

شبیه‌سازی فرآیند فرزکاری در عملیات خشن تراشی پره‌های کمپرسور موتورهای هوایی با استفاده از روش المان محدود

کاظمی نصرآبادی، محمد^۱، معتکف ایمانی، بهنام^۲، صادقی، محمد حسین^۳ و چراغی، اکبر^۴

۱- دانشکده مهندسی هوافضا- دانشگاه هوایی شهید ستاری

۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشگاه هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۹/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۲۲)

چکیده

در فرآیند فرزکاری سرعت بالا پیش‌بینی دقیق نیروهای برشی برای انتخاب بهینه فرز انگشتی و ماشین‌های ابزار از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به اینکه ماشینکاری پره‌های کوتاه به کمک فقط یک عمل خشن‌کاری و یک عمل پرداختکاری میسر است افزایش راندمان ماشینکاری در طی خشن‌کاری و نیمه پرداختکاری حائز اهمیت است. در مرحله خشن‌کاری نرخ برابرداری عامل مهمی است که با شبیه‌سازی فرآیند فرزکاری می‌توان مقدار بهینه آن را قبل از انجام ماشینکاری مشخص نمود. در این تحقیق ابتدا ابعاد براده در حال ماشینکاری با استفاده از یک نرم افزار شبیه‌ساز سه بعدی تخمین زده شده است. در ادامه با استفاده از آزمایش‌های شیار تراشی ثابت‌های برشی قطعه کار محاسبه شده و ماتریس‌های جرم، سختی و استهلاک با استفاده از تحلیل المان محدود، به دست آمده است. در نهایت مدلسازی و شبیه‌سازی دینامیکی نیروهای برشی انجام گرفته و اثر عمق برش تعیین و قبل از هرگونه عملیات ماشینکاری شرایط براده برداری پیش‌بینی شده است. توسط آزمایشات فرزکاری نتایج حاصل از شبیه‌سازی بررسی شده و مورد تایید قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بال- بال مثلثی-زاویه پسگرایی پیش‌بال- توزیع فشار- آزمایش تونل باد

مقدمه

مولد برق، قالب‌های فلزی و قطعات پیچیده هوا فضا اشاره کرد.

با توسعه فرزهای CNC چند محوره و قابلیت انعطاف پذیری ماشین‌های CNC چهار و پنج محوره، امروزه قابلیت ماشینکاری انواع سطوح پیچیده مانند پره‌های توربین و کمپرسور ایجاد شده است. استفاده از این ماشین‌ها نیازمند به کارگیری انواع استراتژی‌های فرزکاری و همچنین انواع مسیرهای ابزار است تا بتوان علاوه بر تولید قطعات ماشینکاری شده به شکل دلخواه، مسائل مهمی

امروزه فرآیند فرزکاری به یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین شیوه‌های تولید تبدیل شده است. از برتری‌های فرآیند فرزکاری می‌توان به دقت بالا، هزینه کم، کاربرد آسان و قابلیت مناسب در تولید قطعاتی با اشکال متنوع و پیچیده اشاره کرد [۱]. همچنین بسیاری از قطعات حساس و دقیق صنعتی توسط این روش تولید می‌شوند که از این میان می‌توان به مواردی چون پره‌های توربوشارژرها و کمپرسورهای گریز از مرکز، پره‌های موتور جت، توربین‌های

۱- استادیار و نویسنده پاسخگو، تلفن: ۰۲۱-۶۶۶۹۰۰۶۹، آدرس پست الکترونیک: M_nasr1350@yahoo.com

۲- دانشیار

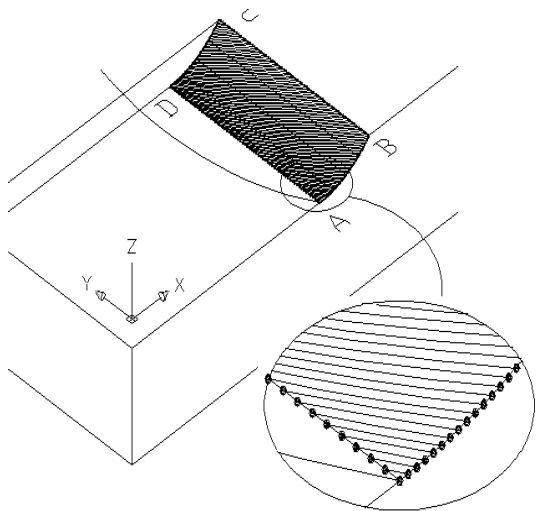
۳- استاد

۴- کارشناس ارشد

عملیات خشن تراشی پره‌های کمپرسور موتور هواپیما مورد استفاده قرارداد.

مدل‌سازی لبه‌های برنده و سطح تماس ابزار و قطعه کار

استوانه با قطری برابر با قطر فرز انگشتی مورد استفاده و همچنین ارتفاعی برابر با طول برشی آن ایجاد می‌شود سپس یکی از لبه‌های ابزار توسط یک منحنی^۴ NURBS مدل می‌شود. پس از ایجاد حجم جاروب شده ابزار، به وسیله عمل تفاضل حجم جاروب شده از قطعه کار کم و سطح تماس ابزار با قطعه کار مشخص می‌شود. سپس همانطوری که در شکل ۱ نشان داده شده لبه مارپیچی به گوشه مورد نظر سطح تماس منتقل می‌شود. با دوران این لبه به اندازه نواحی زاویه‌ای دلخواه می‌توان مختصات نقاط برخورد ابتدایی و انتهایی لبه مارپیچی با مرزهای سطح تماس را در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف محاسبه نمود.



شکل ۱- درگیری لبه‌های ابزار با قطعه کار

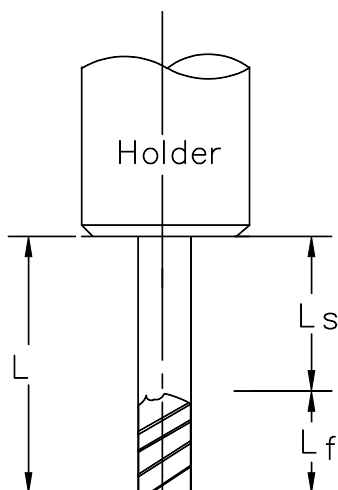
مرزهای AB و BC از سطح تماس، مختصات نقاط شروع درگیری لبه و مرزهای CD و DA مختصات نقاط خاتمه درگیری لبه‌ها را نشان می‌دهد. این مدل‌سازی و محاسبات در دو حالت فرزکاری با حرکت مخالف^۵ و حرکت موافق^۶ پیاده‌سازی شده است. حالت فرزکاری با حرکت مخالف بدین صورت می‌باشد که مختصات نقاط شروع به ترتیب از A به سمت B 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 با حرکت موافق مختصات

مانند تلرانس ابعادی خواسته شده و کیفیت سطح مطلوب را تامین نمود. یک نوع پره کوتاه وجود دارد که نه فاقد کله و ریشه بوده و در آن از روش فرزکاری مارپیچی^۱ استفاده می‌شود.

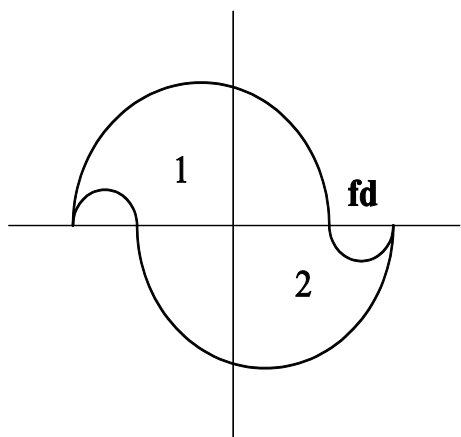
روش سنتی فرزکاری این قطعات بدین صورت می‌باشد که ابتدا نرخ پیشروی خیلی کم، سرعت پائین و تعداد زیادی مراحل نیمه پرداخت و پرداخت استفاده می‌شوند. این روش به منظور کاهش خطاهای ناشی از تغییر مکان‌های استاتیکی و همچنین جلوگیری از ارتعاشات خودبرانگیخته استفاده شده است. واضح است که هزینه این روش بالا می‌باشد. جهت بهینه‌سازی شرایط براده برداری از روش سعی و خطا استفاده می‌شود که با از بین بردن چند قطعه یا ابزار شرایط بهینه براده برداری بدست می‌آید. اسمیت و تولستوی [۲] مسئله ارتعاشات هنگام فرزکاری پره‌ها توسط فرز انگشتی‌های باریک را بررسی کرده‌اند. آنها نشان داده‌اند که نرخ براده برداری بستگی زیادی به طول ابزار و سرعت ماشینکاری دارد و با انتخاب مناسب این دو پارامتر می‌توان به نرخ‌های براده برداری بالاتری دست یافت. همچنین نشان داده‌اند که فرزکاری پره‌های خیلی نازک توسط فرز انگشتی‌هایی که طول لبه برنده آنها محدود است امکان پذیر می‌باشد. لازم به ذکر است که مدل‌سازی سیستم برشی مورد استفاده آنها کامل نبوده و بیشتر جنبه آزمایشی داشته است.

یک مدل جامع که بتواند با دقت و قابلیت اطمینان بالایی فرآیند ماشینکاری را پیش‌بینی کند وابسته به مدل‌سازی دقیق نیروهای ماشینکاری می‌باشد. برای پیش‌بینی مشکلاتی نظیر چتر^۲ (نوعی ارتعاش خودبرانگیخته) و صدمه ابزار، در ابتدا باید میزان نیروها بطور دقیق پیش‌بینی شود [۳]. جهت محاسبات نیرو نیاز به یک سری تخمین در خصوص ابعاد براده در حال ماشینکاری می‌باشد. بهترین ابزارها جهت به دست آوردن این ابعاد، نرم افزارهای شبیه ساز سه بعدی می‌باشند در این نرم افزارها ابزار و قطعه کار با یکدیگر در لبه برش ابزار درگیر شده و مختصات درگیری لبه برش ابزار در قطعه کار مشخص شده و با استفاده از این مختصات، اطلاعات لازم جهت شبیه سازی نیروها بدست می‌آید. یکی از بهترین نرم افزارهای موجود ACIS [۴] می‌باشد که در آن برای مدل‌سازی از تکنیک نمایش لایه مرزی^۳ استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق را می‌توان در

تمام سطح مقطع ابتدا اینرسی ناحیه 1 بدست آمده و اینرسی دیگر ناحیه‌ها به وسیله تبدیل انجام می‌گیرد. اینرسی کل سطح مقطع به وسیله جمع اینرسی همه نواحی بدست می‌آید.



شکل ۲- سازه ابزار فرز انگشتی بر روی دستگاه فرز CNC



شکل ۳- سطح مقطع فرز انگشتی ۲ شماره

با توجه به اینکه در یک تیغه فرز انگشتی دو شیاره سطح مقطع ابزار نسبت به محورهای X و Y متقارن نیست ممان اینرسی کل در جهت‌های X و Y متفاوت هستند.

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. این مختصات در یک فایل متنی ذخیره و در محاسبه نیروهای استاتیکی و دینامیکی و همچنین تغییر مکان‌های ابزار و قطعه کار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سیستم ارتعاشی ماشین ابزار

سیستم ارتعاشی ماشین ابزار متشکل از سه قسمت اسپیندل، یاتاقان‌های حمایت کننده و ابزار فرزکاری انگشتی در نظر گرفته می‌شود. غالباً ابزار مورد استفاده در فرآیند فرزکاری انگشتی، ابزار با شیاره‌های ماریچی می‌باشد، به علت وضعیت هندسی ویژه، استفاده از المان تیر ساده برای مدل‌سازی این نوع ابزارها روش مناسبی نمی‌باشد. از هر دو روش تحلیلی و آنالیز المان محدود جهت تحلیل استاتیکی و دینامیکی فرزهای انگشتی استفاده می‌شود.

هدف اصلی از تحلیل استاتیکی، محاسبه تغییر مکان فرز انگشتی تحت اثر نیروهای فرزکاری است. به منظور محاسبه تغییر مکان ابزار می‌توان چندین روش مدل‌سازی را مورد استفاده قرار داد. متداولترین روش برای تعیین انحراف ابزار بدین صورت است که مطابق شکل ۲ ابزار به صورت تیر یکسر درگیر کاملاً مقید شده (بر روی ساقه ابزار و ابزارگیر) در نظر گرفته شده و انحراف آن از رابطه ۱ محاسبه و تعیین می‌گردد.

$$\delta = \frac{64F L^3}{3\pi E D^4} \quad (1)$$

مدل ارائه شده یک مدل استاتیکی است که انحراف ابزار، تابع سه پارامتر E (مدول یانگ ابزار) و L^3 / D^4 (پارامتر ضعیف بودن ابزار) و F (نیروی ماشینکاری عمود بر محور ابزار) است. در رابطه ۱، L طول تعلیق ابزار^۷ و D قطر ابزار است [۵].

از معایب این مدل در نظر نگرفتن اثر لبه‌های ابزار می‌باشد. به علت پیچیدگی سطح مقطع ابزار در طول محور آن، اغلب محاسبات اینرسی مشکل‌ترین قسمت تحلیل استاتیک می‌باشد. مقطع عرضی یک فرز انگشتی دو شیاره در شکل ۳ نشان داده شده است. به منظور محاسبه اینرسی

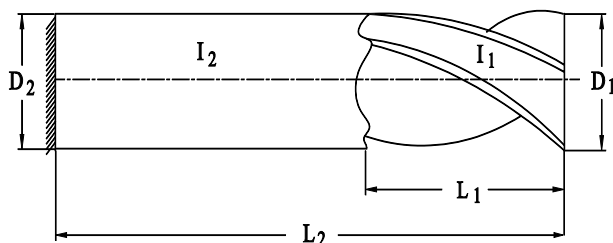
ابزار می‌باشند. $R(x)$ و $S(y)$ شکل‌های ساختاری هستند. با صرف‌نظر از اینرسی چرخشی و تغییر شکل برشی، معادلات حرکت به صورت معادلات مشهور اویلر-برنولی (رابطه ۵) می‌باشند [۷].

$$EI_1 \frac{d^4 R}{dx^4} - \rho A_1 \omega^2 R = 0, \quad 0 \leq x \leq L_1 \quad (5)$$

$$EI_2 \frac{d^4 S}{dy^4} - \rho A_2 \omega^2 S = 0, \quad 0 \leq y \leq L_2$$

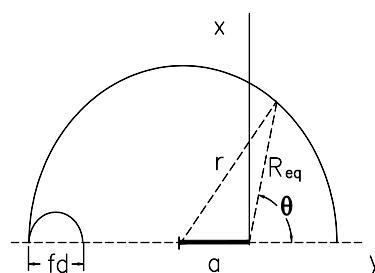
که در رابطه ۵، E مدول الاستیسیته و ρ دانسیته می‌باشد. با حل معادله فوق و بدست آوردن معادله مشخصه و حل آن فرکانس‌های طبیعی به صورت ۶ محاسبه می‌شوند [۹ و ۸].

$$\omega = (\beta L_1) \sqrt{\frac{EI_1}{\rho A_1 L_1^4}} \text{ or } \omega = (\alpha L_2) \sqrt{\frac{EI_2}{\rho A_2 L_2^4}} \quad (6)$$



شکل ۵- هندسه تیر با دو بخش هندسی مختلف

در برخی از تحقیقات سیستم ارتعاشی ابزار به صورت پارامترهای لامپد مدل‌سازی و بررسی شده است که این پارامترها از روش آنالیز مودال بدست آمده‌اند. در تحقیقات جدیدتر این سیستم ارتعاشی از روش اجزاء محدود مدل شده است. روش اجزاء محدود یک روش عددی برای حل معادلات دیفرانسیل فیزیکی و مهندسی است. در روش المان محدود ساختار داده شده به چندین المان تقسیم‌بندی شده و حل مناسبی برای جابجایی هر المان فرض می‌شود. در این تحقیق ابزار فرز انگشتی به صورت نشان داده شده در شکل ۵ شامل دو قسمت شیاردار و بدون شیار می‌باشد.



شکل ۴- ناحیه ۱ از فرز انگشتی دو شیاره

با استفاده از شکل ۴ ممان اینرسی ناحیه ۱ از ابزارهای دو شیاره به وسیله محاسبه شعاع معادل R_{eq} با استفاده از قانون کسینوس‌ها در ترم‌هایی از r (شعاع کمان)، a (موقعیت مرکز کمان تا مرکز مختصات) و θ توسط روابط ۲ بدست می‌آید [۶].

$$R_{eq\ 2-flute}(\theta) = -a \cos(\theta) + \sqrt{(r^2 - a^2) + a^2 \cos^2(\theta)} \quad 0 < \theta < \pi \quad (7)$$

ممان اینرسی حول محورهای x و y توسط روابط ۳ به دست می‌آیند:

$$I_{xx,1} = \frac{1}{4} \int_0^\pi R_{eq}^4 \sin^2(\theta) d\theta - \left[\frac{1}{8} \pi \left(\frac{fd}{2} \right)^4 \right]$$

$$I_{yy,1} = \frac{1}{4} \int_0^{\pi/2} R_{eq}^4 \cos^2(\theta) d\theta - M, \quad (8)$$

$$M = \left[\frac{1}{8} \pi \left(\frac{fd}{2} \right)^4 + \frac{\pi \left(\frac{fd}{2} \right)^2}{2} \left(r - \frac{fd}{2} \right)^2 \right]$$

بعد از انتقال و جمع، ممان اینرسی کل ابزار انگشتی دوشیاره توسط رابطه ۴ بدست خواهد آمد:

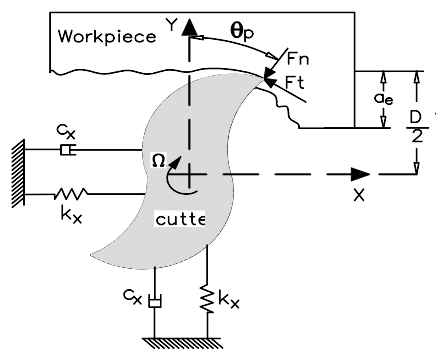
$$I_{xx2-flute\ total} = 2I_{xx,1}, \quad I_{yy,2-flute\ total} = 2I_{yy,1} \quad (9)$$

آنالیز دینامیکی برای مشخص کردن شکل‌های ساختاری^۱ و بسامدهای طبیعی سیستم ارتعاشی ماشین ابزار به کار می‌رود. مدل تیر با دو قسمت هندسی متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است که D_1 قطر قسمت شیاردار ابزار، D_2 قطر قسمت بدون شیار ابزار، L_1 طول قسمت شیاردار و L_2 طول کلی ابزار می‌باشد. I_2 و I_1 نیز به ترتیب ممان اینرسی قسمت‌های شیاردار و بدون شیار

بود. مقدار تاخیر زاویه ای (ψ) در عمق محوری (z) ابزار به صورت رابطه ۷ به دست می آید [۱۱]:

$$\tan \beta = \frac{D\psi}{2Z} \Rightarrow \psi = \frac{2Z \tan \beta}{D} \quad (7)$$

به این ترتیب اگر پایین ترین نقطه یک لبه از ابزار، به عنوان نقطه مرجع، در موقعیت زاویه ای (θ) قرار داشته باشد، نقطه ای روی همان لبه که در ارتفاع z قرار دارد در موقعیت زاویه ای ($\theta - \psi$) قرار می گیرد. در نتیجه ضخامت براده برداشته شده توسط نقاط مختلف یک لبه متغییر خواهد بود. هندسه عملیات فرزکاری مخالف در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- حالت فرزکاری مخالف برای محاسبه نیروهای فرزکاری

تغییرات ضخامت براده در عملیات فرز انگشتی را می توان توسط رابطه ۸ تخمین زد [۱۲]:

$$h = f_t \sin \theta_p \quad (8)$$

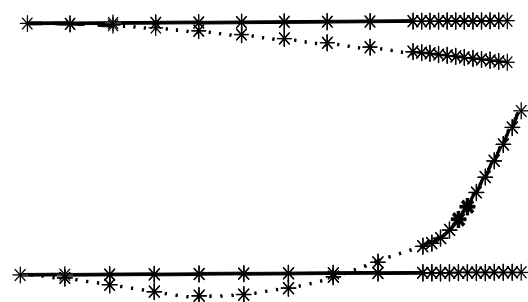
در رابطه ۸، f_t نرخ پیشروی برحسب $mm/tooth$ و θ_p موقعیت لحظه ای درگیری می باشد. اگر تعداد دندانه های ابزار N باشد زاویه گام ابزار به صورت زیر خواهد بود:

$$\phi_p = \frac{2\pi}{N} \quad (9)$$

به این ترتیب زاویه درگیری برای هر نقطه دلخواه روی هر لبه دلخواه ابزار مطابق رابطه ۱۰ می باشد:

$$\theta_p(z) = \theta + j\phi_p - k_\beta z \quad (10)$$

مدل سازی المان محدود ابزار با تعداد ۱۰ المان تیر در قسمت شیاردار و تعداد ۱۰ المان تیر در قسمت المان بندی انجام شده است. توسط نرم افزار متلب و با استفاده از جعبه ابزار CALFEM و همچنین داده های ورودی مطابق جدول ۱ تحلیل المان محدود انجام شده و ماتریس های جرم، استهلاک و سختی جامع محاسبه شده و در شبیه سازی عملیات فرزکاری مورد استفاده قرار می گیرد. شکل دو مود اول این ساختار در شکل ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است که جعبه ابزار CALFEM یک برنامه کامپیوتری با کارایی بالا جهت استفاده در روش المان محدود می باشد و برای انواع مختلف مسائل مکانیک سازه ای مورد استفاده قرار می گیرد [۱۰].



شکل ۶- شکل دو مود اول ابزار برشی

جدول ۱- خواص ماده و مشخصات هندسی ابزار

| | |
|---------------------|---------------------------------|
| مدول الاستیسیته | $200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ |
| قطر مقطع عرضی | $D_1 = 12 \text{ mm}$ |
| شیاردار و بدون شیار | $D_2 = 12 \text{ mm}$ |
| (چگالی) kg/m^3 | 8600 Kg/m^3 |
| نسبت پواسون | $\nu = 0.3$ |

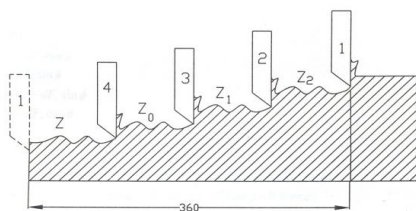
مدل سازی فرزکاری انگشتی

در فرآیند فرزکاری انگشتی نیروهای ماشینکاری ماهیتی پرپودیک دارند که این موضوع منجر به تنش های مکانیکی و گرمایی در ابزار و کاهش طول عمر آن می شود. ابزارهای انگشتی در فرزکاری جانبی که در آن دیواره قطعه کار تحت عملیات ماشینکاری قرار می گیرد کاربرد دارند. اگر زاویه هلیکس ابزار β باشد، یک نقطه روی لبه ابزار دارای یک تاخیر زاویه ای نسبت به پایین ترین نقطه همان لبه خواهد

$$\begin{aligned}
 F_X &= \sum_{j=0}^{N-1} F_{xp} \\
 F_Y &= \sum_{j=0}^{N-1} F_{yp} \\
 F_z &= \sum_{j=0}^{N-1} F_{zp}
 \end{aligned}
 \tag{۱۴}$$

حال اگر ارتعاشات بین ابزار و قطعه کار وجود داشته باشد یک حالت موج‌دار روی سطح ماشینکاری شده باقی می‌ماند. لبه برنده در مرحله بعدی (دور بعدی در تراشکاری یا دندانه بعدی در فرزکاری) با یک سطح موج‌دار مواجه می‌شود و در نتیجه براده دارای ضخامت متغییر خواهد بود. بنابراین نیروی برش متغییر و متناوب خواهد بود که ایجاد ارتعاشات می‌کند و به همین ترتیب سطح موج دار به‌طور مداوم ایجاد می‌شود.

ضخامت براده به علت ارتعاشات لبه برنده نسبت به قطعه کار برابر با ضخامت براده نامی (h) نخواهد بود. در مقابل لبه‌های برنده یک سطح موج‌دار وجود خواهد داشت که ناشی از ارتعاشات عمود بر سطح برش می‌باشد. مطابق شکل ۸ با در نظر گرفتن سه برش قبلی (Z_0, Z_1, Z_2) می‌توان یک رابطه خطی (رابطه ۱۵) برای نیرو در نظر گرفت.



شکل ۸. لبه های برنده ابزار و سطوح موج دار

$$F = k_s \cdot doc (h - Z + Z_{min})
 \tag{۱۵}$$

که در رابطه ۱۵، Z تغییر مکان جاری و Z_{min} کمترین مقدار از تغییر مکان‌های Z_0, Z_1, Z_2 می‌باشد. در هنگام برش به شرطی نیروی برشی غیر صفر است که حاصل $h - Z + Z_{min}$ مثبت باشد و در غیر این صورت پدیده خارج شدن ابزار از برش^۹ پیش خواهد آمد. رابطه فوق برای تراشکاری (براده با ضخامت ثابت) و همچنین برای فرزکاری (براده با ضخامت متغییر) معتبر است. اما در حالت فرزکاری تمایز حالت برش پایدار از برش ناپایدار به علت وجود نیروی برشی متغییر و ارتعاشات گذرا پیچیده‌تر است.

مؤلفه‌های نیروی مماسی، شعاعی و محوری را می‌توان به صورت رابطه ۱۱ نوشت [۱۳]:

$$\begin{aligned}
 dF_{t,p}(\theta, z) &= [K_{tc} h_p(\theta_p(z)) + K_{te}] dz \\
 dF_{r,p}(\theta, z) &= [k_{rc} h_p(\theta_p(z)) + K_{re}] dz \\
 dF_{a,p}(\theta, z) &= [k_{ac} h_p(\theta_p(z)) + K_{ae}] dz
 \end{aligned}
 \tag{۱۱}$$

در رابطه ۱۱، K_{ac}, K_{tc}, K_{rc} ثابت‌های نیروی برش در جهات شعاعی، مماسی و محوری می‌باشد همچنین K_{ae}, K_{te}, K_{re} به عنوان ثابت‌های لبه‌ای نیروی برش در جهات شعاعی، مماسی و محوری تعریف می‌شود. ثابت‌های نیروی برش و همچنین ثابت‌های لبه‌ای نیروی برش توسط آزمایش اندازه‌گیری نیرو به‌وسیله دینامومتر به دست می‌آیند. روش تعیین آزمایشگاهی این ثابت‌ها در ادامه این تحقیق خواهد آمد. المان‌های نیرو در جهت X, Y, Z به صورت رابطه ۱۲ خواهند بود:

$$\begin{aligned}
 dF_{x,p}(\theta_p(z)) &= -dF_{t,p} \cos \theta_p(z) - dF_{r,p} \sin \theta_p(z) \\
 dF_{y,p}(\theta_p(z)) &= +dF_{t,p} \sin \theta_p(z) - dF_{r,p} \cos \theta_p(z) \\
 dF_{z,p}(\theta_p(z)) &= +dF_{a,p}
 \end{aligned}
 \tag{۱۲}$$

با مقدارگذاری به جای $dF_{a,p}, dF_{r,p}, dF_{t,p}$ از رابطه ۱۱ در رابطه ۱۲ و انتگرال‌گیری رابطه ۱۳ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 F_{x,p}(\theta_p(z)) &= \left\{ \frac{c}{4k_\beta} [-K_{tc} \cos 2\theta_p(z) \right. \\
 &+ K_{rc} [2\theta_p(z) - \sin 2\theta_p(z)] \\
 &+ \left. \frac{1}{k_\beta} [K_{te} \sin \theta_p(z) - K_{re} \cos \theta_p(z)] \right\}_{z_{p,1}(\theta_p(z))}^{z_{p,2}(\theta_p(z))}
 \end{aligned}
 \tag{۱۳}$$

$$\begin{aligned}
 F_{y,p}(\theta_p(z)) &= \left\{ \frac{-c}{4k_\beta} [K_{tc} (2\theta_p(z) \right. \\
 &- \sin 2\theta_p(z)) + K_{rc} \cos 2\theta_p(z)] \\
 &+ \left. \frac{1}{k_\beta} [K_{te} \cos \theta_p(z) + K_{re} \sin \theta_p(z)] \right\}_{z_{p,1}(\theta_p(z))}^{z_{p,2}(\theta_p(z))}
 \end{aligned}$$

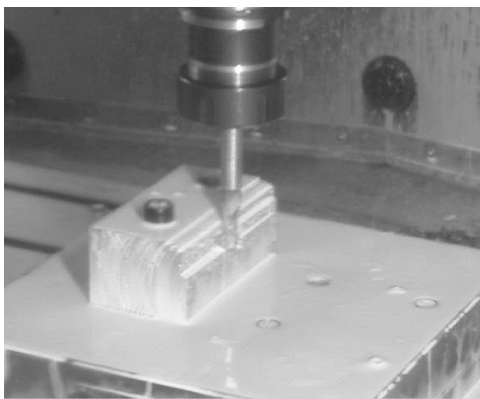
$$F_{z,p}(\theta_p(z)) = \frac{1}{k_\beta} \left[K_{ac} \cos \theta_p(z) \right]_{z_{p,1}(\theta_p(z))}^{z_{p,2}(\theta_p(z))} - K_{ae} \theta_p(z)$$

نیروی کل روی ابزار حاصل جمع برداری نیروی تک‌تک لبه‌ها می‌باشد لذا می‌توان مقدار آن را به صورت رابطه ۱۴ نوشت:

روش تجربی برای محاسبه ضرایب نیروی برش

یک روش سریع برای تعیین ثابت های نیروی برش انجام آزمایش و تعیین ضرایب برشی می باشد. در این روش که به روش ساختارگرا^{۱۱} معروف است، یکسری آزمایشات تحت پیشروی های مختلف اما میزان درگیری و عمق برش ثابت انجام می شود. سپس مقدار متوسط نیرو در هر پرود ابزار اندازه گیری شده و به منظور جلوگیری از اثر خطای خروج از مرکز ابزار^{۱۲} روی اندازه گیری ها، کل نیرو در هر دور اسپیندل جمع و بر تعداد دندانه های اسپیندل تقسیم می شود. سپس مقدار اندازه گیری شده نیروی متوسط از روش تجربی با رابطه تئوری برابر قرار داده شده و ثابت های نیروی برش بدست می آیند. در روش ساختارگرا آزمایش شیار زنی^{۱۳} متداول است. آزمایش های برشی توسط ابزار فوق با مقدار عمق نفوذ ۴۰ میلی متر برای محدوده پیشروی ۰/۱، ۰/۱۵۰۸ و ۰/۲۰۱۷ میلی متر بر دندانه و سرعت اسپیندل ۳۵۰۰ rpm و ۷۰۰۰ rpm انجام شده است. شکل ۹ تجهیزات آزمایش برای اندازه گیری مولفه های نیروی برشی را نشان می دهد.

شکل ۱۰ نیروهای اندازه گیری شده در راستای x, y را برای سرعت اسپیندل ۳۵۰۰ rpm و بار براده 0.1 mm/tooth نشان می دهد. نیروی برش متوسط برای کل ناحیه پایدار اندازه گیری محاسبه شده است.



شکل ۹- آزمایش اندازه گیری نیروی برش توسط دینامومتر Kistler 9255B

نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایشات انجام شده

در این بخش تجهیزات آزمایش، نحوه محاسبه ضرایب نیروی برشی، نتایج شبیه سازی همراه با نتایج آزمایشات فرزکاری ارائه می شود.

تجهیزات و وسایل آزمایش

در آزمایشات انجام شده از ماشین فرز CNC سه محوره مدل (DECKEL-MAHO DMC 104 V Linear) استفاده شده است. این دستگاه فرز CNC دارای حداکثر سرعت اسپیندل ۱۸۰۰۰ rpm می باشد. ابزار مورد استفاده فرز انگشتی دو لبه از جنس HSS به قطر ۱۲ میلی متر با زاویه مارپیچ ۳۰ درجه بوده که مقدار عمق نفوذ ابزار ۷۸ میلی متر در نظر گرفته شده است. با توجه به کاربرد گسترده آلیاژ Al-6061-T6 در صنعت هوا فضا جهت انجام آزمایشات از این جنس استفاده شده است.

با استفاده از دینامومتر پیزوالکتریک چند مولفه ای (Kistler 9255B) نیروهای فرزکاری اندازه گیری شده است. لازم به ذکر است که این دینامومتر برای اندازه گیری مولفه های نیروهای دینامیکی و شبه استاتیکی^۹ اعمالی بر روی صفحه بالایی خود در سه راستای عمود بر هم F_x, F_y, F_z به کار می رود. همچنین با بکارگیری وسایل و تجهیزات الحاقی، قابلیت اندازه گیری دقیق گشتاورها حول محورهای x, y, z یعنی M_x, M_y, M_z را دارا است.

دینامومتر به خاطر داشتن صلبیت بالا دارای بسامد طبیعی بزرگی است. دقت بالای دینامومتر قابلیت اندازه گیری تغییرات دینامیکی بسیار کوچک در نیروهای بزرگ را فراهم می سازد. دینامومتر فارغ از اینکه نیروی برشی اعمالی در کدام نقطه از صفحه بالایی آن اثر کند مقدار نیروی اعمالی را با خطایی در حدود ۲ تا ۵ درصد دامنه نیرو اندازه گیری می کند. پهنای باند یا محدوده بسامد دینامومتر 9255B، ۳ kHz می باشد. این مفهوم بدان معنی است که در هر ثانیه مجموعه دینامومتر می تواند ۳۰۰۰ نمونه نیرو بخواند.

جدول ۲- ضرایب برشی بدست آمده از آزمایش شیار زنی

| n (rpm) | 3500 | 7000 |
|---------------------------------|--------|---------|
| K_{tc} (N / mm ²) | 552.57 | 499.95 |
| K_{rc} (N / mm ²) | 186.88 | 114.64 |
| K_{te} (N / mm) | 19.635 | 13.74 |
| K_{re} (N / mm) | 14.137 | 11.7809 |

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۲ با افزایش سرعت اسپیندل ضرایب برشی کاهش می‌یابند.

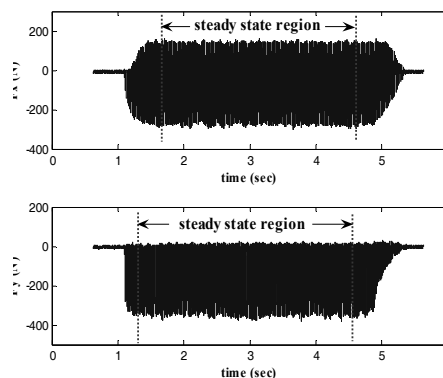
نتایج آزمایش و مقایسه با شبیه‌سازی

جهت انجام آزمایشات ابتدا دینامومتر کالیبره شده و با شرایط ارائه شده در جدول ۳ آزمایش‌های فرزکاری انجام شده است.

جدول ۳- شرایط ماشینکاری و آزمایش‌های انجام شده

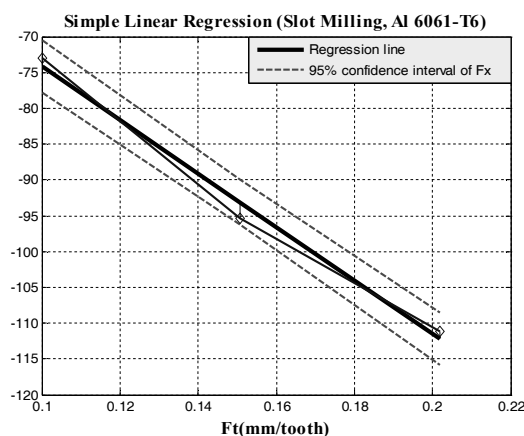
| شماره آزمایش | DOC (mm) | WOC (mm) | Ft (mm/tooth) | n (rpm) |
|--------------|----------|----------|---------------|---------|
| 1 | 2 | 2 | 0.1 | 12000 |
| 2 | 3 | 2 | 0.1 | 12000 |
| 3 | 4 | 2 | 0.1 | 12000 |
| 4 | 5 | 2 | 0.1 | 12000 |
| 5 | 7 | 2 | 0.1 | 12000 |
| 6 | 10 | 2 | 0.1 | 12000 |

نیروهای فرزکاری شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در جهت x, y برای حالت‌های نشان داده شده در جدول ۳ اندازه‌گیری شده است. نتایج شبیه‌سازی در سه دور چرخش ابزار برای آزمایش‌های شماره ۱، ۲، ۴ و ۵ در شکل‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ آمده است.

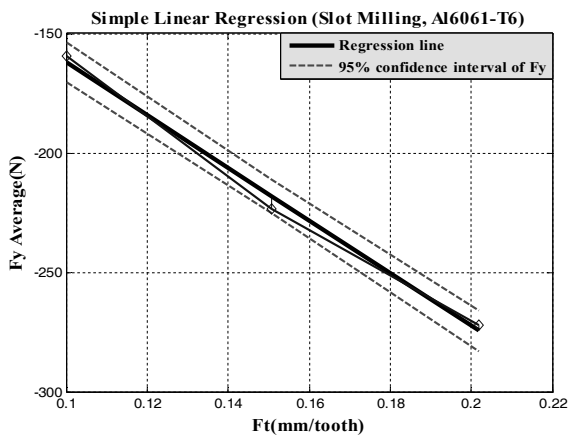


شکل ۱۰- سیگنال نیروی برشی برای سرعت اسپیندل ۳۵۰۰ rpm و بار براده ۰/۱ mm/tooth

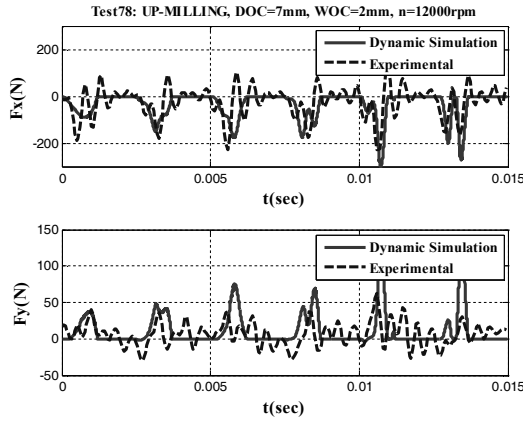
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج تحلیل رگرسیون ضرایب نیروی برشی در راستای x, y را به صورت تابعی از پیشروی نشان می‌دهند. با استفاده از رگرسیون خطی ضرایب نیروی برشی و لبه‌ای در جهات شعاعی و مماسی محاسبه شده و در جدول ۲ ارائه شده اند.



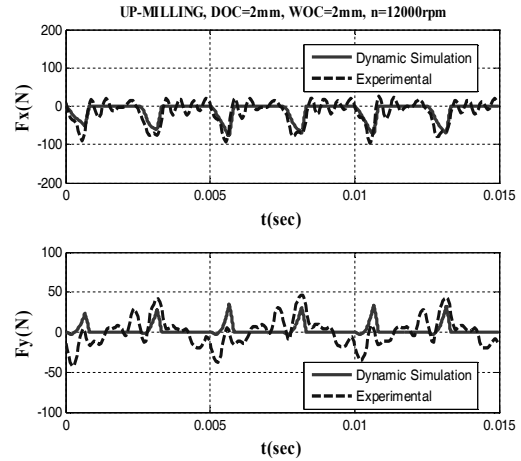
شکل ۱۱- تحلیل رگرسیون خطی برای نیروی میانگین Fx



شکل ۱۲- تحلیل رگرسیون خطی برای نیروی میانگین Fy

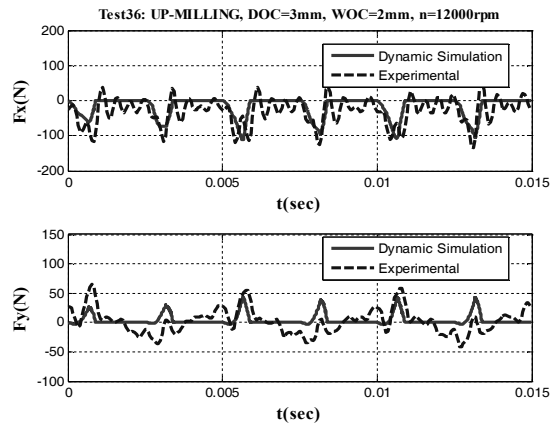


شکل ۱۶- نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های X و Y با عمق برش محوری 7 mm



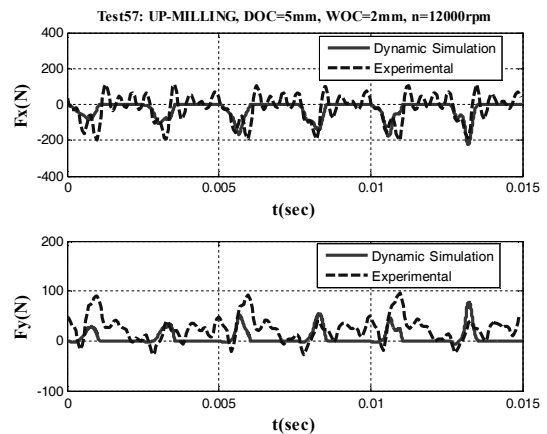
شکل ۱۳- نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های X و Y با عمق برش محوری 2 mm

همانطور که در دیاگرام نیروهای شبیه سازی شده مشاهده می شود حداکثر دامنه نیرو به تدریج زیاد شده و به محدوده متوسط ثابتی می رسد. این پدیده به علت خیزهای متفاوت قطعه کار نسبت به لبه های برنده اتفاق می افتد. ضخامت براده به تدریج روی هر لبه افزایش یافته و به محدوده ای می رسد که مقدار میانگین آن ثابت می شود. دلیل یکسان بودن دامنه در نیروهای اندازه گیری شده این است که نتایج برای سه دور چرخش ابزار درحین ماشینکاری انتخاب و آورده شده است. همچنین از مشاهده این نمودارها می توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق برش محوری نیروهای برش افزایش می یابد.



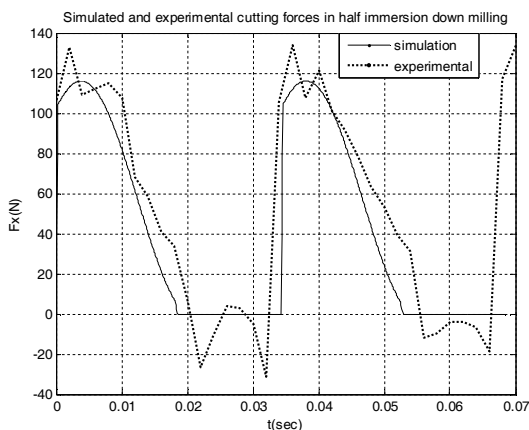
شکل ۱۴- نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های X و Y با عمق برش محوری 3 mm

با توجه به شکل های فوق مشاهده می شود که نیروهای برشی شبیه سازی شده و اندازه گیری شده از سازگاری خوبی برخوردار می باشند. خطا بین نتایج شبیه سازی شده و اندازه گیری شده ناشی از عدم پوشش کلی فرضیات مدل در نظر گرفته شده با واقعیت می باشد که شامل موارد متفاوتی است. یکی از این موارد مشکل خروج از مرکزی ابزار می باشد که سبب خطا می گردد. دلیل دیگر نیز تیز نبودن نوک ابزار و خواص له کنندگی ابزار می باشد که نیروهای شخم زنی را شامل می گردد. دلیل دیگر فرض صلب بودن قطعه کار می باشد که در واقعیت چنین نبوده و با وارد شدن نیرو به نوک ابزار، ابزار و ماشین ابزار و قطعه کار تغییر شکل یافته و سبب ایجاد خطا می گردد. لازم به ذکر است که درصد

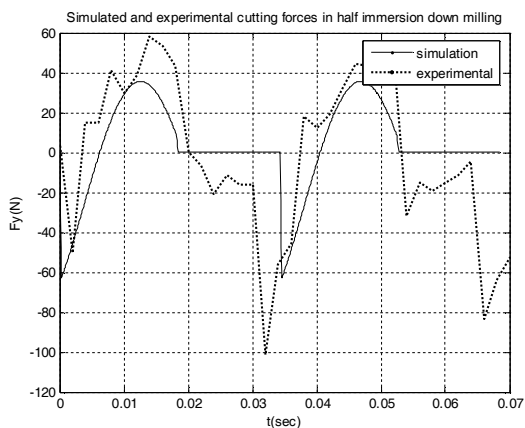


شکل ۱۵- نیروهای دینامیکی شبیه سازی و اندازه گیری شده در جهت های X و Y با عمق برش محوری 5 mm

استاتیکی عملیات خشن تراشی انجام شده است و با نیروهای بدست آمده توسط دینامومتر مقایسه شده است که از سازگاری کاملاً خوبی برخوردار می‌باشد. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ این مقایسه را نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به اینکه مرحله خشن تراشی باربرداری عامل مهمی است با اطمینان از صحت شبیه‌سازی می‌توان در فرآیند فرزکاری مقدار بهینه آن را قبل از انجام ماشینکاری مشخص نمود.



شکل ۱۸- طیف نیروی F_x شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده



شکل ۱۹- طیف نیروی F_y شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده

نتیجه‌گیری

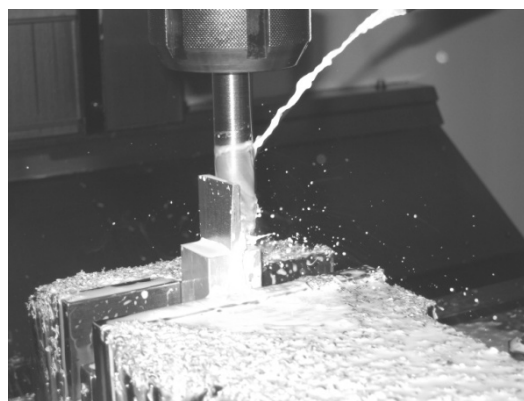
مدل‌سازی و شبیه‌سازی نیروهای برشی در فرآیند فرزکاری انگشتی با استفاده از تحلیل المان محدود انجام شده است. ابعاد براده در حال ماشینکاری با استفاده از یک نرم افزار شبیه‌ساز سه بعدی تخمین زده شده است. با استفاده از آزمایش‌های شیار تراشی ثابت‌های برشی قطعه کار محاسبه شده است. همچنین با استفاده از تحلیل المان

خطا از نسبت درصد خطای شبیه‌سازی شده به متوسط نیروهای اندازه‌گیری شده مطابق رابطه ۱۶ به‌دست می‌آید.

$$(16)$$

$$error (\%) = \left| \frac{Ave Sim force - Ave Meas force}{Ave Meas force} \right| \times 100$$

حال با اطمینان از صحت شبیه‌سازی می‌توان شرایط بهینه ماشینکاری را با تغییر پارامترهای برشی بدست آورد. از نتایج بدست آمده می‌توان در عملیات فرزکاری خشن تراشی پره‌های کمپرسور هواپیما استفاده نمود. در ادامه این عملیات شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی با انجام آزمایش‌های خشن تراشی مورد تایید قرار گرفته است. شکل ۱۷ عملیات فرزکاری خشن تراشی پره کوتاه کمپرسور موتور هواپیما مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- فرزکاری ماریچی قطعه مورد آزمایش با فرز CNC محور ۳

شرایط خشن‌تراشی قطعه آلومینیومی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- شرایط خشن تراشی قطعات آلومینیومی

| دور اسپیندل | پیشروی بر دندان | عمق برش شعاعی | عمق برش محوری | نوع عملیات | جهت فرزکاری |
|-------------|-----------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| 1750 rpm | 0.35 mm/tooth | 11 mm | 0.4 mm | با خنک کاری | فرزکاری موافق |

به منظور محاسبه نیروهای فرزکاری شبیه‌سازی

- [7] B., Evren., "Modeling statics and dynamics of milling machine components", Master of Science., 2003.
- [8] E., Budak., "Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity", International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 2006, pp. 1478–1488.
- [9] E., Budak., "Analytical models for high performance milling. Part II: process dynamics and stability", International journal of machine tools & manufacture 46, 2006, pp. 1489–1499.
- [10] Calfem, A finite element toolbox to MATLAB, LUND university, 2004
- [11] B.R., Patela, B.P., Mannb, K.A., Youngc, "Uncharted islands of chatter instability in milling", International journal of machine tools & manufacture, 2008, pp. 124–134.
- [12] H.Z., Li, W.B., Zhang, X.P., Li, , "Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory", International journal of mechanical sciences, 2001, pp. 1711–1730.
- [13] M.C., Yoon, Y.G., Kim, "Cutting dynamic force modeling of endmilling operation", Journal of materials processing technology, 2004, pp. 155–156.

محدود ماتریس های جرم، سختی و استهلاک محاسبه شده و در شبیه سازی فرآیند فرزکاری مورد استفاده قرار گرفته است. اثر عمق برش تعیین و قبل از هرگونه عملیات ماشینکاری شرایط براده برداری پیش بینی شده است. با افزایش عمق برش محوری نیروهای برش افزایش می یابد با انجام آزمایشات فرزکاری شبیه سازی های انجام شده مورد تایید قرار گرفته است.

پی نوشت

- ۱- Spiral milling
- ۲-Chatter
- ۳-Boundary representation
- ۴-Non uniform rational B-Spline
- ۵-Up-Milling
- ۶-Down-Milling
- ۷-Overhang
- ۸-Mode shapes
- ۹-Jumps out of the cut
- ۱۰-Quasi static
- ۱۱-Mechanistic
- ۱۲-Run out
- ۱۳-Full immersion

مراجع

- [1] F.D., Caulfield., "Electromechanical actuator development for integrated chatter prediction on high speed machining centers", A thesis for the degree of master of science, 2002.
- [2] J., Tlusty., 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.
- [3] Y., Altintas., D., Montgomery., E., Budak, (1992), "Dynamic peripheral milling of flexible structure", Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 137-145.
- [4] Spatial Technology, Inc., Boulder, colorado. ACIS geometric modeller. application guide, 1994.
- [5] Beer, F., Johnston, E., "Mechanics of materials", Mcgraw-Hill, U.K. 1992.
- [6] E., Budak., Y., Altintas., "Peripheral milling conditions for improved dimensional accuracy", International Journal of Machine Tools and Manufacture" 34 (7), 1994. pp. 907–918.