزان براده‌برداری در این فرایند بررسی شود.

2- پرداخت‌کاری با سیال ساینده به کمک نیروی گریز از

مرکز¹ CFAAFM

یکی از نقاط ضعف فرایند AFM، سرعت کم پرداخت سطحی است. بنابراین تلاش برای افزایش نرخ براده‌برداری ادامه دارد. برای رسیدن به عملیات دقیق پرداخت سطحی بدون تداخل عملکرد، درک از روابط درونی بین پارامترهای ورودی و خروجی نیاز است. این امر در شناخت شرایط مطلوب پرداخت سطحی و ترکیبات مطلوب آن‌ها مؤثر است [16].

² Visco-Elastic

¹ Centrifugal Force Assisted Abrasive Flow Machining

در روابط (1)، m جرم یک ذره، r شعاع چرخش آن، ω سرعت دورانی، μ ویسکوزیته سیال، d_p قطر ذره و V_c سرعت حرکت ذره به سمت دیواره قطعه کار است.

اگر F_c در بازه زمانی کوچک dt ثابت فرض شود، V_c از روابط (2) بدست خواهد آمد:

$$F_c - F_{drag} = m \frac{dV_c}{dt}, \quad F_c - 3\pi\mu d_p V_c = m \frac{dV_c}{dt}$$

$$\int \frac{dV_c}{F_c - 3\pi\mu d_p V_c} = \frac{1}{m} \int dt \rightarrow$$

$$\frac{\ln(F_c - 3\pi\mu d_p V_c)}{-3\pi\mu d_p} = \frac{t}{m} + k \quad (2)$$

با اعمال شرایط مرزی $V_c = 0, t = 0$ رابطه (3) بدست می‌آید:

$$k = \frac{\ln F_c}{-3\pi\mu d_p} \quad (3)$$

$$\frac{\ln(F_c - 3\pi\mu d_p V_c)}{-3\pi\mu d_p} = \frac{t}{m} + \frac{\ln F_c}{-3\pi\mu d_p}$$

بنابراین:

$$F_c - 3\pi\mu d_p V_c = e^{\Delta C} \quad (4)$$

که در آن:

$$\Delta C = -3\pi\mu d_p \left[\left(\frac{t}{m} \right) + (\ln F_c - 3\pi\mu d_p) \right]$$

با توجه به مقادیر m و μ می‌توان روابط (5،6) را نوشت:

$$F_c - 3\pi\mu d_p V_c \cong 0 \quad (5)$$

$$V_c = \frac{F_c}{3\pi\mu d_p} \quad (6)$$

بنابراین برآیند سرعت ذره ساینده (V_r) که مسیر حرکت ذره را نیز تعیین می‌کند و از سرعت‌های V_c و V_a بدست می‌آید بصورت رابطه (7) تعریف می‌شود:

$$V_r = \sqrt{V_a^2 + V_c^2} \quad (7)$$

در چنین شرایطی زاویه α (زاویه حمله یا اصابت) که زاویه برخورد ذره ساینده به دیواره قطعه کار است بدست می‌آید:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_c}{V_a} \right) \quad (8)$$

از آنجا که ماهیت فیزیکی سیال عامل نیمه‌جامد است، بنابراین فرایند پرداخت کاری دقیقاً در جهت α رخ نمی‌دهد.

در فرایند CFAAFM قطعه کار به هنگام چرخش با سرعت مماسی V_t ، در یک شرایط دینامیکی قرار می‌گیرد. بنابراین به سطح قطعه کار نیروی مماسی F_t نیز وارد می‌شود، که در شکل 5 نشان داده شده است.

عمق براده‌برداری به F_r بستگی دارد، در حالی که میزان براده‌برداری به F_a و F_t وابسته است:

$$F_s = \sqrt{F_a^2 + F_t^2} \quad (9)$$

که F_s نیروی برشی نهایی بر سطح قطعه کار است.

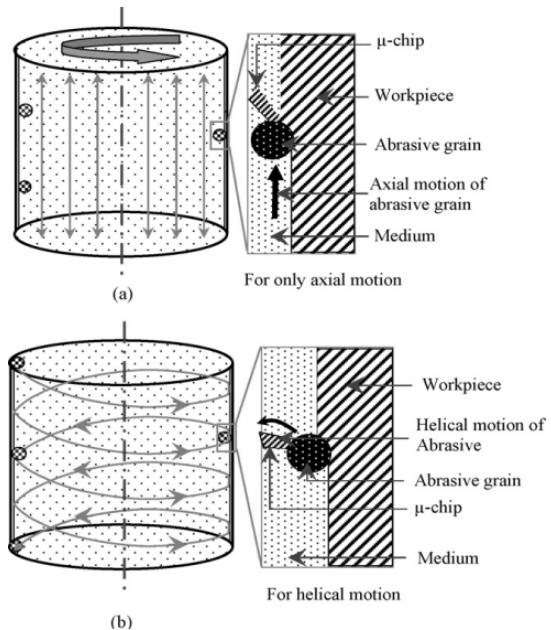


Fig. 3 Abrasive medium motions, (a) two motions of CFAAFM shown individually (medium reciprocation and workpiece rotary motion) in CFAAFM, (b) approximately helical finishing path on the workpiece surface as a result of simultaneous axial and rotary motions[1]

شکل 3 حرکات سیال عامل (الف) حرکت رفت و برگشتی سیال عامل و حرکت دورانی قطعه کار به صورت جداگانه. (ب) مسیر پرداخت کاری تقریباً مارپیچی ناشی از حرکات دورانی و محوری [1]

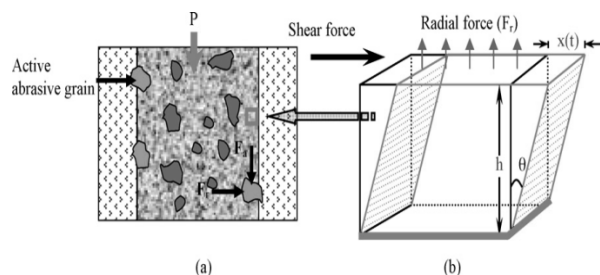


Fig. 4 (a) Forces acting on a single grain in AFF process, (b) viscoelastic medium material behavior of exerting radial force normal to applied shear force direction[1]

شکل 4 (الف) نیروی وارد بر یک ذره در فرایند AFF. (ب) اعمال نیروی شعاعی عمود بر جهت نیروی برشی ناشی از رفتار ویسکوالاستیک سیال عامل [1].

عمق دندانه‌های ایجاد شده روی قطعه کار، بستگی به F_r و مقاومت فشاری مربوطه سیال عامل دارد، اما دندانه‌ها در سرعت‌های پایین رخ می‌دهد که در این حالت سرعت شعاعی نادیده گرفته شده است. در ویسکوزیته و فشار اکستروژن بالاتر، نسبت نیروی (F_r / F_a) بیشتر می‌شود و به عبارتی مقدار افزایش در F_r بیش از F_a خواهد شد.

$$F_r = F_c - F_{drag} \quad (1-الف)$$

$$F_c = m r \omega^2 \quad (1-ب)$$

$$F_{drag} = 3\pi\mu d_p V_c \quad (1-ج)$$

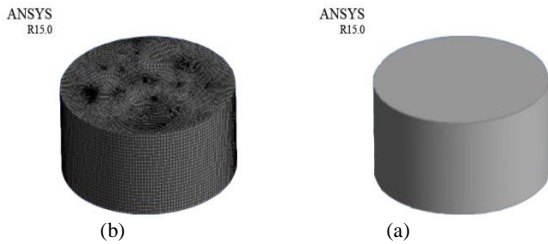


Fig. 6 (a) 3D workpiece model (b) Grids of the calculation domain

شکل 6 (الف) مدل سه‌بعدی قطعه کار (ب) دامنه حل شبکه‌بندی شده

این امر همچنین برای جلوگیری از خطاهای گرد کردن¹، که برای مثال در حل معادلات خطی توسط گسسته‌سازی به وجود می‌آیند، نقش مهمی ایفا می‌کند. بنابراین یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر حل عددی ایجاد یک شبکه محاسباتی مناسب است و باید در هر مسأله اثر اندازه شبکه، روی نتایج بدست آمده بررسی شده تا به کم‌هزینه‌ترین و دقیق‌ترین حل عددی دست یافت. برای این منظور میزان براده‌برداری برای شش اندازه شبکه متفاوت محاسبه شده و نتایج در شکل 7 آورده شده است:

با توجه به شکل 7 مشخص است که میزان براده‌برداری در سه نمونه آخر یعنی تعداد المان‌های 120000، 128000 و 140000 با دقت بسیار خوبی تقریباً برابر است، که به دلیل تغییر ناچیز در این ناحیه می‌توان از این تغییر چشم‌پوشی کرد. بنابراین با در نظر گرفتن امکانات سخت‌افزاری و برای کاهش هزینه محاسبات، از شبکه با 120000 المان استفاده شده است.

3-4- جزئیات شبیه‌سازی

حل گر CFX برای مدل‌سازی فرایند سایش و میزان براده‌برداری از رابطه پیچیده‌ای استفاده می‌کند که خواص ذره و دیواره و نیز اثرات برخورد ذره به دیواره در آن دیده شده است. این رابطه به شرح زیر است:

$$E = kV_p^n f(\gamma) \quad (12)$$

که در آن E جرم بی بعد، V_p سرعت برخورد ذره ساینده به دیواره قطعه‌کار، n عدد ثابتی که تابع جنس دیواره است، $f(\gamma)$ تابع بی‌بعد زاویه اصابت که در طی فرایند حل و با سایش دیواره قطعه‌کار مرتباً در حال تغییر است و k ثابتی است که بر اساس سرعت اولیه برخورد ذره ساینده به دیواره تعیین می‌شود.

در فرایند شبیه‌سازی CFAAFM، ابتدا به شبیه‌سازی فرایند AFM پرداخته شده و پس از مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایش‌های تجربی و مطمئن شدن از صحت حل، با اعمال سرعت دورانی به قطعه‌کار، اثر اعمال نیروی گریز از مرکز بر سرعت و میزان براده‌برداری بررسی شده است.

طی فرایند CFAAFM یکی از دو شرایط زیر اتفاق می‌افتد:

$$F_{req} < F_s \quad (10-الف)$$

$$F_{req} \geq F_s \quad (10-ب)$$

F_{req} مقاومتی است که قطعه‌کار در برابر نیروی برشی و

براده‌برداری از خود نشان می‌دهد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{req} = \tau_s A_p \quad (11)$$

که در آن τ_s مقاومت برشی قطعه‌کار و A_p سطح نفوذ

تصویر شده است که البته در فرایند حل عددی در هر بازه زمانی تغییر می‌کند. در چنین شرایطی اگر $F_s > F_{req}$ باشد، براده‌برداری انجام می‌گیرد و شروع براده‌برداری در حالت $F_s = F_{req}$ خواهد بود [1].

4- شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش، مدل‌سازی برخورد سیال ساینده و سطح داخلی یک استوانه دوار، با نرم‌افزار ANSYS CFX انجام شده است. این برنامه قابلیت ایجاد طیف وسیعی از قابلیت‌های مدل‌سازی برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر، آرام و مغشوش و مدل‌های ریاضی برای برهم‌کنش بین دو فاز سیال و جامد را دارا می‌باشد، که قادر به ترکیب با مدل‌سازی هندسه پیچیده نیز می‌باشد.

4-1- تولید یک مدل سه‌بعدی و شبکه بندی

در محاسبات CFD، برای شروع فرایند تجزیه و تحلیل تعامل بین سیال و جسم جامد، اولین گام، ایجاد یک مدل سه‌بعدی از جسم جامد و تعیین دامنه حل مورد نظر است. برای این منظور مدل سه‌بعدی قطعه‌کار ایجاد شده است و در ادامه جهت تعیین دامنه حل و شبکه‌بندی پرداخته شده است. شکل 6 نمایی از قطعه‌کار را نشان می‌دهد.

4-2- بررسی استقلال از اندازه شبکه

استفاده از شبکه‌ای با کیفیت مناسب، نقش بسیار مهمی در کنترل خطای گسسته‌سازی دارد.

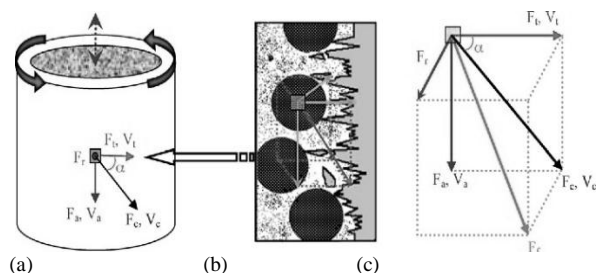


Fig. 5 Forces and velocity components in CFAAFM process in the finishing region [1]

شکل 5 مؤلفه‌های نیرو و سرعت در فرایند CFAAFM [1]

¹ Round-Off Errors

مشخصات جریان (سرعت و فشار و تعداد سیکل‌ها) و تأثیرگذارند. طبق بررسی‌های انجام شده، در این پژوهش به بررسی اثر سه پارامتر کلیدی فشار، تعداد سیکل‌ها و سرعت دورانی قطعه‌کار بر روی میزان براده‌برداری پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ¹، آزمایش‌هایی برای این سه پارامتر به صورت سه سطحی طراحی و سایر پارامترها ثابت فرض شده است. پارامترهای متغیر و ثابت ورودی به ترتیب در جداول 2 و 3 آمده است. برای یک حوزه محاسباتی مشخص، شرایط مرزی صحیح از اهمیت بسزایی برخوردار است. از آنجا که جریان در داخل قطعه‌کار به صورت رفت و برگشتی است، لذا یافتن روشی جهت مدل‌سازی شرایط مرزی ورودی و خروجی، کار نسبتاً پیچیده‌ای است.

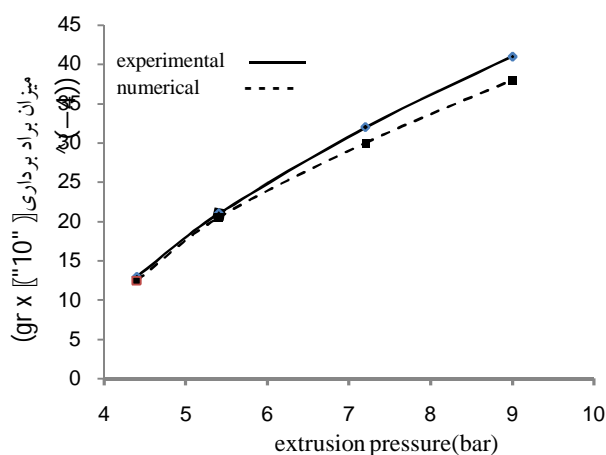


Fig. 9 Variation of material removal versus extrusion pressure for experimental and numerical results [17]

شکل 9 تغییرات میزان براده‌برداری بر حسب فشار برای نتایج تجربی و عددی [17]

جدول 1 مقایسه نتایج شبیه‌سازی با چرخش قطعه‌کار و بدون چرخش
Table 1 Comparison of results of simulation for rotary workpiece and stationary workpiece

شرح کار	براده‌برداری (g*10 ⁻⁴)
شبیه‌سازی با چرخش قطعه‌کار	1641
شبیه‌سازی بدون چرخش قطعه‌کار	18

جدول 2 پارامترهای مؤثر وسطوح تغییرات آنها

Table 2 Effective parameters and their variation surfaces

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
سرعت دورانی (rpm)	50	100	150
تعداد سیکل	25	50	75
فشار اکستروژن (MPa)	2	3	4

¹ Respond Surface Method

برای این منظور فرایند AFM ساده برای تعداد سیکل 50 شبیه‌سازی شده و در شکل‌های 8 و 9 با نتایج تجربی مقایسه شده است. میزان براده‌برداری بدست آمده از حل عددی نسبت به نتایج تجربی خطای قابل قبول 5 درصد را نشان می‌دهد. سپس در ادامه برای بررسی اثر نیروی گریز از مرکز، قطعه‌کار در همان شرایط قبلی دوران داده شده و همان‌گونه که در جدول 1 ملاحظه می‌شود، مقدار براده‌برداری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

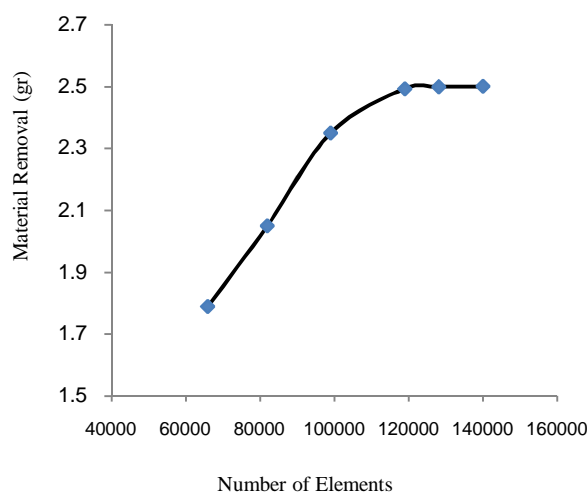


Fig. 7 Variation of material removal versus grids size (Number of elements)

شکل 7 تغییرات میزان براده‌برداری بر حسب اندازه شبکه (تعداد المان)

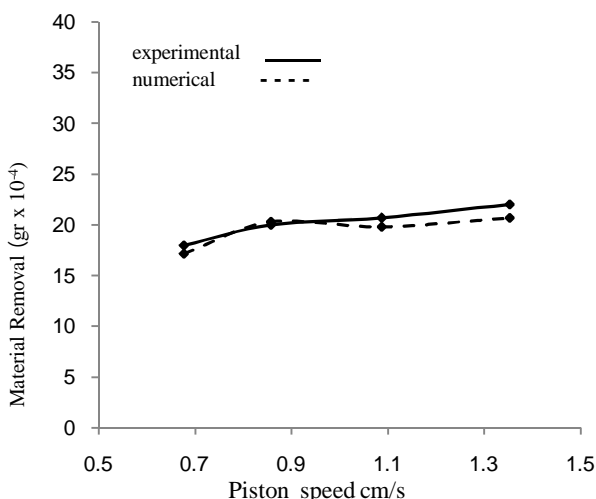


Fig. 8 Variation of material removal versus piston speed for experimental and numerical results [17]

شکل 8 تغییرات میزان براده‌برداری بر حسب سرعت برای نتایج تجربی و عددی [17]

در فرایند CFAAFM پارامترهای گوناگونی از قبیل جنس و هندسه قطعه‌کار، مشخصات سیال عامل و ذرات ساینده و نیز

جدول 3 پارامترهای ثابت در حل عددی

Table 3 Constants in numerical simulation

پارامتر	شرح
جنس قطعه کار	برنج
قطر قطعه کار	30mm
ارتفاع قطعه کار	12mm
زبری اولیه	0/1mm
سرعت جریان محوری	2/1cm/s
دمای سیال عامل	25° C
رژیم جریان	آرام
نوع حل عددی	گذرا
سیال عامل	پلی پرپیلن گلیکول
ویسکوزیته سیال عامل	400cp
ذرات ساینده	کاربید سیلیکون
اندازه ذرات ساینده	0/152mm
چگالی ذرات ساینده	3/21g/cm ³
درصد جرمی ذرات ساینده	45%

دامنه حل نزدیک باشد، می‌تواند تأثیر زیادی در تسریع روند همگرایی داشته باشد، که در این پژوهش از همین روش استفاده شده است. از مهم‌ترین فرضیات در نظر گرفته شده می‌توان به نادیده گرفتن تغییرات دما در سیال و بدنه قطعه کار اشاره کرد که با توجه به نتایج تجربی و مقالات بررسی شده، کاملاً طبیعی است. نکته قابل توجه دیگر اینکه برای محاسبه اثر ذرات جامد در یک سیال پیوسته، معمولاً بین 100 تا 1000 ذره مورد نیاز است. با این حال، اگر اطلاعات دقیق‌تری در مورد کسر حجمی ذرات و نیروهای محلی در مرزهای دیوار مورد نیاز باشد، بایستی تعداد بسیار زیادی از ذرات مدل‌سازی شود. هنگام شبیه‌سازی فرایند CFAAFM می‌توان از دو مدل کوپل یک‌طرفه³ و کوپل کامل⁴ استفاده کرد. روش کوپل کامل می‌تواند اثرات ذرات جامد را روی فاز سیال پیش‌بینی کند ولی هزینه محاسباتی بیشتری را نسبت به مدل کوپل یک‌طرفه تحمیل خواهد کرد. روش کوپل یک‌طرفه مسیر حرکت ذرات را با توجه به میدان فاز سیال و بدون اثر گذاری روی میدان سیال پیش‌بینی می‌کند. با توجه به بهره‌مندی از سیستم پردازش موازی ابررایانه ملی واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان، جهت افزایش دقت محاسبات، از روش کوپل کامل استفاده شده است.

5- نتایج

با توجه به گستردگی پارامترهای مؤثر در فرایند AFM که در پژوهش‌های انجام شده پیشین به آنها اشاره شده است، ابتدا یک سری شبیه‌سازی بر اساس طراحی آزمایش دو سطحی برای پارامترهای مؤثر انجام شد و سپس پارامترهای فشار، سرعت دورانی و تعداد سیکل که بیشترین تأثیر را بر فرایند داشته‌اند، انتخاب شده است. سطوح تغییرات این پارامترها نیز، با مطالعه پژوهش‌های انجام شده و نیز با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی موجود در تست‌های تجربی (مثلاً مقاومت محدود قطعه کار در برابر فشار اکستروژن) انتخاب شده است.

برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر میزان براده‌برداری با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب⁵ و روش طراحی آزمایش سطح پاسخ، یکسری آزمایش طراحی و برای تحلیل آماری نتایج از روش آنالیز واریانس استفاده شده است. با توجه به وجود 3 پارامتر 3 سطحی و تمایل به بررسی تعاملات بین فاکتوری دوتایی، حالت باکس بنکن⁶ انتخاب شده و تعداد 15 آزمایش

بدین منظور با نوشتن تابعی برحسب زمان، به تعریف شرایط مرزی ورودی و خروجی پرداخته شده است. برای مسأله مورد نظر، شرایط مرزی شامل ورودی و خروجی تناوبی¹ و شرط مرزی دیواره است که به صورت زیر فرض شده‌اند.

مرز ورودی و خروجی تناوبی: جریان سیال ساینده با سرعت 1/2cm/s (جابه‌جایی تناوبی شرایط مرزی ورودی و خروجی در هر سیکل، به‌گونه‌ای که در هر سیکل ابتدا قسمت بالای قطعه کار ورودی و قسمت پایینی آن خروجی است و در برگشت، این شرایط مرزی معکوس خواهد شد.) و فشارهای سیال ۲،۳،۴ bar.

دیواره داخلی استوانه: دیواره با سرعت دورانی rpm ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و با شرط عدم لغزش.

لازم به ذکر است، مقدار 1e-4 برای سطح باقی‌مانده RMS² (ریشه میانگین مربعات) به عنوان یک معیار مناسب همگرایی انتخاب شده است. البته چون نوع حل به صورت زمان‌مند و گذرا است، لذا زمان کل حل به عنوان محدود کننده عمل خواهد کرد. همچنین به دلیل ویسکوزیته بالای سیال عامل و سرعت کم آن، رژیم جریان آرام می‌باشد و نیازی به استفاده از مدل‌های توربولانسی نیست.

در مورد جریان‌های پیچیده، که همگرایی مشکل است، استفاده از یک حدس اولیه یا مقادیر اولیه که به مقادیر نهایی

³ One-Way Coupling

⁴ Full Coupling

⁵ Minitab

⁶ Box Benken

¹ Periodic

² Root Mean Square

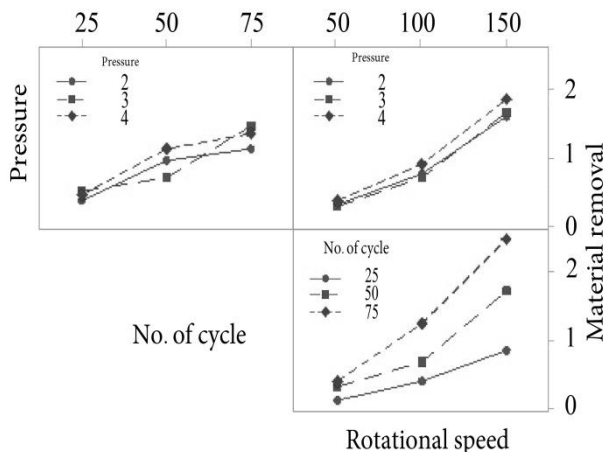


Fig. 11 Interaction effects of pressure, No of cycle and rotational speed on the material removal

شکل 11 اثرات تعاملی پارامترهای فشار، تعداد سیکل و سرعت دوران قطعه‌کار بر میزان براده‌برداری

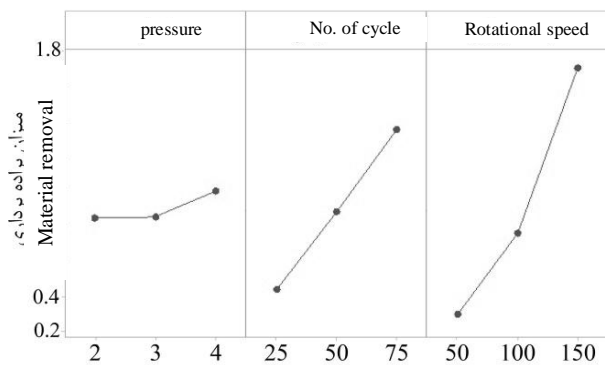


Fig. 12 Effects of pressure, No of cycle and rotational speed on the material removal

شکل 12 تاثیر پارامترهای فشار، تعداد سیکل و سرعت دوران قطعه کار بر میزان براده‌برداری

همان‌گونه که در شکل 12 مشاهده می‌شود، افزایش هر یک از پارامترهای فشار، سرعت و تعداد سیکل منجر به افزایش مقدار براده‌برداری از سطح می‌گردد که این نتیجه با انتظارات تطابق دارد. زیرا در بازه مورد بررسی با افزایش تعداد سیکل براده‌برداری، زمان فرایند براده‌برداری نیز افزایش یافته و به همین دلیل مقدار براده‌برداری افزایش یافته است. با افزایش سرعت دورانی، سرعت برخورد ذرات ساینده 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. همچنین افزایش فشار اکستروژن منجر به افزایش نیروی وارد شده از طرف ذرات ساینده به سطح قطعه‌کار شده و میزان براده‌برداری افزایش می‌یابد. از بین پارامترهای مورد بررسی سرعت دورانی بیش‌ترین

طراحی و نتایج بدست آمده در جدول 4 آمده‌است.

همچنین در شکل 10 نمودار نرمال پلات آورده شده است. با توجه به توزیع مقادیر مانده‌ها در شکل 10، صحت فرض نرمال بودن برای داده‌های آزمایش‌های انجام شده تأیید می‌شود. پس از ورود نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار، عملیات تحلیل داده‌ها انجام شد. در شکل 11 تأثیر اثرات تعاملی پارامترها بر میزان براده‌برداری نمایش داده شده است. با توجه به این که در تمامی 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.

در شکل 12 نیز تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی نشان داده شده است

جدول 4 آزمایش‌های شبیه‌سازی شده همراه با پاسخ مدل

Table 4 Simulated experiments with model response

آزمایش	فشار (بار)	تعداد سیکل	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	میزان براده‌برداری (گرم)
1	3	50	100	0/691448
2	3	75	50	0/4172257
3	4	50	150	1/8635214
4	3	75	150	2/4920356
5	2	25	100	0/361524
6	3	25	50	0/13622327
7	2	75	100	1/135244
8	4	50	50	0/36410148
9	3	25	150	0/845244
10	2	50	150	1/594118
11	2	50	50	0/2859457
12	4	25	100	0/4241631
13	3	50	100	0/691448
14	3	50	100	0/691448
15	4	75	100	1/354554

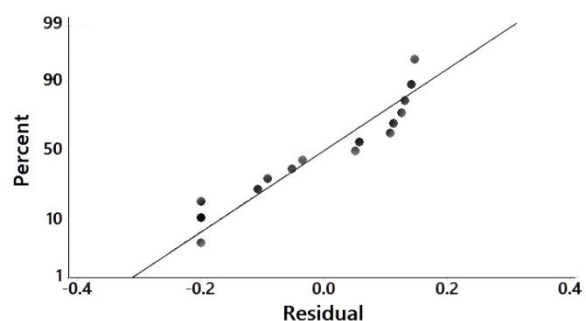


Fig. 10 Normal probability plot

شکل 10 نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی مانده

100 درصدی فشار، میزان براده‌برداری به ترتیب 6 و 31 درصد افزایش داشته است. با دو و سه برابر شدن تعداد سیکل نیز میزان براده‌برداری با یک روند روبه رشد تقریباً خطی به ترتیب 114 و 230 درصد افزایش داشته‌است. همچنین با دو و سه برابر شدن سرعت دورانی به ترتیب 144 و 440 درصد افزایش در میزان براده‌برداری مشاهده می‌شود که با توجه به رابطه نیروی گریز از مرکز با توان دوم سرعت دورانی کاملاً توجیه‌پذیر است. نهایتاً می‌توان گفت مدل توسعه داده شده توانایی شبیه‌سازی فرایند پرداخت با جریان مواد ساینده به کمک نیروی گریز از مرکز را دارد.

7- مراجع

- [1] M. Ravi Sankar, V. K. Jain, J. Ramkumar, Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing, *Wear*, Vol. 267, pp. 43–51, 2009.
- [2] M.R. Sankar, V. K. Jain, J. Ramkumar, Rotational abrasive flow finishing (R-AFF) process and its effects on finished surface topography, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, pp. 637–650, 2010.
- [3] H.J. Tzeng, B.H. Yan, R.T. Hsu, Y.C. Lin, Self-modulating abrasive medium and its application to abrasive flow machining, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 32, pp. 1163–1169, 2006.
- [4] L. J. Rhoades, Abrasive flow machining [AFM], *Manufacturing Engineering*, Vol. 101, No. 5, pp. 75-78, 1988.
- [5] L. Rhoades, Orbital and or reciprocal machining with a viscous plastic medium, *International Patent No. 05044*, 1990.
- [6] L. Rhoades, Abrasive flow machining: a case study, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 28, No. 1, pp. 107-116, 1991.
- [7] 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.
- [8] V. K. Gorana, V. K. Jain, G. K. Lal, Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining, *Wear*, Vol. 260, pp. 128-139, 2006.
- [9] K. L. Petri, R. E. Billo, B. Bidanda, A neural network process model for abrasive flow machining operations, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 52-64, 1998.
- [10] S. S. Lam, A. E. Smith, Process monitoring of abrasive flow machining using a neural network predictive model, *Proceedings of the Sixth Industrial Engineering Research Conference*, pp.

تأثیر را بر براده‌برداری دارد.

همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، افزایش سرعت و تعداد سیکل به طور همزمان تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقدار براده‌برداری دارد. همچنین افزایش فشار در مقایسه با تعداد سیکل و سرعت دورانی تأثیر کمتری بر براده‌برداری دارد. بر اساس آنالیز واریانس انجام شده، معادله رگرسیون بین پارامترهای مؤثر بر میزان براده‌برداری به صورت زیر می‌باشد که برای این معادله، ضریب همبستگی R^2 مقدار 97/02 درصد به دست آمده که نشان‌دهنده تطابق مناسب معادله به دست آمده با مقادیر داده‌ها دارد.

$$\begin{aligned} \text{Material Removal} = & 0.8899 + 0.0787 P + 0.4540 N \\ & + 0.6989 RS + 0.0392 P*N + 0.0478 P*RS \\ & + 0.3414 N *RS \end{aligned} \quad (13)$$

در رابطه فوق P ، N و RS به ترتیب بیانگر فشار، تعداد سیکل و سرعت دورانی می‌باشد. رابطه فوق، ارتباط بین پارامترهای ورودی و تعاملات آن‌ها بر میزان براده‌برداری را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تعاملات دوتایی بین پارامترها تأثیر کمتری به نسبت پارامترهای اصلی بر خروجی دارند.

6- نتیجه‌گیری

استفاده از فرایندهای ترکیبی AFM به دلیل امکان غلبه بر محدودیت‌های فرایند مانند نرخ براده‌برداری پایین، مورد توجه بسیاری محققان قرار گرفته است. فرایند پرداخت با جریان مواد ساینده به کمک نیروی گریز از مرکز، یکی از این فرایندهای ترکیبی است که اخیراً توسط پژوهشگران توسعه داده شده است. از آنجا که شناخت بهتر فرایند و امکان پیش‌بینی نتیجه کار قبل از انجام تجربی بسیار مورد اهمیت می‌باشد، لذا در این پژوهش هدف طراحی مدلی جهت شبیه‌سازی فرایند پرداخت با جریان مواد ساینده به کمک نیروی گریز از مرکز بوده، و بدین منظور در ابتدا فرایند AFM مدل و نتیجه آن با داده‌های تجربی موجود اعتبارسنجی شده است. سپس با اضافه نمودن نیروی گریز از مرکز چرخشی روی قطعه‌کار، تأثیر این نیرو بر تغییر میزان براده‌برداری مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده، نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش قطعه، باعث افزایش بیش از 91 برابری مقدار براده‌برداری می‌شود. در ادامه با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ سعی شده، تأثیر پارامترهای ورودی شامل سرعت دورانی، فشار اکستروژن و تعداد سیکل‌ها بر میزان براده‌برداری در فرایند بررسی شود. تحلیل آماری نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، با افزایش 50 و

- [15] R. S. Walia, H. S. Shan, P. Kumar, Finite element analysis of media used in the centrifugal force assisted abrasive flow machining process, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, pp. 1775-1785, 2006.
- [16] R. S. Walia, H. S. Shan, and P. Kumar, Modeling of Centrifugal-Force-Assisted Abrasive Flow Machining, *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 223, pp. 195-204, 2009.
- [17] R. K. Jain, V. K. Jain, P. M. 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.
- 477-482, 1997.
- [11] S. S. Lam, A. E. Smith, Cascade - Correlation Neural Network Modeling of the Abrasive Flow Machining Process, *International Journal of Industrial Engineering*, pp. 898-905, 1998.
- [12] M. R. Shabgard, B. Karamzadeh, R. Alizadegan and 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. 106-112, 2015. (In Persian)
- [13] R. S. Walia, H. S. Shan, and P. Kumar, Abrasive Flow Machining with Additional Centrifugal Force Applied to the Media, *Machining Science and Technology*, Vol. 10, pp. 341-354, 2006.
- [14] R. S. Walia, H. S. Shan, P. Kumar, Parametric Optimization of Centrifugal Force-Assisted Abrasive Flow Machining (CFAAFM) by the Taguchi Method, *Materials and manufacturing*, Vol. 21, pp. 375-382, 2006.