

کاهش ارتعاشات خودتحریک در فرایند میکروفرزکاری با استفاده از جاذب‌های ارتعاشی

صالح شاکری
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه شهید باهنر کرمان
saleh.shakeri68@yahoo.com

فرهاد شیخ سامانی*
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه شهید باهنر کرمان
farhad.samani@uk.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۲

چکیده

در این مقاله به مسئله فرونشاندن ارتعاشات خودتحریک در فرایند میکروفرزکاری به منظور دستیابی به دقت بیشتر، کیفیت سطح بهتر و نرخ برداشت ماده بالاتر پرداخته شده است. فرایند میکروفرزکاری به صورت سیستمی دو درجه آزادی مدل شده و آثار 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 خطی و غیرخطی طراحی شده‌اند و مقادیر پارامترهای آنها توسط یک الگوریتم توسعه‌یافته بهینه شده است. تأثیر این جاذب‌ها بر پاسخ زمانی سیستم و ناحیه پایداری آن بررسی و نشان داده شده است که ارتعاشات سیستم به‌میزان قابل توجهی کاهش یافته و ناحیه پایداری نیز به‌طور محسوسی گسترش یافته است. در نهایت عملکرد انواع جاذب‌های ارتعاشی با یکدیگر مقایسه و بهترین نوع آن مشخص شده است.

واژگان کلیدی: ارتعاشات غیرخطی، میکروفرزکاری، جاذب ارتعاشی غیرخطی، سایش ابزار

۱. مقدمه

خودتحریک^۱ اشاره کرد که سبب سایش زیاد یا شکست ابزار برش، دقت پایین ابعاد قطعه کار و در نهایت کیفیت پایین سطح کار شده می‌شود. ارتعاشات خودتحریک ناشی از حرکت نسبی بین قطعه کار و ابزار برش است و نتیجه آن، ایجاد موج و ترک‌های نامنظم در سطح ماشینکاری شده است. بنابراین ضروری است به‌منظور بهبود رفتار ارتعاشی سیستم، با استفاده از جاذب‌های ارتعاشی خطی و

فرایند میکروفرزکاری (فرزکاری در ابعاد میکرو) در ساخت قطعاتی با ظرافت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد و از جمله مناسبترین روش‌ها برای تولید شکل‌های هندسی پیچیده است. به‌علت نیازهای اخیر صنعت در تولید با ابعاد کوچکتر، کاربرد فرایند میکروفرزکاری با تولید میکروقطعاتی از جنس‌های مختلف گسترش یافته است. از جمله عوامل بازدارنده در این فرایند می‌توان به پدیده ارتعاشات

غیرخطی مناسب، تحقیقاتی روی سیستم انجام شود. جاذب‌های ارتعاشی دینامیکی به‌عنوان راهی مؤثر و کارآمد در کاهش سطح ارتعاشات نامطلوب در فرکانس‌های خاص شناخته شده‌اند. از زمان کارهای فراهم [۱] در سال ۱۹۰۹ م، تعداد زیادی از مقالات به مطالعه، بهبود و آزمایش این ابزار نسبتاً ساده در زمینه کاهش ارتعاشات پرداخته‌اند. تئوری جاذب ارتعاشی خطی در نوشته‌ها و مقالات [۲-۳] نوشته شده و هنوز در بسیاری از تحقیقات فعال [۴] مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه بیشتر این جاذب‌های خطی فقط در محدوده باریک و محدود از فرکانس تحریک مؤثرند.

برای غلبه بر این موضوع، بعضی از تحقیقات بر مطالعه جاذب‌هایی با پارامترهای غیرخطی [۵-۶] اختصاص یافته است. هدف این مطالعات، بهینه‌سازی جاذب برای کاهش ارتعاشات، با افزایش پهنای باند مؤثر و کاهش دامنه ارتعاشات کل سیستم بوده است. کوینی شیوه‌ای برای به‌کار بردن جاذب‌های ارتعاشی غیرخطی مرتبه دوم در سازه‌هایی انعطاف‌پذیر که به‌صورت یک سیستم دو درجه آزادی مدل شده‌اند، ارائه داده است [۷]. همچنین در کار دوم، دینامیک مربوط به جاذب ارتعاشی غیرخطی یک سیستم دو درجه آزادی با میرایی و فنریت غیرخطی را ارائه داده‌اند، که به مطالعه آثار میرایی غیرخطی بر پاسخ پایدار^۲ یک جاذب مرتبه سوم پرداخته است [۸]. الکساندر و همکاران نیز کارهایی تئوری و آزمایشگاهی ارائه نموده‌اند که عملکرد جاذب ارتعاش غیرخطی مرتبه سوم را در ایزولاسیون مربوط به زلزله و آثار انتقال انرژی با تحریک خارجی مورد بررسی قرار داده است [۵-۹].

در سال‌های اخیر، در زمینه مدلسازی تحلیلی و دینامیکی مربوط به نیروهای میکروفرزکاری مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. کیم و همکاران در سال ۲۰۰۴ م یک مدل استاتیکی از تشکیل و رشد تراشه در فرایند فرزکاری پیشنهاد دادند که متناوب‌بودن تشکیل و رشد تراشه را نشان می‌دهد [۱۰]. کنگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ م یک

مدل مکانیکی تحلیلی، از فرایند میکروفرزکاری برای پیش‌بینی نیروهای برش مطرح کردند که آثار تماس جانبی را نیز در نظر می‌گیرد [۱۱]. در سال ۲۰۰۸ م، مدل تئوری دیگری ارائه شد که آثار اندازه شعاع لبه ابزار برش و خروج از مرکز آن را نیز در نظر می‌گرفت [۱۲]. آفازوف و همکاران در سال ۲۰۱۰ م، مدل جدیدی را با در نظر گرفتن مسیر حرکت ابزار برش و آثار خروج از مرکز آن، سرعت زاویه محور، تماس قطعه‌کار و ابزار برش، اندازه شعاع لبه ابزار برش و رفتار ترمودینامیکی قطعه‌کار پیشنهاد کردند که نیروهای برش را به‌خوبی تقریب می‌زد [۱۳]. پژوهش‌ها در زمینه درک سینماتیک کامل ابزار برش نیز طی سال‌های اخیر گسترش زیادی یافته است. کوینتانا و همکاران روشی آزمایشگاهی برای به‌دست آوردن دیاگرام پایداری مربوط به فرزکاری ارائه داده‌اند [۱۴]. آفازوف و همکاران در سال ۲۰۱۲ م، برای ارتعاشات فرایند میکروفرزکاری مدلی را توسعه دادند که ترم‌های غیرخطی مربوط به سرعت زاویه‌ای را در نظر می‌گیرد [۱۵]. در پژوهش حاضر نیز به‌طور عمده از نتایج این پژوهش استفاده شده است. برای این منظور بر روی آنالیز تأثیر دینامیک مربوط جاذب‌های ارتعاشی به‌کار رفته در فرایند میکروفرزکاری تمرکز شده است. هدف این کار به‌طور کلی بررسی عملکرد جاذب‌های ارتعاشی و به‌طور خاص مقایسه جاذب‌های خطی و غیرخطی در بهبود عملکرد سیستم است. بدین منظور میزان بهبود پاسخ ارتعاشی به‌هنگام استفاده از جاذب ارتعاشی، به‌صورت عددی و با رسم نمودارهای پاسخ زمانی سیستم و منحنی پایداری با استفاده از روش حل عددی رونگه-کوتا صریح^۳ بررسی شده است و مقادیر بهینه پارامترهای مربوط به جاذب ارتعاشی نیز به‌دست آمده‌اند.

۲. مدل دینامیکی فرایند میکروفرزکاری

در پژوهش حاضر از مدل نیروهای برش میکروفرزکاری توسعه‌یافته استفاده شده است و ضخامت تراشه با در نظر

اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. مسیر حرکت لبه k به صورت زیر به دست می‌آید [۱۳].

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

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

به طوری که در این روابط f نرخ جلوروندگی بر حسب میلی‌متر بر ثانیه، R شعاع ابزار برش بر حسب میلی‌متر، ω سرعت زاویه‌ای محور بر حسب رادیان بر ثانیه، t زمان، k شماره دندانه، K تعداد دندانه‌ها، R_0 طول خروج از مرکز ابزار برش بر حسب میلی‌متر و γ_0 زاویه خروج از مرکز بر حسب رادیان می‌باشد. منحنی مسیر لبه $k-1$ نیز از معادله ۱ و با جانشین کردن $k-1$ به جای k و t' به جای t این چنین به دست می‌آید [۱۳]:

$$x_{(k-1)} = f t' + R \sin\left(\omega t' - \frac{2\pi(k-1)}{K}\right) + R_0 \sin(\omega t' + \gamma_0) \quad (2)$$

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

زمان t' بیان‌کننده زمان مربوط به برش لبه $k-1$ است و این گونه به دست می‌آید [۱۳]:

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

ضخامت تراشه h با توجه به روابط هندسی بدین صورت مدل شده است [۱۳]:

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

به طوری که در رابطه ۴، مقادیر L و α_0 به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$L = \sqrt{(x_0 - x_{0'})^2 + (y_0 - y_{0'})^2} \quad (5)$$

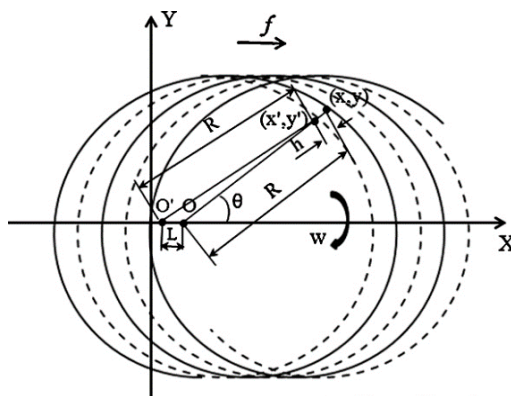
$$\alpha_0 = \tan^{-1}\left(\frac{y_0 - y_{0'}}{x_0 - x_{0'}}\right) \quad (6)$$

$$x_0 = f t + R_0 \sin(\omega t + \gamma_0) \quad (7)$$

گرفتن خروج از مرکز ابزار برش تعیین می‌شود [۱۳]، استفاده شده است. این مدل رابطه بین نیروهای برش، ضخامت تراشه برداشته شده و سرعت برش را پیش بینی می‌کند. به علاوه، از این مدل برای پیش‌بینی نیروهای برش فولاد AISI H13 و آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V استفاده شده که سازش خوبی بین نتایج پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌های آزمایشات مستخرج از مرجع [۱۳] برای هر دو ماده مشاهده شده است.

۳. مدل‌سازی ضخامت تراشه برداشته شده

برای مدل کردن ضخامت تراشه، ابتدا منحنی مسیر لبه‌های ابزار برش مدل می‌شود. این منحنی‌ها به شعاع ابزار برش، سرعت زاویه‌ای محور، اثر خروج از مرکز ابزار و نرخ جلوروندگی بستگی دارند. شکل ۱ منحنی‌های مسیر مربوط به لبه‌های برش k و $k-1$ ابزار را نشان می‌دهد [۱۳].



شکل ۱. مسیر حرکت لبه‌های k و $k-1$ در مختصات کارتزین XY خط پر نمایانگر لبه برش k و خط چین لبه برش $k-1$ است [۱۳]

از جمله مشکلات رایج در فرایند میکروفزکاری خروج از مرکز ابزار برش است، که علت اصلی بروز آن، انحراف مرکز ابزار برش است. تأثیر این مؤلفه در فرایند فرزکاری با ابعاد معمولی ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. اما همان‌طور که توسط بائو و تانسل گزارش شده است، یک خروج از مرکز کوچک در فرایند میکروفزکاری، تغییرات چشمگیری در نیروها ایجاد می‌کند [۱۶]. لذا اعمال اثر آن

سرعت مماسی ابزار برش از معادله ۱۰ به دست می‌آید [۱۳].

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

لازم به ذکر است که واحد ضخامت تراشه در معادلات ۹ و ۱۰ میکرومتر است. نیروها در جهات برشی (F_c) و مماسی (F_t) از جانشینی معادلات ۴ و ۱۰ در معادله ۹ به دست می‌آیند و براساس الگوی حرکت فرایند، نیروهای میکروفزرکاری در جهات x و y نیز این چنین محاسبه می‌شوند [۱۳]:

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

به طوری 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^۴ آزمایش (۱ میلی متر) و θ زاویه چرخش است. نتایج ارزیابی مدل شبیه سازی نیروها در سه شرایط برشی مختلف در شکل های ۳ و ۴ نمایش داده شده است [۱۳].

۵. پاسخ ارتعاشات فرایند میکروفزرکاری در حوزه زمان

ارتعاشات خودتحرک معمولاً با حل معادلات در حوزه فرکانس یا زمان مدل می‌شوند. حل در حوزه فرکان معمولاً وقتی استفاده شده است که نیروهای برش فرزکاری رفتار خطی از خود نشان داده‌اند و این مسئله در فرایند فرزکاری با ابعاد معمولی متداول است. حال آنکه در فرایند میکروفزرکاری، نرخ جلوروندگی حدود چند میکرون بر دندانه و قطر ابزار برش کوچک (بین ۱۰ میکرومتر تا ۱ میلی متر) می‌باشد. نیروهای برش آن، رفتاری غیرخطی از خود نشان می‌دهند [۱۵]. چون نیروهای برش میکروفزرکاری غیرخطی‌اند، معادلات حرکت در نرم افزار متمتیکا^۵ و با استفاده از حل های عددی در حوزه زمان حل شده‌اند. سیستم کلی این فرایند را می‌توان همانند آنچه در شکل ۵ رسم شده است، دوبعدی در نظر گرفت [۱۵].

$$\begin{aligned} y_0 &= R_0 \cos(\omega t + \gamma_0) \\ x_{(\omega)} &= f t' + R_0 \sin(\omega t' + \gamma_0) \\ y_{(\omega)} &= R_0 \cos(\omega t' + \gamma_0) \end{aligned} \quad (8)$$

در شکل ۲ آثار خروج از مرکز بر ضخامت تراشه در نرخ جلوروندگی ۵ میلی متر بر ثانیه، دور محور ۵۰۰۰۰ دور بر دقیقه و زاویه خروج از مرکز ۴۵ درجه نشان داده است. این نتایج با استفاده از نرم افزار متمتیکا اعتبارسنجی و نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده 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 و در نتیجه اختلاف مقدار نیروی وارد شده به دنده‌ها بیشتر می‌شود.

۴. مدل سازی نیروهای برش و ارزیابی اعتبار آن

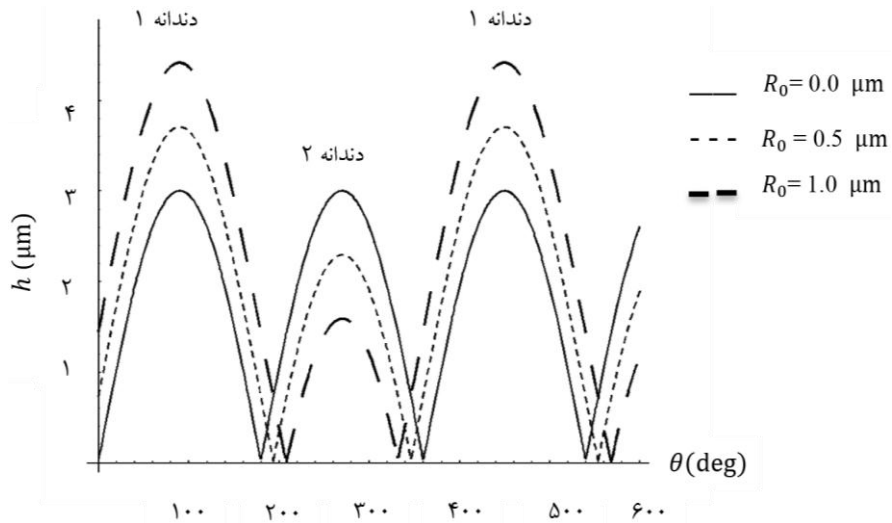
رابطه بین نیروهای برش و ضخامت تراشه در سرعت های زاویه ای گوناگون از معادله ۹ به دست می‌آید [۱۳]:

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

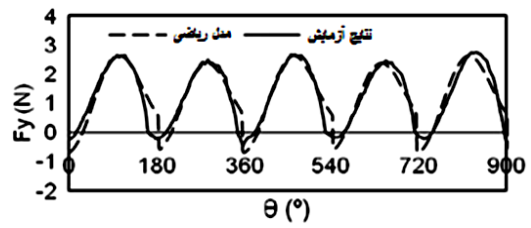
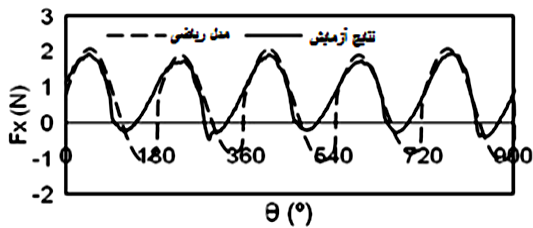
به طوری که در این رابطه F_c نیرو در جهت برش و F_t نیرو در جهت مماسی است. مقادیر ثابت مورد استفاده در معادله ۹ در جدول ۱ معرفی شده‌اند [۱۳].

جدول ۱. مقادیر ثابت مربوط به معادله ۹ [۱۳]

ثوابت نیرو	F_c	F_t
p_1	۲۴۷۳۰	۱۳۲۰۰
p_2	-۰/۰۶۶	۰/۰۰۰
p_3	-۰/۰۰۰۱۶	-۰/۰۰۰۰۴۵
p_4	-۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰
p_5	۶/۶۳	۶/۵
p_6	-۶/۹	-۱۲

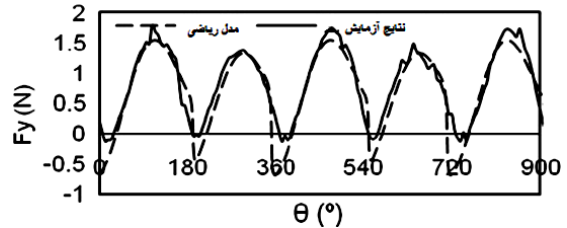
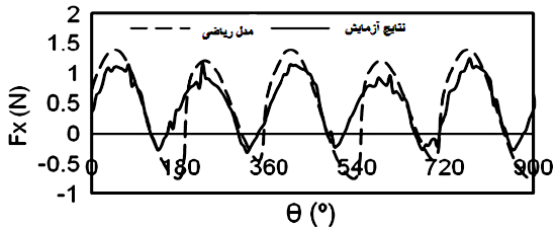


شکل ۲. ضخامت لایه برداشته شده در نرخ جلوروندگی ۵ میلی متر بر ثانیه و زاویه خروج از مرکز ۴۵ درجه [۱۳]



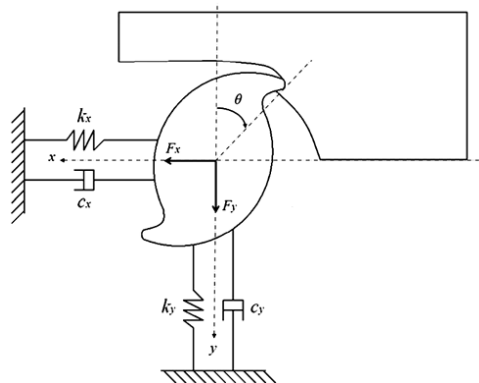
شکل ۳. نیروها در سرعت زاویه ای ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ جلوروندگی ۱ میلی متر بر ثانیه،

زاویه خروج از مرکز ۴۵ درجه و مقدار خروج از مرکز ۰/۳ میکرومتر [۱۳]



شکل ۴. نیروها در سرعت زاویه ای ۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ جلوروندگی ۲ میلی متر بر ثانیه،

زاویه خروج از مرکز ۴۵ درجه و مقدار خروج از مرکز ۰/۳ میکرومتر [۱۳]



شکل ۵. مدل دینامیکی فرایند میکروفرزکاری [۱۵]

دینامیک سیستم میکروفزکاری می‌تواند با استفاده از دو معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه دوم در دو بعد حرکت تشریح شود [۱۵].

$$\begin{aligned} m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) &= F_x \\ m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) &= F_y \end{aligned} \quad (12)$$

در این مقاله به منظور مقایسه نتایج، از پارامترهای دینامیکی مرجع [۱۵] استفاده شده است (جدول ۲). معادله ۱۲ با تقسیم بر جرم کل و در نظر گرفتن روابط ذیل به صورت معادله ۱۳ بازنویسی شده است [۱۵].

$$\begin{aligned} \frac{c}{m} &= 2\xi\omega_n \\ \frac{k}{m} &= \omega_n^2 \\ \ddot{x}(t) &= \frac{\omega_{n,x^2} F_x}{k_x} - 2\xi_x \omega_{n,x} \dot{x}(t) - \omega_{n,x^2} x(t) \\ \ddot{y}(t) &= \frac{\omega_{n,y^2} F_y}{k_y} - 2\xi_y \omega_{n,y} \dot{y}(t) - \omega_{n,y^2} y(t) \end{aligned} \quad (13)$$

در این مقاله برای حل معادله ۱۳ از روش انتگرالگیری رونگه - کوتای صریح در حوزه زمان استفاده شده است. بعد از حل معادله ۱۳ در حوزه زمان و به دست آمدن جابه‌جایی در جهات x و y ، از معیاری برای ارزیابی رخداد پدیده ارتعاشات خودتحریک استفاده شده است. در اینجا از متغیر واریانس آماری به‌عنوان معیاری برای تشخیص این پدیده استفاده شده است. روش به‌دست آوردن واریانس آماری این‌گونه است [۱۵]:

$$\begin{aligned} S_x^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \\ S_y^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \end{aligned} \quad (14)$$

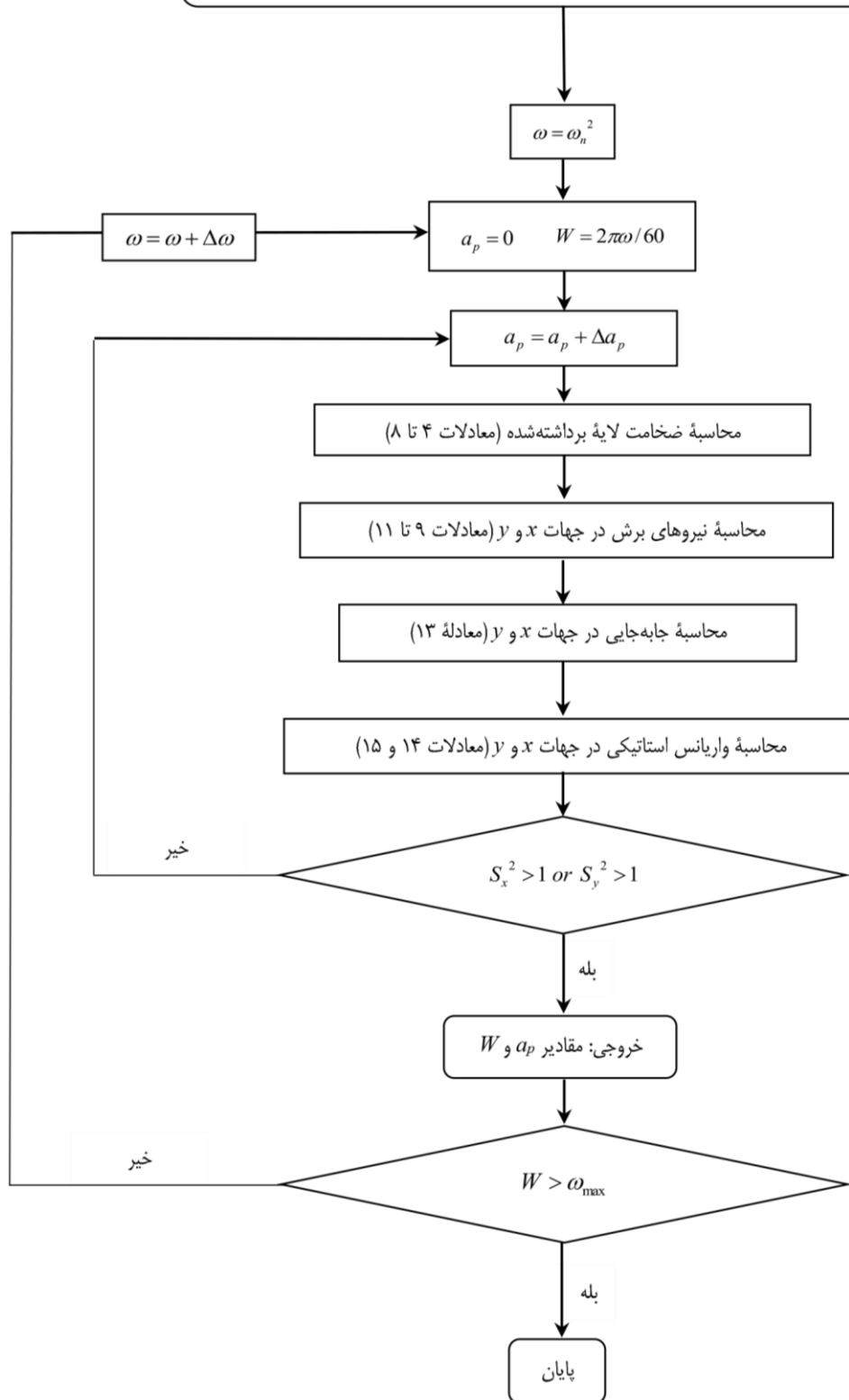
به‌طوری‌که S_x^2 و S_y^2 واریانس آماری در جهات x و y ، x_i و y_i جابه‌جایی حاصل از حل معادله ۱۳ در زمان‌های مشابه، n تعداد فواصل کوچک زمانی و \bar{x} و \bar{y} میانگین

جابه‌جایی در جهات x و y هستند و به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند [۱۵].

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

برش میکروفزکاری زمانی که واریانس آماری بزرگتر از ۱ باشد، ناپایدار در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. در این مقاله حد پایین برای پایداری در نظر گرفته شده است، یعنی زمانی که حتی یکی از واریانس‌های آماری در جهات x یا y به مقدار ۱ برسد، سیستم ناپایدار در نظر گرفته می‌شود. شکل ۶ دیاگرام تعیین منحنی پایداری را نشان می‌دهد [۱۵]. مشخص است که سرعت محور از واحد دور بر دقیقه به رادیان بر ثانیه تبدیل شده است. این دیاگرام در مرجع [۱۵] در حالی استفاده شده است که سیستم فاقد جاذب ارتعاشی می‌باشد. در این مقاله نیز از همان دیاگرام برای تعیین و رسم منحنی پایداری برای سیستم دارای جاذب استفاده شده است. الگوریتم شکل ۶ در نرم‌افزار ممتیکا بازنویسی و نتایج آن با نتایج آزمایشات مندرج در مرجع [۱۵] در شکل ۷ مقایسه شده است. زمان کل محاسبات مربوط به معادلات ۱۳، ۲/۰ ثانیه و بازه افزایش زمان 10^{-6} ثانیه در نظر گرفته شده است. بازه افزایش سرعت محور در هر دور الگوریتم ۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. انتخاب بازه کوچکتر سبب دقیق‌تر شدن نمودارها می‌شود، اما زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. بنابراین انتخاب ۵۰ دور بر دقیقه برای $\Delta\omega$ منطقی به‌نظر می‌رسد. بازه تغییر عمق برش نیز ۱ میکرومتر در نظر گرفته شده است. منحنی پایداری در بازه ۱۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ برای سرعت محور به‌دست آمده است. در شکل ۸ تصاویری از سطوح صیقلی و زبر کارشده در سرعت محور ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه نمایش داده شده است [۱۵]. تصویر سطح کارشده صیقلی در عمق برش خیلی کم، که انتظار رخداد پدیده ارتعاشات

ورودی: پارامترهای دینامیکی سیستم مونتاژشده ابزار برش، ثوابت نیرو، نرخ جلوگیری، بازه افزایش زمان، بازه افزایش عمق برش، بازه افزایش سرعت محور، کمترین و بیشترین سرعت محور



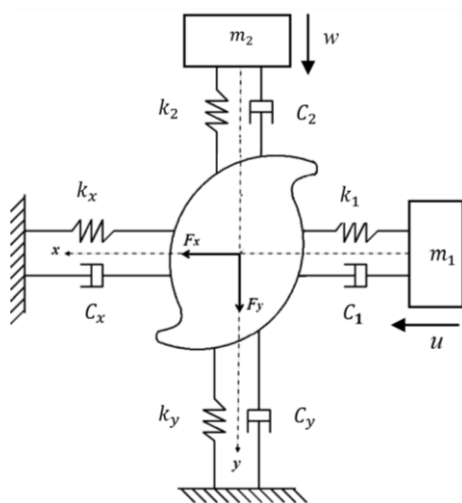
شکل ۶. دیاگرام مربوط به الگوریتم به دست آوردن منحنی پایداری سیستم میکروفرزکاری [۱۵]

جدول ۲. پارامترهای دینامیکی سیستم
یکپارچه ابزار برش و نگهدارنده ابزار [۱۵]

پارامترهای مدل دینامیکی	مود شیپ اول	مود شیپ دوم
ω_n	۴۰۳۵	۵۱۶۳
ξ	۰/۰۱۰۵	۰/۰۳۸
k	۳/۲	۰/۵۳۹۷

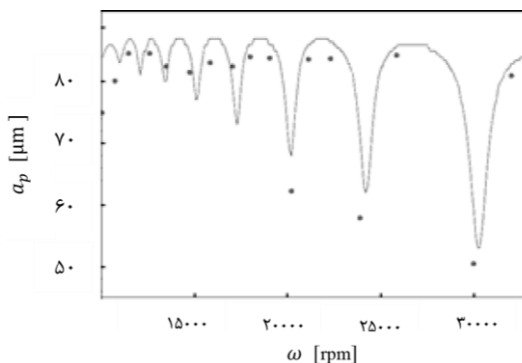
۶. دینامیک فرایند همراه با جاذب‌های ارتعاشی

چون نیاز به کیفیت بالای سطح کار شده بسیار مهم است، فرونشاندن ارتعاشات خودتحریرک در این فرایند امری حیاتی است و بدین منظور، در این پژوهش تأثیر جاذب ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت فرمول‌بندی مربوط به جاذب ارتعاشی در فرایند میکروفزکاری توضیح داده شده است. جاذب ارتعاشی^۶ شامل یک سیستم یک درجه آزادی متشکل از یک جرم، دمپر و فنر می‌باشد. در شکل ۹ طرح کلی از فرایند میکروفزکاری همراه با جاذب ارتعاشی متصل در جهات x و y به ترتیب با پارامترهای m_1 , c_1 , k_1 و m_2 , c_2 , k_2 نشان داده شده است. جابه‌جایی دینامیکی جاذب‌ها با w و u نشان داده می‌شود.

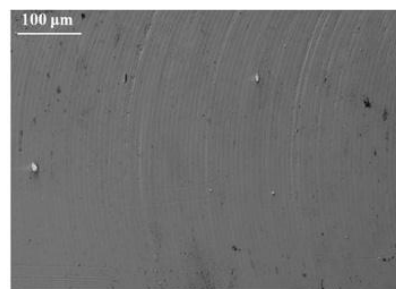


شکل ۹. طرح کلی فرایند میکروفزکاری همراه با جاذب‌های ارتعاشی در جهات x و y

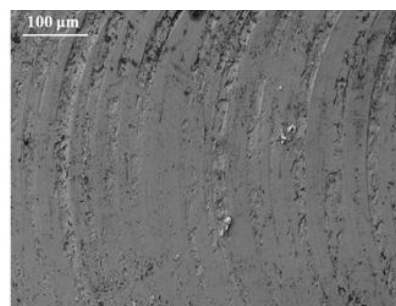
خودتحریرک وجود ندارد، عکس‌برداری شده است. در صورتی که زبری سطح دیگر در اثر ارتعاشات ابزار برش در عمق برش زیادتر از حد مجاز است. علائم این پدیده در سرعت‌های ۲۴۰۰۰، ۲۶۰۰۰ تا ۲۹۰۰۰ و ۳۲۰۰۰ دور بر دقیقه انتظار می‌رود. احتمال رخداد آن در سرعت‌های بین ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه کمتر از سرعت‌های بالای ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه است [۱۵].



شکل ۷. منحنی پایداری به‌دست آمده از مدل تنوری (خط پر) و نتایج آزمایش (نقاط) در نرخ جلوروندگی ۴ میکرومتر بر دنده



(الف)



(ب)

شکل ۸. سطوح کار شده (الف) بدون رخداد ارتعاشات خودتحریرک؛ (ب) با رخداد ارتعاشات خودتحریرک [۱۵]

پارامترهای دینامیکی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی فرایند، در جدول ۲ ذکر شده‌اند. به‌منظور مقایسه نتایج از پارامترهای دینامیکی مرجع ۱۵ استفاده شده است. تمام نتایج این تحقیق برای حالتی ارائه شده است که فرایند فرزکاری با دو دندان و شعاع ابزار برش ۲۵۰ میکرومتر است. شرایط اولیه نیز به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned}x(0) &= y(0) = 0 \\ \dot{x}(0) &= \dot{y}(0) = 0\end{aligned}$$

۷. جاذب ارتعاشی خطی

با در نظر گرفتن معادله ۱۲، معادله دینامیکی سیستم جذب‌شده با جاذب خطی طبق قانون دوم نیوتن به‌صورت روابط ۱۶ توصیف می‌شود.

$$\begin{aligned}m_x \ddot{x}(t) + (c_1 + c_2) \dot{x}(t) + (k_1 + k_x) x(t) \\ - c_1 \dot{u}(t) - k_1 u(t) &= F_x \\ m_y \ddot{y}(t) + (c_1 + c_y) \dot{y}(t) + (k_2 + k_y) y(t) \\ - c_2 \dot{w}(t) - k_2 w(t) &= F_y\end{aligned} \quad (16)$$

به‌طوری‌که در این معادلات $m\ddot{x}$ و $m\ddot{y}$ ترم‌های اینرسی ابزار برش در جهت‌های x و y و $m\ddot{u}$ و $m\ddot{w}$ ترم‌های اینرسی جاذب‌ها در جهت‌های x و y هستند. همان‌طور که مشخص است، $c_x \dot{x}$ و $k_x x$ به‌ترتیب مربوط به ترم نیروی میرایی ابزار برش و ترم نیروی بازگرداننده ابزار برش در جهت x هستند. همچنین $c_y \dot{y}$ و $k_y y$ مربوط به همین ترم‌ها در جهت y می‌باشند. عبارات $c_1(\dot{u} - \dot{x})$ و $k_1(u - x)$ مربوط به نیروهای میرایی و بازگرداننده جاذب ارتعاشی در جهت x هستند. عبارات $c_2(\dot{w} - \dot{y})$ و $k_2(w - y)$ نیز مربوط به جاذب ارتعاشی در جهت y هستند.

۸. جاذب ارتعاشی غیرخطی

پس از بررسی حالت‌ها و نمونه‌های مختلف جاذب‌های ارتعاشی غیرخطی، دو نوع جاذب ارتعاشی که بهترین تأثیر

و عملکرد را داشتند، انتخاب و مطالعه شدند که در ادامه به شرح چگونگی عملکرد آنها پرداخته شده است. همان‌طور که در ادامه ذکر و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، تأثیر تغییرات ضریب میرایی در جاذب بسیار محسوس‌تر و تأثیرگذارتر از تغییرات سختی فنر است. لذا در جاذب‌های غیرخطی، ترم مربوط به میرایی غیرخطی و ترم سختی فنر، خطی در نظر گرفته شده است. نوع اول جاذب غیرخطی انتخاب‌شده به‌گونه‌ای است که نیروی میرایی متناسب با مرتبه دوم سرعت برای سرعت‌های مثبت و متناسب با منفی مرتبه دوم سرعت برای سرعت‌های منفی است. معادله ۱۷ مربوط به این نوع جاذب با پارامتر میرایی غیرخطی مرتبه دوم است که با توجه به قانون دوم نیوتن و معادله ۱۶ استخراج شده است.

$$\begin{aligned}m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) + c_1 (\dot{x}(t) - \dot{u}(t)) |\dot{x}(t) - \dot{u}(t)| \\ + k_1 (x(t) - u(t)) &= F_x \\ m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) + c_2 (\dot{y}(t) - \dot{w}(t)) |\dot{y}(t) - \dot{w}(t)| \\ + k_2 (y(t) - w(t)) &= F_y\end{aligned} \quad (17)$$

معادله ۱۸ استخراج شده است. نوع دوم جاذب غیرخطی انتخاب شده نیز به‌گونه‌ای است که نیروی میرایی متناسب با مرتبه سوم سرعت است. معادله ۱۸ مربوط به جاذب با پارامتر میرایی غیرخطی مرتبه سوم است.

$$\begin{aligned}m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) + \\ c_1 (\dot{x}(t) - \dot{u}(t))^3 + k_1 (x(t) - u(t)) &= F_x \\ m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) + \\ c_2 (\dot{y}(t) - \dot{w}(t))^3 + k_2 (y(t) - w(t)) &= F_y \\ m_1 \ddot{u}(t) + c_1 (\dot{u}(t) - \dot{x}(t))^3 + k_1 (u(t) - x(t)) &= 0 \\ m_2 \ddot{w}(t) + c_2 (\dot{w}(t) - \dot{y}(t))^3 + k_2 (w(t) - y(t)) &= 0\end{aligned} \quad (18)$$

نتایج حاصل از حل معادلات ۱۶ تا ۱۸ و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای جاذب‌ها در بخش‌های بعد آورده شده است. به‌گونه‌ای که ابتدا پارامترهای جاذب‌ها بهینه و رفتار ارتعاشی قبل و بعد از نصب آنها مقایسه شده است. در این بخش نیز زمان کل محاسبات مربوط به معادلات، ۰/۲

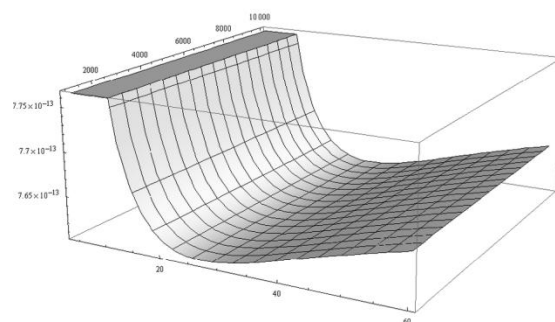
ثانیه و بازه افزایش زمان 10^{-6} ثانیه در نظر گرفته شده است. بازه افزایش سرعت محور نیز در هر دور الگوریتم ۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

۹. بهینه‌سازی پارامترهای جاذب‌های ارتعاشی

در این مقاله، از الگوریتمی مشابه شکل ۶ و روش بهینه‌سازی brute-force، که تمام حالت‌های ممکن را بررسی می‌کند، برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای جاذب ارتعاشی استفاده شده است. مقادیر مربوط به میرایی جاذب و سختی فنر به‌عنوان پارامترهای کنترل در نظر گرفته شده‌اند و مقدار جرم ثابت نگه داشته شده است. پارامترهایی که مقدار واریانس عددی و در نتیجه دامنه ارتعاش کمتری را نتیجه دهند، به‌عنوان مقادیر بهینه انتخاب شده‌اند.

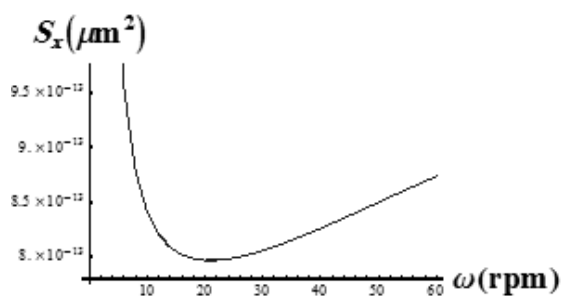
۹-۱. بهینه‌سازی جاذب‌های ارتعاشی خطی

فضای پارامتری به صورت $0 < c_1, c_2 < 60Ns/m$ و $1 < k_1, k_2 < 10000N/m$ در نظر گرفته شده است. این فضای پارامتری به وسیله مقادیر $n_1 = 60$ و $n_2 = 200$ 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. مقدار واریانس آماری در حالت‌های مختلف جاذب ارتعاشی، محاسبه و نمودار مربوط به آن نیز رسم شده است (شکل ۱۰). به علت تقارن در هندسه ابزار برش، مقادیر مربوط به واریانس در هر دو جهت بسیار نزدیک‌اند.



شکل ۱۰. نمودار واریانس آماری در حالت‌های مختلف پارامترهای جاذب خطی

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، تأثیر تغییرات سختی فنر بسیار کمتر از تأثیر 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 بهینه می‌شوند. در مرحله دوم، با ثابت نگه‌داشتن مقدار جرم و فنریت جاذب، به مانند آنچه در شکل ۱۱ نمایش داده شده است، مقادیر c_1 و c_2 به‌عنوان پارامترهای کنترل در نظر گرفته و بهینه شده‌اند. مقادیر بهینه پارامترها در دو سرعت بالا ۳۰۲۰۰ دور بر دقیقه و پایین ۱۵۰۰۰ دور بر دقیقه استخراج شده و در جدول ۳ آورده شده‌اند.



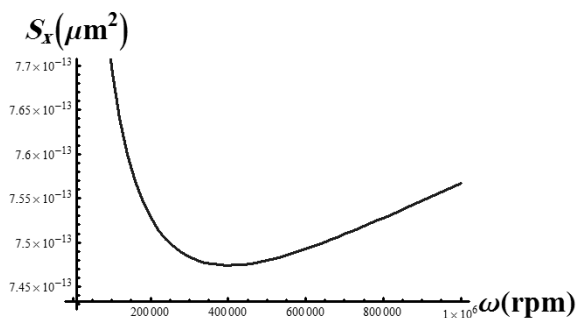
شکل ۱۱. نمودار بهینه‌سازی ضریب میرایی جاذب ارتعاشی خطی در سرعت ۳۰۲۰۰ دور بر دقیقه

۹-۲. بهینه‌سازی جاذب‌های ارتعاشی غیرخطی

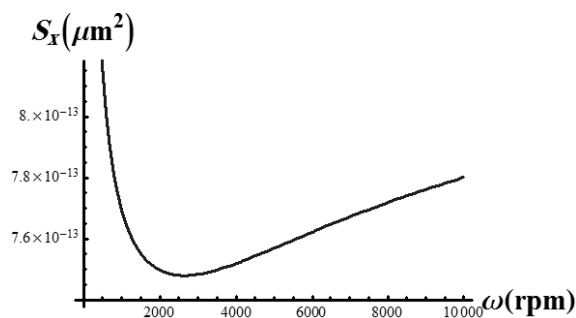
در جاذب‌های غیرخطی به کار رفته تأثیر تغییرات سختی فنر بسیار کمتر از تأثیر تغییرات مقدار ضریب میرایی در کاهش ارتعاشات سیستم است. بنابراین با ثابت نگه‌داشتن مقدار جرم و فنریت جاذب، مقادیر c_1 و c_2 به‌عنوان پارامترهای کنترل در نظر گرفته و بهینه شده‌اند. برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای جاذب ارتعاشی غیرخطی مرتبه دوم فضای پارامتری به صورت $0 < c_1, c_2 < 10000Ns/m$ در نظر گرفته شده است. این فضای پارامتری به وسیله مقدار $n_1 = 100$ تقسیم و مطالعه شده است (شکل ۱۲). برای جاذب ارتعاشی غیرخطی مرتبه سوم فضای پارامتری به صورت $0 < c_1, c_2 < 1000000Ns/m$ در نظر گرفته شده است. تقسیمات این فضای پارامتری نیز به وسیله مقدار

به علت تقارن در هندسه ابزار برش و جاذب‌های ارتعاشی، مقادیر بهینه مربوط به پارامترهای جاذب‌های ارتعاشی افقی و عمودی یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

$n_1 = 500$ انجام شده است (شکل ۱۲). مقادیر بهینه پارامترهای این دو نوع جاذب غیرخطی در سرعت 30200 دور بر دقیقه استخراج شده و در جدول ۴ آورده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲. نمودار بهینه‌سازی ضریب میرایی جاذب غیرخطی با الف) میرایی مرتبه دوم، ب) مرتبه سوم

در سرعت 30200 دور بر دقیقه با پارامترهای ثابت $m_1 = 10 \text{ gr}$ و $k_1 = 2000 \text{ N/m}$

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

ω	جرم (گرم)		ضریب سختی (نیوتن ثانیه بر متر)		ثابت فنر (نیوتن بر ثانیه)	
	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

جدول ۴. مقادیر بهینه پارامترهای جاذب‌های ارتعاشی غیرخطی مرتبه دوم و سوم

	جرم (گرم)		ضریب سختی (نیوتن ثانیه بر متر)		ثابت فنر (نیوتن بر ثانیه)	
	m_1	m_2	c_1	c_2	k_1	k_2
جاذب غیرخطی مرتبه دوم	۱۰	۱۰	۲۶۰۰	۲۶۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰
جاذب غیرخطی مرتبه سوم	۱۰	۱۰	۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰

گرفته است. بدین منظور نمودارهای مربوط به دامنه ارتعاشات و منحنی پایداری قبل و بعد از به کار بردن جاذبها رسم و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در واقع نمودارهای مربوط به دامنه ارتعاشات، تأثیر جاذبها در یک

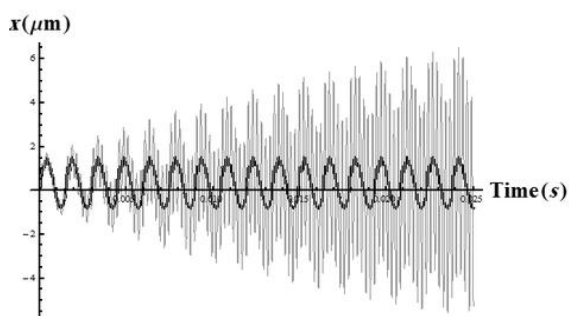
۱۰. اثر جاذب ارتعاشی بهینه‌شده بر عملکرد ارتعاشی سیستم
عملکرد جاذب‌های ارتعاشی خطی و غیرخطی به کار رفته روی ابزار برش در عملیات میکروفرزکاری مورد مطالعه قرار

سرعت خاص و نمودارهای منحنی پایداری، تأثیر آنها را در بازه گسترده‌ای از سرعت محور دوران نشان می‌دهند.

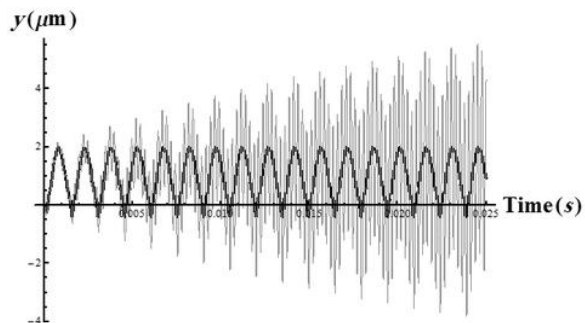
۱.۱ اثر جاذب ارتعاشی بر دامنه ارتعاشات

تأثیر جاذب‌های ارتعاشی در کاهش دامنه ارتعاشات نوک ابزار برش در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ کاملاً مشهود است. با استفاده از جاذب ارتعاشی بهینه در سرعت بالا (۳۰۲۰۰ دور

بر دقیقه)، دامنه ارتعاشات نوک ابزار برش در مقایسه با سیستم بدون جاذب تقریباً یک سوم شده است. شکل ۱۳ مربوط به عملکرد جاذب ارتعاشی خطی و شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب مربوط به جاذب‌های ارتعاشی غیرخطی با میرایی مرتبه دوم و سوم هستند. این نمودارها در سرعت و عمق برش خاصی با استفاده از نرم‌افزار ممتیکا استخراج، رسم و مقایسه شده‌اند.

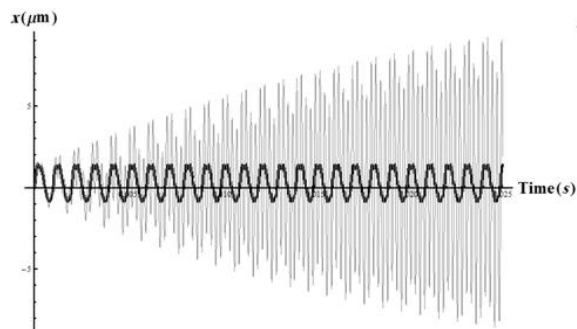


(ب)

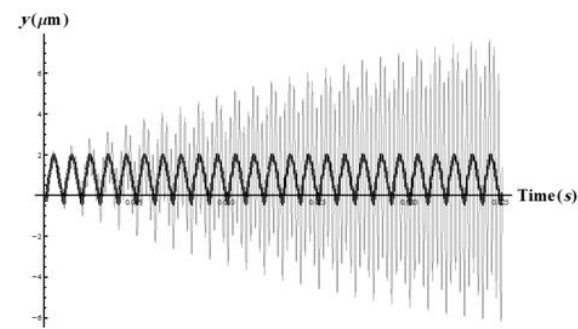


(الف)

شکل ۱۳. ارتعاشات ابزار برش در جهات x و y برای مدل بدون جاذب ارتعاشی (خط نازک) و با جاذب ارتعاشی خطی (خط پر)

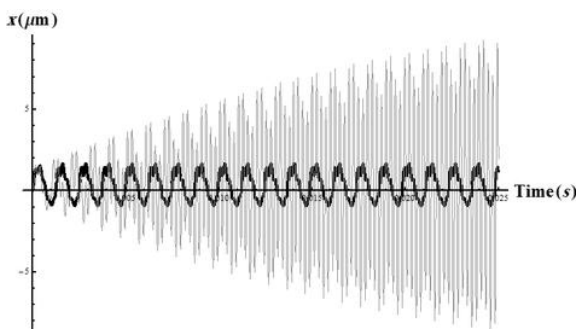


(ب)

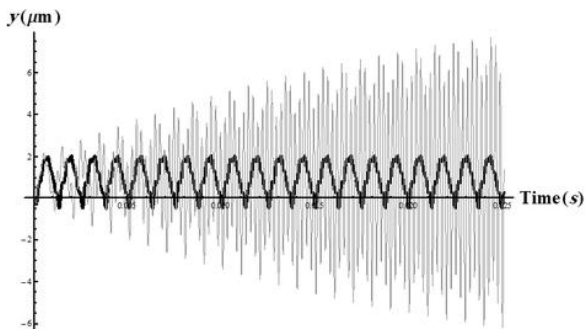


(الف)

شکل ۱۴. ارتعاشات ابزار برش در جهات x و y برای مدل بدون جاذب ارتعاشی (خط نازک) و با جاذب ارتعاشی غیرخطی مرتبه دوم (خط پر)



(ب)



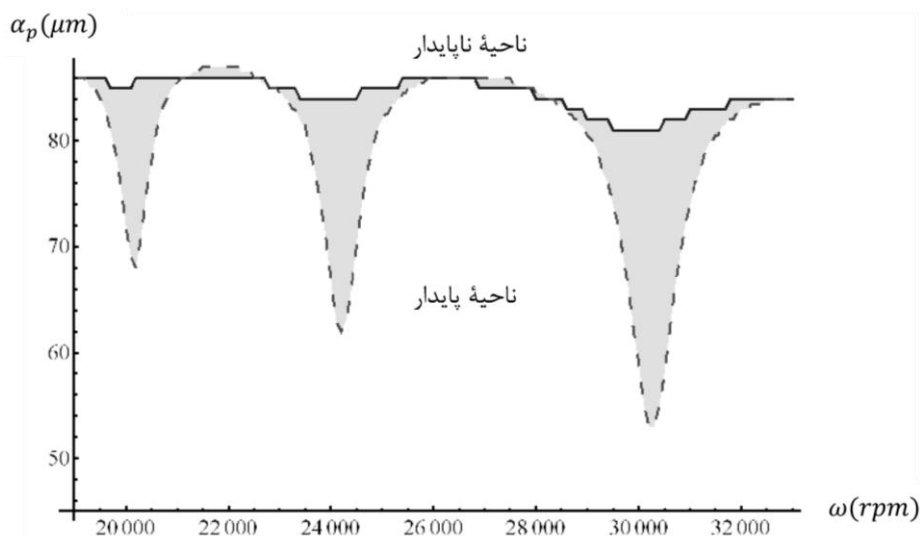
(الف)

شکل ۱۵. ارتعاشات ابزار برش در جهات x و y برای مدل بدون جاذب ارتعاشی (خط نازک) و با جاذب ارتعاشی غیرخطی مرتبه سوم (خط پر)

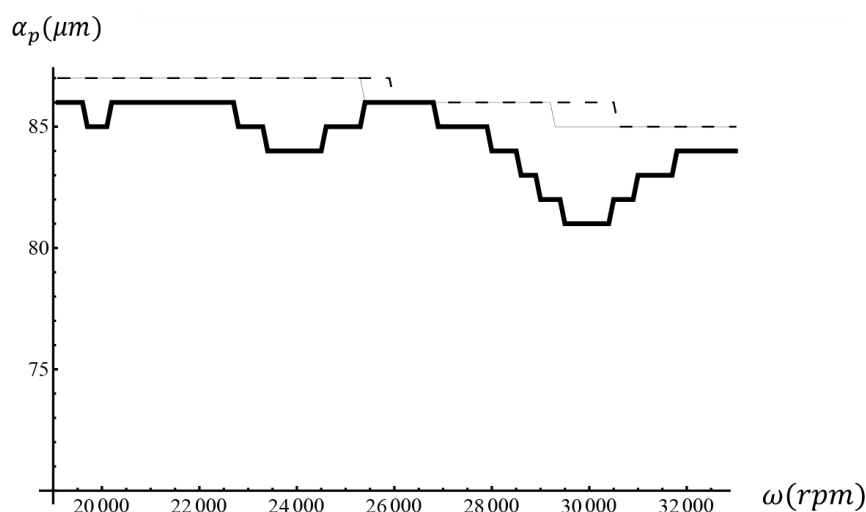
۱۲. تأثیر جاذب ارتعاشی بر پایداری سیستم

در شکل ۱۶ ناحیه‌های پایداری سیستم بدون جاذب و با جاذب ارتعاشی خطی بهینه نمایش و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در ناحیه پایداری انتظار وقوع پدیده ارتعاشات خودتحریک و ایجاد زبری سطح کار شده نمی‌رود [۱۲]. در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نشان داده شده است که جاذب‌های ارتعاشی بهینه‌شده تأثیر بسزایی در کاهش ارتعاشات این

سیستم دارند و پایداری سیستم را برای مقادیر بالاتری از عمق برش تضمین می‌کنند. در واقع قسمت هاشورخورده شکل ۱۶ ناحیه‌ای است که با به کار بردن جاذب‌های ارتعاشی بهینه‌شده به ناحیه پایداری سیستم افزوده شده است. برای جاذب‌های ارتعاشی غیرخطی بهینه نیز نمودارهای پایداری استخراج شده و در شکل ۱۷ همراه با جاذب‌های خطی و غیرخطی بهینه‌شده با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱۶. ناحیه پایداری سیستم میکروفرزکاری بدون جاذب (ناحیه زیر خط چین) و با جاذب ارتعاشی بهینه‌شده (ناحیه زیر خط تیره‌رنگ)



شکل ۱۷. ناحیه پایداری سیستم میکروفرزکاری با جاذب ارتعاشی خطی

(ناحیه زیر خطوط سیاه ضخیم) و با جاذب ارتعاشی غیرخطی با میرایی مرتبه دوم (ناحیه زیر خط چین) و میرایی مرتبه سوم (ناحیه زیر خط سیاه باریک)

۱۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله از جاذب‌های ارتعاشی بهینه خطی و غیرخطی با میرایی مرتبه دوم و سوم برای فرونشاندن ارتعاشات خودتحریک در فرایند میکروفرزکاری استفاده شده است. فرایند میکروفرزکاری به صورت سیستم دو درجه آزادی مدل شده است. مقادیر پارامترهای جاذب‌های ارتعاشی، با استفاده از روش بهینه‌سازی Brute-force method و حل عددی رونگه - کوتای صریح به دست آمده‌اند. تأثیر جاذب‌های ارتعاشی بهینه‌شده بر کاهش ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفته است و بر اساس نتایج حاصل از مقادیر مربوط به دامنه ارتعاشات در حالت‌های مختلف، استفاده از جاذب ارتعاشی بهینه دامنه ارتعاشات ابزار برش را در سرعت‌هایی که احتمال رخداد پدیده ارتعاشات خودتحریک زیاد است بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. این امر سبب افزایش کیفیت سطح تولید شده می‌گردد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نشان داده شد، رفتار ارتعاشی سیستم به هنگام استفاده از جاذب‌های خطی و غیرخطی نزدیک به هم است. بنابراین تفاوت عملکرد آنها در شکل ۱۷، که مربوط به ناحیه‌های پایداری سیستم است، بهتر نشان داده

شده است. همچنین آنالیز پایداری نشان داده است که با استفاده از جاذب‌های ارتعاشی بهینه، محدوده محسوسی (قسمت هاشورخورده شکل ۱۶) با توجه به عمق نفوذ ابزار برش، به ناحیه پایداری فرایند بدون جاذب (ناحیه زیر خطچین) افزوده شده است. در واقع با استفاده از این جاذب‌های ارتعاشی و 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. در نهایت در شکل ۱۷ نشان داده شده است که عملکرد جاذب‌های ارتعاشی غیرخطی بهینه و به خصوص جاذب ارتعاشی غیرخطی با میرایی مرتبه دوم بهتر از جاذب ارتعاشی خطی است. جاذب ارتعاشی غیرخطی مرتبه دوم، با توجه به عمق برش در مرز ناحیه‌های پایداری نشان داده شده، عملکرد سیستم را به میزان ۶۲ درصد نسبت به سیستم بدون جاذب و ۶ درصد نسبت به سیستم با جاذب خطی بهینه، در سرعت بحرانی بررسی شده، بهبود بخشیده است. لذا این نوع جاذب ارتعاشی غیرخطی، بهترین نوع جاذب برای فرایند میکروفرزکاری با مشخصات ذکر شده در این مقاله است.

۱۴. مأخذ

- [1] Frahm, H. "Device for damping vibrations of bodies", US Patent No.989, 958, 1911.
- [2] Ibrahim, R. A. "Recent advances in nonlinear passive vibration isolators." *Journal of Sound and Vibration* 314, 2008, pp. 371-452.
- [3] Snowdon, J. C., *Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems*, John Wiley & Sons, New York, 1968.
- [4] Febbo, M. "Optimal parameters and characteristics of a three degree of freedom dynamic vibration absorber." *Journal of Vibration and Acoustics*, 134, 2012, pp. 10-21.
- [5] Alexander, N.A., F. Schilder. "Exploring the performance of a nonlinear tuned mass damper", *Journal of Sound and Vibration*, 271, 2009, pp. 15-24.
- [6] Karyeaclis, M., T. K. Caughey. "Stability of a semi-active impact damper." *Journal of Applied Mechanics* 56, 1989, pp. 926-940.
- [7] Oueini, S. S., A. H. Nayfeh, J. R. Pratt. "A Nonlinear vibration absorber for flexible structures." *Nonlinear Dynamics*, 15, 1998, pp. 259-282.

- [8] Oueini, S. S., C. M. Chin, A. H. Nayfeh. "Dynamics of a cubic nonlinear vibration absorber." *Nonlinear Dynamics*, 20, 1999, pp. 283–295.
- [9] Gourdon, E., N. A. Alexander, C. H. Lamarque, S. Pernot, C. A. Taylor. "Nonlinear energy pumping under transient forcing with strongly nonlinear coupling theoretical and experimental results." *Journal of Sound and Vibration*, 300, 2007, pp. 522–551.
- [10] Kim, C., J. Mayor, J. Ni. "A static model of chip formation in micro scale milling." *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126, 2004, pp. 710–719.
- [11] Kang, I., J. S. Kim, J. H. Kim, M. Kang, Y. Seo. "A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process." *Journal of Material Processing Technology*, 187, 2007, pp. 250-255.
- [12] Bissacco, G., H. Hansen, J. Slunsky. "Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling." *Manufacturing Technology*, 57, 2008, pp. 113-116.
- [13] Afazov, S. M., S. M. Ratchev, J. Segal. "Modelling and simulation of micro-milling cutting forces." *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2010, pp. 2154-2162.
- [14] Quintana, G., J. Ciurana, D. Teixidor. "A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 2008, pp. 1637–1645.
- [15] Afazov, S. M., S. M. Ratchev, J. Segal, A. A. Popov. "Chatter modelling in micro-milling by considering process nonlinearities." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 56, 2012, pp. 28–38.
- [16] Bao, W. Y., I. N. Tansel. "Modelling micro-end-milling operations: Part II: tool run-out." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2000, pp. 2175–2192.
- [17] Zhongqun, L., L. Qiang. "Solutions and analysis of chatter stability for end milling in the time-domain." *Chinese Journal of Aeronautics* 21, 2008, pp. 169–178.

پی‌نوشت

-
1. chatter
 2. steady state
 3. Explicit Runge-Kutta
 4. orthogonal
 5. Mathematica
 6. tuned mass damper