

شبیه‌سازی و کنترل ارتعاشات هنگام ماشینکاری قطعات قابل انعطاف*

بهنام معتکف ایمانی^(۱)محمد کاظمی نصرآبادی^(۲)

چکیده یکی از مشکلات ماشینکاری قطعات قابل انعطاف مانند پره‌ها، پوسته‌ها و قابها که در صنایع هوافضا موارد بسیاری از آنها مشاهده می‌شود ارتعاشات Chatter (نوعی ارتعاشات خود برانگیخته) هنگام ماشینکاری این گونه قطعات می‌باشد. این ارتعاشات خود برانگیخته ناشی از اثرات متقابل بین ابزار (مانند فرزانگشتی) و قطعه کار (مانند پره) می‌باشد که می‌تواند دقت ابعادی و صافی سطح قطعه را از بین ببرد. در این تحقیق عملیات فرزکاری قطعات قابل انعطاف توسط یک مدل جامع، متشکل از مدل جسم صلب (Solid Modeling) عملیات فرزکاری، مدل دینامیکی، نیروهای برشی و مدل اجزاء محدود (Finite Element) اسپیندل-ابزار و قطعه کار شبیه‌سازی شده است. دامنه ارتعاشات Chatter از طریق کنترل شرایط براده برداری در حد مورد قبول نگه‌داشته شده در حالیکه سعی می‌شود نرخ براده برداری (Metal removal rate) بیشترین مقدار ممکن باشد. واژه‌های کلیدی فرزکاری، مدلسازی نیروهای برشی، ماشینکاری قطعات قابل انعطاف

Simulation and Control of Vibrations During Flexible Part Machining

B. Moetakef Imani

M. Kazemi Nasr-Abadi

Abstract One of the problems encountered during machining of flexible parts such as: blades, housing and frames is self-excited chatter vibrations. These vibrations are due to the interaction of the tool and the flexible part which can deteriorate dimensional accuracy and surface finish of the part. In this research milling operations of flexible parts are simulated by a comprehensive model consisting of solid modeller of milling operation, dynamic modeller of cutting forces and FEM modeller of tool-spindle and part. Amplitude of chatter vibrations are controlled within acceptable limits by improving cutting conditions where metal removal rate approaches to attainable maximum values.

Key Words Milling, Cutting Forces Modeling, Flexible Part Machining.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۷/۷/۷۹ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۲۷/۵/۸۰ به دفتر نشریه رسیده است.

۱- استادیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه هوایی شهید ستاری

مقدمه

در بسیاری از کاربردها، بویژه در صنایع هوافضا، نیاز به استفاده از فرز انگشتی هایی با نسبت طول به قطر زیاد پیش می آید. به طور معمول، این ابزارها برای تولید قطعاتی که دارای حفره های بزرگ همراه با دیواره های نازک می باشند، مورد استفاده قرار می گیرند [1]. قطعات یاد شده دارای شکل هندسی پیچیده ای بوده و معمولاً به خاطر کمینه سازی وزن، دارای قابلیت انعطاف بالایی می باشند. معمولاً این گونه اجزاء قبل از ماشینکاری ضخامتی کمتر از 5mm و ارتفاعی بیش از 30mm دارند. به عنوان مثال می توان پره های توربوشارژها، پره های کمپرسورهای گریز از مرکز و پروانه موتورهای جت را ذکر نمود که توسط فرزهای CNC ماشینکاری می شوند. جنس مورد استفاده معمولاً آلیاژهای آلومینیم یا آلیاژهای تیتانیوم و نیکل می باشد [2].

مسئله ماشینکاری این قطعات از این نظر پیچیده است که دامنه و جهت نیروهای فرزکاری به صورت تناوبی تغییر می کنند و روی سازه ای عمل می نمایند که از نقطه نظر استاتیکی و دینامیکی قابلیت انعطاف بالایی دارد. تغییر مکانهای استاتیکی موجب خطاهای ابعادی خواهند شد در حالی که تغییر مکانهای دینامیکی روی صافی سطح قطعه مؤثر می باشند [2].

روش سنتی فرزکاری این قطعات بدین صورت می باشد که ابتدا از نرخ پیشروی خیلی کم، سرعت پائین و از تعداد زیادی مراحل نیمه پرداخت و پرداخت استفاده می شود. این روش به منظور کاهش خطاهای ناشی از تغییر مکانهای استاتیکی و همچنین، جلوگیری از ارتعاشات خودبرانگیخته یا Chatter در نظر گرفته شده است. بهینه سازی شرایط براده برداری با روش سعی و خطا به انجام می رسد که با هزینه بالایی همراه است.

فرزکاری سازه های قابل انعطاف توسط Kline در

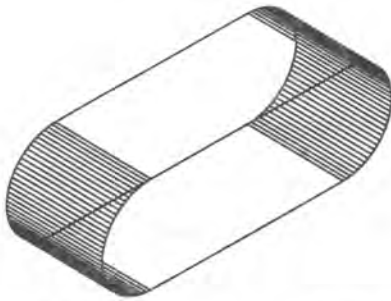
مقاله [10] مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق یک صفحه به صورت گیردار-گیردار-آزاد در تماس با فرز انگشتی قابل انعطاف از روش اجزاء محدود مدلسازی شده و مسئله به صورت کاملاً استاتیکی تحلیل شده است. بعبارت دیگر، اثر تغییرات ضخامت براده و دینامیک سازه ها در نظر گرفته نشده اند. در تحقیق جدیدتر توسط Budak [3] قطعه قابل انعطاف به صورت یک صفحه گیردار-آزاد-آزاد (Cantilever plate) در تماس با فرز انگشتی مدل شده است. برای ساده سازی محاسبات، مدل دینامیکی صفحه با استفاده از روش اجزاء محدود و آنالیز مودال به ناحیه تماس ابزار منتقل شده و همچنین، از قابلیت انعطاف فرز انگشتی چشم پوشی شده است.

در ادامه این مقاله به صورت زیر ارائه می شود: ابتدا روش مدلسازی جسم صلب عملیات فرزکاری و محاسبات درگیری لبه های برش و قطعه کار بیان می شود، سپس انواع مدل های فیزیکی عملیات فرزکاری بررسی و فرمولاسیون مدل خیز دینامیکی-نیروی Regenerative برای محاسبات بعدی نوشته می شود. در بخش بعدی مدلسازی اجزاء محدود ابزار-اسپیندل و قطعه کار که در این تحقیق استفاده شده توضیح داده می شود. سرانجام، ارتعاشات این مجموعه شبیه سازی و دامنه ارتعاشات به کمک تغییر شرایط براده برداری کنترل می شود.

مدل سازی هندسی

هندسه قطعه کار، حجم جاروب شده توسط ابزار، مسیر ابزار و لبه های درگیری ابزار با قطعه کار از روش مدلسازی جسم صلب توسط نرم افزار [4] ACIS محاسبه می شوند. ابتدا یک استوانه با قطری برابر با قطر فرز انگشتی مورد نظر و ارتفاعی برابر با طول برشی آن، ایجاد می شود. ابزار مورد استفاده یک فرز انگشتی با

مدلسازی هندسی حجم جاروب شده. حجم جاروب شده (Swept volume) ابزار توسط روش زیر ساخته می‌شود. ابتدا دو نیم استوانه برای نقاط شروع و انتهای مسیر ساخته می‌شود. نیم استوانه اول توسط عمل تفاضل (Subtract) یک مکعب از یک استوانه بوجود آمده است، سپس نیم استوانه کپی شده و به اندازه ۱۸۰ درجه دوران داده می‌شود و به نقطه انتهایی مسیر ابزار منتقل می‌گردد. این نیم استوانه طوری دوران داده می‌شود که محورش بر مسیر ابزار مماس باشد. با استفاده از مسیر ابزار و سطح عمود بر مسیر ابزار حجم جاروب شده ابزار ساخته می‌شود. این سه حجم (دو نیم استوانه و حجم جاروب شده مسیر ابزار) توسط عمل اتحاد (Union) متحد شده و در نهایت یک جسم صلب نشان دهنده حجم کل جاروب شده توسط ابزار ایجاد می‌شود (شکل ۳).



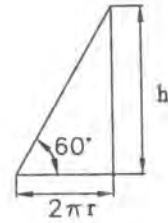
شکل ۳ حجم جاروب شده توسط ابزار

شبه‌سازی فرزکاری و محاسبه درگیری لبه برش. پس از ایجاد حجم جاروب شده ابزار، به وسیله عمل تفاضل (Subtract) حجم جاروب شده از قطعه کار کم و سطح تماس (Contact face) ابزار با قطعه کار مشخص می‌شود. سپس همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده لبه ماریچی به گوشه مورد نظر سطح تماس منتقل می‌شود. با دوران این لبه به اندازه نمودهای زاویه‌ای دلخواه (مثلاً ۱ درجه) می‌توان مشخصات نقاط برخورد

زاویه ماریچ (Helix) ۳۰ درجه می‌باشد که توسط روابط زیر بیان شده است (شکل ۱).

$$\alpha = \frac{\pi}{3}$$

$$h = 2\pi r \tan \alpha \quad (1)$$



شکل ۱ زاویه ماریچ

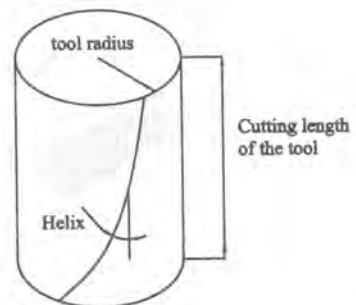
مدلسازی لبه برنده. بعد از ایجاد استوانه، یکی از لبه‌های ابزار توسط یک منحنی (Non-uniform rational B-spline) NURBS به صورت زیر مدل می‌شود (شکل ۲). ابتدا در روی لبه نقاطی به فاصله زاویه‌ای یکسان (da-π/720) در نظر گرفته می‌شود. موقعیت x، y و z نقاط از روابط زیر بدست می‌آیند. θ زاویه هر نقطه نسبت به نوک لبه برنده است. از نقاط بدست آمده یک منحنی NURBS عبور داده می‌شود که مدل لبه برشی مورد نظر می‌باشد. از این لبه در محاسبه درگیری ابزار با قطعه کار استفاده خواهد شد.

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

$$z = h \frac{2\theta}{\pi}$$

(۲)



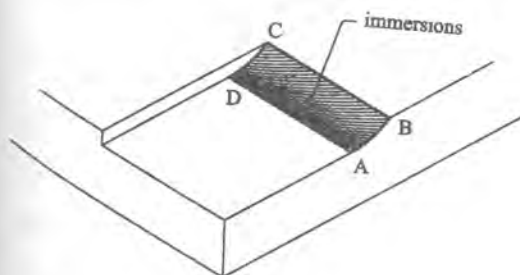
شکل ۲ لبه برنده فرز انگشتی

مدلسازی عملیات فرزکاری

برای تحلیل و تخمین کیفیت عملیات فرزکاری مدل‌های کامل و معتبری از این عملیات مورد نیاز است. به عنوان مثال می‌توان ذکر کرد این تحلیل و تخمین‌ها قادر خواهند بود که مرحله بررسی و تصدیق NC کدها در روی ماشین را حذف کنند. مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده و توسعه یافته‌اند [6] که عبارتند از:

- ۱- مدل خیز استاتیکی، نیروی صلب میانگین
 - ۲- مدل نیروی صلب لحظه‌ای
 - ۳- مدل خیز استاتیک، نیروی صلب لحظه‌ای
 - ۴- مدل نیروی لحظه‌ای با پس‌خور استاتیکی خیز
 - ۵- مدل خیز دینامیکی-نیروی Regenerative
- از میان مدل‌های فوق مدل خیز دینامیکی نیروی Regenerative برای شبیه‌سازی عملیات فرزکاری قطعات قابل انعطاف انتخاب شده و فرمولاسیون این مدل به‌طور کامل بیان می‌شود.

مدل خیز دینامیکی - نیروی Regenerative. این مدل پیچیدگی بالایی دارد و روش مناسب حل آن شبیه‌سازی در دامنه زمان می‌باشد. نیروی Regenerative به این مفهوم است که نیروی هر دندانه نه تنها بستگی به پیشروی بر دندانه و خیز دینامیکی ابزار دارد بلکه شکل سطح تولید شده توسط دندانه‌های قبلی نیز در مقدار نیرو مؤثر است، (شکل ۶). بنابراین نیروی هر لبه از



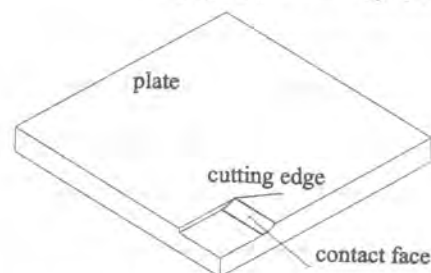
شکل ۵ درگیری لبه‌ها با قطعه کار

ابتدایی و انتهایی لبه ماریچی با مرزهای سطح تماس را در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف محاسبه نمود. در شکل (۴) سطح تماس ابزار با قطعه کار و قسمت‌های درگیر لبه برنده ابزار نشان داده شده است. با استفاده از مختصات نقاط شروع و انتهای لبه‌های درگیر با قطعه کار زوایای ورود و خروج لبه‌ها توسط روابط زیر بدست می‌آیند.

$$\sin \phi = \frac{x}{r} \Rightarrow \sin \phi_s = \frac{x_s}{r} \Rightarrow \phi_s = \sin^{-1} \frac{x_s}{r} \quad (3)$$

$$\sin \phi_e = \frac{x_e}{r} \Rightarrow \phi_e = \sin^{-1} \frac{x_e}{r}$$

مرزهای AB و BC از سطح تماس مختصات نقاط شروع درگیری لبه، و مرزهای CD و DA مختصات نقاط خاتمه درگیری لبه‌ها را نشان می‌دهد. این مدلسازی و محاسبات توسط نرم‌افزار ACIS در دو حالت بار همراه (Up-Milling) و بار غیرهمراه (Down-Milling) انجام شده است. حالت بار همراه بدین صورت می‌باشد که مختصات نقاط شروع، به ترتیب، از a به سمت B و بعد به سمت C و نقاط خروجی، به ترتیب، از A به D و بعد به سمت C مرتب می‌شوند. اما در حالت فرزکاری غیرهمراه مختصات نقاط شروع، به ترتیب، از C به سمت B و بعد به سمت A و مختصات نقاط خروجی، به ترتیب، از C به D و بعد به سمت A مرتب می‌شوند که این مختصات در یک فایل متنی ذخیره می‌گردند و در محاسبه نیروهای استاتیکی و دینامیکی و همچنین تغییر مکانهای ابزار و قطعه کار مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۴ مدل قطعه کار، سطح تماس و لبه ماریچی

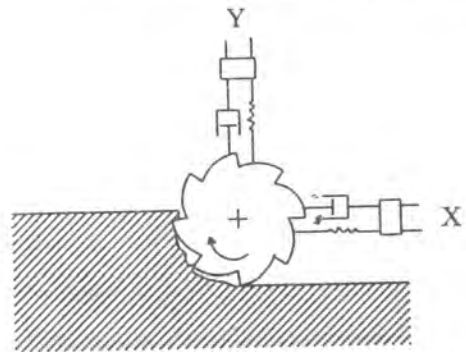
انتقال یافته

رابطه زیر بدست می آید [6و9]:

$$F_t = k_t b (h + Z - Z_0) \quad (4)$$

$$F_r = k_r F_t$$

که در این رابطه، Z تغییر مکان جاری ابزار عمود بر سطح برش و Z_0 تغییر مکان ابزار روی سطحی که قبلاً تولید شده، k_r و k_t ضرایب برشی ویژه، F_r و F_t نیروهای برشی مماسی و شعاعی روی لبه و b عمق برش می باشند. خیزهای دینامیکی به این مفهوم است که اینرسی سیستم (ابزار، اسپیندل و در مقابل آنها قطعه کار) در محاسبه تغییر مکانهای ابزار در نظر گرفته شده اند.



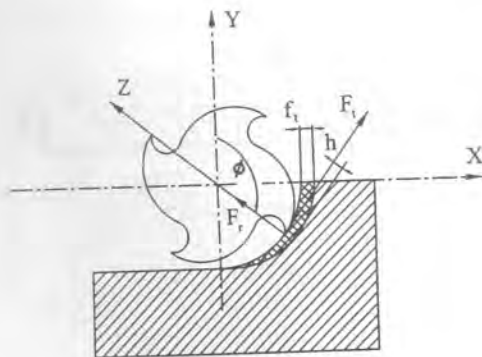
شکل ۶ مدل شبیه سازی عملیات فرزکاری در دامنه زمان

F_z نیروی برش کوچک بوده و سیستم دستگاه فرز در این راستا صلبیت زیادی دارد می توان از آن چشم پوشی نمود. از روشهای مختلفی مانند (Euler method, Newmark method, Wilsin θ Integration method) می توان دستگاه فوق را انتگرال گیری نمود [8]. مکان لبه برنده در تماس با قطعه کار ذخیره شده و به عنوان پروفیل سطح تولید شده توسط لبه برنده قبلی در نظر گرفته می شود. در پله زمانی بعدی ابزار یک نمو زاویه ای همراه با نمو پیشروی خواهد داشت. هنگام محاسبه ضخامت براده خیز ابزار و پروفیل سطح تولید شده توسط لبه برنده قبلی در نظر گرفته خواهد شد. همانطوری که در شکل (۷) نشان داده شده است، ضخامت نامی براده عمود بر سطح برش h می باشد که در هر موقعیت زاویه ای ϕ توسط رابطه زیر محاسبه می شود.

$$h = f_t \sin \phi \quad (6)$$

در رابطه فوق f_t پیشروی ابزار به ازای هر دندانه می باشد. تغییر مکان ابزار عمود بر برش با z نشان داده شده که به تغییر مکانها در جهت های x و y وابسته است. همچنین، در این شکل نیروی F_t نیروی برشی مماسی و نیروی F_r نیروی برشی شعاعی نمایش داده شده اند.

$$z = x \sin \phi + y \cos \phi \quad (7)$$



شکل ۷ ضخامت نامی براده نیروی برشی شعاعی F_r و نیروی برشی مماسی F_t

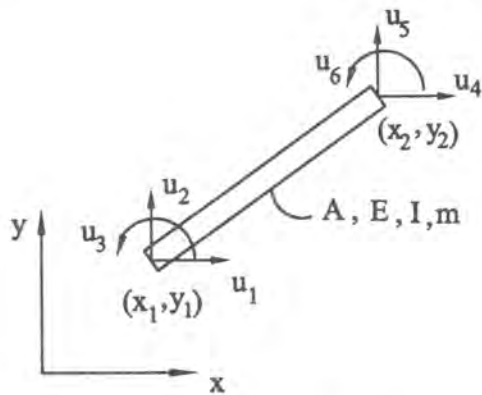
مدل دینامیکی ابزار به صورت یک سیستم چند درجه آزادی در دو جهت عمود بر هم در نظر گرفته شده است. شبیه سازی در دامنه زمان با پله های کوچک انجام می شود. در هر لحظه نیروها روی لبه هایی که با قطعه کار درگیرند محاسبه شده در راستای محورهای افقی و عمودی تصویر می شوند. دستگاه معادلات دیفرانسیل حرکت به صورت زیر نشان داده می شود.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_x \quad (5)$$

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F_y$$

در این رابطه x و y تغییر مکانهای دینامیکی در راستای محورهای افقی و عمودی و F_x و F_y مؤلفه نیروهای برش در راستای این دو محور می باشند. با توجه به اینکه مؤلفه

شده‌اند. شکل (۸) یک المان تیر با سطح مقطع یکنواخت را نشان می‌دهد. در این المان مفاصل هم جابجایی‌های انتقالی و هم جابجایی‌های چرخشی را تحمل می‌کنند. المان در نظر گرفته شده دارای شش درجه آزادی می‌باشد [7].



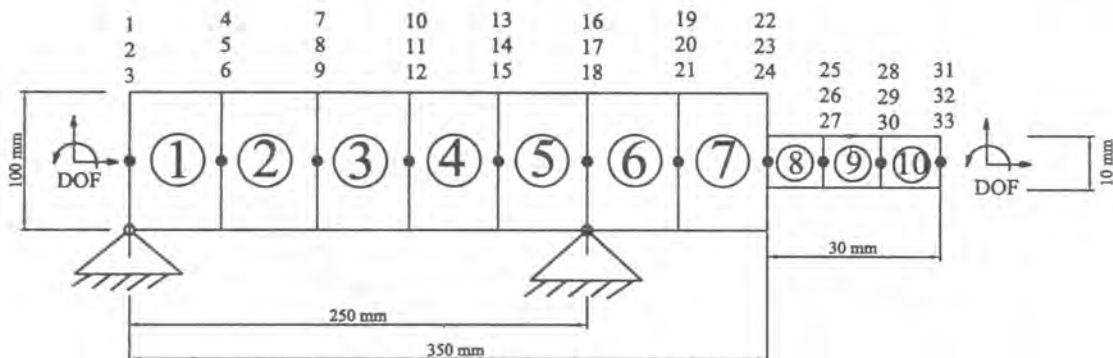
شکل ۸ المان تیر در صفحه xy

المانها توسط گره‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند که در این گره‌ها درجات آزادی المانهای مجاور یکسان می‌باشند. در این مقاله دستگاه فرز شامل اسپیندل، تکیه‌گاه‌های اسپیندل و ابزار فرز انگشتی به صورت نشان داده شده در شکل (۹) مدل می‌شوند.

این مدل علاوه بر مدل‌سازی نیروی Regenerative می‌تواند ارتعاشات Chatter و ارتعاشات اجباری در ارتباط با عملیات فرزکاری را بخوبی شبیه‌سازی کند [6]. همچنین، این مدل قادر خواهد بود بارگذارهای غیرخطی را که در عملیات فرزکاری پدید می‌آید در روی مدل اعمال کند. به عنوان مثال در صورتی که دامنه ارتعاشات ابزار به حدی بزرگ شود که تماس لبه با قطعه کار قطع شود مدل با یک مقایسه قادر خواهد بود بجای نیروی منفی نیروی صفر را جایگزین نماید. این مسئله در ارتباط با ارتعاشات ماشین‌های ابزار پدیده Basic-nonlinearity [9] نامیده می‌شود. مدل‌سازی خیز دینامیکی-نیروی Regenerative در محیط نرم‌افزار MATLAB ۷۳/۵ برنامه‌نویسی شده است.

مدلسازی اجزاء محدود (FE) پروسه فرزکاری قطعات انعطاف‌پذیر

مدلسازی FE/ابزار و اسپیندل. در روش اجزاء محدود ابتدا یک المان از ساختار داده شده را در نظر گرفته و برای آن المان ماتریسهای جرم، سختی و استهلاک محاسبه



شکل ۹ مدل اجزاء محدود ابزار - اسپیندل

تعریف می‌شود.

$$d = \{w_1 \phi_1 \theta_1 w_2 \phi_2 \theta_2 w_3 \phi_3 \theta_3 w_4 \phi_4 \theta_4\} \quad (9)$$

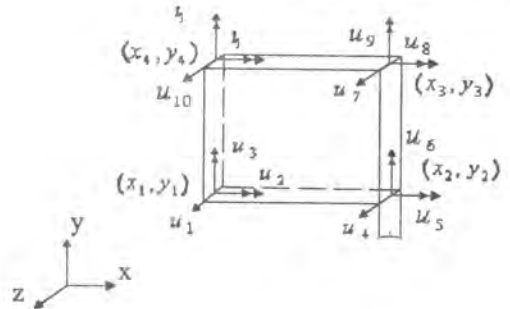
به علت اینکه ۱۲ درجه آزادی وجود دارد یک چند جمله‌ای باید شامل ۱۲ ثابت باشد. یک انتخاب خوب برای توابع انترپولاسیون (Interpolation) به صورت زیر می‌باشد:

$$w = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6xy^2 + a_7xy^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3 + a_{11}x^3y + a_{12}xy^3 \quad (10)$$

پس از محاسبه ماتریس‌های جرم، استهلاک و سختی برای المانها، ماتریس‌های جامع برای کل ساختار محاسبه می‌شود. در این مقاله قطعه کار که صفحه‌ای به ابعاد $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 7.5\text{mm}$ می‌باشد توسط ۲۰۰ المان به ابعاد $5\text{mm} \times 2/5\text{mm}$ به صورت نشان داده شده در شکل (۱۱) شبکه‌بندی شده است. جهت‌های نشان داده شده در این شکل مطابق با جهات معرفی شده در مدلسازی اجزاء محدود ابزار-اسپیندل و مدلسازی نیرو می‌باشد.

اعمال شرایط مرزی. تکیه‌گاههای در نظر گرفته شده برای سیستم ابزار-اسپیندل به صورت مفصلی ثابت

مدلسازی FE قطعه کار انعطاف پذیر. برای تحلیل اجزاء محدود قطعه کار که یک صفحه یکسرگیردار می‌باشد از المان صفحه‌ای (Plane element) استفاده می‌شود. ماتریس‌های جرم، استهلاک و سختی برای المانها محاسبه شده و درجات آزادی المان در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

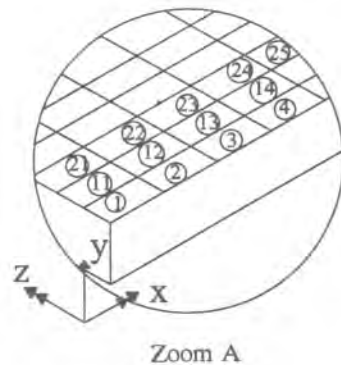
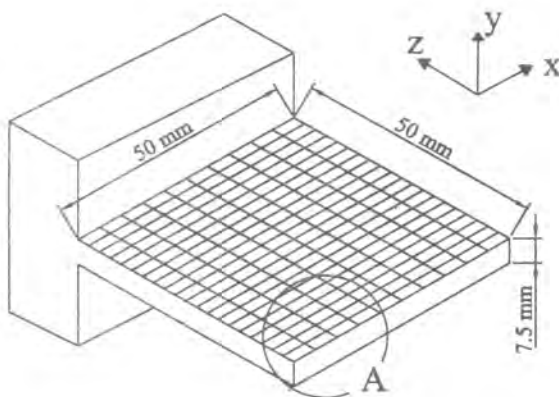


شکل ۱۰ المان صفحه‌ای با ۱۲ درجه آزادی

هر گره المان دارای سه درجه آزادی شامل یک افت عمود بر صفحه و دو چرخش حول محورها بوده که افت عمودی توسط w و چرخشها حول محور x و y ، به ترتیب، توسط ϕ و θ نشان داده می‌شوند.

$$\phi = \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \theta = \frac{\partial w}{\partial y} \quad (8)$$

بردار جابجایی گره‌های ۱۲ درایه دارد که به صورت زیر



شکل ۱۱ مدل اجزاء محدود قطعه کار

مؤلفه‌های F_x و F_y به ترتیب روی مدل ابزار-اسپیندل در صفحات xz و yz در نظر گرفته می‌شود. عکس‌العمل مؤلفه F_x روی درجه آزادی شماره ۱۰ در مدل صفحه اعمال می‌شود.

کنترل ارتعاشات مجموعه ابزار-اسپیندل و قطعه کار

شرایط براده‌برداری و پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. نمو زاویه‌ای $0/05$ درجه معادل $0/0001389$ ثانیه در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی برای درگیری چهار لبه انجام شده است که برای پیش‌بینی آستانه ارتعاشات Chatter کافی می‌باشد. هنگامی که ارتعاشات کاملاً توسعه یافته Chatter ایجاد شود، دامنه نیروهای برشی و نیز تغییر مکانهای ناشی از آن افزایش خواهند یافت.

می‌باشند که می‌توان فرض کرد در این تکیه‌گاهها از تغییر مکانهای خطی جلوگیری به عمل می‌آید. به عبارت دیگر لازم است که سطرها و ستونهای مربوط به درجات آزادی این تکیه‌گاهها از ماتریس جامع حذف گردند. با توجه به اینکه در تکیه‌گاههای گیردار خیز و شیب برابر صفر است سطرها و ستونهای مربوط به این درجات آزادی از ماتریسهای جامع حذف می‌شوند.

پارگذاری. ابتدا مؤلفه‌های F_x و F_y نیروی برش در هر مرحله زمانی با استفاده از روش خیز دینامیکی-نیروی regenerative بر روی لبه‌های درگیر ابزار با قطعه کار محاسبه می‌شوند. مؤلفه‌های نیروی محاسبه شده در موقعیت مورد نظر روی درجه آزادی شماره ۲۸ در سیستم ابزار-اسپیندل اعمال می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای ثابت قرزکاری

پارامترهای برش			
ضریب برشی ویژه (Mpa)	۱۰	قطر ابزار (mm)	۱۱۸۵[3]
نمو زاویه‌ای (deg)	۴	تعداد دندانه	۰/۰۵
نمو زمانی انتگرالیگری (sec)	۶۰۰	سرعت برش (rpm)	۰/۰۰۰۱۳۹
پیشروی بر دندانه (mm)	۳۰	زاویه مارپیچ (deg)	۰/۰۴۴

عمق برش محوری آستانه ارتعاشات Chatter مشاهده نمی‌شود و همچنین تغییر مکانها در همان محدوده باقی می‌مانند.

آستانه ارتعاشات Chatter در عمق برش محوری ۵mm و عمق برش شعاعی ۰/۵mm در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود. این ارتعاشات کاملاً توسعه یافته نیستند و دامنه نیرو و تغییر مکانهای صفحه و ابزار در محدوده قابل قبول می‌باشند. در واقع از نقطه نظر

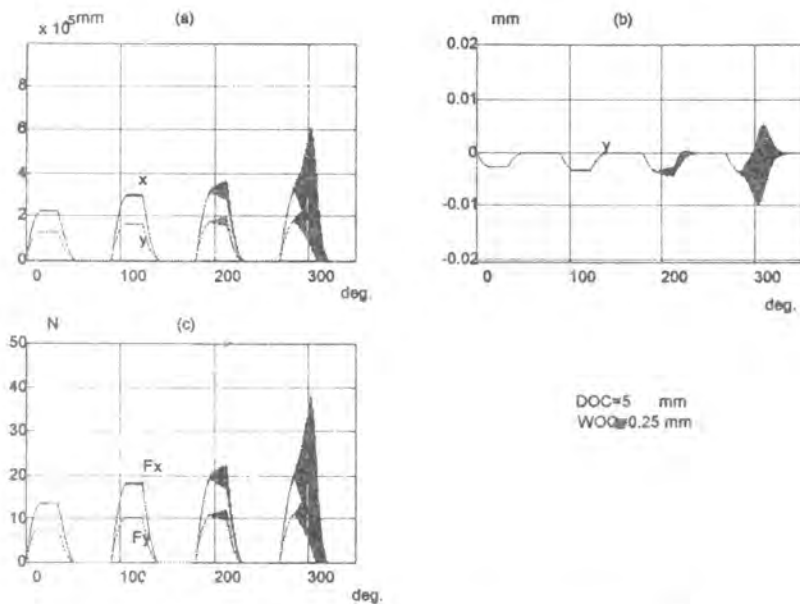
به عنوان مثال همانطور که در جدول (۲) نشان داده شده است در شرایط براده‌برداری برای عمق برش محوری $DOC = 5$ ، و عمق برش شعاعی $WOC = 0/25 \text{ mm}$ (شکل ۱۲)، ارتعاشات ناپایدار Chatter وجود ندارد. همچنین، بیشترین تغییر مکانهای نوک ابزار کمتر از $6 \times 10^{-5} \text{ mm}$ و تغییر مکان نقطه تماس صفحه با ابزار کمتر از 1 mm می‌باشد که کمتر از تolerانسهای ابعادی قطعه در بسته‌ترین حالت می‌باشد. بتدریج با افزایش

توقف عملیات فرزکاری، موجب شکست ابزار یا قطعه کار خواهد شد. همانطوری که مشاهده شد، معیار اصلی در محدود نمودن عملیات فرزکاری قطعات قابل انعطاف ارتعاشات Chatter می باشد. تغییر مکانهای ابزار و قطعه کار اهمیت کمتری نسبت به ارتعاشات Chatter دارند.

ابعادی قطعه می تواند قابل قبول باشد اما از نظر صافی سطح مورد قبول نخواهد بود. پدیده Basic Non-linearity و بیرون پریدن ابزار از قطعه کار در شکل (۱۴) قابل مشاهده است و ارتعاشات Chatter کاملاً توسعه یافته اند. علت اصلی بروز این ارتعاشات افزایش درگیری لبه برنده با سطح برش است که در صورت عدم

جدول ۲ پارامترهای متغیر فرزکاری

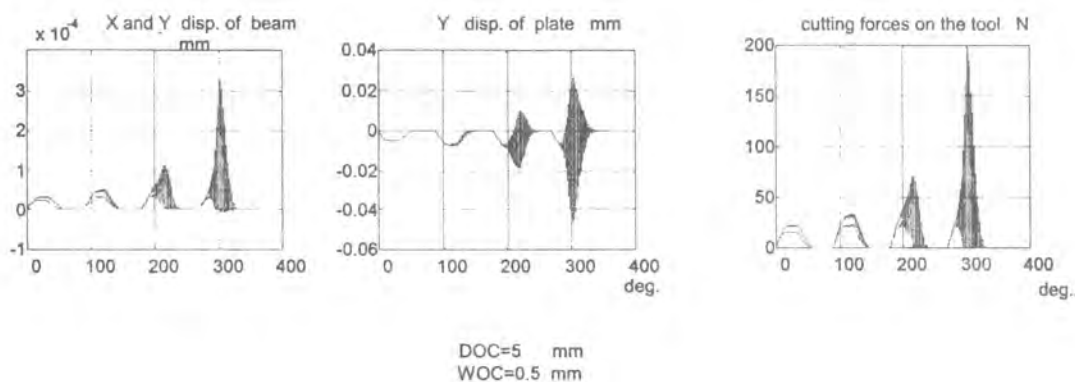
حالت	(DOC) (mm)	(WOC) (mm)	پایداری	حالت	(DOC) (mm)	(WOC) (mm)	پایداری
۱	۲/۵	۰/۲۵	پایدار	۴	۲/۵	۰/۵	پایدار
۲	۵	۰/۲۵	پایدار	۵	۵	۰/۵	آستانه ناپایداری
۳	۷/۵	۰/۲۵	پایدار	۶	۷/۵	۰/۵	ناپایدار



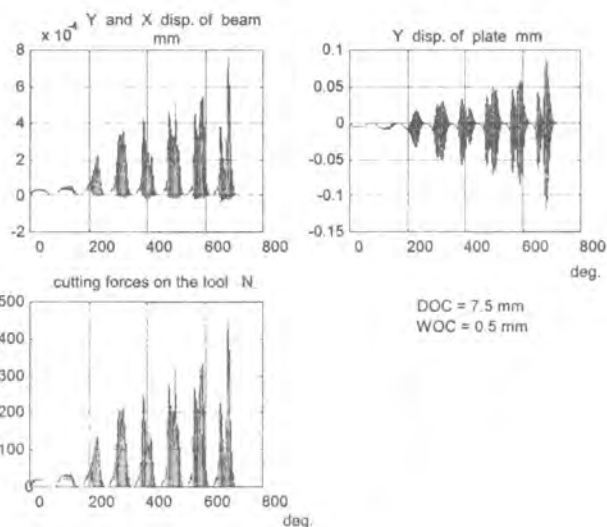
شکل ۱۲ ارتعاشات پایدار سیستم ابزار - اسپیندل و قطعه کار

(a) تغییر مکان دینامیکی تیر در دو جهت x,y؛ (b) تغییر مکان دینامیکی صفحه در جهت y؛

(c) مؤلفه های نیروهای برشی روی ابزار



شکل ۱۳ آستانه ارتعاشات Chatter در سیستم ابزار - اسپیندل و قطعه کار



شکل ۱۴ ارتعاشات Chatter توسعه یافته در سیستم ابزار - اسپیندل و قطعه کار

نتیجه گیری

این‌رو، می‌تواند برای بهینه‌سازی شرایط براده‌برداری با تابع هدف ماکزیمم‌سازی نرخ براده‌برداری MRR تحت قید آستانه ارتعاشات Chatter استفاده شود. همانطوری که بحث شد هنگام فرزکاری قطعات قابل انعطاف مانند پره‌ها، قایها و پوسته‌ها، معیار اصلی محدودیت عملیات ارتعاشات Chatter می‌باشد که باید کنترل شوند در حالیکه تغییر مکانهای استاتیکی ابزار و قطعه کار اهمیت چندانی ندارند.

در این مقاله از روش مدل‌سازی جسم صلب، مدل‌سازی دینامیکی نیروهای برش و مدل‌سازی اجزاء محدود ابزار-اسپیندل و قطعه‌کار، مسئله ارتعاشات خود برانگیخته Chatter شبیه‌سازی شده و شرایط پایداری این مجموعه بررسی شده است. مدل جامع توسعه یافته قادر است عمق و عرض براده‌برداری که در آن آستانه ارتعاشات Chatter شروع می‌شود، را پیش‌بینی کند، از

مراجع

1. J. Tlustý, S. Smith, W. R. Winfough, "Techniques for the Long Slender End Mill in High Speed Milling". *Annals of the CIRP*, Vol. 45/1/96, (1996).
2. F. Abrari, A. D. Spence, M. A. Elbestawi, "*Tool-Workpiece Interaction During Milling of Flexible Parts*", 1st Int. Symposium on "Multi-Body Dynamics: Monitoring and Simulation Techniques", 25-27, Uni. of Bradford, Uk, (1997).
3. Y. Alintas, D. Montgomery, E. Budak, "Dynamic peripheral milling of flexible structures", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol 114/137, pp. 137-145, (1992).
4. ACIS Solid Modeller, Spacial Technology Crop, V3, (1997).
5. CALFEM, A Finite Element Toolbox to MATLAB, V3. 3, LUND University, Sweden (1998).
6. S. Smith, J. Tlustý, "Modeling and simulation of the milling process", *ASME WAM, PED*, Vol. 33, pp. 17-26, (1988).
7. D. J. Dawe, "*Matrix and Finite Element Displacement Analysis of Structures*" Clarendon Press, Oxford, UK, (1984).
8. Bathe, Klaus-Jurgen, "*Finite Element Procedures in Engineering Analysis*", pp. 635-636, (1982).
9. J. Tlustý, F. Ismail, "Basic Non-linearity in Machining Chatter", *CIRP Annuals*, 30(1): 299-304, (1981).
10. W. A. Klein, R. E. DeVor, and I. A. Shreef., "The prediction of surface accuract in milling", *Journal of Engineering for Industry*, pp. 104-272, (1982).