



اثر طول ابزار روی نرخ براده‌برداری‌های پایدار در فرآیند فرزکاری سرعت بالا

محمد کاظمی نصرآبادی^{۱*}، علی نوری^۱، علی جعفری^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران
۲- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری
*kazemi@ssau.ac.ir، ۰۲۸۴۶۷۳۴۱۱، صندوق پستی

چکیده

فرزکاری سرعت بالا بطور وسیعی در صنعت ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش نسبت به فرزکاری سنتی سریع‌تر و دقیق‌تر می‌باشد. مشخصه‌های دقت و سرعت در روش ساخت، آن را برای تولید قطعات فرزکاری بزرگتر با دقت بالا، مناسب می‌سازد. این تحقیق اثر طول ابزار را روی نرخ براده‌برداری‌های پایدار در فرزکاری سرعت بالا مورد بررسی قرار می‌دهد. نشان داده می‌شود که طول ابزار قویاً فرکانس طبیعی انعطاف پذیرترین مود را تحت تاثیر قرار می‌دهد و بالاترین نرخ براده‌برداری موقعی که طول ابزار در منطقه پایدار با بالاترین سرعت قابل دستیابی است، اتفاق می‌افتد. همچنین بعضی مواقع ابزارهای بلندتر می‌توانند نرخ براده‌برداری‌های بالاتری را نسبت به ابزارهای کوتاه‌تر انتخاب کنند.

کلید واژگان: فرزکاری سرعت بالا، نرخ براده‌برداری، اثر طول ابزار، دالان‌های پایدار

The effect of tools length on stable materials removal rate in high speed milling process

Mohammad Kazemi Nasrabai*, Ali Noori, Ali Jafari

Department of aerospace Engineering, shahid sattari air University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1384673411, Tehran, Iran, kazemi@ssau.ac.ir

ABSTRACT

High-speed milling is widely used in the manufacturing industry. This method is faster and more precise than the traditional milling. The feature of precision and speed in the method of manufacturing has made it suitable for manufacturing of bigger and high precision milling parts. This research studies the effect of tool length on stable materials removal rate in high speed milling processes. It is shown that the tools length is highly affected the natural frequency of the most flexible mode and the high material removal rate is obtained when the tools length in the stable region is accessible with the fastest speed. Furthermore, sometimes longer tools provide higher material removal rate than the short ones.

Keywords: High Speed Milling, Material Removal Rate, Stability Lobes, Tool Length Effect

۱- مقدمه

فرآیند فرزکاری سرعت بالا به طور وسیعی در صنعت هوافضا به‌منظور ساخت قطعات انعطاف‌پذیر مربوط به بدنه هواپیما مورد استفاده قرار گرفته است و مزیت‌هایی نسبت به ماشین‌کاری سنتی دارد که عبارتند از [۱]:

- ۱- به سازندگان روشی عملی و موثر در هزینه به منظور تولید قطعاتی که به آسانی قابلیت تولید توسط فرآیندهای ماشین‌کاری استاندارد را ندارند می‌دهند.
- ۲- در صنعت هوافضا بعضی از قطعات از مونتاژ نمودن تعداد زیادی قطعات ساخته می‌شوند که با استفاده از ماشین‌کاری سرعت بالا می‌توان این قطعات را از یک بلوک واحد ساخته و زمان تولید قطعه را شدیداً کاهش داد.
- ۳- مقاومت و قابلیت اعتماد قطعات توسط روش ماشین‌کاری سرعت بالا افزایش می‌یابد.
- ۴- وزن کاهش می‌یابد.
- ۵- سرعت تولید یا نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد.

۶- تعداد سرویس دهنده‌ها در تولید کاهش می‌یابد.

۷- نیروهای ماشین‌کاری کاهش می‌یابد.

۸- کیفیت سطح بهتر می‌شود.

در فرآیندهای تراش‌کاری و فرزکاری لرزش یک ناپایداری مهم بوده که نرخ براده‌برداری را محدود می‌کند. تاریخ لرزش ماشین‌ابزار بر می‌گردد به سال ۱۹۰۷ موقعی که تیلور [۲] این پدیده را در ماشین‌ابزار به عنوان مهم ترین و حساس‌ترین مسائل صیقل‌کاری یک ماشین‌کار توصیف کرد. در سال 1946 آرنولد [۳] پدیده لرزش و علت ایجاد آن را بصورت اثر دمپینگ منفی توصیف کرد. در سال 1958 توسط توبایاس [۴] مدلی برای تعیین لرزش و بررسی ناپایداری ماشین ابزار ارائه شد. کادینو [۵] و توبایاس [۶] عمومی‌ترین توضیح پذیرفته شده برای لرزش ماشین‌ابزار را اثر بازایی^۱ نامیده‌اند. تحقیقات نسبتاً زیادی پدیده لرزش احیا شونده^۲ را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیقات نشان داده شده است که مرز بین برش پایدار (بدون لرزش) و برش ناپایدار (با لرزش) می‌تواند در ترم‌هایی از عمق برش محوری به عنوان

1. Regenerative
2. Regenerative chatter

Please cite this article using:

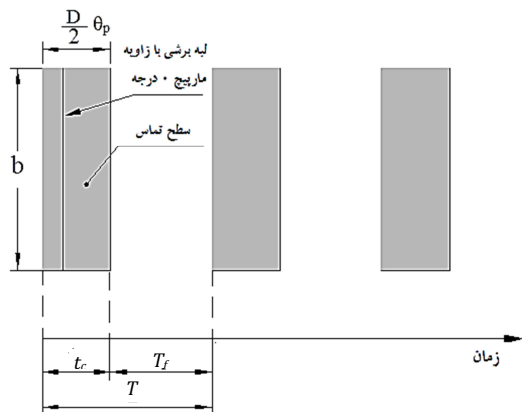
M. Kazemi Nasrabai, A. Noori, A. Jafari, The effect of tools length on stable materials removal rate in high speed milling process, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 95-99, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

$$\Phi = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \begin{bmatrix} -\lambda_1 e^{\lambda_2 t_f} + \lambda_2 e^{\lambda_1 t_f} & -e^{\lambda_1 t_f} + e^{\lambda_2 t_f} \\ -\lambda_1 \lambda_2 e^{\lambda_2 t_f} + \lambda_1 \lambda_2 e^{\lambda_1 t_f} & -\lambda_1 e^{\lambda_1 t_f} + \lambda_2 e^{\lambda_2 t_f} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x(t_c + t_f) \\ \dot{x}(t_c + t_f) \end{cases} = \Phi \begin{cases} x(t_c) \\ \dot{x}(t_c) \end{cases}$$

در شکل ۱ بطور شماتیک فرآیند برش ناپیوسته و پارامترهای مربوط به آن نمایش داده شده‌اند. θ_p زاویه درگیری شعاعی p امین دندان است.



شکل ۱ فرآیند برش ناپیوسته با زاویه مارپیچ ۰°

وقتی لبه برنده در حال برش است، معادله حرکت آن بصورت یک معادله دیفرانسیل تأخیری زمانی (معادله ۵) بیان می‌گردد [۱۱].

$$\ddot{\xi}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{\xi}(t) + \omega_n^2 \xi(t) = -\frac{K_{sx}(t)b}{m} [\xi(t) - \xi(t - \tau)] \quad (5)$$

از آن‌جا که این معادله یک حل تحلیلی بسته^۴ ندارد، یک حل تقریبی بر مبنای جایجایی‌های Z امین جزء از زمان تناوب n ام ابزار به صورت یک ترکیب خطی از چند جمله‌ای‌ها مطابق معادله (۶) در نظر گرفته می‌شود [۱۴]:

$$X(t) = \sum_{j=1}^4 a_{jn}^n \phi_j(\sigma_j(t)) \quad (6)$$

در این رابطه $\sigma_j(t) = t - n\tau - \sum_{k=1}^{j-1} t_k$ زمان محلی در جزء Z ام مربوط به پیرو n ام می‌باشد. بازه زمانی برای k امین جزء t_k و توابع سعی^۵ $\phi_j(\sigma_j(t))$ ، به صورت چند جمله‌ای‌های هرمیت درجه سه^۶ در نظر گرفته می‌شوند. در جزء Z ام این توابع بصورت رابطه (۷) تعریف شده‌اند [۱۴، ۱۳]:

$$\begin{aligned} \phi_1(\sigma_j) &= 1 - 3\left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right)^2 + 2\left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right)^3 \\ \phi_2(\sigma_j) &= t_j \left[\left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right) - 2\left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right)^3 \right] \\ \phi_3(\sigma_j) &= 3\left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right)^2 - 2\left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right)^3 \\ \phi_4(\sigma_j) &= t_j \left[-\left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right) + \left(\frac{\sigma_j}{t_j}\right)^3 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

تابعی از سرعت اسپیندل تصور شود. این نتایج در یک دیاگرام دالان پایدار^۱ آمده است که با استفاده از این دیاگرام‌ها ممکن است ترکیبات مشخصی از پارامترهای ماشین‌کاری را پیدا کنیم که ماکزیمم نرخ براده‌برداری را در شرایط بدون لرزش داشته باشیم [۷-۹]. تلاستی و همکاران [۴] و توپایاس [۵] روش‌های حوزه فرکانسی را برای تحلیل پایدار برش پیوسته ارائه داده‌اند. این روش‌ها بطور وسیع برای محاسبه مرزهای پایدار دقیق برای تراش-کاری و مرزهای پایدار تقریبی برای فرزکاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بای‌لای و همکاران [۱۰] برای محاسبه مرزهای پایدار از روش آنالیز المان محدود زمانی استفاده کرده‌اند. آنالیز المان محدود زمانی^۲ یکی از روش‌های مهم و نسبتاً جدید جهت پیش‌بینی حدود پایدار در فرآیند فرزکاری می‌باشد که این روش برای اولین بار توسط بای‌لای و همکاران به یک فرآیند برشی ناپیوسته اعمال شد. در تحقیقات جدیدتر این روش همچنین در فرآیند فرزکاری با بار جانبی کم مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۲۰۰۲ روش آنالیز المان محدود زمانی توسط بای‌لای و همکاران [۱۱] به دو درجه آزادی و بالاتر توسعه داده شده بود. توسعه به 2-DOF مهم می‌باشد چرا که مدل واقع بین از فرزکاری باید تغییر مکان‌های در جهت X و Y را مدنظر قرار دهد. با توجه به مرور مقالات یکی از بهترین و کارآمدترین روش‌ها جهت تعیین پایدار روش آنالیز المان محدود زمانی می‌باشد. در این تحقیق اثر طول ابزار در محدوده پایدار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی تحلیل اجزاء محدود زمانی (TFEA) برای پیش‌بینی حدود پایدار فرزکاری با لبه برنده مستقیم

در این تحقیق حدود پایدار در فرآیند فرزکاری توسط روش توانمند تحلیل اجزاء محدود زمانی تعیین می‌گردد. در این روش، زمانی که ابزار در تماس با قطعه کار نباشد سیستم ارتعاشات آزاد را تجربه می‌کند و می‌توان حل کاملی داشت. در حین درگیری لبه برنده با قطعه کار، زمان برش به تعداد معینی جزء تقسیم می‌گردد که یک حل تقریبی را ارائه می‌دهد. از انطباق این دو حل، یک سیستم خطی مجزا^۳ بدست می‌آید که پایدار فرآیند را می‌توان به کمک مشخصه‌های این سیستم خطی مجزا، بررسی کرد. این روش اولین بار توسط بای‌لای و همکاران [۱۲] برای یک فرآیند برشی ناپیوسته به کار گرفته شد. در حالتی که لبه برنده با قطعه تماس ندارد، حرکت سیستم به صورت ارتعاشات آزاد مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = 0 \quad (1)$$

حل دقیق ارتعاشات آزاد توسط رابطه (۲) داده شده است:

$$x(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} \quad (2)$$

در این رابطه $\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm i\omega_d$ و $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ می‌باشد که ω_n فرکانس طبیعی سیستم بر حسب رادیان بر ثانیه و ζ نسبت میرایی می‌باشد که توسط رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3)$$

در $t = t_c$ لبه برنده قطعه کار را ترک نموده و پس از آن مدت زمان ارتعاشات آزاد t_f می‌باشد. به منظور ارتباط حالت ابزار در شروع ارتعاشات آزاد به حالت آن در انتهای ارتعاشات آزاد، ماتریس انتقال حالت بصورت رابطه (۴) محاسبه شده است [۱۳، ۱۲]:

4. Closed Form
5. Trial Function
6. Cubic Hermit Polynomials

1. Stability Lobes Diagram (SLD)
2. TFEA (Time Finite Element Analysis)
3. Linear discrete map

معادلات (۸) و (۹) در ماتریس کلی مطابق رابطه (۱۰) مرتب می‌شوند که ضرایب حل مفروض را به صورت بازگشتی به ضرایب مربوط به عبور قبلی لبه برنده ارتباط می‌دهد:

در این معادله زیرماتریس‌ها و درآیه‌های آنها برای زامین جزء بصورت رابطه (۱۱) تعریف شده‌اند:

$$N_1^j = \begin{bmatrix} N_{11}^j & N_{12}^j \\ N_{21}^j & N_{22}^j \end{bmatrix}, \quad N_2^j = \begin{bmatrix} N_{13}^j & N_{14}^j \\ N_{23}^j & N_{24}^j \end{bmatrix}$$

$$P_1^j = \begin{bmatrix} P_{11}^j & P_{12}^j \\ P_{21}^j & P_{22}^j \end{bmatrix}, \quad P_2^j = \begin{bmatrix} P_{13}^j & P_{14}^j \\ P_{23}^j & P_{24}^j \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$N_{mi} = \int_0^{t_j} \{m\ddot{\phi}_i + c\dot{\phi}_i + (k + K_c b)\phi_i\} \psi_m d\sigma$$

$$C_m = \int_0^{t_j} b f_0 \psi_m d\sigma \quad P_{mi} = \int_0^{t_j} K_c b \phi_i \psi_m d\sigma$$

معادله (۱۱) یک سیستم دینامیکی گسسته را بیان می‌کند که می‌تواند بصورت خلاصه شده طبق روابط (۱۲) یا (۱۳) نوشته شود [۱۱].

$$Aa_n = Ba_{n-1} + C \quad (12)$$

یا:

$$a_n = \phi a_{n-1} + D \quad (13)$$

مقادیر ویژه ماتریس انتقال $\phi = A^{-1}B$ ، مضارب مشخصه^۳ نامیده می‌شوند و با توان مشخصه که پایداری سیستم‌های پیوسته را نشان می‌دهند، قابل مقایسه می‌باشند. شرط پایداری سیستم دینامیکی گسسته فوق برای سرعت اسپیندل (Ω) و عمق برش (b) داده شده این است که اندازه کلیه مضارب مشخصه کوچکتر از ۱ باشد [۱۲].

با استفاده از این شرط پایداری می‌توانیم مرزهای بین برش پایدار و ناپایدار را بصورت تابعی از سرعت اسپیندل و عمق برش نشان دهیم.

۳- اثر طول ابزار برشی روی دیاگرام دالان پایداری

در فرآیند فرزکاری انگشتی طول ابزار برشی عموماً فرکانس‌های مودال و در نتیجه موقعیت‌های دالان‌های پایداری و حدود آن را تعیین می‌کند اگر طول ابزار افزایش یابد محل دالان‌های پایداری به سمت چپ حرکت می‌کند. همچنین حدود پایداری نیز پایین‌تر می‌آید. بالاترین نرخ براده برداری موقعی که طول ابزار در منطقه‌ای پایدار با بالاترین سرعت قابل دستیابی است اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه طول ابزار فرکانس طبیعی انعطاف‌ترین مود را تحت تاثیر قرار می‌دهد و تغییرات در فرکانس پایدارترین سرعت را نیز در دیاگرام دالان پایداری تغییر می‌دهد ابتدا برای ابزار با طول مختلف از طریق آزمایش تابع پاسخ فرکانسی را محاسبه و پارامترهای فرکانس، سختی مودال، جرم مودال و استهلاک را محاسبه و در محاسبات مربوط به دیاگرام دالان پایداری لحاظ می‌کنیم. در بخش بعدی مراحل طراحی آزمایش و تست مودال ارائه شده است.

۴- طراحی آزمایش

ابزار فرز انگشتی دو لبه از جنس HSS با قطر ۱۲ mm و طول کلی ۱۱۰ mm انتخاب و با طول‌های بیرون آمدگی ۰.۴ mm، ۶۰ mm و ۸۰ mm داخل کولت قرار گرفته و آزمایش تست مودال انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است که آنالیز

این توابع بصورت فوق تعریف شده‌اند تا بتوان ضرایب حل مفروض را با انطباق سرعت‌های اولیه و انتهایی هر جزء، بدست آورد. با جایگزینی معادله (۶) در معادله حرکت (۵) یک خطای غیر صفر ایجاد می‌شود. خطای حل مفروض با ضرب کردن در مجموعه‌ای از توابع آزمایشی^۱، وزن‌دار می‌شود. انتگرال خطای وزن‌دار مساوی صفر قرار داده شده و در نتیجه دو معادله اضافی برای هر جزء بدست می‌آید. توابع آزمایشی به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که ساده‌ترین توابع ممکن باشند: $\psi_1(\sigma_j) = 1$ (ثابت) و $\psi_2(\sigma_j) = \frac{\sigma_j}{t_j} - \frac{1}{2}$ (خطی). انتگرال‌گیری در بازه زمان هر جزء، $t_j = \frac{t_c}{E}$ انجام می‌شود و معادله (۸) حاصل می‌گردد [۱۱]:

$$\int_0^{t_j} \left\{ M \left(\sum_{i=1}^4 a_{ji}^n \ddot{\phi}_i(\sigma_j) \psi_m(\sigma_j) \right) + C \left(\sum_{i=1}^4 a_{ji}^n \dot{\phi}_i(\sigma_j) \psi_m(\sigma_j) \right) + (K + bK_c(\sigma_j)) \left(\sum_{i=1}^4 a_{ji}^n \phi_i(\sigma_j) \psi_m(\sigma_j) \right) - bK_c(\sigma_j) \left(\sum_{i=1}^4 a_{ji}^{n-1} \phi_i(\sigma_j) \psi_m(\sigma_j) \right) - b f_0(\sigma_j) \psi_m(\sigma_j) \right\} d\sigma_j = 0, \quad m=1,2 \quad (8)$$

E تعداد جزء‌های محدود در برش و شمارنده m برای مشخص کردن توابع آزمایشی استفاده شده است. جملات $K_c(\sigma_j)$ و $f_0(\sigma_j)$ بجای $K_c(t)$ و $f_0(t)$ بکار رفته‌اند تا بطور واضح، وابستگی آن‌ها به زمان محلی را نشان دهند. ارتباط بین شرایط اولیه و نهایی در ارتعاشات آزاد برحسب ضرایب توابع اصلی^۲ بصورت رابطه (۹) بیان می‌شود [۱۱]:

$$\begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{pmatrix}^n = \Phi \begin{pmatrix} a_{E3} \\ a_{E4} \end{pmatrix}^{n-1} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، a_{11}^n و a_{12}^n به ترتیب جابجایی و سرعت در ورود به جزء اول در زمان تناوب n و همچنین a_{E3}^{n-1} و a_{E4}^{n-1} به ترتیب جابجایی و سرعت در خروج از المان E^۳ در زمان تناوب $n-1$ می‌باشند. برای سایر اجزاء شرط پیوستگی موقعیت و سرعت در انتهای هر جزء با موقعیت و سرعت در ابتدای جزء بعدی برقرار می‌شود.

$$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ N_1^1 & N_2^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & N_1^2 & N_2^2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & N_1^E & N_2^E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \end{bmatrix} \\ \dots \\ \begin{bmatrix} a_{E3} \\ a_{E4} \end{bmatrix} \end{Bmatrix} = \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \Phi \\ P_1^1 & P_2^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_1^2 & P_2^2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & P_1^E & P_2^E \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \end{bmatrix} \\ \dots \\ \begin{bmatrix} a_{E3} \\ a_{E4} \end{bmatrix} \end{Bmatrix}^{n-1} + \begin{Bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \\ \dots \\ \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \end{Bmatrix}$$

3. Characteristic multipliers (CMs)

1. Test Functions
2. Basis Functions



شکل ۵ نمودار تابع پاسخ فرکانسی در جهت X برای طول بیرون آمدگی ابزار برابر ۶۰ میلی متر



شکل ۶ نمودار تابع پاسخ فرکانسی در جهت X برای طول بیرون آمدگی ابزار برابر ۸۰ میلی متر

با استفاده از نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی، مقادیر فرکانس و ضریب میرایی در جهت X و Y بصورت جدول ۱ بدست می آید.

با توجه به جدول ۱ مشاهده می شود که با افزایش طول ابزار، انعطاف پذیری نیز بیشتر می شود. اطلاعات جدول ۱ جهت شبیه سازی های مربوط به محاسبه دیاگرام دالان پایداری مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این تحقیق ابتدا فرآیند فرزکاری دو درجه آزادی با بار جانبی کم (۱۰٪ درگیری) در حالت مخالف ۲ با استفاده از پارامترهای مودال و شرایط ماشین کاری داده شده در جدول های ۲ و ۳ با استفاده از روش آنالیز المان محدود زمانی شبیه سازی شده است. نتیجه حاصل از شبیه سازی دیاگرام دالان پایداری در محدوده سرعت اسپیندل ۱۰۰۰۰-۳۰۰۰ rpm و در محدوده عمق برش mm ۱-۱۰ در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱ مقادیر فرکانس و ضریب میرایی در جهت X و Y

طول بیرون آمدگی ابزار	۴۰ mm	۶۰ mm	۸۰ mm
فرکانس در جهت X	۱۸۹۲	۱۴۷۹	۸۰۳
فرکانس در جهت Y	۲۳۱۷	۱۴۶۵	۱۰۳۴
ضریب میرایی در جهت X	۰/۰۷۳۵	۰/۰۱۰۲	۰/۰۴۱۶
ضریب میرایی در جهت Y	۰/۰۵۷۱	۰/۰۲۸۶	۰/۰۹۶۸

جدول ۲ پارامترهای مودال ابزار [۱۰]

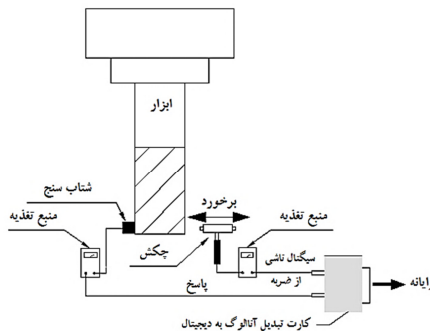
	X	Y
فرکانس (Hz)	۹۲۲	۹۲۲
نسبت استهلاک (%)	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱
سختی (N/m)	$1/34 \times 10^6$	$1/34 \times 10^6$

جدول ۳ پارامترهای برشی [۱۰]

تعداد دندانه های برشی	N=۲
ضریب برشی مماسی	$6 \times 10^{-8} \text{ N/m}^2$
ضریب برشی نرمال	$2 \times 10^{-8} \text{ N/m}^2$
قطر ابزار	D=۱۲/۷mm
پیشروی بر دندانه	Ft=۰/۱mm/tooth
نسبت عمق برش شعاعی به قطر ابزار	D=۰/a

مودال تحقیقی است در مورد ویژگی ها و مشخصات دینامیکی یک سازه مکانیکی که تحت تاثیر محرکی دینامیکی قرار گرفته باشد و به ما کمک می کند که از چگونگی ارتعاش یک سازه شامل فرکانس و میرایی و شکل مود مطلع گردیم.

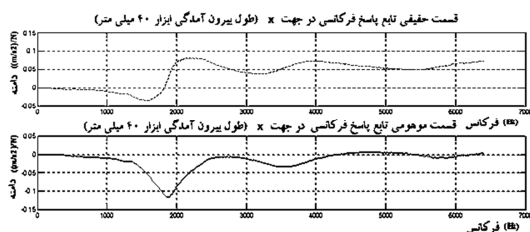
دیاگرام شماتیک انجام آزمایش مودال ابزار در شکل ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق به منظور اندازه گیری تابع پاسخ فرکانسی ابزار، ابتدا ابزار فرز انگشتی فولاد تندبر دو لبه به طول ۱۱۰ میلی متر و به قطر ۱۲ میلی متر داخل کولت دستگاه فرز سی ان سی^۱ مدل FP4MA قرار گرفته و شتاب سنج در نوک ابزار و در جهت X قرار می گیرد سپس ابزار توسط چکش در جهت X تحریک می شود. همین عمل برای جهت Y نیز تکرار شده است. این آزمایش برای طول های بیرون آمدگی ابزار از اسپیندل به مقدار ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی متر انجام می گیرد. شکل ۳ نحوه انجام آزمایش مودال را نشان می دهد. تابع پاسخ فرکانسی برای قسمتهای حقیقی و موهومی در جهت X و Y برای طول های بیرون آمدگی ابزار برابر با ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی متر اندازه گیری شده است. نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی برای قسمت های حقیقی و موهومی در جهت X برای طول های بیرون آمدگی ابزار برابر با ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی متر در شکل های ۴ تا ۶ نشان داده شده است.



شکل ۲ دیاگرام شماتیک انجام آزمایش مودال ابزار



شکل ۳ نحوه انجام آزمایش مودال ابزار



شکل ۴ نمودار تابع پاسخ فرکانسی در جهت X برای طول بیرون آمدگی ابزار برابر ۴۰ میلی متر

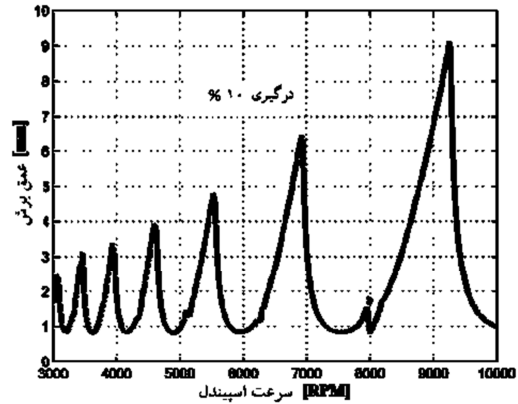
2. Up-Milling

1. CNC (computer numerical control)

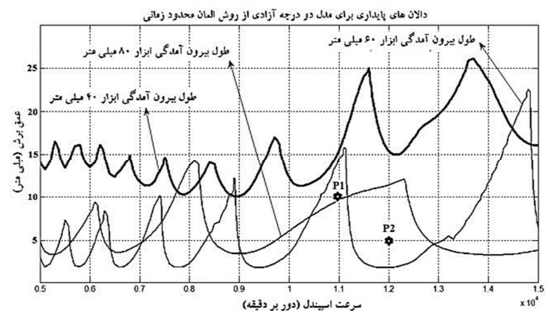
توانند نرخ‌های براده‌برداری‌های بالاتری را نسبت به ابزارهای کوتاهتر انتخاب کنند. به عبارت دیگر این مطلب که همیشه ابزارهای کوتاهتر بهتر است واقعیت ندارد.

۶- مراجع

- [1] Francis Donald Caulfield, *Electromechanical actuator development for integrated chatter prediction on high speed machining centers*, master of science, 2002
- [2] F.W. Taylor, On the art of cutting metals, *Transactions of ASME* 28 31-350, 1907
- [3] RN Arnold, The mechanism of tool vibration in the cutting of steel, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1946.
- [4] S.A. Tobias, W. Fishwick, The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions, *Transaction of the ASME* 80 (1958) 1079-1088.
- [5] V.A. Kudinov, Theory of vibration generated from metal cutting (in Russian), *New Technology of Mechanical Engineering*, USSR Academy of Sciences Publishing House, Moscow, 1955.
- [6] Tobias, S. A., *Machine Tool Vibration*, Wiley, New York. 1965
- [7] Y. Altintas, D. Montgomery, E. Budak, Dynamic peripheral milling of flexible structures, *ASME J. Eng. Ind.* 114 (1992) 137-145.
- [8] J. Tlustý, M. Poláček, The stability of machine tools against self-excited vibrations in machining, *Proceedings of the ASME International Research in Production Engineering*, Pittsburgh, USA, (1963) 465-474.
- [9] H.E. Merrit, Theory of self-excited machine tool chatter, *Journal of Engineering for Industry* 87 (1965) 447-454.
- [10] Bayly, P.V., Halley, J.E., Mann, B.P. and Davies, M.A., Stability of interrupted cutting by temporal finite element analysis, *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference*, DETC/2001 VIB-21581, Pittsburgh, PA., 2001
- [11] P. V. Bayly, Brian P. Mann, Tony L. Schmitz, David A. Peters, Gabor Stepan, Tamas Insperger, Effects of Radial Immersion and Cutting Direction on Chatter Instability in End-Milling, *ASME International Mechanical Engineering Conference & Exhibition* New Orleans, Louisiana, November 17-22, 2002
- [12] Bayly, P. V., Halley, J. E., Mann, B. P., Davies, M. A., Stability of Interrupted Cutting by Temporal Finite Element Analysis. *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 125, 220-225, 2003
- [13] Insperger, T., Mann, B.P., Stepan, G., Bayly, P.V., Stability of Up-Milling and Down-Milling, Part1: Alternative Analytical Methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 43, 25-34, 2003
- [14] Mann, B.P., Bayly, P.V., Davies, M.A., Halley, J.E., 2004. Limit Cycles, Bifurcations, and Accuracy of the Milling Process. *Journal of Sound and Vibration*. 277, 31-48.



شکل ۷ نمودار دالان‌های پایداری حاصل از روش TFEA با زاویه ماریچ صفر درجه



شکل ۸ دیاگرام دالان پایداری برای طول‌های بیرون آمدگی مختلف ابزار از اسپیندل

حال با اطمینان از صحت شبیه‌سازی، برای طول‌های بیرون آمدگی مختلف ابزار از اسپیندل، پارامترهای به دست آمده از تست مودال را مورد استفاده قرار داده و دیاگرام دالان پایداری را شبیه‌سازی و اثر طول ابزار را بررسی می‌نماییم. شکل ۸ نتیجه شبیه‌سازی برای طول‌های بیرون آمدگی ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی متر را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که چگونه طول ابزار نرخ براده‌برداری پایدار قابل قبول را تحت تاثیر قرار می‌دهد به‌عنوان مثال برای سرعت اسپیندل ۱۲۰۰۰ rpm و عمق برش محوری ۵mm (نقطه P1) ابزار با طول بیرون آمدگی ۸۰mm بهتر از ابزار با طول بیرون آمدگی ۶۰mm است. اما برای سرعت اسپیندل ۱۱۰۰۰ rpm و عمق برش محوری ۱۰mm (نقطه P2) ابزار با طول بیرون آمدگی ۶۰mm بهتر از ابزار با طول بیرون آمدگی ۸۰mm است و در نتیجه این مطلب که همیشه ابزار کوتاهتر بهتر است واقعیت ندارد.

۵- نتیجه‌گیری

در حالت عمومی همان‌طور که طول ابزار افزایش می‌یابد جرم موثر افزایش، سختی کاهش و فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابد. طول ابزار برش عمدتاً فرکانس‌های مودال و در نتیجه موقعیت‌های دالان پایداری و حدود آن را تعیین می‌کند. اگر طول ابزار افزایش یابد محل دالان‌های پایداری به سمت چپ حرکت نموده (یعنی سرعت‌های اسپیندل پایینتر) و همچنین حدود پایداری نیز پایین‌تر می‌آید.

اگر چه افزایش طول ابزار حد پایداری را کاهش می‌دهد ولی در بعضی مواقع بدست آوردن دالان‌های پایداری در سرعت‌های پایینتر مطلوب ما است. بالاترین نرخ براده‌برداری موقعی که طول ابزار در منطقه‌ای پایدار با بالاترین سرعت قابل دستیابی است اتفاق می‌افتد. بعضی مواقع ابزارهای بلندتر می-