

مطالعه تحلیلی و تجربی ناپایداری در فرآیند فرزکاری و بررسی چگونگی تأثیر پارامترهای برشی و سختی ابزار

محمد مهدی ابوترابی زارچی^۱ و محمدرضا رازفر^۲

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۵/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۲/۰۳)

چکیده

در این مقاله، به کمک معادلات ارتعاشی ابزار در دو جهت X و Y، پدیده چتر در فرآیند فرزکاری مدل سازی شده است. برای حل این معادلات، ویژگی های ساختاری ابزار برشی، نظیر فرکانس طبیعی اصلی، ضریب میرایی و سختی آن در جهت های X و Y باید معلوم باشد. برای تعیین این ویژگی ها، "آزمایش مودال" انجام شده و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مدل تحلیلی ارائه شده برای پدیده چتر، در عمق های برش محوری مختلف مورد بررسی تجربی قرار گرفته و درستی آن تأیید شده است. میزان عمق برش بحرانی در فرآیند شیار تراشی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V با ابزار کاربیدی بصورت های تجربی و تحلیلی در حدود ۵ میلیمتر بدست آمده است. پس از اطمینان از صحت مدل ارائه شده برای پیش بینی وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر، تأثیر پارامترهای سرعت برشی، سختی ابزار فرز انگشتی و عمق برش شعاعی بر پایداری سیستم برشی شبیه سازی شده است. با افزایش سرعت برشی، سیستم بین حالت های پایدار و ناپایدار چند بار سوئیچ می کند. دلیل این رفتار شکل خاص نمودار دالان های پایداری (SLD) است. افزایش سختی ابزار برشی و کاهش میزان درگیری شعاعی ابزار با قطعه کار فرآیند را پایدارتر می سازد.

واژه های کلیدی: فرزکاری، چتر، آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V، آزمایش مودال، مدل سازی نیروی برشی

Analytical and Experimental Investigations of Instability in Milling Process and Studying the Effect of Cutting Parameters and Tool Stiffness

M.M. Abootorabi Zarchi and M.R. Razfar

Mech. Eng. Dep't., AmirKabir Univ. of Tech.

ABSTRACT

Using cutting tool vibration equations in x and y directions, the chatter phenomenon in milling process is modeled. To solve these equations, cutting tool structural characteristics, such as natural frequency, damping ratio, and its stiffness in x and y directions must be known. For finding these properties, "Modal Test" is performed and its results are analyzed. The suggested analytical model for chatter phenomenon is tested experimentally in different axial depth of cut and its correctness is proved. The critical depth of cut in slotting Titanium alloy Ti6Al4V with Carbide tool is achieved both experimentally and analytically about 5 mm. After validation the suggested model for predicting chatter, the effect of cutting speed, endmill stiffness, and radial depth of cut on cutting system stability are simulated. Increasing the cutting speed causes system switches between stable and unstable conditions for several times. This is because of the special shape of the Stability Lobe Diagram (SLD). Increasing the endmill stiffness and decreasing the radial depth of the cut or tool-workpiece engagement make the process more stable.

Keywords: Milling, Chatter, Titanium Alloy Ti6Al4V, Modal Test, Cutting Force Modeling

۱- دانشجوی دکترا (نویسنده پاسخگو): abootorabi@aut.ac.ir

۲- استادیار: razfar@aut.ac.ir

۱- مقدمه

محدوده پایدار باشد. بدست آوردن حداکثر عمق برشی که می‌توان در آن بصورت پایدار عملیات شیارتراشی را با یک ابزار فرز مشخص انجام داد، از اهمیت خاصی در صنعت برخوردار است.

در این مقاله، به کمک معادلات دینامیکی ارتعاش ابزار در جهت‌های X و Y، مدلی برای پیش‌بینی وقوع پدیده چتر در فرآیند فرزکاری ارائه شده‌است. برای حل معادلات ارتعاشی باید ویژگی‌های ساختاری ابزار برشی نظیر فرکانس طبیعی اصلی، ضریب میرایی و سختی آن معلوم باشد. برای تعیین این ویژگی‌ها، "آزمایش مودال" انجام شده و نتایج حاصل از آن، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌است. به کمک روابط تحلیلی و داده‌های تجربی حاصل از آزمایش مودال، وقوع یا عدم وقوع پدیده چتر در فرآیند شیارتراشی بر روی قطعه‌کاری از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti_6Al_4V در حالت‌های مختلفی از عمق برش محوری، پیش‌بینی و مورد بررسی تجربی واقع شده‌است. قطعه‌کار استفاده شده در آزمایش‌ها یعنی آلیاژ تیتانیوم Ti_6Al_4V از مواد پُر کاربرد در صنعت است که در مقالات موجود کمتر به ویژگی‌های ماشینکاری آن توجه شده‌است. در انتها، تأثیر پارامترهای سرعت برشی، سختی ابزار فرز انگشتی و عمق برش شعاعی بر پایداری سیستم برشی، شبیه‌سازی شده‌است.

۲- مدل نیرو

برای شبیه‌سازی تحلیلی پدیده چتر در فرآیند فرزکاری ابتدا باید مدل نیروی استفاده شده در آن معرفی گردد. شکل ۱ موقعیت هندسی ابزار و قطعه‌کار در حین فرآیند فرزکاری با تیغ‌فرز انگشتی را نشان می‌دهد. با دوران فرز انگشتی، ضخامت براده تغییر می‌کند. ضخامت براده در زاویه چرخش ϕ ، بصورت زیر نشان داده می‌شود:

$$h(\phi) = f_t \sin \phi, \quad (1)$$

که در آن، f_t پیشروی به‌ازای هردندانه و ϕ زاویه فاز آنی لبه ابزار است.

امروزه فرآیند فرزکاری بطور گسترده‌ای در ساخت قطعات صنعتی مختلف بکار می‌رود [۱]. از مزیت‌های فرآیند فرزکاری می‌توان به دقت بالا، هزینه کم، کاربرد آسان و قابلیت مناسب در تولید قطعاتی با اشکال متنوع و پیچیده اشاره کرد. همچنین بسیاری از قطعات حساس و دقیق صنعتی با استفاده از این روش تولید می‌شوند که از این میان می‌توان به مواردی چون پره‌های توربوشارژها و کمپرسورهای گریز از مرکز، پروانه‌های موتور جت، توربین‌های مولد برق، قالب‌های فلزی و قطعات پیچیده هوا فضا اشاره کرد [۲]. ملاحظات مربوط به قیمت تمام‌شده قطعات، به‌میزان زیادی به نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح ایجادشده در فرآیند ماشینکاری بستگی دارد. هم‌نرخ براده‌برداری و هم کیفیت سطح، دارای محدودیت‌هایی هستند که باعث وجود پدیده چتر، ایجاد می‌شوند [۳]. ارتعاشات نسبی بین یک ابزار برشی و قطعه‌کار باعث می‌شود که در حین ماشینکاری، ضخامت براده‌های بوجود آمده نسبت به زمان متغیر باشد. از آنجاکه نیروهای برشی تقریباً متناسب با مساحت سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته هستند، تغییرات ضخامت براده باعث بوجود آمدن نیروهای برشی دینامیکی می‌شود که ممکن است مدهای ساختاری سیستم ابزار - ماشین ابزار را تحریک کنند و ارتعاشات ناپایداری را بوجود آورند که چتر نامیده می‌شود [۴]. تاریخچه چتر در ماشین ابزار به حدود صد سال قبل برمی‌گردد که تیلور از چتر در ماشین ابزار به عنوان "ناشناخته‌ترین و حساس‌ترین مشکل پیش روی یک اپراتور" نام برد [۵].

در فرآیند فرزکاری، چتر در ترکیبات خاصی از عمق برش محوری و سرعت اسپیندل، اتفاق می‌افتد. پیش‌بینی مرزهای پایداری با توجه به پارامترهای مؤثر بر فرآیند یعنی سرعت اسپیندل و عمق برش که هر دو بر نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح ایجادشده تأثیر می‌گذارند، به روش‌های مختلفی انجام شده‌است و مدل‌های تحلیلی زیادی برای آن وجود دارد [۶-۹]. برای جلوگیری از چتر در ماشینکاری، باید با مدل کردن و شبیه‌سازی تحلیلی پدیده چتر، پارامترهای ماشینکاری بهینه را انتخاب نمود و براده‌برداری را بگونه‌ای انجام داد که ماشینکاری در

بترتیب ضرایب نیروی لبه‌ای مخصوص در هر یک از جهت‌های مماسی، شعاعی و محوری هستند. نیروهای برشی سه‌گانه در جهت محوره‌های X و Y و Z توسط رابطه زیر به شکل ماتریسی قابل نمایش هستند:

$$\begin{Bmatrix} F_x(\phi) \\ F_y(\phi) \\ F_z(\phi) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ +\sin\phi & -\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_t(\phi) \\ F_r(\phi) \\ F_a(\phi) \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

نیروی برشی در زاویه فاز ϕ هر لبه برشی که $\phi_{st} < \phi < \phi_{ex}$ ظاهر می‌شود و ممکن است مثبت یا منفی باشد. ϕ_{ex}, ϕ_{st} به ترتیب نشان‌دهنده زاویه ورود به قطعه کار و زاویه خروج از آن می‌باشند (شکل ۱).

آزمایشات تجربی بر روی قطعه‌ای از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti_6Al_4V انجام شده است. برای بدست آوردن نیروهای تحلیلی، باید ضرایب $K_{ae}, K_{re}, K_{te}, K_{ac}, K_{rc}, K_{tc}$ برای این آلیاژ مشخص باشد. این ضرایب به کمک روش آلتینتاش [۱۱] یعنی رگرسیون خطی میانگین نیروهای برشی در پیشروی‌های مختلف و به کمک داده‌های متعامد مربوط به آلیاژ تیتانیوم Ti_6Al_4V [۱۴، ۱۳]، محاسبه شده‌اند (جدول ۱).

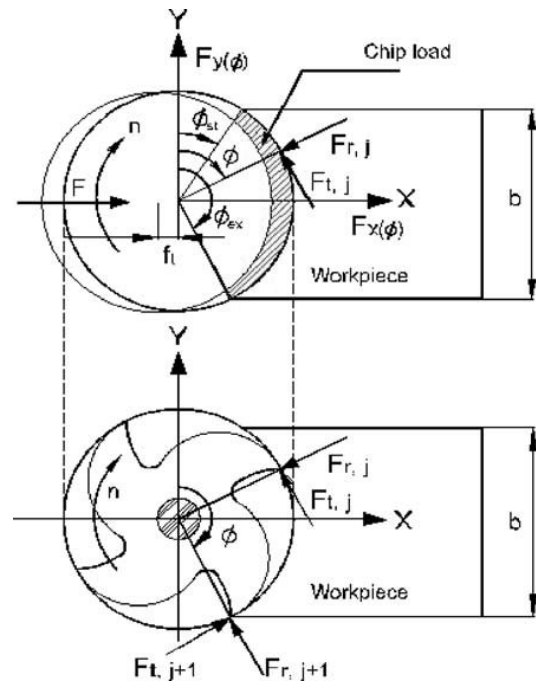
جدول ۱): ضرایب نیروی برشی محاسبه شده برای آلیاژ تیتانیوم Ti_6Al_4V .

K_{ae}	K_{re}	K_{te}	K_{ac}	K_{rc}	K_{tc}	$\frac{1}{10^3} \frac{N}{mm^2}$
-۳	۴۳	۲۴	۱۱۱۹	۵۱۳	۱۸۴۴	

با محاسبه ضرایب نیروی برشی، می‌توان از مدل نیروی ذکر شده در مدل‌سازی پدیده چتر استفاده نمود.

۳- مدل ریاضی چتر

در یک فرآیند ماشینکاری تحت شرایط دینامیکی، ابزار برشی و قطعه کار و ماشین ابزار در جهت‌های مختلفی می‌توانند خمش و پیچش داشته باشند و حالت‌های مختلف ارتعاش را بوجود آورند؛ یعنی قطعه کار تقریباً در



شکل ۱): موقعیت هندسی ابزار و قطعه کار در حین فرآیند فرزکاری [۱۰].

مدل نیروی بکاررفته در این مقاله توسط آلتینتاش [۱۱] ارائه شده است:

$$\begin{aligned} F_t(\phi) &= K_{tc} ah(\phi) + K_{te} a, \\ F_r(\phi) &= K_{rc} ah(\phi) + K_{re} a, \\ F_a(\phi) &= K_{ac} ah(\phi) + K_{ae} a. \end{aligned} \quad (2)$$

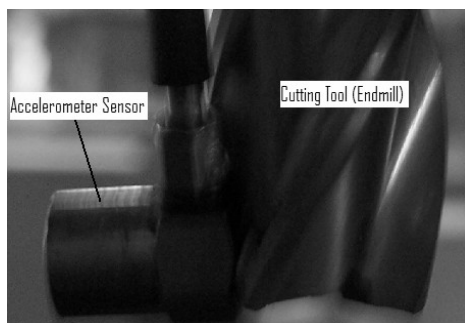
این مدل علاوه بر اینکه نیروهای برشی را متناسب با مساحت سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته فرض می‌کند، نیروهای شخم (لبه‌ای) را نیز در نظر گرفته و فرض می‌کند که متناسب با عرض درگیری برش باشند. در فرآیند واقعی برش، لبه برنده بطور کامل تیز نیست و در اثر ساییدگی ابزار شعاع کوچکی پیدا می‌کند؛ بنابراین، تماس بین ابزار و قطعه کار در یک سطح انجام می‌گیرد، نه در یک خط. در نتیجه، به لبه برنده علاوه بر نیروی برشی، نیروی دیگری به نام نیروی لبه‌ای نیز وارد می‌شود [۱۲].

اگر عمق تماس در جهت محور ابزار a باشد، آنگاه مساحت سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته به اندازه $ah(\phi)$ خواهد بود. ضرایب K_{ac}, K_{rc}, K_{tc} به ترتیب ضرایب نیروی برشی مخصوص در هر یک از جهت‌های مماسی، شعاعی و محوری و ضرایب K_{ae}, K_{re}, K_{te}

فرکانس طبیعی، ضریب میرایی، شکل مودها و غیره. در این تحقیق از انجام آزمایش مودال به همراه رابطه تئوری (۶) جهت به دست آوردن ضرایب مورد نیاز در تحلیل ریاضی، استفاده شده است.

۳-۱- آزمایش مودال

نحوه انجام آزمایش مودال بدین ترتیب است که سیستم مورد آزمایش در صورت امکان با قیود مکانیکی طبیعی خود و در غیر اینصورت با ساپورت‌هایی که مدل فرضی سیستم و پارامترهای مودال آنرا مغشوش نکند، مهار شده و یک سنسور برای سنجش شتاب با توجه به نیازمندی آزمایش در قسمت مشخصی از آن نصب می‌گردد. طریقه نصب سنسور شتاب‌سنج بر روی ابزار فرز انگشتی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): نصب سنسور شتاب‌سنج بر روی ابزار برشی در آزمایش مودال.

تحریک سیستم معمولاً بوسیله لرزاننده^۱ یا ضربه‌ای با یک چکش خاص انجام می‌شود. سیگنال تحریک و سیگنال پاسخ بصورت همزمان توسط دستگاه تحلیل‌گر^۲ دریافت می‌گردد. نحوه تنظیم دستگاه و تجهیزات آزمایش مودال در شکل ۳ نشان داده شده است.

معمولاً نسبت جابجایی به تحریک (X/F) در دامنه فرکانسی، مونیتور می‌گردد که دارای مفهوم فیزیکی پُرکاربردی است. این نسبت جابجایی به تحریک، تابع پاسخ فرکانسی سیستم^۳ نامیده می‌شود. با انجام آزمایش مودال، نمودار پاسخ فرکانسی نشان داده شده در شکل ۴

هر جهتی نسبت به ابزار می‌تواند حرکت کند. بنابراین تحت شرایط برشی، در پارامترهای سرعت برشی، پیشروی، عمق برشی و زوایای سطوح ابزار نسبت به قطعه کار ممکن است تغییراتی بوجود آید. هر یک از این تغییرات در فرآیند برش باعث افزایش تغییرات در نیروهای وارد بر ابزار می‌شوند. بسته به جهت این تغییرات نسبت به حرکت ارتعاشی، این تغییرات ممکن است ارتعاش را دمپ کنند یا افزایش دهند. بطور طبیعی اگر سیستم تحت چند نیروی ضربه‌ای ناگهانی قرار گیرد، ارتعاش بوجود می‌آید ولی خصوصیات دمپینگ ماشین بعد از چند ارتعاش، آن را از بین می‌برد. اگر تغییرات نیروی برشی بزرگ باشد و در جهت خلاف اثرات دمپینگ عمل کند، دامنه ارتعاش رشد می‌کند (حتی اگر نیروهای تحریک کننده و دمپینگ در تعادل باشند). به این ارتعاش، یک ارتعاش خود برانگیخته یا چتر گویند.

معادله دینامیکی ارتعاش ابزار در فرآیند فرزکاری در دو جهت X و Y بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= F_x, \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= F_y, \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن، M جرم، c استهلاک و k سختی ابزار است. با استفاده از روش انتگرال گیری اوپلر می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{x}_n &= (F_x - c_x \dot{x} - k_x x) / m, \\ \dot{x}_{n+1} &= \dot{x}_n + \dot{x}_n dt, \\ x_{n+1} &= x_n + \dot{x}_{n+1} dt. \end{aligned} \quad (5)$$

معادلات (۵) در جهت Y نیز به همین صورت نوشته می‌شود. با استفاده از روابط دینامیکی زیر می‌توان از معادله (۵) در پیش‌بینی پدیده چتر استفاده نمود:

$$m = \frac{k}{(2\pi f)^2}, \quad c = 2\eta \sqrt{k \cdot m}, \quad (6)$$

که در آن، f فرکانس طبیعی اصلی سیستم و η نسبت میرایی است. مشاهده می‌شود که برای پیش‌بینی پدیده چتر (بکمک رسم نمودار نیرو یا جابجایی نسبت به زمان)، مشخصه‌های دینامیکی ابزار برشی باید معلوم باشند. آزمایش مودال روشی است برای بدست آوردن پارامترهای دینامیکی ساختارهای مختلف. این پارامترها عبارتند از:

- 1-Shaker
- 2-Analyzer
- 3-Frequency Response Function FRF

۴- بررسی تجربی مدل تحلیلی چتر

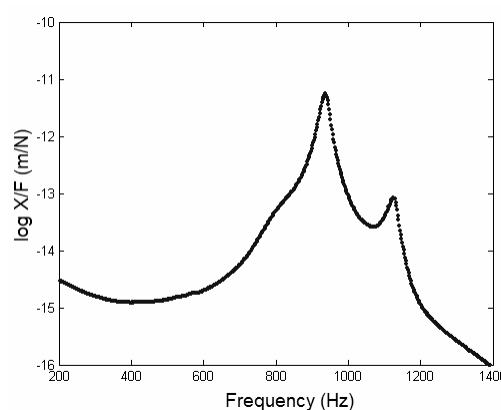
آزمایشات شیار تراشی بر روی قطعه‌ای از آلیاژ Ti_6Al_4V با ابعاد $10 \times 70 \times 140$ و با ابزار فرز انگشتی کاربایدی چهار لبه به قطر ۸ میلیمتر توسط یک ماشین ابزار فرز عمودی انجام شده است. مقدار سرعت اسپیندل $N=1,200$ rpm است. برای اندازه‌گیری نیروهای برشی از یک دینامومتر Kistler 9255B استفاده شده است.

یکی از راه‌های تشخیص پدیده چتر در فرآیندهای ماشینکاری، اندازه‌گیری نیروی برشی در حین فرآیند است. خروجی دینامومتر استفاده شده در آزمایش‌های تجربی، نمودارهایی مشابه شکل‌های ۵ و ۷ و ۹ است و مقادیر F_x و F_y را بصورت یک عدد متوسط نشان نمی‌دهد. برای مقایسه داده‌های تجربی با نتایج تحلیلی، از مقادیر حداکثر نیروی تجربی در یک بازه زمانی میانگین گرفته شده است و این میانگین نیرو در جهت‌های x و y بترتیب بعنوان F_x و F_y تجربی منظور شده‌اند.

شبیه‌سازی‌ها و آزمایشات در سه عمق برش مختلف ۳ و ۵ و ۸ میلیمتر انجام شده‌اند. شکل ۵ نشان دهنده نیروی برشی تجربی در حالت $DOC=3mm$ است.



شکل (۳): تنظیم تجربی آزمایش مودال.

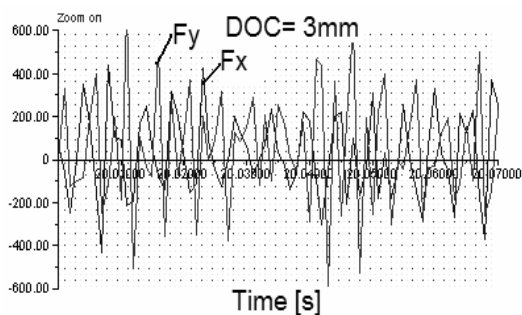


شکل (۴): نمودار پاسخ فرکانسی ابزار برشی که از آزمایش مودال بدست آمده است.

بدست می‌آید. این نمودار نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی اصلی سیستم، ۹۳۴ هرتز است. ویژگی‌های ساختاری ابزار فرز انگشتی که از آزمایش مودال بدست آمده، در جدول ۲ ذکر شده است. با استفاده از روابط ریاضی و داده‌های تجربی بدست آمده، می‌توان نمودار نیروی برشی برحسب زمان را رسم نمود. روند افزایشی در نمودار نیروی برشی نسبت به زمان، نشان دهنده وقوع پدیده چتر در فرآیند فرزکاری است.

جدول (۲): ویژگی‌های ساختاری ابزار برشی.

نسبت میرایی (η)	سختی (N/m)	فرکانس (Hz)	جهت
۰/۰۵	2×10^7	۹۳۴	x
۰/۰۵	2×10^7	۹۳۴	y

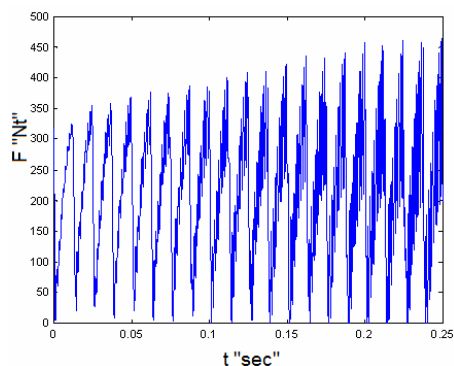


شکل (۵): نیروی برشی تجربی در حالت $DOC=3mm$.

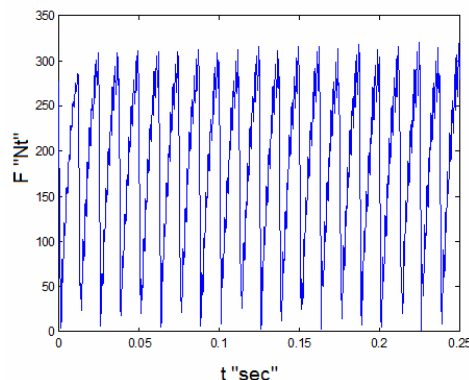
در حالت تحلیلی میزان نیروی برشی از رابطه زیر محاسبه گردیده است:

$$F = (F_x^2 + F_y^2)^{0.5}, \quad (7)$$

که در آن، F_x و F_y از رابطه (۳) جایگزین شده‌اند. نمودار نیروی شبیه‌سازی شده برحسب زمان در حالت $DOC=3mm$ در شکل ۶ نشان داده شده است.

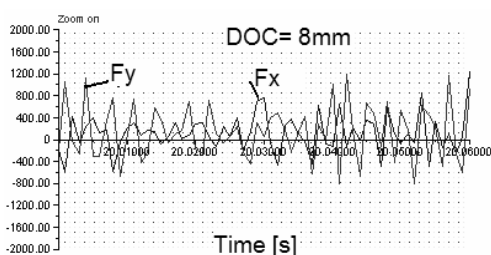


شکل (۸): نیروی برشی شبیه‌سازی شده در حالت .DOC=5mm



شکل (۶): نیروی برشی شبیه‌سازی شده در حالت .DOC=3mm

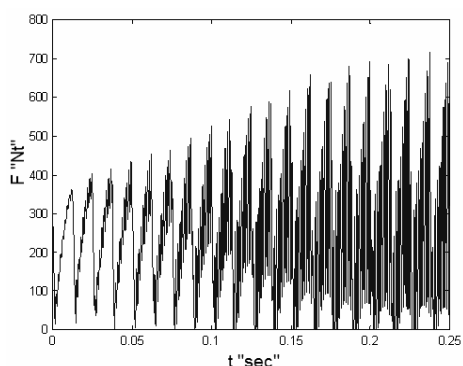
مقادیر F_x و F_y تجربی در شکل ۷ بترتیب برابر است با 320 N و 300 N که برآیند آنها 439 N است. میزان متوسط برآیند نیروهای شبیه‌سازی شده در این حالت 395 N است که خطای ۱۰٪ را نشان می‌دهد. نیروی برشی تجربی و شبیه‌سازی شده در حالت DOC=8mm بترتیب در شکل‌های ۱۰ - ۹ آمده است. مقادیر F_x و F_y تجربی بترتیب 420 N و 590 N و برآیند آنها 724 N است. در این حالت، متوسط برآیند نیروهای شبیه‌سازی شده 610 N و میزان خطا ۱۶٪ است.



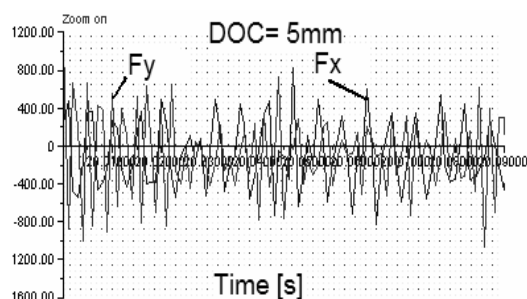
شکل (۹): نیروی برشی تجربی در حالت .DOC=8mm

هر دو نمودار تجربی و تحلیلی در شیار تراشی با DOC=3mm نشان‌دهنده حالت بدون چتر است. مقادیر F_x و F_y تجربی در این حالت بترتیب 210 N و 315 N و برآیند آنها 378 N است. میزان متوسط برآیند نیروهای شبیه‌سازی شده در DOC=3mm برابر با 312 N است که خطای ۱۷٪ را نسبت به نتیجه تجربی نشان می‌دهد.

شکل‌های ۷ و ۸ بترتیب نتایج تجربی و تحلیلی نیروی برشی در حالت DOC=5mm را نشان می‌دهند. نیروی برشی تجربی در حالت DOC=5mm به مقادیر بحرانی نزدیک شده است. نیروی شبیه‌سازی شده در این حالت نشان دهنده یک روند صعودی ملایم است. به نظر می‌رسد که عمق برش 5 mm در مرز میان پایداری و ناپایداری قرار دارد. لازم به ذکر است که نمودار نیروی شبیه‌سازی شده، از زمان $t=0$ ثانیه شروع می‌شود در حالیکه نمودار نیروی تجربی نشان دهنده مقادیر نیرو در زمان بین ۱۰ و ۱۰/۱ ثانیه است.

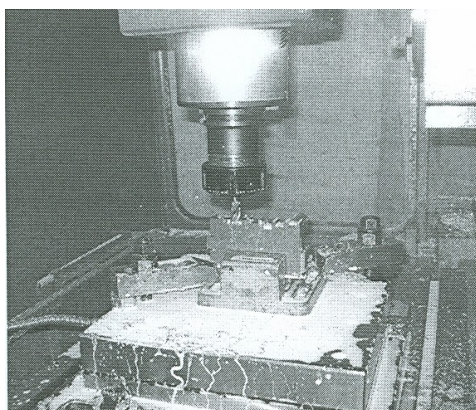


شکل (۱۰): نیروی برشی شبیه‌سازی شده در حالت .DOC=8mm

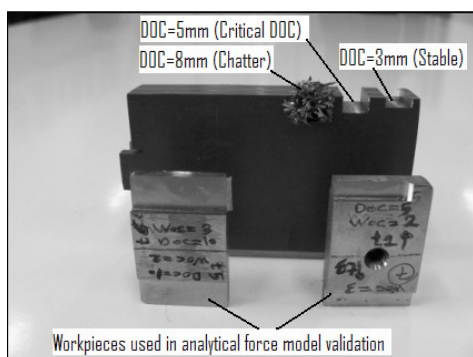


شکل (۷): نیروی برشی تجربی در حالت .DOC=5mm

یک روش برای پیش‌بینی مرزهای پایداری در کاربردهای مختلف صنعتی و آزمایشگاهی است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۱): (الف) یک قطعه‌کار در حال ماشینکاری؛ (ب) قطعه‌کارهای حاصل از آزمایشات تجربی.

۵- تأثیر پارامترهای مختلف بر پایداری سیستم

برشی

مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی نشان‌دهنده تطابق خوب آنها در پیش‌بینی وقوع پدیده چتر است. پس از تأیید شبیه‌سازی تحلیلی با داده‌های تجربی، در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف بر پایداری سیستم برشی شبیه‌سازی شده است.

۵-۱- تأثیر سرعت اسپیندل بر پایداری سیستم

برشی

نمودار رسم‌شده در شکل ۱۰ یک حالت ناپایدار را نشان می‌دهد و همانطور که قبلاً اشاره شد، مقدار سرعت اسپیندل در آن، $N=1,200$ rpm است. اگر در شرایط

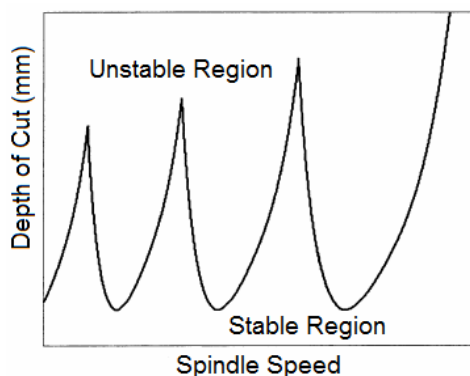
در حالت $DOC=8mm$ ، نتیجه تجربی نشان می‌دهد که نیرو به مقدار زیادی افزایش یافته و برش بسختی انجام می‌شود. در این حالت، براده‌ها به سطح قطعه‌کار جوش خورده و کیفیت سطح را خراب می‌کند. شکل ۱۱ قطعه‌کارهای به‌دست آمده از آزمایش‌ها و یک قطعه‌کار در حال ماشینکاری که روی دینامومتر قرار گرفته است را نشان می‌دهد. براده‌های جوش خورده به سطح قطعه در حالت $DOC=8mm$ نشان‌دهنده شرایط بسیار بد ماشینکاری و وقوع پدیده چتر است.

در حالت $DOC=8mm$ ، نمودار نیروی شبیه‌سازی شده دارای یک روند صعودی است و بخوبی وقوع پدیده چتر را پیش‌بینی می‌کند. در این حالت، نتیجه حاصل از شبیه‌سازی در پیش‌بینی وقوع چتر بخوبی با نتیجه تجربی مطابقت دارد.

یکی از مهمترین مشکلاتی که در راه تحقیق پیرامون پدیده چتر وجود دارد آن است که اگر یک آزمایش با پارامترهای برشی خاص و با ابزار برشی معین بر روی قطعه‌ای صورت پذیرد و فرآیند پایدار باشد، نمی‌توان بطور ۱۰۰٪ بیان کرد که آزمایشی مشابه آزمایش پایدار فوق در یک آزمایشگاه یا مکان دیگر حتماً پایدار است. دلیل این رفتار آن است که شرایط دینامیکی ماشین‌ابزار و کل سیستم برش در دو مکان مختلف نمی‌تواند کاملاً بر هم منطبق باشد و حتماً تفاوت‌هایی در ویژگی‌های ارتعاشی سیستم "ماشین‌ابزار / قطعه‌کار / ابزار برشی" در دو مکان مختلف وجود خواهد داشت. به همین دلیل است که مقایسه نتایج تجربی بدست آمده در مورد پایداری یک آزمایش برشی با نتایج مشابه دیگر از نظر تئوری صحیح نمی‌باشد و در مقالات هم این موضوع کمتر دیده می‌شود. اهمیت این مقاله و مقالاتی مشابه آن در این است که یک پروسه جهت بررسی پایداری فرآیند را معرفی می‌کند و هر کس در حالت خاص و شرایط عملی خود می‌تواند ویژگی‌های موجود در سیستم خود را درون پروسه معرفی شده قرار دهد و پایداری یا عدم پایداری فرآیند مورد نظر را پیش‌بینی کند. به عبارت دیگر در این مقاله، نتایج تجربی به‌دست آمده نظیر یافتن عمق برش بحرانی برای $DOC=5$ mm برای ابزار کاربایدی و قطعه‌کار آلیاژ تیتانیوم Ti_6Al_4V دارای اهمیت ثانویه است و موضوع مهم، ارائه

اگر باز هم سرعت اسپیندل افزایش یابد و به $N=5,200$ rpm برسد، نمودارهای موجود در شکل ۱۳ به دست می آید که یک روند افزایشی را نشان می دهد و سیستم مجدداً ناپایدار می شود.

یکی از مفاهیم مهم در بررسی پایداری فرآیند فرزکاری، مفهوم "نمودار دالان های پایداری" است. شکل کلی نمودار دالان های پایداری (SLD) در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نواحی زیر منحنی، پایدار و نواحی بالای آن، ناپایدار هستند.



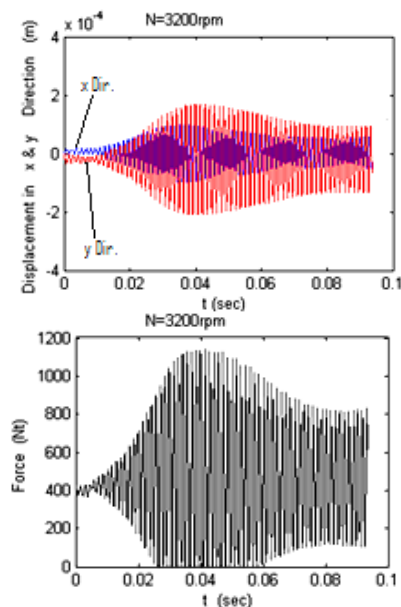
شکل (۱۴): شکل کلی نمودار دالان های پایداری.

در نمودار دالان های پایداری، برای یک عمق برش محوری خاص، با افزایش سرعت اسپیندل، ممکن است سیستم بین حالت پایدار و حالت ناپایدار چندین بار سوئیچ کند که این موضوع بخاطر شکل خاص نمودار دالان های پایداری است. این رفتار را می توان اینگونه توضیح داد که با تغییر سرعت برشی در یک عمق برش ثابت، رفتار اصطکاکی سیستم برشی تغییر کرده و باعث تغییراتی در مقادیر جابجایی ها و نیروی برشی وارد بر ابزار می گردد.

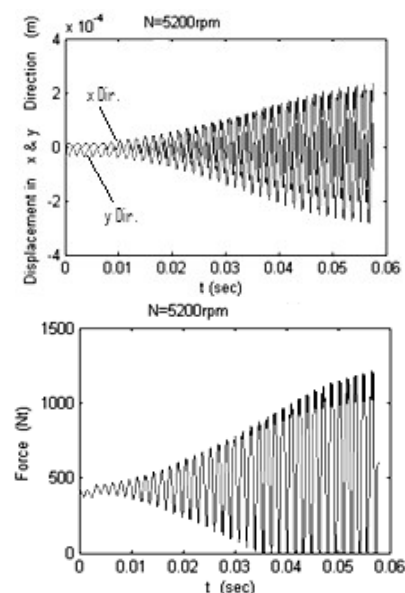
۵-۲- تأثیر سختی ابزار در جهت های X و Y بر پایداری سیستم برشی

در شکل ۱۰ که یک حالت ناپایدار را نشان می دهد، مقدار سختی ابزار در هر یک از جهت های X و Y به اندازه $K=2 \times 10^7$ N/m است. اگر همه پارامترهای مؤثر بر برش ثابت باشد و فقط سختی ابزار در هر دو جهت به $K=4 \times 10^7$ N/m رسانده شود، سیستم برشی پایدار می شود.

مشابه فقط سرعت اسپیندل به $N=3,200$ rpm افزایش یابد، نتایج نشان داده شده در شکل ۱۲ به دست می آید که یک حالت پایدار را نشان می دهد؛ یعنی در این حالت خاص، فقط با افزایش سرعت اسپیندل می توان از وقوع پدیده چتر در فرآیند فرزکاری جلوگیری نمود.

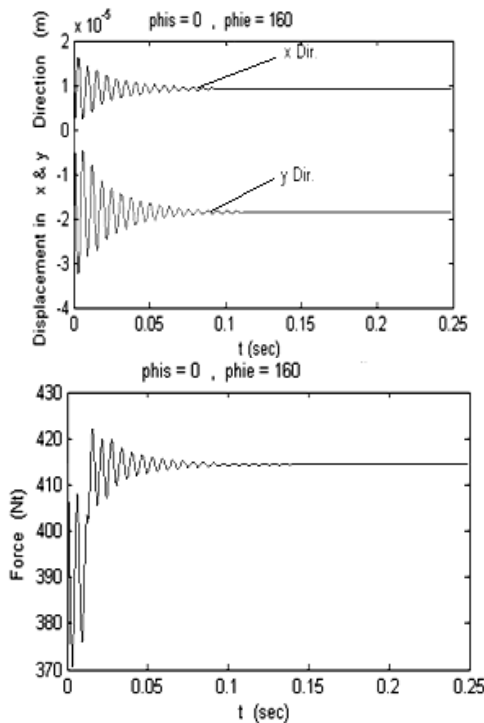


شکل (۱۲): نتایج شبیه سازی شده برای عمق برش محوری $a=8$ mm و سرعت اسپیندل $N=3,200$ rpm.



شکل (۱۳): نتایج شبیه سازی شده برای عمق برش محوری $a=8$ mm و سرعت اسپیندل $N=5,200$ rpm.

همانطور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، کاملاً پایدار می‌گردد. بنابراین، برای یک جفت ابزار و قطعه کار با پارامترهای برشی مشخص، ممکن است بتوان با اندکی تغییر در میزان درگیری شعاعی ابزار با قطعه کار، سیستم را از حالت ناپایدار به حالت پایدار تبدیل نمود.



شکل (۱۶): نتایج شبیه‌سازی شده برای حالت $a=8\text{mm}$

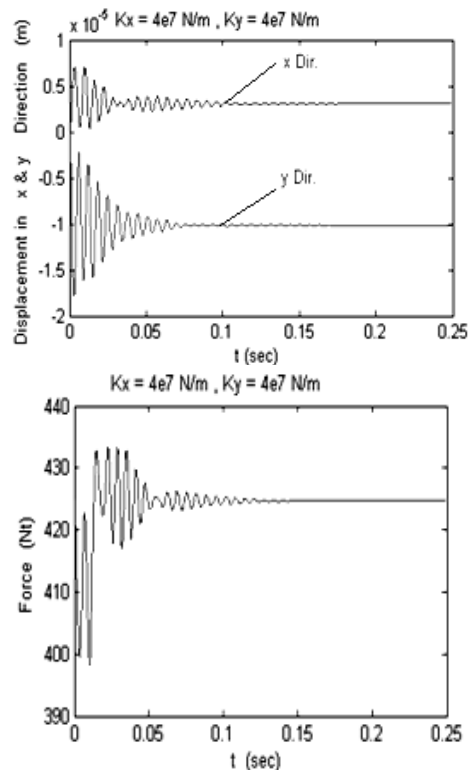
$$\phi_{st} = 0^\circ, \phi_{ex} = 160^\circ$$

واضح است که با افزایش میزان درگیری شعاعی ابزار با قطعه کار، میزان نیروی وارد بر ابزار برشی و همچنین مقادیر جابجایی‌های ابزار افزایش می‌یابد و این افزایش بسته به میزان آن، ممکن است به وقوع پدیده چتر کمک نماید.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شبیه‌سازی تحلیلی پدیده چتر به کمک معادلات ارتعاشی ابزار انجام شده و مدل نیروی بکار رفته در آن مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. هدف اصلی، تهیه یک پروسه جهت پیش‌بینی پایداری یا عدم پایداری یک فرآیند فرزکاری است که بتواند در فرآیندهای فرزکاری دیگر با ابزارها و قطعه‌کارهای مختلف نیز مورد

نمودارهای مربوط به این حالت جدید را می‌توان در شکل ۱۵ مشاهده نمود.



شکل (۱۵): نتایج شبیه‌سازی شده وقتی که سختی ابزار در دو جهت X و Y به اندازه $K=4 \times 10^7 \text{ N/m}$ است $(a=8\text{mm})$.

با افزایش سختی ابزار، میزان صلابت آن افزایش یافته و ابزار ارتعاشات کم‌دامنه‌تری را انجام می‌دهد. افزایش سختی ابزار در دو جهت X و Y باعث می‌شود که مقادیر عمق برش بحرانی در نمودار دالان‌های پایداری افزایش یابد و سیستم پایدارتر شود.

۵-۳- تأثیر عمق برش شعاعی (درگیری ابزار و قطعه کار) بر پایداری سیستم برشی

در شکل ۱۰ زاویه ورود ابزار به قطعه کار $\phi_{st} = 0^\circ$ و زاویه خروج ابزار از آن $\phi_{ex} = 180^\circ$ فرض شده و سیستم کاملاً ناپایدار است. اگر تمام پارامترهای برشی مربوط به شکل ۱۰ ثابت نگه داشته شوند و فقط زاویه خروج ابزار از قطعه کار به $\phi_{ex} = 160^\circ$ کاهش یابد، سیستم برشی

3. Van de Wou, N., Fassen, R.P.H, Oosterling, J.A.J., and Nijmeijer, H., "Modelling of High Speed Milling for Prediction of Regenerative Chatter", *Int. J. Machine Tools & Manufacture* Vol. 43, No. 14, pp. 321-339, 2003
4. Mann, B.P., Bayly, P.V., Davies, M.A., and Halley, J.E., "Limit Cycles Bifurcations and Accuracy of the Milling Process", *J. Sound and Vibration*, Vol. 277, No. 1, pp. 31-48, 2004
5. Insperger, T., Mann, B.P., Stepan, G., and Bayly, P.V., "Stability of Up-milling and Down-milling, Part 1: Alternative Analytical Method", *Int. J. Machine Tools & Manufacture* Vol. 43, No. 3, pp. 25-34, 2003
6. Altintas, Y. and Budak, E., "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling", *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 357-362, 1995
7. Budak, E. and Altintas, Y., "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, Part I: General Formulation", *J. Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 120, No. 2, pp. 22-30, 1998
8. Tian, J. and Hutton, S.G., "Chatter Instability in Milling Systems with Flexible Rotating Spindles: A New Theoretical Approach", *J. Manufacturing Science and Eng.* Vol. 123, No. 1, pp. 1-9, 2001.
9. Davies, M.A., Pratt, J.R., Dutterer, B., and Burns, T.J., "Stability Prediction for Low Radial Immersion Milling", *J. Manufacturing Science and Eng.*, Vol. 124, No. 2, pp. 217-225, 2002
10. Yoon, M.C. and Kim, Y.G., "Cutting Dynamic Force Modeling of End-milling Operation", *Int. J. Materials Processing Tech.*, Vol's. 155-156, pp. 1383-1389, 2004
11. Altintas, Y., "Manufacturing Automation—metal Cutting Mechanics. Machine Tool Vibrations, and CNC Design", Cambridge Univ. Press, London, 2000
۱۲. یوسفی، ر. و حامدی، م.، "ارائه یک مدل تحلیلی به منظور پیش‌بینی نیروهای ماشینکاری وارد بر فرز سر کروی"، *مجله مکانیک و هوا فضا*، جلد ۲، شماره ۳، ص.ص. ۵۷-۶۵، ۱۳۸۵.
13. Budak, E., Altintas, Y., and Armarego, E.J.A., "Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data", *ASME J. Manufacturing Science and Eng.* Vol. 118, No. 2, pp. 216-224, 1996
14. Altintas, Y. and Lee, P., "Mechanics and Dynamics of Ball Endmilling", *ASME J. Manufacturing Science and Eng.* Vol. 120, No. 4, pp. 684-692, 1998

استفاده قرار گیرد. برای حل معادلات مربوط به ناپایداری در فرآیند فرزکاری، مشخصه‌های ساختاری ابزار برشی نظیر فرکانس طبیعی اصلی، ضریب میرایی و سختی آن از طریق انجام آزمایش مودال تعیین شده‌است.

نوآوری این مقاله از نظر تئوری در آن است که معادلات ارتعاش ساختاری ابزار برشی را همزمان با معادلات نیرویی در نظر گرفته است و برای یافتن کلیه ضرایب استفاده شده اعم از ضرایب نیروی برشی و ویژگی‌های ساختاری ابزار برشی، آزمایش‌های تجربی انجام شده‌است. چون در معادلات ارتعاشی از نیرو استفاده می‌شود، بدست آوردن ضرایب برشی اهمیت خاصی دارد و مستقیماً بر روی شرایط ارتعاشی ابزار تأثیر می‌گذارد. در ضمن، پیش‌بینی تئوری حدود پایداری به کمک روابط ریاضی اکنون نیز در تحقیقات مورد بررسی قرار می‌گیرد و از نظر صنعتی حائز اهمیت است.

بررسی تجربی مدل ارائه شده برای پیش‌بینی پدیده چتر نشان دهنده دقت قابل قبول آن است. میزان عمق برش بحرانی به دست آمده در شبیه‌سازی فرآیند شیارتراشی آلیاژ تیتانیوم Ti_6Al_4V با ابزار کاربادی با نتایج تجربی مطابقت دارد. پس از تأیید تجربی مدل‌سازی انجام شده، تأثیر فاکتورهای سرعت برشی، سختی ابزار فرز انگشتی و میزان درگیری شعاعی ابزار و قطعه کار بر پایداری سیستم برشی، شبیه‌سازی شده‌است.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، علاوه بر رسم نمودار نیروی برشی بر حسب زمان، نمودار جابجایی ابزار در هر یک از جهت‌های X و Y بر حسب زمان نیز رسم شده که بوضوح وجود یا عدم وجود پدیده چتر را نمایان می‌سازد.

بطور کلی، شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این مقاله با دقت قابل قبولی پایداری یا عدم پایداری آزمایش‌های انجام شده را پیش‌بینی کرده‌اند. برای افزایش میزان دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده باید در تحقیقات آتی از مدل‌های نیرویی مناسب‌تر و دقیق‌تر استفاده نمود.

مراجع

1. Tlustý, J., "Manufacturing Processes and Equipment, Prentice Hall, New Jersey 2000
۲. کاظمی نصرآبادی، م.، معتکف ایمانی، ب. و صادقی، م. ح.، "شبیه‌سازی فرآیند فرزکاری با بار جانبی کم و پیش‌بینی نواحی پایداری"، *مجله مکانیک و هوا فضا*، جلد ۴، شماره ۱، ص.ص. ۵۵-۶۶، ۱۳۸۷.