



اثر طول ابزار روی نرخ براده برداری های 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

*تهران، صندوق پستی ۱۳۸۴۶۷۳۴۱۱، kazemi@ssau.ac.ir

چکیده

فرزکاری سرعت بالا بطور وسیعی در صنعت ساخت مورد استفاده قرار می گیرد. این روش نسبت به فرزکاری سنتی سریع تر و دقیق تر می باشد. مشخصه های دقت و سرعت در روش ساخت، آن را برای تولید قطعات فرزکاری بزرگتر با دقت بالا، مناسب می سازد. این تحقیق اثر طول ابزار را روی نرخ براده برداری های پایدار در فرزکاری سرعت بالا مورد بررسی قرار می دهد. نشان داده می شود که طول ابزار قویاً فرکانس طبیعی انعطاف پذیرترین مود را تحت تاثیر قرار می دهد و بالاترین نرخ براده برداری موقعی که طول ابزار در منطقه پایدار با بالاترین سرعت قابل دستیابی است، اتفاق می افتد. همچنین بعضی مواقع ابزارهای بلندتر می توانند نرخ براده برداری های بالاتری را نسبت به ابزارهای کوتاه تر انتخاب کنند.

کلید واژگان: فرزکاری سرعت بالا، نرخ براده برداری، اثر طول ابزار، دالان های پایداری

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 به منظور ساخت قطعات انعطاف پذیر مربوط به بدنه هواپیما مورد استفاده قرار گرفته است و مزیت هایی نسبت به ماشین کاری 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 ماشین کاری استاندارد را ندارند می دهند.
- ۲- در صنعت هوافضا بعضی از قطعات از مونتاژ نمودن تعداد زیادی قطعات ساخته می شوند که با استفاده از ماشین کاری سرعت بالا می توان این قطعات را از یک بلوک واحد ساخته و زمان تولید قطعه را شدیداً کاهش داد.
- ۳- مقاومت و قابلیت اعتماد قطعات توسط روش ماشین کاری سرعت بالا افزایش می یابد.
- ۴- وزن کاهش می یابد.
- ۵- سرعت تولید یا نرخ براده برداری افزایش می یابد.

۶- تعداد سرویس دهنده ها در تولید کاهش می یابد.

۷- نیروهای ماشین کاری کاهش می یابد.

۸- کیفیت سطح بهتر می شود.

در فرآیندهای تراش کاری و فرزکاری لرزش یک ناپایداری مهم بوده که نرخ براده برداری را محدود می کند. تاریخ لرزش ماشین ابزار بر می گردد به سال ۱۹۰۷ موقعی که تیلور [۲] این پدیده را در ماشین ابزار به عنوان مبهم ترین و حساس ترین مسائل صیقل کاری یک ماشین کار توصیف کرد. در سال ۱۹۴۶ آرنولد [۳] پدیده لرزش و علت ایجاد آن را بصورت اثر دمپینگ منفی توصیف کرد. در سال ۱۹۵۸ توسط توپایاس [۴] مدلی برای تعیین لرزش و بررسی ناپایداری ماشین ابزار ارائه شد. کادینو [۵] و توپایاس [۶] عمومی ترین توضیح پذیرفته شده برای لرزش ماشین ابزار را اثر بازبازایی^۱ نامیده اند. تحقیقات نسبتاً زیادی پدیده لرزش احیا شونده^۲ را مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیقات نشان داده شده است که مرز بین برش پایدار (بدون لرزش) و برش ناپایدار (با لرزش) می تواند در ترم هایی از عمق برش محوری به عنوان

1. Regenerative
2. Regenerative chatter

Please cite this article using:

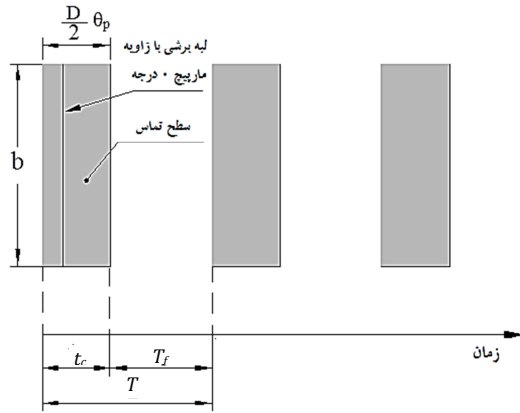
M. Kazemi Nasrabai, A. Noori, A. Jafari, The effect of tools length on stable materials removal rate in high speed milling process, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 95-99, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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

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

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 °

وقتی لایه 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 جابجایی‌های ξ 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 j 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 j ام این توابع بصورت رابطه (۷) تعریف شده‌اند [۱۴، ۱۳]:

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

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 پایداری برش پیوسته ارائه داده‌اند. این روش‌ها بطور وسیع برای محاسبه مرزهای پایداری دقیق برای تراش-کاری و مرزهای پایداری تقریبی برای فرزکاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بای‌لای و همکاران [۱۰] برای محاسبه مرزهای پایداری از روش آنالیز المان محدود زمانی استفاده کرده‌اند. آنالیز المان محدود زمانی^۲ یکی از روش‌های مهم و نسبتاً جدید جهت پیش‌بینی حدود پایداری 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 پایداری روش آنالیز المان محدود زمانی می‌باشد. در این تحقیق اثر طول ابزار در محدوده پایداری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی تحلیل اجزاء محدود زمانی (TFEA) برای

پیش‌بینی حدود پایداری فرزکاری با لایه برنده مستقیم

در این تحقیق حدود پایداری 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 لایه 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 پایداری 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 لایه 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 $t = t_c$ لایه 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 z آمین 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 پایداری 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 ۱۲mm و طول کلی ۱۱۰mm انتخاب و با طول‌های بیرون آمدگی ۴۰mm، ۶۰mm و ۸۰mm 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]:

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

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 ام 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.

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

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

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 میلی‌متر



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

با استفاده از نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی، مقادیر فرکانس و ضریب میرایی در جهت X و Y بصورت جدول ۱ بدست می‌آید. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که با افزایش طول ابزار، انعطاف پذیری نیز بیشتر می‌شود. اطلاعات جدول ۱ جهت شبیه‌سازی‌های 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 ماشین‌کاری داده شده در جدول‌های ۲ و ۳ با استفاده از روش آنالیز المان محدود زمانی شبیه‌سازی شده است. نتیجه حاصل از شبیه‌سازی 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.

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

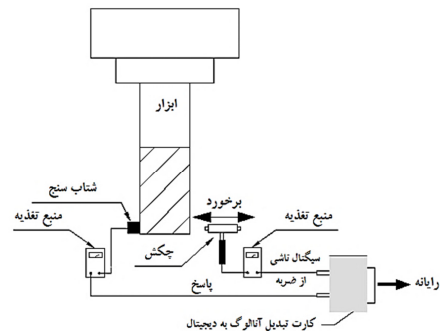
	X	Y
فرکانس (Hz)	۹۲۲	۹۲۲
نسبت استهلاک (%)	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱
سختی (N/m)	$1/34 \times 10^6$	$1/34 \times 10^6$

تعداد دندان‌های 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 دندان‌ها	Ft=۰/۱mm/tooth
نسبت عمق برش شعاعی به قطر ابزار	D=۰/۱a

2. Up-Milling

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

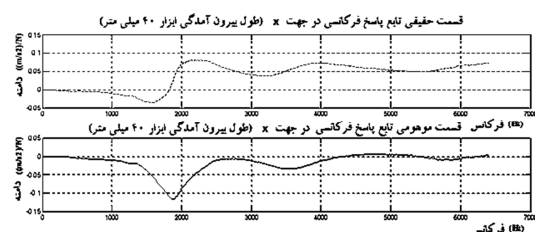
دیاگرام شماتیک انجام آزمایش مودال ابزار در شکل ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری تابع پاسخ فرکانسی ابزار، ابتدا ابزار فرزانشستی فولاد تندبر دو لبه به طول ۱۱۰ میلی‌متر و به قطر ۱۲ میلی‌متر داخل کولت دستگاه فرز سی ان سی^۱ مدل FP4MA قرار گرفته و شتاب سنج در نوک ابزار و در جهت X قرار می‌گیرد سپس ابزار توسط چکش در جهت X تحریک می‌شود. همین عمل برای جهت Y نیز تکرار شده است. این آزمایش برای طول‌های بیرون‌آمدگی ابزار از اسپیندل به مقدار ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر انجام می‌گیرد. شکل ۳ نحوه انجام آزمایش مودال را نشان می‌دهد. تابع پاسخ فرکانسی برای قسمتهای حقیقی و موهومی در جهت X و Y برای طول‌های بیرون‌آمدگی ابزار برابر با ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. نمودارهای تابع پاسخ فرکانسی برای قسمت‌های حقیقی و موهومی در جهت X برای طول‌های بیرون‌آمدگی ابزار برابر با ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است.



شکل ۲ دیاگرام شماتیک انجام آزمایش مودال ابزار



شکل ۳ نحوه انجام آزمایش مودال ابزار



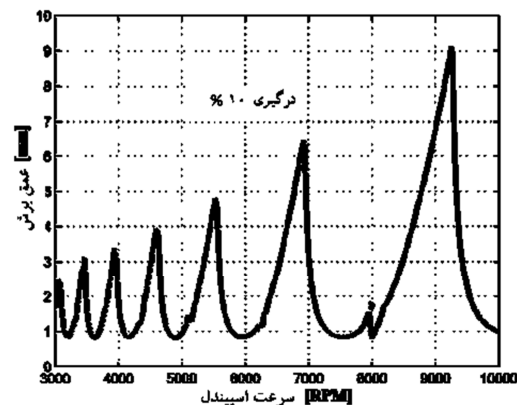
شکل ۴ نمودار تابع پاسخ فرکانسی در جهت X برای طول بیرون آمدگی ابزار برابر ۴۰ میلی‌متر

1. CNC (computer numerical control)

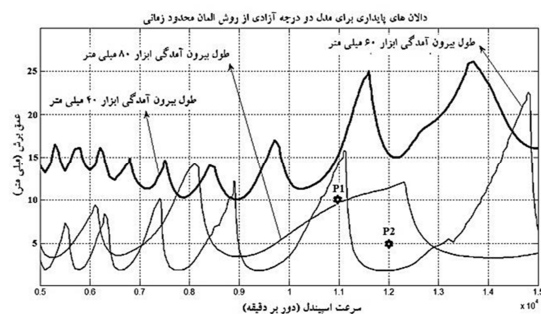
توانند نرخ‌های براده‌برداری‌های بالاتری را نسبت به ابزارهای کوتاه‌تر انتخاب کنند. به عبارت دیگر این مطلب که همیشه ابزارهای کوتاه‌تر بهتر است واقعیت ندارد.

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. Polacek, 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 مارپیچ 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 ۵ mm (نقطه P1) ابزار با طول بیرون آمدگی ۸۰ mm بهتر از ابزار با طول بیرون آمدگی ۶۰ mm است. اما برای سرعت اسپیندل ۱۱۰۰۰ rpm و عمق برش محوری ۱۰ mm (نقطه P2) ابزار با طول بیرون آمدگی ۶۰ mm بهتر از ابزار با طول بیرون آمدگی ۸۰ mm 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-