مجلهٔ فنی و مهندسی مدرس- مکانیک
دورهٔ دهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۸۹

شبیه‌سازی دینامیکی فرایند فرزکاری با بار جانبی کم و بررسی اثر عمق برش و نرخ پیشروی

محمد کاظمی نصرآبادی[۱]، محمد حسین صادقی[۲*]، بهنام معتکف ایمانی[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

***تهران، صندوق پستی ۱۱۱- ۱٤۱۱۵**

SADEGHIM@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸٦، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۷)

چکیده- در طی عملیات فرزکاری، نیروهای برشی باعث ایجاد ارتعاشات در ابزار برشی، قطعه کار و تجهیزات نگهدارنده می‌شود و بنابراین سلامت سطح قطعه نهایی و کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیش‌بینی دقیق نیروهای برشی برای انتخاب بهینه فرز انگشتی و ماشینهای ابزار از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق مدل‌سازی و شبیه‌سازی نیروهای برشی در فرایند فرزکاری انگشتی انجام می‌شود. ابعاد براده در حال ماشینکاری با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی سه‌بعدی تخمین زده می‌شود. اثر عمق برش و نرخ پیشروی تعیین شده و قبل از هرگونه عملیات ماشینکاری، شرایط براده‌برداری پیش‌بینی می‌شود.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی دینامیکی، فرزکاری جانبی، بار جانبی کم.

Cutting dynamic simulation of Low Immersion End Milling Operation: Effect of cutting depth and feed rate

M.K. NasrAbadi[1], M.H.Sadeghi[2*], B.M. Imani[3]

1- Professor, Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Tarbiat Modares University
2- Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashad
3- Ph. D., Candidate, Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Tarbiat Modares University

***P.O. Box: 14115-143, Tehran, Iran**
SADEGHIM@modares.ac.ir

Abstract

In end milling operation, cutting forces induce vibration on tool, workpiece and clamping devices which affects surface integrity and quality of the product. In this process, to select the optimum end mill and machine tool, the prediction of exact cutting forces is of prime importance. In the present work, modeling and simulation of cutting forces in end milling operation are performed. Instantaneous chip geometry is predicted using a 3D simulation software, the effect of cutting depth and feed rate are calculated and cutting conditions are predicted before any machining operation.

Keywords: Cutting Dynamic Simulation, Peripheral End milling, Low Immersion

۱- مقدمه

در فرایند فرزکاری به‌منظور بهینه‌سازی فرایند، پیش‌بینی نیروهای برش ضروری است. برای پیش‌بینی نیروهای فرزکاری چندین مدل، به‌ویژه مدل‌های مکانیستیک، شامل تحقیقات Kline و همکاران [۱]، Sutherland و Devor [۲]، Tlusty و Smith [۳]، Altintas و Spence [٤] توسعه یافته است. مدل‌ها با استفاده از داده‌های ورودی شامل خواص ماده قطعه کار، هندسه ابزار و شرایط برشی، نیروهای فرزکاری را پیش‌بینی می‌کنند. پیش‌بینی دقیق نیروهای برشی برای انتخاب بهینه فرز انگشتی و ماشینهای ابزار از اهمیت زیادی برخوردار است. برای پیش‌بینی مشکلاتی نظیر لرزش[1] و صدمه دیدن ابزار، در ابتدا باید نیروها به‌طور دقیق پیش‌بینی شود [٥]. برای محاسبات نیرو به انجام تخمینهایی از ابعاد براده در حال ماشینکاری نیاز می‌باشد. بهترین ابزارها برای به‌دست آوردن این ابعاد، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی سه‌بعدی است در این نرم‌افزارها ابزار و قطعه کار با یکدیگر در لبه برش ابزار درگیر شده و مختصات درگیری لبه برش ابزار در قطعه کار به‌دست می‌آید. با استفاده از این مختصات، اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی نیروها در مرحله بعدی به‌دست می‌آید. یکی از بهترین نرم‌افزارهای موجود ACIS[2] [٦] است که در آن برای مدل‌سازی از روش نمایش لایه مرزی[3] استفاده شده است. در روشهای سنتی فرزکاری، به‌منظور کاهش خطاهای ناشی از تغییر مکانهای استاتیکی و همچنین جلوگیری از ارتعاشات خود برانگیخته، پیشروی بسیار کم و سرعت پایین بوده و از تعداد زیادی مراحل نیمه‌پرداخت و پرداخت استفاده می‌شود و با از بین بردن چند قطعه یا ابزار، شرایط بهینه براده‌برداری به‌دست می‌آید. واضح است که هزینه این روشها بالا است. بنابراین با شبیه‌سازی دینامیکی فرایند فرزکاری می‌توان شرایط براده‌برداری بهینه را قبل از انجام هر گونه ماشینکاری عملی به‌دست آورد. در این تحقیق ابتدا ضرایب نیروی برشی با استفاده از آزمایش محاسبه شده است. در ادامه شبیه‌سازی دینامیکی فرایند فرزکاری انگشتی انجام شده و به‌وسیله آزمون‌های ماشینکاری به اثبات رسیده است. اثر عمق برش و نرخ پیشروی تعیین شده و قبل از هرگونه عملیات ماشینکاری، شرایط براده‌برداری پیش‌بینی می‌شود. مدل‌سازی هندسی قطعه کار، حجم جاروب شده توسط ابزار، مسیر ابزار و لبه‌های درگیری ابزار با قطعه کار از روش مدل‌سازی جسم صلب توسط نرم‌افزار ACIS انجام شده است.

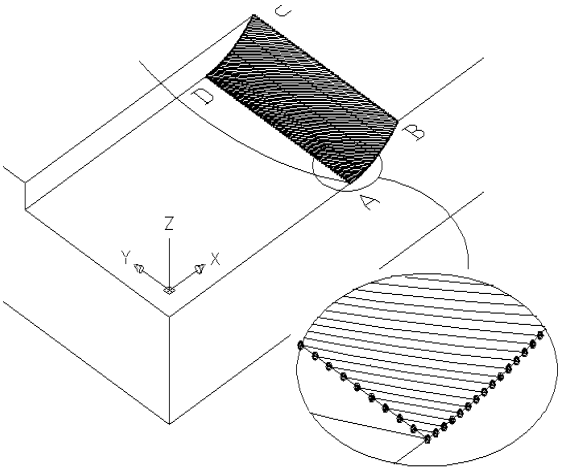
۲- مدل‌سازی ابزار و لبه برنده

مدل‌سازی ابزار توسط نرم‌افزار مدل‌سازی هندسی دقیق انجام شده است. درگیری ابزار و قطعه کار ارزیابی شده و زوایای ورود و خروج ابزار از قطعه کار مدل‌سازی شده و به‌صورت تابعی از مختصات مرکز ابزار در طول مسیر ماشینکاری ذخیره‌سازی شده است. زوایای ورود و خروج ابزار، به‌عنوان شرایط مرزی نیروهای برشی در طول مسیر ماشینکاری استفاده شده است. شکل ۱ سطح تماس ابزار با قطعه کار و قسمتهای درگیر لبه برنده ابزار با قطعه کار را نشان می‌دهد.

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[4] و حرکت موافق[5] انجام شده است. حالت فرزکاری با حرکت مخالف بدین صورت است که مختصات نقاط شروع به‌ترتیب از A به سمت B و بعد به سمت C و نقاط

1. Chatter
2. B-Rep Solid Modeler
3 . Boundary Representation
4. Up-Milling
5. Down-Milling

خروجی به‌ترتیب از A به D و بعد به سمت C مرتب می‌شوند. اما در حالت فرزکاری با حرکت موافق مختصات نقاط شروع به‌ترتیب از C به سمت B و بعد به سمت A و مختصات نقاط خروجی به‌ترتیب از C به D و بعد به سمت A مرتب می‌شوند که این مختصات در فایل متنی ذخیره شده و در محاسبه نیروهای استاتیکی و دینامیکی و همچنین تغییر مکانهای ابزار و قطعه کار استفاده می‌شوند.



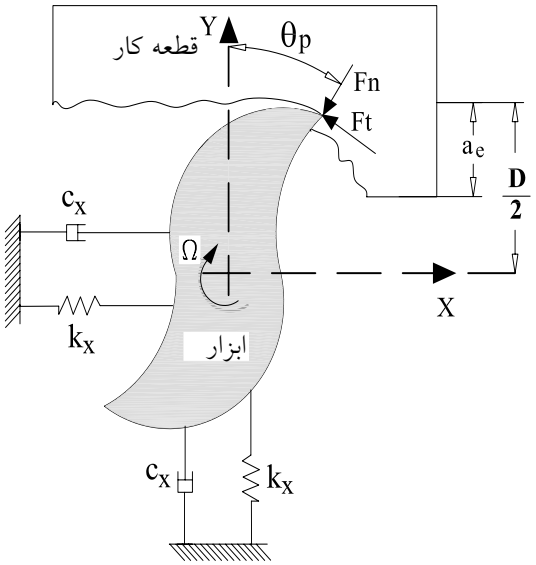
شکل ۱ درگیری لبه‌های برنده با قطعه کار

۳- مدل‌سازی فرزکاری انگشتی

در فرایند فرزکاری انگشتی، نیروهای ماشینکاری ماهیتی متناوب دارند که این موضوع، تنشهای مکانیکی و گرمایی را در ابزار ایجاد کرده و کاهش طول عمر آن را سبب می‌شود. مهمترین کاربرد ابزارهای انگشتی، فرزکاری جانبی است که در آن دیواره قطعه کار، تحت عملیات ماشینکاری قرار می‌گیرد. اگر زاویه مارویچ ابزار برابر β باشد، هر نقطه روی لبه ابزار، دارای تاخیر زاویه‌ای نسبت به پایین‌ترین نقطه همان لبه خواهد بود. مقدار تأخیر زاویه‌ای (ψ) در عمق محوری (z) ابزار به‌صورت زیر به‌دست می‌آید[۵]:

$$\tan\beta = \frac{D\psi}{2Z} \Rightarrow \psi = \frac{2Z\tan\beta}{D} \qquad (۱)$$

به این ترتیب اگر پایین‌ترین نقطه یک لبه از ابزار، به‌عنوان نقطه مرجع، در موقعیت زاویه‌ای (θ) قرار داشته باشد، نقطه‌ای روی همان لبه که در ارتفاع z قرار دارد در موقعیت زاویه‌ای $(\theta-\psi)$ قرار می‌گیرد. در نتیجه ضخامت برادهٔ برداشته شده توسط نقاط مختلف یک لبه متغیر خواهد بود. هندسه عملیات فرزکاری مخالف در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ حالت فرزکاری مخالف برای محاسبه نیروهای فرزکاری

تغییرات ضخامت براده در عملیات فرز انگشتی را می‌توان با رابطه زیر تخمین زد [۷]:

$$h = f_t \sin\theta_p \qquad (۲)$$

در رابطه فوق f_t نرخ پیشروی برحسب (mm/tooth) و θ_p موقعیت لحظه‌ای درگیری است. اگر تعداد دندانه‌های ابزار برابر N باشد، زاویه گام ابزار به‌صورت زیر است:

$$\varphi_p = \frac{2\pi}{N} \quad (3)$$

به این ترتیب زاویه درگیری برای هر نقطه دلخواه روی هر لبه دلخواه ابزار برابر است با:

$$\theta_p(z) = \theta + j\phi_p - k_\beta z \quad (4)$$

مؤلفه‌های نیروی مماسی، شعاعی و محوری را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$dF_{t,p}(\theta,z) = \left[K_{tc} h_p(\theta_p(z)) + K_{te}\right]dz$$
$$dF_{r,p}(\theta,z) = \left[k_{rc} h_p(\theta_p(z)) + K_{re}\right]dz \quad (5)$$
$$dF_{a,p}(\theta,z) = \left[k_{ac} h_p(\theta_p(z)) + K_{ae}\right]dz$$

K_{ac}, K_{tc}, K_{rc} ثابتهای نیروی برش در جهت‌های شعاعی، مماسی و محوری است. همچنین مقادیر 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 به‌صورت زیر خواهند بود:

$$dF_{x,p}(\theta_p(z)) = -dF_{t,p}\cos\theta_p(z) - dF_{r,p}\sin\theta_p(z)$$
$$dF_{y,p}(\theta_p(z)) = +dF_{t,p}\sin\theta_p(z) - dF_{r,p}\cos\theta_p(z) \quad (6)$$
$$dF_{z,p}(\theta_p(z)) = +dF_{a,p}$$

با مقدارگذاری به جای $dF_{a,p}, dF_{r,p}, dF_{t,p}$ از رابطه ۵ در رابطه ٦ و انتگرال‌گیری داریم:

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

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

$$F_{z,p}(\theta_p(z)) = \frac{1}{k_\beta}\left[K_{ac}\cos\theta_p(z) - K_{ae}\theta_p(z)\right]_{z_{p,1}(\theta_p(z))}^{z_{p,2}(\theta_p(z))} \quad (7)$$

نیروی کل روی ابزار حاصل جمع برداری نیرو روی تک‌تک لبه‌ها می‌باشد لذا می‌توان مقدار آن را به‌صورت زیر نوشت:

$$F_X = \sum_{j=0}^{N-1} F_{xp}$$
$$F_Y = \sum_{j=0}^{N-1} F_{yp} \quad (8)$$
$$F_Z = \sum_{j=0}^{N-1} F_{zp}$$

٤- مدل‌سازی ارتعاشات خود برانگیخته در فرآیند فرزکاری

شکل ۲ مدل مورد استفاده به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند فرزکاری را نشان می دهد. مشخصه های دینامیکی سیستم در دو جهت آزادی x و y نشان داده شده اند. در این شکل نیرو روی هر لبه را می توان توسط رابطه زیر بدست آورد:

$$F_{n+1} = K_{tc}a(c + z_n - z_{n-1}) \quad (۹)$$

که در این رابطه ، n اندیس شمارنده بازه زمانی ، z خیز ابزار در جهت عمود بر سطح برش و z_0 خیز دندانه ای که قبلا سطح جاری را تولید کرده است، می باشند. در هر لحظه توسط رابطه فوق نیرو روی لبه های درگیر محاسبه و جمع برداری می شود. با استفاده از روش Newmark [۸] شتابها در هر دو جهت محاسبه شده و با دو بار انتگرالگیری تغییر مکان ابزار در جهت مربوطه بدست می آید. برای هرکدام از جهات آزادی می‌توان نوشت:

$$F_n = m\ddot{x}_n + c\dot{x}_n + kx_n \quad (۱۰)$$

به این ترتیب در هر بازه زمانی Δt موقعیت هر لبه درگیر با قطعه کار محاسبه و ذخیره گشته و در محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین خیز ابزار در جهت عمود بر سطح (z) عبارت است از:

$$z_n = -(x_n \sin\phi + y_n \cos\phi) \quad (۱۱)$$

ویژگی این مدل آن است که بعضی از پدیده‌هایی را که به غیرخطی شدن فرآیند منجر می‌شوند می‌توان در تحلیل وارد کرد. به‌عنوان مثال ممکن است دامنه ارتعاشات به‌قدری بزرگ شود که در بعضی از جاها لبه ابزار تماس خود با قطعه کار را از دست بدهد که در این صورت می‌گوییم پدیده خروج ابزار از برش[1] رخ داده است. هنگامی که این شرایط اتفاق می افتد نیروی برش دیگر متناسب با ضخامت براده نمی‌باشد و در این زمان مقدار نیرو صفر یا منفی می‌باشد. به این ترتیب می توان با اضافه کردن یک مقایسه گر منطقی به مدل، هرگاه مقدار نیرو منفی بود آنرا صفر در نظر بگیریم.

۵- الگوریتم شبیه‌سازی ارتعاشات خود برانگیخته در عملیات فرزکاری انگشتی

در این قسمت به ارائه یک الگوریتم مناسب به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند در عملیات فرزکاری پرداخته می شود. الگوریتم ارائه شده بر مبنای مدل توضیح داده شده در بالا پی ریزی گردیده است. از مشخصه های این الگوریتم می‌توان به مدل‌سازی دقیق شروع عملیات فرزکاری در دورهای اولیه که حالت گذرای عملیات را تشکیل می‌دهند اشاره کرد. اگر یک ابزار فرز انگشتی چهار لبه در نظر گرفته شود با چهار ناحیه متفاوت روبرو می شویم که عبارتند از:

ناحیه اول: این ناحیه ربع اول از دور اول چرخش ابزار را تشکیل می دهد. در این ناحیه لبه ابزار از سطحی براده برمی دارد که قبلا ماشینکاری نشده است. در این حالت ضخامت براده عبارت است از:

$$h_c = h_j - z \quad (۱۲)$$

که در این رابطه z خیز دینامیکی لبه جاری و h_j ضخامت نامی براده می باشد که از رابطه (۲) بدست می‌آید.

ناحیه دوم: این ناحیه ربع دوم از دور اول ابزار را تشکیل می دهد که در آن ضخامت براده با استفاده از ضخامت نامی، خیز دینامیکی لبه جاری (z) و خیز دینامیکی لبه قبلی (z_1) بدست می آید. برای این ناحیه می توان نوشت:

$$h_c = h_j - z + z_1 \quad (۱۳)$$

ناحیه سوم: این ناحیه ربع سوم از دور اول ابزار را تشکیل می دهد. در این ناحیه ضخامت براده علاوه بر h_0

1. Jump out of the Cut

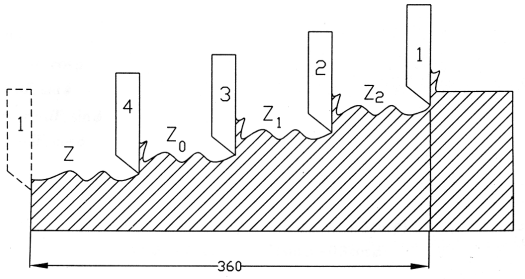
و خیز دینامیکی لبه جاری، تابعی از خیز دینامیکی دو لبه قبلی نیز می باشد:

$$h_c = h_0 - z + z_1 + z_2 \qquad (14)$$

ناحیه چهارم: در سایر قسمتها معادله حاکم بر ضخامت براده، معادله مربوط به ناحیه چهارم می باشد که در آن علاوه بر خیز دینامیکی لبه جاری خیز دینامیکی سه لبه قبل هم در نظر گرفته می شود. برای ناحیه چهارم ضخامت براده از رابطه زیر بدست می آید:

$$h_c = h_0 - z + z_1 + z_2 + z_3 \qquad (15)$$

شکل (۳) نشان دهنده اثر خیز دینامیکی لبه های قبل در محاسبه ضخامت براده جاری می باشد[۹].



شکل ۳ لبه های برنده ابزار و سطوح موج دار

در الگوریتم پیشنهادی ورودی ها عبارتند از: سختی در جهت x و y (K_x, K_y)، جرم (m_x, m_y) زاویه ورود و خروج ابزار (θ_{st}, θ_{ex})، پیشروی f_t، قطر ابزار d، سرعت اسپیندل n، تعداد دندانه های ابزار N، عمق برش محوری a، زاویه هلیکس ابزار h، ضرایب نیروی برش، تعداد دور ابزار و خروجی ها عبارتند از: نیروی دینامیکی در جهت x و y و خیز دینامیکی ابزار در جهت x و y که برای هر موقعیت زاویه ای ابزار بدست می آید. پارامترهای ارتعاشی سیستم به‌صورت مقادیر ارائه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده اند [۱۰]:

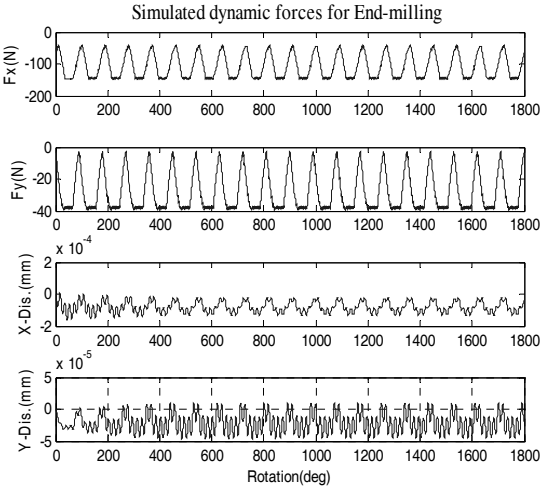
جدول ۱ پارامترهای مودال سیستم ارتعاشی

$f_x = f_y = ۹۲۲(Hz)$
$K_x = K_y = ۱.۳٤\times۱۰^{٦}(N/m)$
$\xi_x = \xi_y = ۰.۰۱۱$

در شکل ٤ نیروهای F_x، F_y و ارتعاشات مرکز ابزار در جهت x و y برای پنج دور چرخش و شرایط ماشینکاری ارائه شده در جدول ۲ رسم شده اند.

جدول ۲ پارامترهای شبیه‌سازی

قطر ابزار (mm)	۱۰
تعداد لبه ها	٤
دور اسپیندل (rpm)	۲۸۰۰
زاویه مارپیچ (deg)	۳۰
عمق برش شعاعی[1] (mm)	۱
عمق برش محوری[2] (mm)	۱۰
پیشروی بر دندانه(mm/tooth)	۰/۰۲۵
تعداد دور چرخش ابزار	۵



شکل ٤ نیروهای Regenerative و خیز مرکز ابزار

1. Width of Cut (WOC)
2. Depth of Cut (DOC)

٦- روش تجربی برای محاسبه ضرایب نیروی برش

یک روش سریع برای تعیین ثابتهای نیروی برش انجام آزمایش و کالیبراسیون ابزار می‌باشد. در این روش که به روش ساختارگرا[1] معروف است، یکسری آزمایشات تحت پیشروی‌های مختلف اما میزان درگیری و عمق برش ثابت انجام می‌گیرد. سپس مقدار متوسط نیرو در هر پریود ابزار اندازه‌گیری شده و به‌منظور جلوگیری از اثر خطای خروج از مرکزی ابزار[2] روی اندازه‌گیری ها، کل نیرو در هر دور اسپیندل جمع و بر تعداد دندانه‌های اسپیندل تقسیم می‌شود. سپس مقدار اندازه‌گیری شدهٔ نیروی متوسط از روش آزمایشگاهی با رابطه تئوری برابر قرار داده شده و ثابتهای نیروی برش بدست می آیند.

با انتگرال‌گیری از رابطه (٦) می توان رابطه زیر را نوشت:

$$\overline{F}_q = \frac{1}{\phi_p}\int_{\theta_{st}}^{\theta_{ex}} F_q(\theta)d\theta \qquad (16)$$
$$q = x, y, z$$

در این موارد آزمایش شیار تراشی[3] بسیار معمول و راحت است زیرا در این حالت زاویه ورود $\theta_{st} = 0$ و زاویه خروج $\theta_{ex} = \pi$ می‌باشد. هنگامی که این دو مقدار در معادله (١٦) اعمال می‌شوند، نیروی متوسط در هر پریود دندانه به‌صورت زیر خواهد بود [١١]:

$$\overline{F}_X = -\frac{Na}{4}K_{rc}c - \frac{Na}{\pi}K_{tc}$$
$$\overline{F}_Y = \frac{Na}{4}K_{tc}c + \frac{Na}{\pi}K_{tc} \qquad (17)$$
$$\overline{F}_Z = +\frac{Na}{\pi}K_{ac}c + \frac{Na}{2}K_{ae}$$

نیروی متوسط را می‌توان به‌صورت یک تابع خطی از پیشروی f_t و یک مقدار آفست که بدلیل نیروی لبه‌ای[4] اتفاق می‌افتد به‌صورت زیر نوشت:

$$\overline{F}_q = \overline{F}_{qc}c + \overline{F}_{qe} \qquad (18)$$
$$q = x, y, z$$

مقادیر نیروی متوسط کل در هر پیشروی توسط دینامومتر اندازه‌گیری می‌شود. با محاسبه مقدار نیروی متوسط کل می توان مؤلفه لبه‌ای نیروی برش لبه ای $(\overline{F}_{qe})$ را توسط رگرسیون خطی به دست آورد که در نهایت ضرایب نیروی برش به‌صورت زیر به دست می‌آیند [١١]:

$$K_{tc} = \frac{4\overline{F}yc}{Na} \quad , \quad K_{te} = \frac{\pi\overline{F}_{ye}}{Na}$$
$$K_{rc} = \frac{-4\overline{F}_{Xc}}{Na} \quad , \quad K_{re} = \frac{-4\overline{F}_{xe}}{Na} \qquad (19)$$
$$K_{ac} = \frac{\pi\overline{F}_{zc}}{Na} \quad , \quad K_{ae} = \frac{2\overline{F}ze}{Na}$$

٧- تجهیزات مورد استفاده و مواد و روش آزمایش

٧-١- تجهیزات و وسایل مورد آزمایش

در تستهای تجربی انجام شده جهت انجام عملیات ماشینکاری از ماشین فرز CNC سه محوره همزمان VMC با کنترلر FANUC-١٨ M استفاده شده است. این ماشین CNC دارای حداکثر سرعت اسپیندل rpm ٦٠٠٠ می باشد. ابزار مورد استفاده در این تحقیق ابزار انگشتی کاربیدی سر تخت تک لبه به قطر ١٠ میلیمتر با زاویه مارپیچ ٣٠ درجه و مقدار Overhang

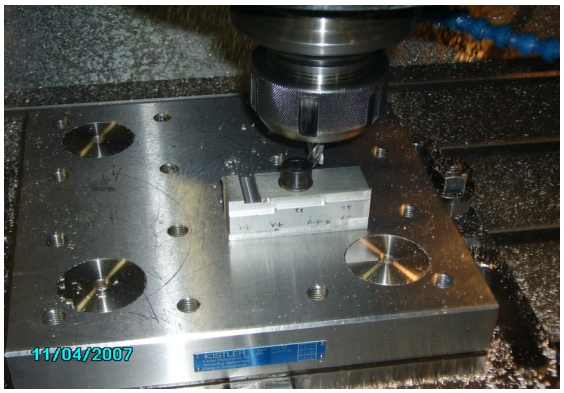
1. Mechanistic
2. Runout
3. Full Immersion
4. Edge Force

ابزار ۳۵ میلی متر می باشد. لازم به ذکر است که در ابتدا ابزار ٤ لبه داشته است که به‌منظور جلوگیری از آشفتگی به واسطه خطای خروج از مرکزی ابزار[1] سه لبه از ابزار سنگ زده شده است. با توجه به کاربرد گسترده آلیاژ Al-۷۰۷۵-T٦ در صنعت هوا فضا جهت انجام آزمایشات از بلوکهای آلومینیومی به ابعاد ۳۰×۳۰×۸۰ میلی متر استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری نیرو از دینامومتر نوع Kistler ۹۲۵۵B استفاده شده است. این دینامومتر دارای قدرت اندازه‌گیری نیرو در محورهای X و Y از ۲۰- تا ۲۰+ کیلونیوتن و در محور Z از ۱۰- تا ٤۰+ کیلو نیوتن می‌باشد. همچنین از تقویت کننده بار الکتریکی (Charge Amplifier) نوع ۵۰۱۹ A استفاده گردیده است. این دستگاه جهت تبدیل بار الکتریکی ایجاد شده در پیزو الکتریکهای دینامومتر به ولتاژ استفاده شده است.

۷-۲- روش انجام آزمایش

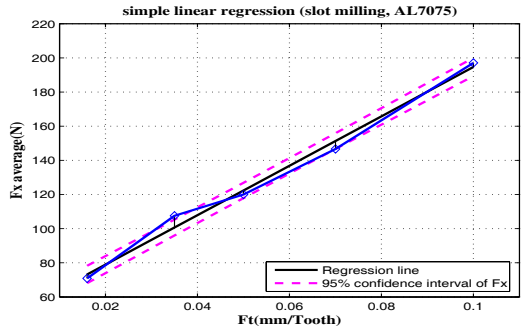
ابتدا به‌منظور بدست آوردن ضرایب نیروی برشی از یک بلوک از جنس آلیاژآلومینیم Al-7075-T6 به ابعاد ۳۰×۳۰×۸۰ میلی متر استفاده می شود. سپس به‌منظور بستن قطعه کار روی دینامومتر سوراخهایی متناسب با سوراخهای دینامومتر در قطعه ایجاد می کنیم. تست های برشی شیار تراشی توسط یک ابزار فرز انگشتی کاربیدی به قطر ۱۰ میلی متر با مقدار بیرون آمدگی از اسپیندل[2] ۳۵ میلیمتر و زاویه مارپیچ ۳۰ درجه برای رنج بار براده ۰/۱- ۰/۰۷- ۰/۰۳۵ - ۰/۰۱٦ میلیمتر بر دندانه و سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ rpm انجام می شود (شکل ۵).

1. Runout
2. overhang

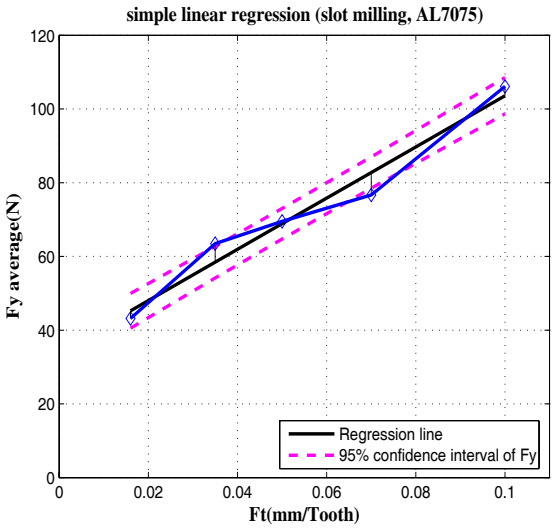


شکل ۵ قطعه کار، دینامومتر و ابزار درحال شیار تراشی

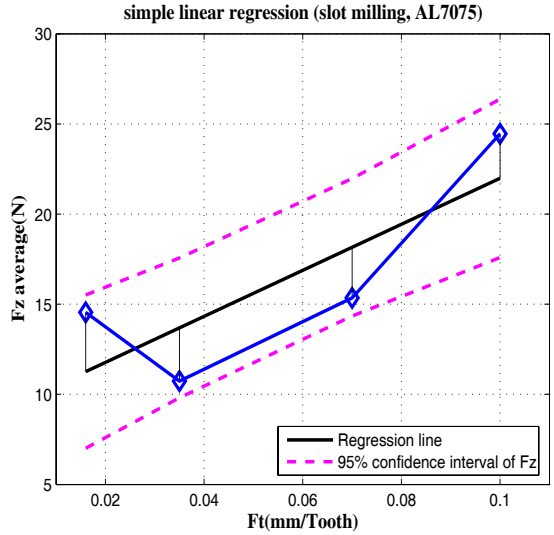
شکلهای ٦، ۷ و ۸ یک تحلیل رگراسیون از ضرایب نیروی برشی بصورت تابعی از سرعت اسپیندل را در جهت های x، y و z نشان می دهند. شیب خط بدست آمده از تحلیل رگراسیون را برابر $\overline{F_{qc}}$ در معادله (۱۸) یا $\frac{Na}{\pi}K_{ac}$ ، $\frac{Na}{\varepsilon}K_{tc}$ ، $\frac{Na}{\varepsilon}K_{rc}$ در معادله (۱۷) قرار داده و مقادیر K_{ac} ، K_{tc} ، K_{rc} (ضرایب نیروی برش شعاعی، مماسی و محوری) را بدست می آوریم. همچنین عرض از مبدا خط بدست آمده از تحلیل رگراسیون را برابر $\overline{F_{qe}}$ در معادله (۱۸) یا برابر $\frac{Na}{\pi}$ ، $\frac{Na}{\pi}$ ، $\frac{Na}{۲}$ در معادله (۱۷) قرار داده و مقادیر K_{ae} ، K_{te} ، K_{re} (ضرایب نیروی برش لبه ای شعاعی، مماسی و محوری) را بدست می آوریم. نتایج تست های انجام شده در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ٦ تحلیل رگراسیون خطی برای نیروی Fx میانگین



شکل ۷ تحلیل رگراسیون خطی برای نیروی Fy میانگین



شکل ۸ تحلیل رگراسیون خطی برای نیروی Fz میانگین

جدول ۳ ضرایب برشی برای تستهای شیار تراشی با استفاده از فرزانگشتی ٤ لبه

n (rpm)=۱۰۰۰	
$K_{te} = ۱۷.۲۷\ (N/mm)$	$K_{tc} = ۷۳۳.٤\ (N/mm^۲)$
$K_{re} = ۱۲.۹٥\ (N/mm)$	$K_{rc} = ۳٤۸\ (N/mm^۲)$
$K_{ae} = ۲.٦۲\ (N/mm)$	$K_{ac} = ٤۹.۷٤۲\ (N/mm^۲)$

به‌منظور تایید نیروهای برشی حاصل از شبیه‌سازی آزمایشات فرزکاری انگشتی بار جانبی کم در حالت فرزکاری مخالف با شرایط ارائه شده در جدول ٤ انجام گرفته است. نیروهای برشی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در جهات X و Y در حوزه زمان برای حالتهای نشان داده شده در جدول (٤) اندازه‌گیری شده است.

جدول ٤ شرایط ماشینکاری و تست های انجام شده در حالت فرزکاری خشک (بدون ماده خنک کننده)

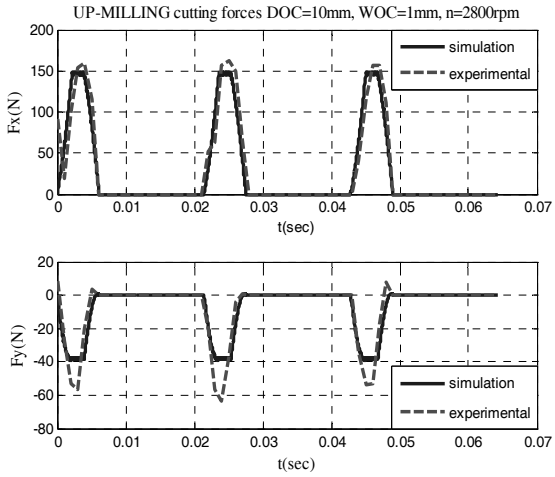
آزمایش	عمق برش محوری (mm)	عمق برش شعاعی (mm)	نرخ پیشروی (mm/min)	سرعت اسپیندل (rpm)
۱	۱۰	۱	۰/۰۲٥	۲۸۰۰
۲	۷	۱	۰/۰۲٥	۲۸۰۰
۳	٥	۱	۰/۰۲٥	۲۸۰۰
٤	۱۰	۱	۰/۰۲۸	۳٥۰۰
٥	۷	۱	۰/۰۲۸	۳٥۰۰
٦	٥	۱	۰/۰۲۸	۳٥۰۰
۷	۱۰	۲	۰/۰۲٥	۲۸۰۰
۸	۷	۲	۰/۰۲٥	۲۸۰۰
۹	٥	۲	۰/ ۰۲٥	۲۸۰۰
۱۰	۷	۱	۰/۰٤	۳٥۰۰
۱۱	٥	۱	۰/۰٥۳	۳٥۰۰

نتایج برای تستهای شماره ۱، ۲ و۸ یعنی در سرعت اسپیندل ۲۸۰۰ rpm و پیشروری بر دندانه ۰/۰۲٥ در حالتهای زیر برای سه دور چرخش ابزار در شکلهای ۹، ۱۰ و ۱۱ آمده است.

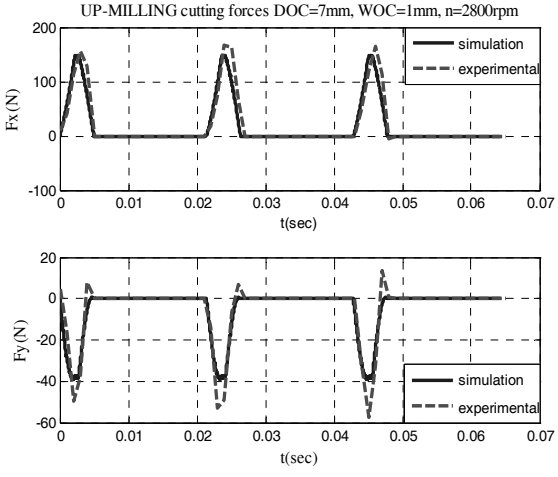
الف – عمق برش محوری ۱۰ mm و عمق برش شعاعی ۱ mm.

ب- عمق برش محوری ۷۰ mm و عمق برش شعاعی ۱ mm.

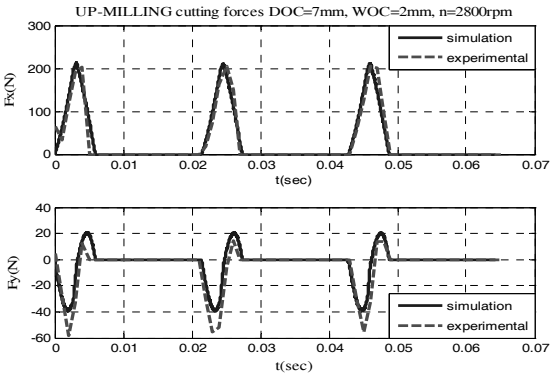
ج- عمق برش محوری ۷۰ mm و عمق برش شعاعی ۲ mm.



شکل ۹ طیف نیروهای Fx و Fy شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (تست ۱)

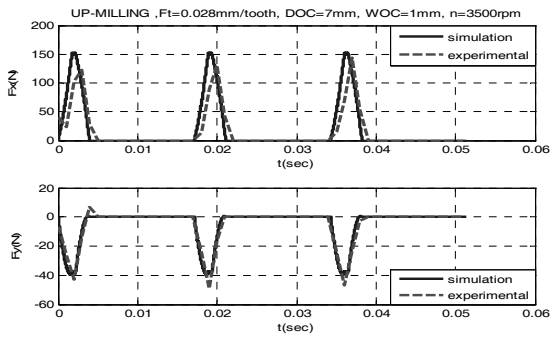


شکل ۱۰ طیف نیروهای Fx و Fy شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (تست ۲)

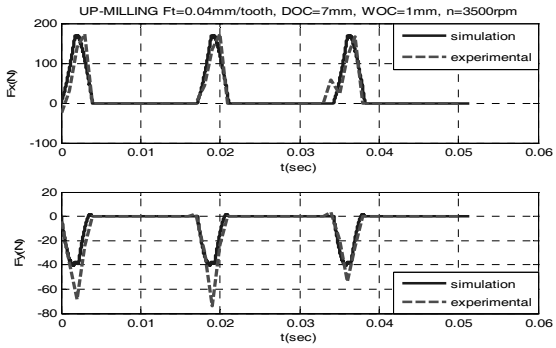


شکل ۱۱ طیف نیروهای Fx و Fy شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (تست ۸)

از مشاهده این نمودارها می توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق برش محوری و همچنین عمق برش شعاعی نیروهای برش افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که اثر تغییرات عمق برش شعاعی به‌مراتب بیشتر از اثر تغییرات عمق برش محوری است. این مسئله به‌این علت است که برای عمق برش شعاعی نسبتا کوچک، طول درگیری لبه برنده با افزایش عمق برش‌محوری تغییر قابل توجهی نخواهد داشت و از طرف دیگر با افزایش عمق برش شعاعی طول درگیری شدیدا افزایش خواهد یافت. در ادامه با ثابت نگه داشتن کلیه پارامترهای برشی و فقط تغییر نرخ پیشروی مطابق شکلهای ۱۲ و ۱۳ مشاهده می شود که با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۲۸ به ۰/۰٤ میلیمتر بر دندانه نیروهای برشی نیز افزایش می‌یابند.



شکل ۱۲ طیف نیروهای Fx و Fy شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (تست ۵)



شکل ۱۳ طیف نیروهای Fx و Fy شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (تست ۱۰)

با توجه به شکلهای فوق مشاهده می شود بین نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده چند درصد خطا وجود دارد که این خطا ناشی از عدم پوشش کلی فرضیات مدل در نظر گرفته شده با واقعیت می باشد که شامل موارد متفاوتی است. یکی از این موارد تیز نبودن نوک ابزار و خواص لـه 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 خطا از نسبت درصد خطای شبیه‌سازی شده به متوسط نیروهای اندازه‌گیری شده مطابق رابطه زیر بدست می آید.

(۲۰)

$$error\,(\%) = \left| \frac{Ave.\ Sim.\ \ force - Ave.\ Meas.\ \ force}{Ave.\ Meas.\ \ force} \right| \times ۱۰۰$$

به عنوان مثال برای تست شماره ۱ مقدار نیروی متوسط شبیه‌سازی شده در جهت x برابر ۲۷/۰۱۶۸- و مقدار نیروی متوسط اندازه‌گیری شده در جهت x برابر ۲۸/۸٤٦۲- می باشد که مقدار خطا ٦/۳٤۱۹ درصد بدست می‌آید.

۸- نتیجه‌گیری

مدلسازی و شبیه‌سازی نیروهای برشی در فرآیند فرزکاری انگشتی انجام شده است. ابعاد براده در حال ماشینکاری با استفاده از یک نرم‌افزار شبیه ساز سه بعدی تخمین زده شده است و اثر عمق برش و نرخ پیشروی تعیین و قبل از هرگونه عملیات ماشینکاری شرایط براده برداری پیش بینی شده است. با افزایش عمق برش محوری و همچنین عمق برش شعاعی نیروهای برش افزایش می یابد که اثر تغییرات عمق برش شعاعی به مراتب بیشتر از اثر تغییرات عمق برش محوری است. همچنین با افزایش نرخ پیشروی، نیروهای برشی نیز افزایش می یابند. با انجام تستهای ماشینکاری، شبیه‌سازیهای انجام شده مورد تایید قرار گرفته است.

۹- منابع

[1] Kline WA, DeVor RE, Undberg JR. "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cut", International Journal of Machine Tool Design and Research 1982;22:7–22.

[2] Sutherland J.W., Devor R.E., "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Vol. 108, No. 4, Nov. 1986, pp. 269-279.

[3] Smith S, TlustyJ. "An overview of the modelling and simulation of the milling process", ASME Journal of Engineering for Industry1991;113:169–75.

[4] Spence D, Altintas Y. "A solid modeller based milling simulation and process planning system", ASME Journal of Engineering for Industry 1994;116:61–9.

[5] Yoon M.C., Kim Y.G.,"Cutting dynamic force modeling of end milling operation", Journal of Materials Processing Technology 155-156(2004), 1383-1389.

[6] Boulder, Colorado Inc., "Spatial Technology ACIS Geometric Modeler", V3.0, 1997.
[7] Li H.Z., Zhang W.B., Li X.P. , "Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory", International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43: 1711–1730,.
[8] Bathe, Klaus-Jurgen, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", 1982 pp. 510-532.
[9] Altintas Y., "Modeling Approaches and Software for Predicting the Performance of Milling perations at MAL- UBC", University of British Columbia (UBC),2001.
[10] Bayly P.V., Mann B.P., Schmitz T.L., Peters D.A., Stepan G., Insperger T., "Effects of radial immersion and cutting direction on chatter instability in end milling", Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition, New Orleans, LA, no. IMECE-34116, New Orleans, LA, ASME, 2002.
[11] Budak E., "Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity", International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1478–1488.