

کاهش ارتعاشات خودتحریک در فرآیند میکروفرزکاری با استفاده از جاذب‌های ارتعاشی

صالح شاکری^۱، فرهاد شیخ‌سامانی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۸/۳۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۱۸	در این مقاله به مساله فرونشاندن ارتعاشات خود تحریک در فرآیند میکروفرزکاری به منظور دستیابی به دقت بیشتر، کیفیت سطح بهتر و نرخ برداشت ماده بالاتر پرداخته شده است. فرآیند میکروفرزکاری به صورت یک سیستم ۲ درجه آزادی مدل شده و اثرات خروج از مرکز ابزار برش نیز در نظر گرفته شده است. به منظور افزایش پایداری سیستم در عمق برش بیشتر و در نتیجه نرخ برداشت ماده بالاتر، جاذب‌های ارتعاشی طراحی شده‌اند و مقادیر پارامترهای آنها بوسیله یک الگوریتم توسعه یافته، بهینه شده است. تاثیر جاذب ارتعاشی بر پاسخ زمانی سیستم و ناحیه پایداری فرآیند، مورد تحقیق قرار گرفته و نشان داده شده است که ارتعاشات سیستم تا حد امکان کاهش یافته و ناحیه پایداری نیز به میزان قابل توجهی گسترش یافته است.
واژگان کلیدی: ارتعاشات غیرخطی، میکرو-فرزکاری، جاذب ارتعاشی، منحنی پایداری، سایش ابزار.	

۱- مقدمه

کیفیت پایین سطح کار می‌شود. ارتعاشات خود تحریک ناشی از حرکت نسبی بین قطعه کار و ابزار برش است و نتیجه آن ایجاد موج در سطح ماشین‌کاری شده است. یکی از نشانه‌های آن ایجاد ترک‌های نامنظم روی سطح، ناشی از ابزار برش خارج شده از کوک است. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد تا تحقیقاتی به منظور بهبود رفتار ارتعاشی سیستم، با استفاده از مدل‌های دینامیکی دقیق‌تر و همچنین به کارگیری جاذب ارتعاشی مناسب بر روی سیستم صورت پذیرد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی تحلیلی و دینامیکی مربوط به نیروهای میکروفرزکاری صورت گرفته است. کیم و همکارانش در سال ۲۰۰۴ یک مدل استاتیکی از تشکیل و رشد تراشه در فرآیند فرزکاری پیشنهاد دادند که متناوب بودن تشکیل و رشد تراشه را

فرآیند فرزکاری در ابعاد میکرو (میکروفرزکاری) در ساخت قطعاتی با ظرافت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد و یکی از مناسب‌ترین راه‌ها برای تولید اشکال هندسی پیچیده است. به علت نیازهای اخیر صنعت در تولیدات با ابعاد کوچک، کاربرد فرآیند میکروفرزکاری با تولید میکروقطعاتی از جنس‌های مختلف گسترش یافته است.

فرآیند میکروفرزکاری با برهم‌کنش ناشی از تماس بین لبه تیز ابزار برش و مواد قطعه کار توصیف می‌شود؛ بدین گونه که یک ترک، ناشی از نیروی برشی زیاد در ماده ایجاد شده و رشد می‌کند و قسمتی از ماده به فرم تراشه برداشته می‌شود. از عوامل بازدارنده در این فرآیند می‌توان به پدیده ارتعاشات خودتحریک اشاره کرد که باعث سایش زیاد و یا شکست ابزار برش، دقت پایین ابعاد قطعه کار و در نهایت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: farhad.samani@uk.ac.ir

۱. دانشجوی دوره کارشناسی ارشد

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر

حوزه حل زمانی با استفاده از واریانس استاتیکی برای تعیین پایداری فرآیند.

جاذب‌های ارتعاشی ابزاری کلاسیک برای کاهش ارتعاشات اجزای مکانیکی تحت تأثیر نیروی پربودیک هستند [۱۷]. جاذب‌های ارتعاشی در موارد متعددی در تجهیزات انتقال توان، خودروها، پل‌ها و ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۸-۲۰].

در تحقیق حاضر میزان بهبود پاسخ ارتعاشی به هنگام استفاده از جاذب ارتعاشی، به صورت عددی و با رسم نمودارهای پایداری با استفاده از روش حل عددی رنگ-کوتا بررسی شده است. مرجع [۲۱] به منظور آشنایی بیشتر با این روش حل عددی آورده شده است. مقادیر بهینه پارامترهای مربوط به جاذب ارتعاشی در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف، بدست آمده‌اند. همچنین نشان داده شده است که به هنگام استفاده از جاذب ارتعاشی خطی، میزان برداشت تراشه بدون رخداد پدیده‌های مخرب به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۲- مدل دینامیکی فرآیند میکروفرزکاری

در تحقیق حاضر از مدل نیروهای برش میکروفرزکاری توسعه یافته، که ضخامت تراشه را با در نظر گرفتن خروج از مرکز ابزار برش تعیین می‌کند [۴]، استفاده شده است. این مدل رابطه بین نیروهای برش، ضخامت تراشه برداشته شده و سرعت برش را پیش‌بینی می‌کند. به علاوه از این مدل برای پیش‌بینی نیروهای برش فولاد AISI H13 و آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V استفاده شده که سازش بسیار خوبی بین نتایج پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌های آزمایشات مستخرج از مرجع [۴] برای هر دو ماده مشاهده شده است.

۲-۱- مدل‌سازی ضخامت تراشه برداشته شده

برای مدل کردن ضخامت تراشه ابتدا منحنی مسیرلبه‌های ابزار برش مدل می‌شوند. این منحنی‌ها به شعاع ابزار برش، سرعت زاویه‌ای محور، اثر خروج از مرکز ابزار و نرخ

نشان می‌دهد [۱]. کنگ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ یک مدل مکانیکی تحلیلی از فرآیند میکروفرزکاری برای پیش-بینی نیروهای برش ارائه دادند که اثرات تماس جانبی را نیز در نظر می‌گیرد [۲]. در سال ۲۰۰۸ یک مدل تئوری دیگر ارائه شد که اثرات اندازه شعاع لبه ابزار برش و خروج از مرکز آن را نیز در نظر گرفته است [۳]. آفازوف و همکارانش [۴] با در نظر گرفتن مسیر حرکت ابزار برش و اثرات خروج از مرکز آن، سرعت زاویه محور و تماس قطعه‌کار و ابزار برش پیشنهاد کردند که نیروهای برش را به خوبی تقریب می‌زند و مقایسه این مدل با نتایج آزمایشگاهی [۵] را نیز ارائه نمودند.

تحقیقات در زمینه درک و فهم سینماتیک کامل ابزار برش نیز در سال‌های اخیر گسترش زیادی یافته است. آلتینتاس و همکارانش [۶] مدل‌هایی با حل چند فرکانسی [۷ و ۸] را با حل زمانی نیمه گسسته [۹-۱۱] مقایسه کرده‌اند. نتایج حاصل از مقایسه بین دو مدل انجام شده و مزایای هر کدام از مدل‌ها را در یک مثال ساده مربوط به فرزکاری ارائه نموده‌اند [۱۲]. کوینتانا و همکارانش یک روش آزمایشگاهی برای بدست آوردن دیاگرام پایداری مربوط به فرزکاری ارائه داده‌اند [۱۳] و کاربرد نمونه‌های مختلفی از سنسورها را برای تشخیص ارتعاشات خودتحریک در فرآیند میکروفرزکاری، به منظور شناخت بهترین نوع سنسور و ترکیبات آن در استفاده‌های صنعتی نیز مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴]. همچنین تحقیقاتی در زمینه پایداری ارتعاشات فرآیند فرزکاری با استفاده از الگوریتم منطق فازی، به منظور اصلاح عدم قطعیت یا تنوع در پارامترهای ورودی مدل انجام شده است [۱۵]. آفازوف و همکارانش در سال ۲۰۱۲ مدلی را برای ارتعاشات فرآیند میکروفرزکاری توسعه دادند [۱۶] که موارد زیر را در نظر می‌گیرد:

اثرات خروج از مرکز ابزار، ترم‌های غیرخطی مربوط به سرعت زاویه‌ای، نیروهای برشی و عمودی مربوط به فرآیند فرزکاری در ابعاد میکرو و همچنین تعریف یک معیار در

¹fuzzy logic algorithm

f نشان دهنده نرخ جلوروندگی (mm/s)، R شعاع ابزار برش (mm)، ω سرعت زاویه‌ای محور (rad/s)، t زمان، k شماره دندانه، K تعداد دندانه‌ها، R_0 طول خروج از مرکز ابزار برش (mm) و γ_0 زاویه خروج از مرکز (rad) می‌باشد. منحنی مسیر لبه $(k-1)$ ام نیز از معادله (۱) و با جانشین کردن $(k-1)$ به جای k و t' به جای t ، این چنین بدست می‌آید.

$$x_{(k-1)} = ft' + R \sin(\omega t' - 2\pi(k-1)/K) + R_0 \sin(\omega t' + \gamma_0) \quad (2)$$

$$y_{(k-1)} = R \cos(\omega t' - 2\pi(k-1)/K) + R_0 \cos(\omega t' + \gamma_0)$$

زمان t' بیان‌کننده زمان مربوط به برش لبه $(k-1)$ ام است و این گونه بدست می‌آید.

$$t' = t - \frac{2\pi}{K\omega} \quad (3)$$

ضخامت تراشه h (mm) با توجه به روابط هندسی بدین صورت مدل شده است.

$$h = R + L \sin(\omega t - 2\pi(k-1)/K + \alpha_0) - \sqrt{R^2 - L^2 \cos^2(\omega t - 2\pi(k-1)/K + \alpha_0)} \quad (4)$$

در حالی که L و α_0 به شکل زیر تعریف می‌شوند.

$$L = \sqrt{(x_o - x_{o'})^2 + (y_o - y_{o'})^2} \quad (5)$$

$$\alpha_0 = \tan^{-1}\left(\frac{y_o - y_{o'}}{x_o - x_{o'}}\right) \quad (6)$$

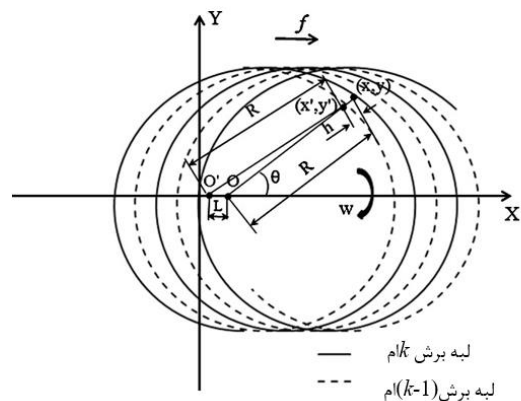
و

$$\begin{aligned} x_{(o)} &= ft + R_0 \sin(\omega t + \gamma_0) \\ y_{(o)} &= R_0 \cos(\omega t + \gamma_0) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_{(o')} &= ft' + R_0 \sin(\omega t' + \gamma_0) \\ y_{(o')} &= R_0 \cos(\omega t' + \gamma_0) \end{aligned} \quad (8)$$

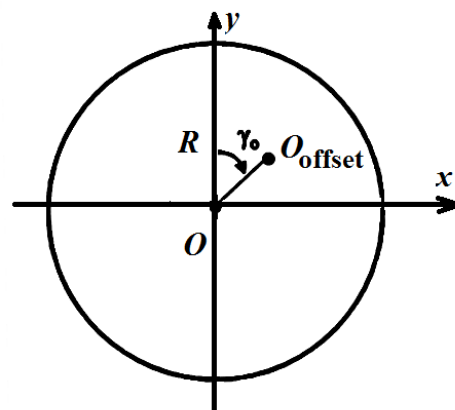
شکل (۳) اثرات خروج از مرکز (R_0) را بر روی ضخامت تراشه (h) در نرخ جلوروندگی 5 mm/s، دور محور (ω) 50000 rpm و زاویه خروج از مرکز ۴۵ درجه نشان داده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش خروج از مرکز، ضخامت تراشه برداشته شده توسط دندانه اول افزایش و توسط دندانه دوم کاهش یافته است و هر چه مقدار خروج از مرکز بیشتر باشد؛ اختلاف ضخامت تراشه برداشته شده

جلوروندگی بستگی دارند. شکل (۱) منحنی‌های مسیر مربوط به لبه‌های برش k ام و $(k-1)$ ام ابزار را نشان می‌دهد. [۴]



شکل ۱- مسیر حرکت لبه‌های k ام و $(k-1)$ ام در مختصات کارتزین $x-y$

یکی از مشکلات رایج در فرآیند میکروفرزکاری، خروج از مرکز ابزار برش است. علت اصلی این خروج از مرکز، انحراف مرکز ابزار برش است (شکل ۲). تاثیر این مولفه در فرآیند فرزکاری با ابعاد معمولی ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. اما همان‌طور که توسط بائو و تانسل [۲۲] گزارش شده است، یک خروج از مرکز کوچک در فرآیند میکروفرزکاری، تغییرات چشم‌گیری در نیروها ایجاد می‌کند. لذا اعمال اثر آن اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد.



شکل ۲- خروج از مرکز ابزار برش

مسیر حرکت لبه k ام این چنین بدست می‌آید [۱۶]:

$$x_{(k)} = ft + R \sin\left(\omega t - \frac{2\pi k}{K}\right) + R_0 \sin(\omega t + \gamma_0) \quad (1)$$

$$y_{(k)} = R \cos\left(\omega t - \frac{2\pi k}{K}\right) + R_0 \cos(\omega t + \gamma_0)$$

فرآیند و همانند آنچه در شکل نشان داده شده است؛ از معادله ۱۱ بدست می‌آیند [۱۶].

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \frac{a_p}{a_p^{orth}} \begin{pmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ -\cos\theta & \sin\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_t \\ F_c \end{pmatrix} \quad (11)$$

جدول ۱- ثوابت مربوط به معادله ۹ برای نیرو در جهت برش، F_t و نیرو در جهت مماسی، F_c

ثوابت نیرو	F_c	F_t
p_1	۲۴۷۳۰	۱۳۲۰۰
p_2	-۰/۰۶۶	۰/۰
p_3	-۰/۰۰۰۱۶	-۰/۰۰۰۰۴۵
p_4	-۰/۰۰۰۹۸	۰/۰
p_5	۶/۶۳	۶/۵
p_6	-۶/۹	-۱۲

در حالی که a_p نشان دهنده عمق برش (۰/۱ میلی متر در آزمایشات مربوط به ارزیابی دقت مدل)، a_p^{orth} ضخامت مبنا در مدل متعامد (orthogonal) آزمایش (۱ میلی متر) و θ زاویه چرخش است. نتایج ارزیابی مدل شبیه‌سازی نیروها در دو شرایط برشی مختلف در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است [۱۶].

نتایج ارزیابی بیشتر برای ۸ شرایط برشی مختلف دیگر در مرجع [۴] ارائه شده است.

و در نتیجه اختلاف مقدار نیروی وارد شده به دنده‌ها بیشتر می‌شود.

۲-۲- مدل‌سازی نیروهای برش و ارزیابی اعتبار آن

رابطه بین نیروهای برش و ضخامت تراشه در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف از معادله ۹ بدست می‌آید [۱۶].

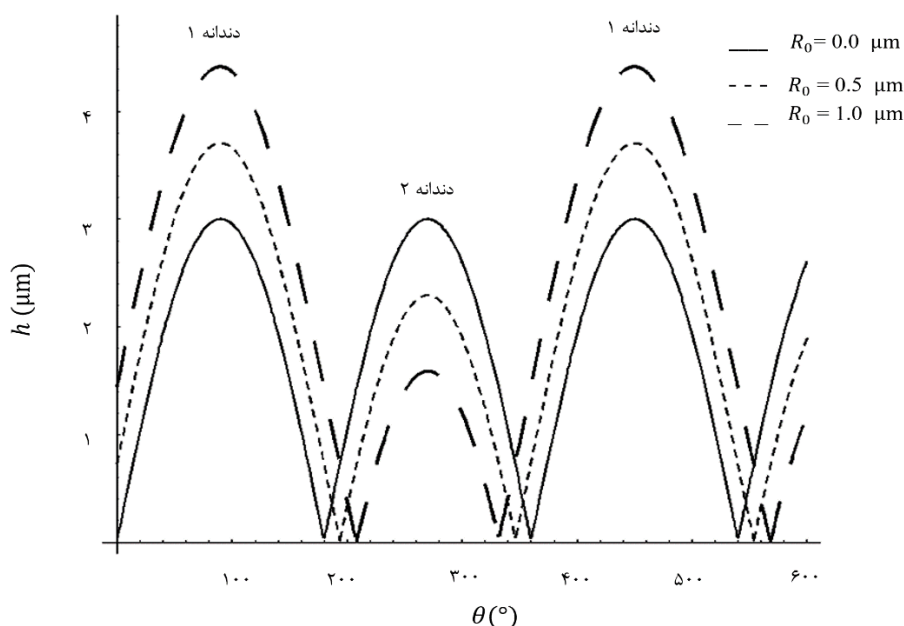
$$F_{c,t} = p_1 v^{p_2} [1 - \exp(p_3 h)] + (p_4 v + p_5) [1 - \exp(p_6 h)] \quad (9)$$

F_c نیرو در جهت برش و F_t نیرو در جهت مماسی می‌باشد. مقادیر عددی مربوط به ثوابت استفاده شده در معادله ۹، در جدول شماره ۱ آورده شده است [۱۶]. سرعت مماسی ابزار برش (v) نیز از معادله ۱۰ بدست می‌آید:

$$v = \omega(R - 0.5h * 10^{-3}) \quad (10)$$

همچنین باید اشاره شود که واحد ضخامت تراشه (h) در معادله ۹ و ۱۰ میکرومتر است.

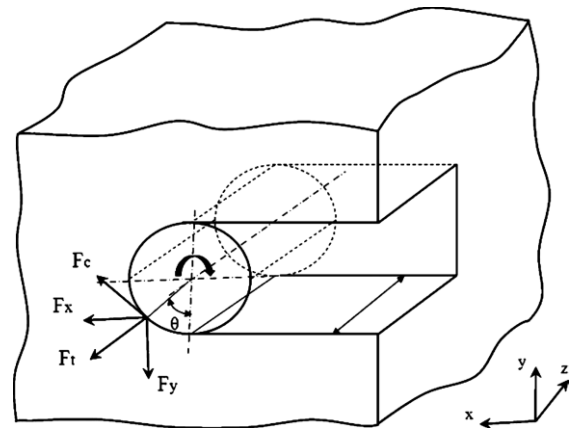
نیروها در جهات برشی (F_c) و مماسی (F_t) از جانشینی معادلات ۴ و ۱۰ در معادله ۹ بدست می‌آیند. نیروهای میکروفزکاری در جهات x و y نیز براساس الگوی حرکت



شکل ۳ - ضخامت لایه برداشته شده (h) در نرخ جلوروندگی 5 mm/s و زاویه خروج از مرکز (γ_0) 45 درجه

رفتار خطی از خود نشان داده‌اند و این مساله در فرآیند فرزکاری با ابعاد معمولی متداول است. در حالی که در فرآیند میکروفرزکاری، قطر ابزار برش کوچک (بین $10 \mu\text{m}$ تا 1mm) و نرخ جلوروندگی حدود چند میکرون بر دندانه می‌باشد و نیروهای برش آن رفتاری غیرخطی از خود نشان می‌دهند [۱۶]. از آنجا که نیروهای برش میکروفرزکاری غیرخطی هستند؛ معادلات حرکت، در نرم افزار Mathematica و با استفاده از حل‌های عددی در حوزه زمان حل شده‌اند.

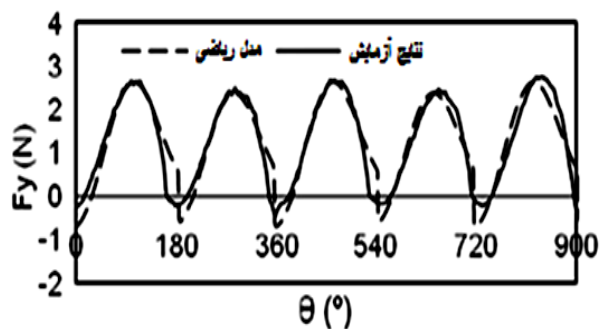
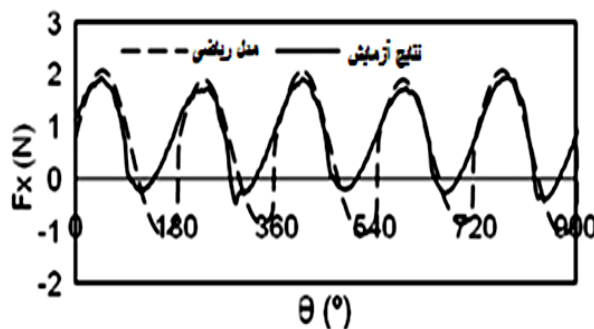
سیستم کلی فرآیند میکروفرزکاری را می‌توان همانند آنچه در شکل ۷ رسم شده است؛ ۲ بعدی در نظر گرفت. دینامیک سیستم میکروفرزکاری می‌تواند با استفاده از دو معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه ۲ در دو بعد حرکت شرح داده شود.



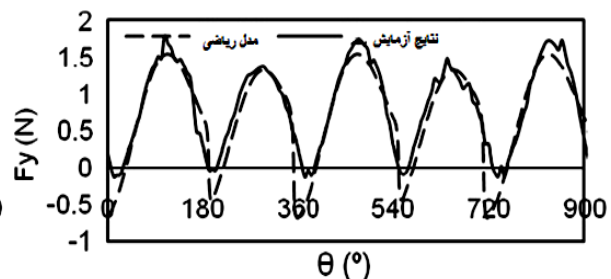
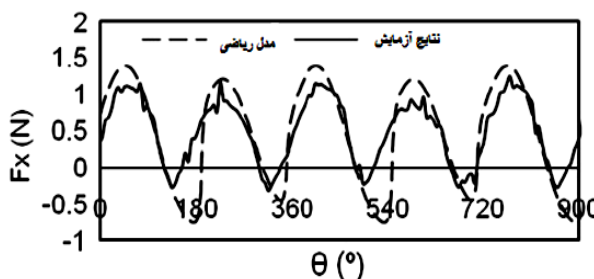
شکل ۴- الگوی حرکت فرآیند میکروفرزکاری

۲-۳- پاسخ ارتعاشات فرآیند میکروفرزکاری در حوزه زمان

ارتعاشات خودتحریک معمولاً با حل معادلات در حوزه فرکانسی یا زمانی مدل می‌شوند. حل در حوزه فرکانسی بیشتر زمانی استفاده شده است که نیروهای برش فرزکاری

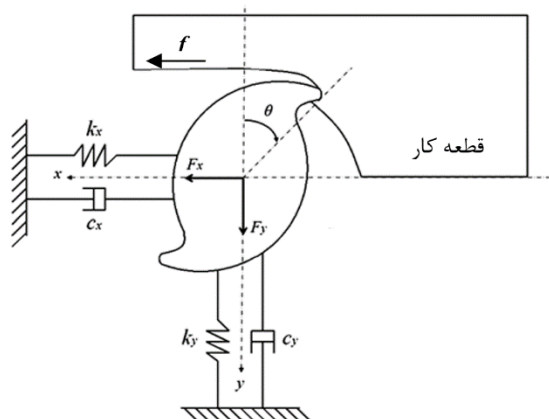


شکل ۵- نیروها در سرعت زاویه ای 5000 دور بر دقیقه، نرخ جلوروندگی 1 میلی متر بر ثانیه، زاویه خروج از مرکز 45 درجه و مقدار خروج از مرکز 0.3 میکرومتر [۱۶]



شکل ۶- نیروها در سرعت زاویه ای 25000 دور بر دقیقه، نرخ جلوروندگی 2 میلی متر بر ثانیه، زاویه خروج از مرکز 45 درجه و مقدار خروج از مرکز 0.3 میکرومتر [۱۶]

را نشان می‌دهد. مشخص است که سرعت محور از واحد دور بر دقیقه به rad/s تبدیل شده است.



شکل ۷ - مدل دینامیکی فرآیند میکروفرزکاری

در شکل ۹ منحنی پایداری در حالت خاصی که نرخ جلوروندگی $4 \mu\text{m/tooth}$ و بر پایه الگوریتم شکل ۸ بدست آمده و با نتایج آزمایشات مندرج در مرجع [۱۶] مقایسه شده است. زمان کل محاسبات مربوط به معادلات ۱۳ و دیاگرام شکل ۸، 0.2 ثانیه و بازه افزایش زمان $(\Delta t = 10^{-6} \text{ s})$ در نظر گرفته شده است. همچنین بازه افزایش سرعت محور $(\Delta \omega)$ در هر دور الگوریتم ۱۰۰ rev/min در نظر گرفته شده است. انتخاب بازه کوچکتر باعث دقیق‌تر شدن نمودارها می‌گردد؛ اما زمان محاسبات را به میزان زیادی افزایش می‌دهد. بنابراین انتخاب 100 rev/min برای $\Delta \omega$ منطقی به نظر می‌رسد. بازه تغییر عمق برش (Δa_p) نیز $1 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. منحنی پایداری در بازه 10000 تا 35000 برای سرعت محور به دست آمده است.

جدول ۲ - پارامترهای دینامیکی سیستم یکپارچه ابزار برش و نگهدارنده ابزار

پارامترهای مدل دینامیکی	مود اول	مود دوم
$w_n [Hz]$	۴۰۳۵	۵۱۶۳
ζ	۰/۰۱۰۵	۰/۰۳۸
$k [MN/m]$	۳/۲	۰/۵۳۹۷

$$m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) = F_x \quad (12)$$

$$m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = F_y$$

در این مقاله به منظور مقایسه نتایج، از پارامترهای دینامیکی استفاده شده در مرجع [۱۶] استفاده شده است (جدول ۲). معادله ۱۲ با تقسیم شدن بر جرم کل و با در نظر گرفتن روابط $k/m = \omega_n^2$ و $c/m = 2\zeta\omega_n$ این فرم بازآرایی شده است:

$$\ddot{x}(t) = \frac{\omega_{n,x}^2 F_x}{k_x} - 2\zeta_x \omega_{n,x} \dot{x}(t) - \omega_{n,x}^2 x(t) \quad (13)$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{\omega_{n,y}^2 F_y}{k_y} - 2\zeta_y \omega_{n,y} \dot{y}(t) - \omega_{n,y}^2 y(t)$$

برای حل معادله ۱۳ از روش انتگرالگیری رانگ-کوتا در حوزه زمان استفاده شده است. بعد از حل معادله ۱۳ در حوزه زمان و بدست آمدن جابجایی در جهت x و y ، از معیاری برای ارزیابی رخداد پدیده ارتعاشات خود تحریک استفاده شده است. در اینجا از متغیر واریانس آماری به عنوان معیاری برای تشخیص این پدیده استفاده شده است. طریقه بدست آوردن واریانس آماری به شکل زیر است.

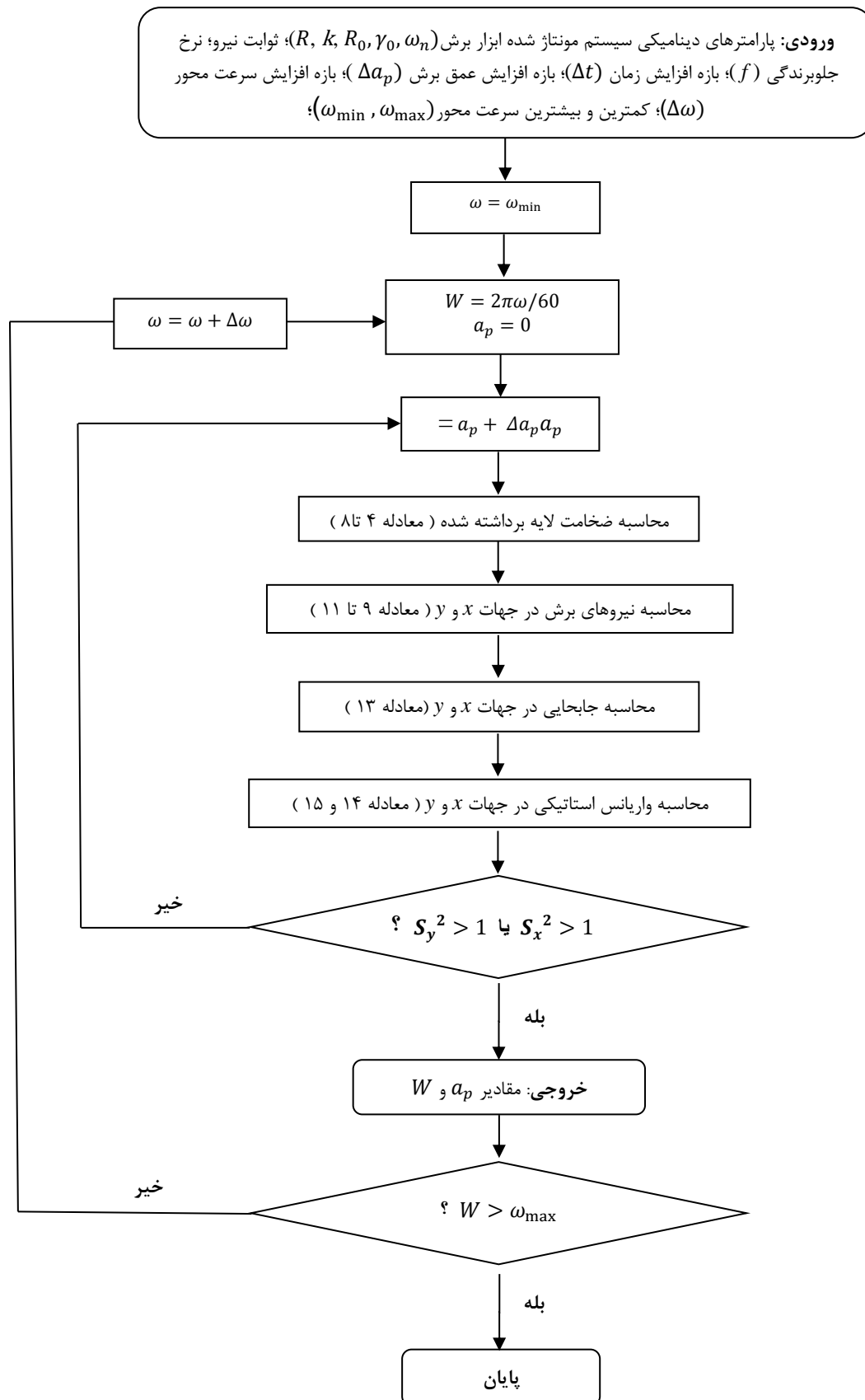
$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (14)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}$$

در حالی که S_x^2 و S_y^2 واریانس آماری در جهت x و y ، x_i و y_i جابجایی بدست آمده از حل معادله ۱۳ در زمان‌های مشابه، n تعداد فواصل کوچک زمانی و \bar{x} و \bar{y} میانگین جابجایی در جهت x و y هستند و این گونه بدست می‌آیند.

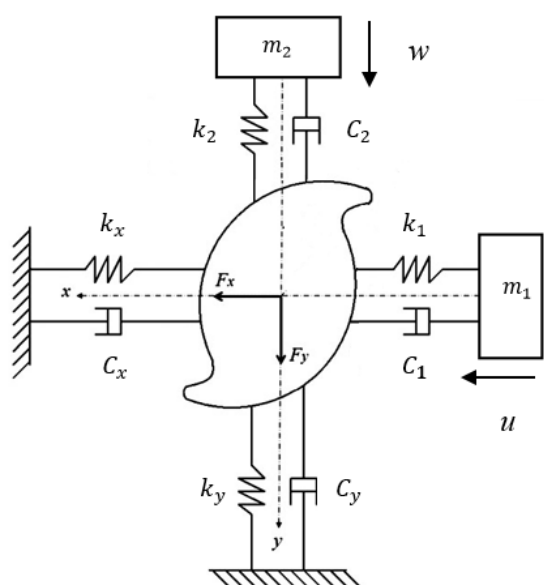
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)}{n}; \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i)}{n} \quad (15)$$

برش میکروفرزکاری زمانی که واریانس آماری بزرگتر از مقدار $1 \mu\text{m}^2$ باشد؛ ناپایدار در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. در این پژوهش حد پایین برای پایداری در نظر گرفته شده است؛ یعنی زمانی که حتی یکی از واریانس‌های آماری در جهت x یا y به مقدار $1 \mu\text{m}^2$ برسد، سیستم ناپایدار در نظر گرفته می‌شود. شکل ۸ دیاگرام تعیین منحنی پایداری



شکل ۸- دیاگرام مربوط به الگوریتم بدست آوردن منحنی پایداری سیستم میکروفزکاری

ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت فرمول‌بندی مربوط به جاذب ارتعاشی در فرآیند میکروفورزکاری توضیح داده شده است. جاذب ارتعاشی (TMD)^۱ معمولاً شامل یک سیستم یک درجه آزادی (SDOF)^۲ متشکل از یک جرم، دمپر و یک فنر می‌باشد. شکل ۱۱ یک طرح کلی از فرآیند میکروفورزکاری همراه با جاذب ارتعاشی متصل در جهات x و y را به ترتیب با پارامترهای m_1, c_1, k_1 و m_2, c_2, k_2 نشان داده است. جابجایی دینامیکی جاذبها با u و w نشان داده می‌شود.



شکل ۱۱- طرح کلی فرآیند میکروفورزکاری همراه با جاذب های ارتعاشی در جهات x و y

با در نظر گرفتن معادله ۱۲، معادله دینامیکی سیستم جذب شده با رابطه ۱۶ توصیف می‌شود.

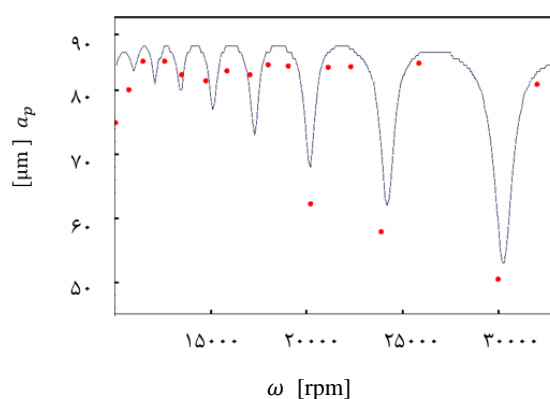
$$m_x \ddot{x}(t) + (c_1 + c_x) \dot{x}(t) + (k_1 + k_x)x(t) - c_1 \dot{u}(t) - k_1 u(t) = F_x$$

$$m_y \ddot{y}(t) + (c_2 + c_y) \dot{y}(t) + (k_2 + k_y)y(t) - c_2 \dot{w}(t) - k_2 w(t) = F_y \quad (16)$$

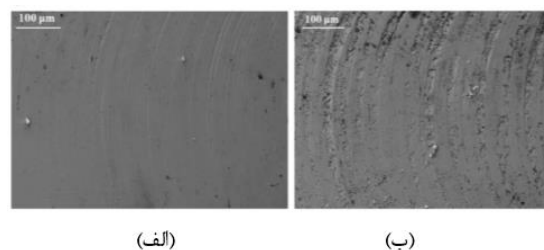
$$m_1 \ddot{u}(t) + c_1 (\dot{u}(t) - \dot{x}(t)) + k_1 (u(t) - x(t)) = 0$$

$$m_2 \ddot{w}(t) + c_2 (\dot{w}(t) - \dot{y}(t)) + k_2 (w(t) - y(t)) = 0$$

شکل ۱۰ عکس‌هایی از سطوح صیقلی و زبر کار شده در سرعت محور ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد [۱۶]. عکس سطح کار شده صیقلی در عمق برش خیلی کم که انتظار رخداد پدیده ارتعاشات خود تحریک وجود ندارد؛ گرفته شده است. در صورتی که زبری سطح دیگر در اثر ارتعاشات ابزار برش در عمق برش زیادتر از حد مجاز است. علائم این پدیده در سرعت‌های ۲۴۰۰۰، ۲۶۰۰۰ تا ۲۹۰۰۰ و ۳۲۰۰۰ دور بر دقیقه انتظار می‌روند. احتمال رخداد آن در سرعت‌های بین ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه کمتر از سرعت‌های بالای ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه است.



شکل ۹- منحنی پایداری بدست آمده از مدل تئوری (خطوط آبی) و نتایج آزمایش (نقاط قرمز) در نرخ جلو روندگی میکرومتر بر دنده



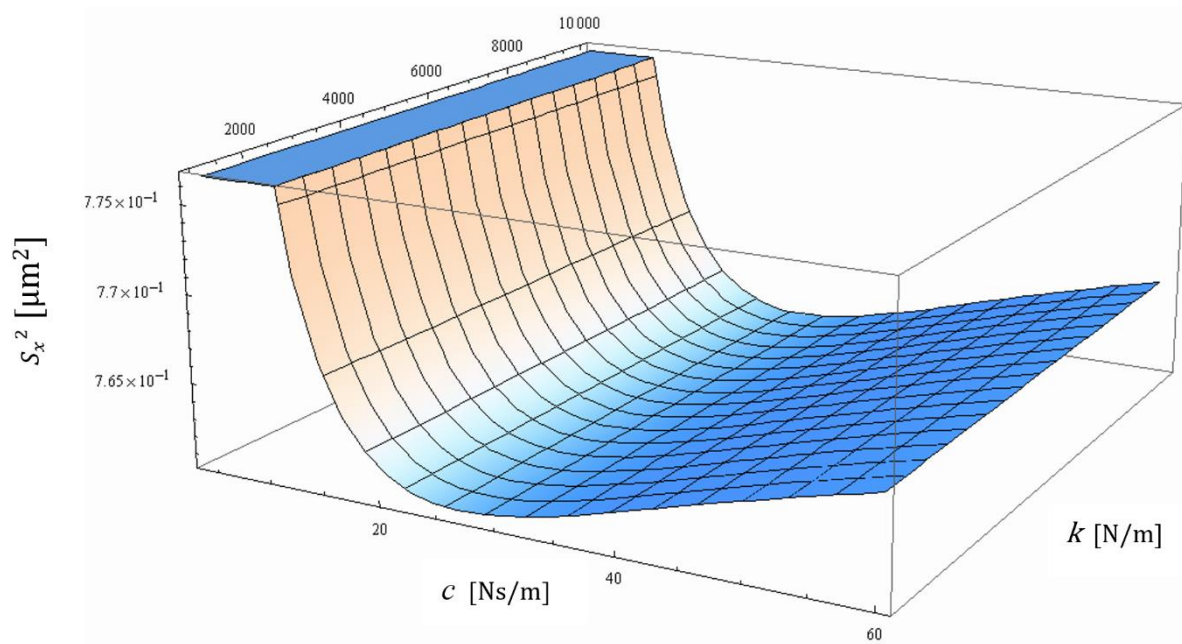
شکل ۱۰- عکس سطوح کار شده بدون رخداد ارتعاشات خود تحریک (الف) و با رخداد ارتعاشات خود تحریک (ب) [۱۶]

۳- دینامیک فرآیند میکروفورزکاری همراه با جاذب ارتعاشی

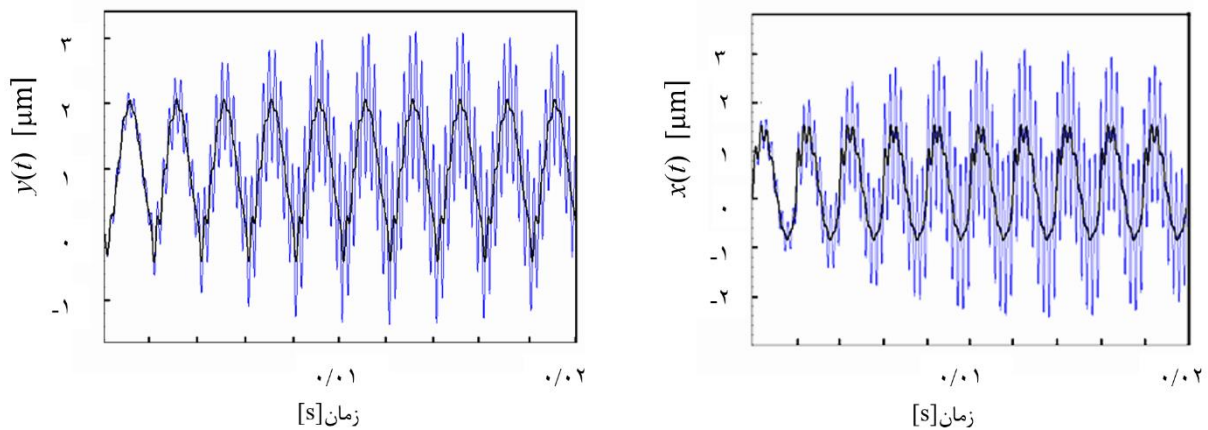
از آنجا که نیاز به کیفیت بالای سطح کار شده، بسیار مهم است؛ فرو نشانیدن ارتعاشات خود تحریک در این فرآیند حیاتی می‌باشد و بدین منظور، در این پژوهش تاثیر جاذب

²Single Degree of Freedom

¹Tuned Mass Damper



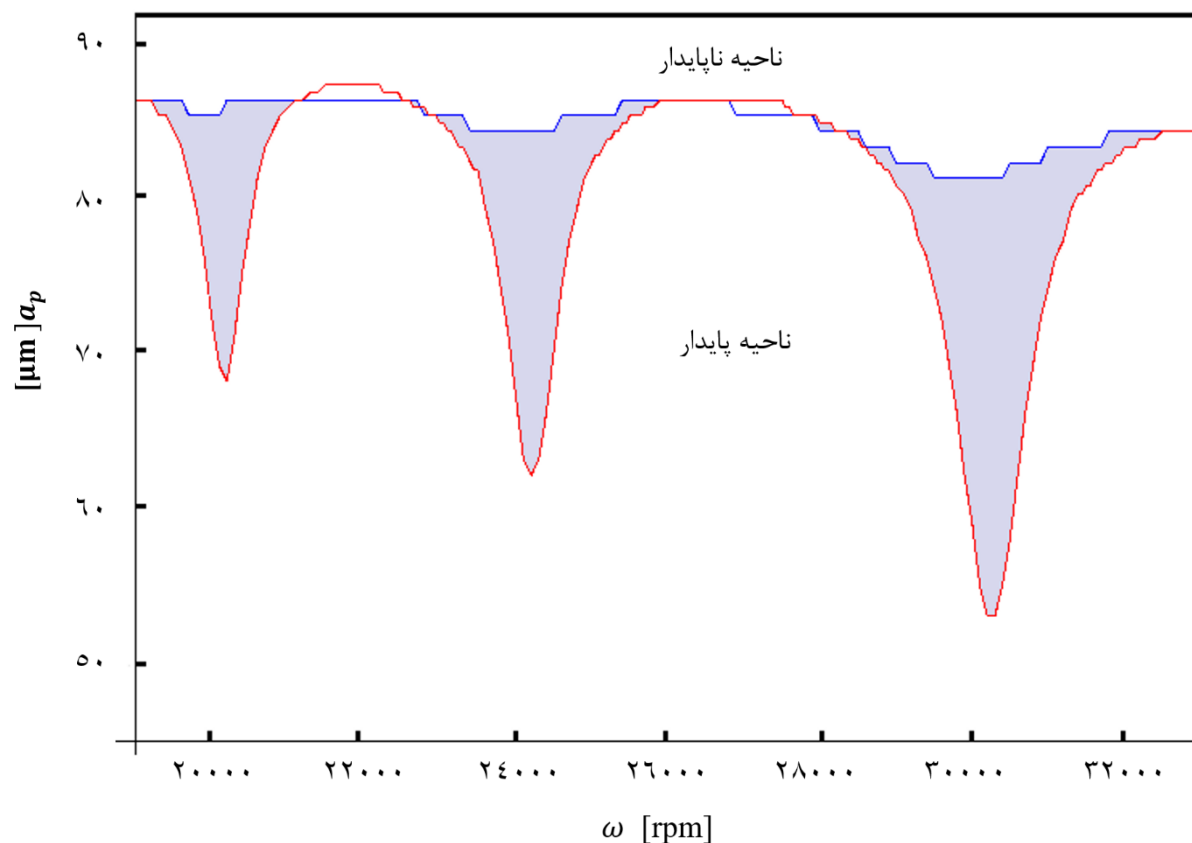
شکل ۱۲- نمودار واریانس آماری در حالت های مختلف پارامترهای جاذب ارتعاشی



شکل ۱۳- ارتعاشات ابزار برش در جهت x و y برای مدل بدون جاذب ارتعاشی (خطوط آبی) و با جاذب ارتعاشی (خطوط سیاه) در صورتی که $\Omega = 1500$ rpm و $a_p = 0.07$ mm

جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای جاذب ارتعاشی در دو سرعت بالا و پایین

Ω (rpm)	m [g]		c [N.s/m]		k [N/m]	
	m_1	m_2	c_1	c_2	k_1	k_2
۱۵۰۰۰	۵	۵۰	۱۸	۲۳	۷۰۰	۲۶۰۰
۳۰۲۰۰	۱۰	۲۵	۲۰	۲۸	۱۰۰۰	۳۵۰۰



شکل ۱۴- ناحیه پایداری سیستم میکروفورزکاری بدون جاذب (زیر خطوط قرمز) و با جاذب ارتعاشی بهینه شده (زیر خطوط آبی)

۴-۱- بهینه‌سازی پارامترهای جاذب ارتعاشی

در این پژوهش از الگوریتمی مشابه شکل ۸ و روش بهینه‌سازی brute-force که تمام حالت‌های ممکن را بررسی می‌کند؛ برای پیدا کردن مقادیر بهینه پارامترهای جاذب ارتعاشی استفاده شده است. مقادیر مربوط به میرایی جاذب و سختی فنر به عنوان پارامترهای کنترل در نظر گرفته شده‌اند (در حالی که مقدار جرم ثابت نگه داشته شده است).

فضای پارامتری به صورت

$$1 < k_1, k_2 < 10000 \text{ N/m}$$

این $0 < c_1, c_2 < 60 \text{ Ns/m}$ در نظر گرفته شده است. این

فضای پارامتری بوسیله مقادیر $n_1 = 60$ و $n_2 = 100$ به ترتیب برای میرایی و فنریت جاذب، تقسیم و مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع مقادیر n_1 و n_2 تعداد تقسیمات بازه فضای پارامتری هستند. سپس مقدار واریانس آماری در حالت‌های مختلف جاذب ارتعاشی، محاسبه و نمودار مربوط به آن نیز رسم شده است (شکل ۱۲). به

نتایج حاصل از حل معادلات (۱۶) و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای جاذب در بخش‌های بعد آورده شده است. به گونه‌ای که ابتدا پارامترهای جاذب بهینه شده و سپس رفتار ارتعاشی قبل و بعد از نصب جاذب مقایسه شده است.

۴-۲- ارائه یافته‌ها و نتایج

پارامترهای دینامیکی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی فرآیند، در جدول ۲ قرار گرفته‌اند. همان‌طور که پارامترهای مربوط به نیروهای برش در جدول ۱ قرار داده شده‌اند. تمام نتایج این تحقیق برای حالتی ارائه شده است که فرآیند فرزکاری با دو دندانه ($K=2$) و شعاع ابزار برش ۲۵۰ میکرومتر ($R=250 \mu\text{m}$) است و شرایط اولیه به صورت $x(0) = y(0) = 0$ و $\dot{x}(0) = \dot{y}(0) = 0$ در نظر گرفته شده است. تحت چنین شرایطی معادله (۱۶) در نرم افزار Mathematica مدل شده است.

و پایداری سیستم را برای مقادیر بالاتر عمق برش تضمین می‌کند. در واقع قسمت هاشور خورده شکل ۱۴ ناحیه‌ای است که با به کار بردن جاذب ارتعاشی بهینه شده، به ناحیه پایداری سیستم افزوده شده است.

۵- نتایج

در این مقاله از جاذب ارتعاشی بهینه برای فرونشاندن ارتعاشات خودتحریک در فرآیند میکروفرزکاری استفاده شده است. فرآیند میکروفرزکاری به صورت سیستم ۲ درجه آزادی مدل شده است. مقادیر بهینه پارامترهای جاذب ارتعاشی، در دو سرعت بالا و پایین، با استفاده از روش بهینه‌سازی Brute-force و حل عددی رانگ - کوتا بدست آمده‌اند.

تاثیر جاذب ارتعاشی بهینه‌شده بر کاهش ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس نتایج بدست آمده، استفاده از جاذب ارتعاشی بهینه، دامنه ارتعاش را در سرعت‌های بحرانی چرخش ابزار برش تا حدود ۵۰٪ کاهش می‌دهد و این امر باعث افزایش کیفیت سطح تولید شده می‌گردد. همچنین آنالیز پایداری نشان داده است که با استفاده از جاذب ارتعاشی بهینه، محدوده محسوسی (قسمت هاشور خورده شکل ۱۴) با توجه به عمق نفوذ ابزار برش، به ناحیه پایداری فرآیند بدون جاذب (ناحیه زیر خط قرمز) افزوده شده است. بنابراین با پایدار نگه‌داشتن شرایط در یک سرعت محور مشخص، می‌توان به مقدار عمق برش بیش‌تر و در نتیجه نرخ برداشت ماده بالاتر بدون کاهش کیفیت سطح دست یافت.

علت تقارن در هندسه ابزار برش، مقادیر مربوط به واریانس در هر دو جهت (S_x^2 , S_y^2) بسیار نزدیک هستند. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است، تاثیر تغییرات سختی فنر بسیار کمتر از تاثیر تغییرات مقدار ضریب میرایی، بر واریانس آماری و در نتیجه کاهش ارتعاشات سیستم است. بنابراین مقدار سختی فنر نیز ثابت در نظر گرفته شده و تنها متغیرهای ضریب میرایی جاذب ارتعاشی (C_1 , C_2) بهینه می‌شوند. لذا در مرحله دوم بهینه‌سازی، با ثابت نگه‌داشتن مقدار جرم و فنریت جاذب، مقادیر C_1 و C_2 به عنوان پارامترهای کنترل در نظر گرفته شدند و مقادیر بهینه پارامترها در دو سرعت بالا (30200 rpm) و پایین (15000 rpm) در جدول ۳ آورده شده است.

۴-۲- تاثیر جاذب ارتعاشی بهینه شده بر پایداری سیستم

نقش جاذب ارتعاشی در کاهش ارتعاشات سیستم به مانند آنچه در شکل ۱۳ نمایش داده شده است، کاملاً مشهود و تاثیرگذار است. با استفاده از جاذب ارتعاشی بهینه در سرعت پایین (15000 rpm)، دامنه ارتعاشات نوک ابزار برش در مقایسه با سیستم بدون جاذب تقریباً نصف شده است (شکل ۱۳). ناحیه‌های پایداری سیستم بدون جاذب و سیستم جذب شده در شکل ۱۴ نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در ناحیه پایداری انتظار وقوع پدیده ارتعاشات خود تحریک و ایجاد زبری سطح کار شده نمی‌رود [۱۶].

در شکل های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است که جاذب ارتعاشی بهینه شده تاثیر بسزایی در کاهش ارتعاشات دارد

۶- مراجع

- [1] C. Kim, J. Mayor, J. Ni, (2004), "A static model of chip formation in microscale milling", Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126, 710-719.
- [2] I. Kang, J.S. Kim, J.H. Kim, M. Kang, Y. Seo, (2007), "A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process", Journal of Material Processing Technology, 187, 250-255.

- [3] G. Bissacco, H. Hansen, J. Slunsky,(2008), “Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling”, *Manufacturing Technology*, 57 ,113–116.
- [4] S.M. Afazov, S.M. Ratchev, J. Segal, (2010), “Modelling and simulation of micro-milling cutting forces”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210,2154–2162.
- [5] S.M. Afazov, S.M. Ratchev, J. Segal,(2011), “Prediction and experimental validation of micro-milling cutting forces of AISI H13 stainless steel at hardness between 35 and 60 HRC”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62 , 1-13.
- [6] Y.Altintas, G.Stepan, D.Merdol, Z.Dombovari,(2008), “Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain”, *CIRP-Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1 , 35–44.
- [7] Y. Altintas, E. Budak,(1995), “Analytical prediction of stability lobes in milling”, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 44 , 357–362.
- [8] E. Budak, Y. Altintas,(1998), “Analytical prediction of chatter stability conditions for multi-degree of systems in milling, part1-modelling and part2-applications”, *Transactions of ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 120,22–30.
- [9] T. Insperger, G. Stepan,(2000), “Stability of the milling process”, *Periodica Polytechnica*, 44,47–57.
- [10] T. Insperger, G. Stepan,(2004), “Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61, 117–141.
- [11] E.Govekar, J.Gradisek, M.Kalveram ,T.Insperger, K.Weinert ,G.Stepan, I.Grabec,(2005), “On stability and dynamics of milling at small radial immersion”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54,357–362.
- [12] N.D. Sims, B. Mann, S. Huyanan,(2008), “Analytical prediction of chatter stability for variable pitch and variable helix milling tools”, *Journal of Sound and Vibration*, 317,664–686.
- [13] G. Quintana, J. Ciurana, D. Teixidor,(2008), “A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48 ,1637–1645.
- [14] E. Kuljanic, M. Sortino, G. Totis,(2008), “Multisensor approaches for chatter detection in milling”, *Journal of Sound and Vibration*, 312,672–693.
- [15] N.D. Sims, G. Manson, B. Mann,(2010), “Fuzzy stability analysis of regenerative chatter in milling”, *Journal of Sound and Vibration*, 329 ,1025–1041.
- [16] S.M. Afazov , S.M. Ratchev, J. Segal, A.A. Popov,(2012), “Chatter modelling in micro-milling by considering process nonlinearities”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 56 ,28–38.
- [17] F.S. Samani, F. Pellicano,(2010), “Linear and Nonlinear Dynamic Absorbers”, Lambert Academic Publishing, Saarbrücken Germany, ISBN: 978-3-8383-2425-8.
- [18] J. Ormondroyd, J.P. Den Hartog,(1928), “The theory of the dynamic vibration absorber”, *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, 50,9-22.
- [19] F.S. Samani, F. Pellicano,(2012), “Vibration reduction of beams under successive traveling loads by means of linear and nonlinear dynamic absorbers”, *Journal of Sound and Vibration*, 331,2272–2290.
- [20] X. Shi, C.S. Cai,(2008), “Suppression of Vehicle-Induced Bridge Vibration Using Tuned Mass Damper”, *Journal of Vibration and Control*, 14, 1037-1054.
- [21] Z. Kalogiratou, T. Monovasilis, G. Psihoyios, T.E. Simos,(2014), “Runge–Kutta type methods with special properties for the numerical integration of ordinary differential equations”, *International Association for Mathematics and Computers in Simulation*, 536,75–146.
- [22] W.Y. Bao, I.N. Tansel,(2000), “Modelling micro-end-milling operations; Part II: tool run-out”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40 ,2175–2192.
- [23] L. Zhongqun, L. Qiang,(2008), “Solutions and analysis of chatter stability for end milling in the time-domain”, *Chinese Journal of Aeronautics*, 21 (2008) 169–178.