

مدل سازی نیروهای ماشین کاری در فرایند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی

محمد حسین صادقی
دانشیار

حشمت ا. حقیقت
فارغ التحصیل دکتری

امیر عبدالله
استادیار

گروه مهندسی ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این مقاله یک روش برای مدل سازی نیروهای ماشین کاری در فرایند فرزکاری با ابزار فرز سر کروی در ماشین کاری سطوح قالب ها بیان شده است. مدل ارائه شده دارای قابلیت تخمین نیروهای ماشین کاری برای شرایط ماشین کاری مختلف می باشد. برای نمایش لبه برش، ابزار و قطعه در حال ماشین کاری از یک نرم افزار مدل سازی هندسی (ACIS) استفاده شده است. قسمت در حال برش لبه برش در هر موقعیت زاویه ای ابزار تقاطع منحنی لبه برشی با لبه های وجه تماس بین ابزار و قطعه در حال ماشین کاری محاسبه می شوند. برای محاسبه نیروهای وارد بر ابزار، قسمت در حال ماشین کاری لبه برش به المان های کوچک تقسیم شده و فرایند ماشین کاری در هر المان به صورت فرایند ماشین کاری مایل شده و نیروهای کل وارد بر ابزار در هر زاویه دوران ابزار از جمع نیروهای المانی محاسبه شده اند. آزمایش های مختلف نیز برای بررسی صحت و سقم نتایج شبیه سازی انجام شده است.

کلمات کلیدی

«فرزکاری» - «ابزار فرز سرکروی» - «مدل سازی» - «نیروهای ماشین کاری»

Modeling of Cutting Forces in Ball-End Milling Process

M.H. Sadeghi
Associate Professor

H.Haghighat
Ph.D. Graduate

A.Abdollah
Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering,
Tarbiat Modarres University

Abstract

An approach for modeling of cutting force in ball-end milling process is presented in this paper. This model has the capability of estimating the cutting forces for various cutting conditions. A commercially available geometric engine (ACIS) is used to represent the cutting edge, cutter and updated part. To determine cutting edge engagement for each tool rotational step, the intersections between the cutting edge with boundary of the contact face between tool and updated part are determined. The engaged portion of the cutting edge is divided into small differential oblique cutting edge segments and the cutting force components are calculated by summing up the differential cutting forces. A series of experiments were performed to verify the proposed approach.

Keywords

“Ball - end Milling” - “Solid Modelling” - “Cutting Forces”

بردار r که بردار موقعیت نقطه P در دستگاه مختصات xyz است را می توان به شکل ذیل نوشت:

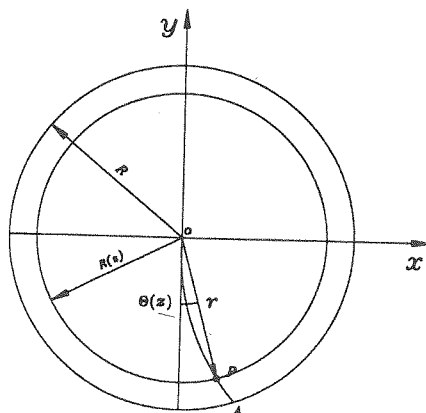
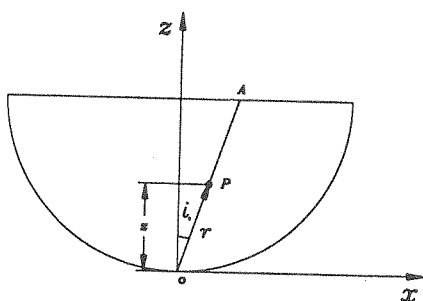
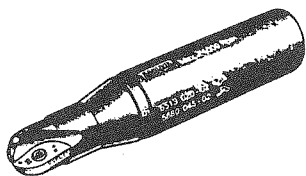
$$r = R(z) \sin \theta(z) i - R(z) \cos \theta(z) j + zk \quad (3)$$

که در رابطه فوق i, j و k به ترتیب بردارهای واحد در امتداد محوره های x, y و z می باشند. با ترکیب روابط (۱)، (۲) و (۳) بردار r را می توان به صورت ذیل نوشت:

$$r = z \tan i_0 i - \sqrt{R^2(z) - (z \tan i_0)^2} j + zk \quad (4)$$

با گرفتن دیفرانسیل از رابطه فوق داریم:

$$dr = (\tan i_0 i - \frac{R(z) \frac{dR(z)}{dz} - z \tan^2 i_0}{\sqrt{R^2(z) - (z \tan i_0)^2}} j + k) dz \quad (5)$$



شکل (۱) ابزار فرز سر کروی و مدل هندسی لبه برش.

فرایند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی (ball-end mill) به طور وسیعی برای ماشین کاری سطوح پیچیده قالب ها استفاده می شود. برخلاف ابزارهای فرز سر تخت (flat end mill)، ابزارهای فرز سرکروی دارای شعاع، زاویه هلیکس (helix angle) و زاویه پیشانی (rake angle) متغییر در امتداد لبه برش (cutting edge) می باشند. به واسطه کاهش شعاع، سرعت ماشین کاری (cutting speed) در طول لبه برش متغییر می باشد این سرعت با مقدار حداکثر در قسمت استوانه شروع و در نوک ابزار به صفر کاهش می یابد. نیروی ماشین کاری در فرایند تراشه برداری از پارامترهای مهم بوده که بر روی تغییر شکل ابزار، پریدن لبه های ابزار، سایش و ارتعاش ابزار اثر می گذارد. بنابراین تاکنون تحقیقات زیادی برای مدل سازی آن صورت گرفته است [۱، ۲، ۳، ۴ و ۵]. هدف از مقاله حاضر، توسعه یک مدل نیرو برای فرایند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی در ماشین کاری سطوح پیچیده قال بها می باشد. سطح یک قالب را می توان با مجموعه ای از سطوح که دارای زاویه q نسبت به محور X و زاویه Ψ نسبت به محور Y می باشند تقریب زده شده و برای نمایش قطعه در حال ماشین کاری، منحنی لبه برش و استخراج اطلاعات هندسی مورد لزوم در محاسبه نیروها از نرم افزار تجارتي ACIS استفاده شده است [۶].

۱- مدل سازی هندسی

۱-۱- مدل سازی لبه برش

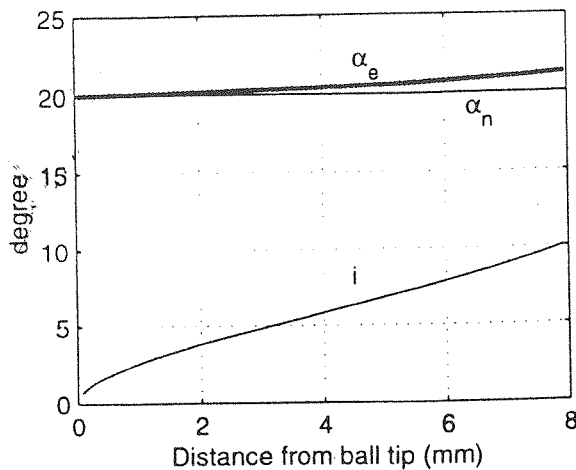
لبه برش می تواند به طور دلخواه روی قسمت کروی ابزار قرار گیرد و بنابراین طرح های مختلف ابزار فرز سر کروی وجود دارد. ابزار فرز سر کروی مورد استفاده در این مقاله که در شکل ۱ نشان داده شده از نوع دندانه جدا شدنی (inert type) بوده و لبه برش (OA در شکل ۱) از تقاطع یک صفحه که دارای زاویه i_0 نسبت به صفحه $y-z$ می باشد، با قسمت کروی ابزار ایجاد می گردد. شعاع $R(z)$ ابزار در صفحه $x-y$ و در ارتفاع z برابر است با:

$$R(z) = \sqrt{R^2 - (R-z)^2} \quad (1)$$

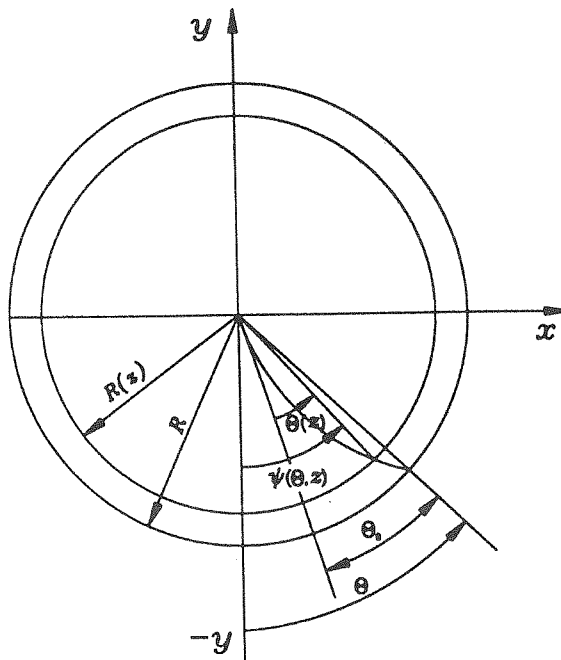
که در رابطه فوق R شعاع قسمت کروی ابزار می باشد. زاویه $\theta(z)$ که زاویه بین تصویر بردار r روی صفحه $x-y$ و محور y می باشد از رابطه ذیل محاسبه می شود:

$$\sin \theta(z) = \frac{z \tan i_0}{R(z)} \quad (2)$$

که در رابطه فوق Z تعداد دندان‌های ابزار، $\theta_0 = \sin^{-1}(\tan i_0)$ می‌باشند و $\theta(z)$ از رابطه (۲) بدست می‌آید.



شکل (۲) تغییرات زاویه تمایل، i ، و زاویه مؤثر تراشه، α_e برای $\alpha_n=20^\circ$ و $i_0=10^\circ$ و $R=8\text{mm}$ در امتداد z .



شکل (۳) زاویه يك المان از لبه برش در صفحه $x-y$ با محور $-y$.

۲-۱. مدل سازی ضخامت تراشه

مدل سازی ضخامت تراشه در فرایند فرزکاری با امتداد تغذیه افقی اولین بار توسط Martellotti صورت گرفت [۸] و برای حالت فرزکاری سه بعدی با ابزار فرز سر کروی (شکل ۴) Lim و همکاران رابطه ذیل را برای ضخامت تراشه به فرض صلب بودن ابزار پیشنهاد کردند:

$$t(\Theta, z) = R_2 - R_1 + f_h \sin \psi(\Theta, z) \quad (13)$$

و طول یک المان (ds) از لبه برش که در ارتفاع z قرار دارد برابر اندازه برادر dr می‌باشد، بنابراین:

$$ds = \left| \frac{dr}{dz} \right| dz = \sqrt{\tan^2 i_0 + \frac{[R(z) \frac{dR(z)}{dz} - z \tan^2 i_0]^2}{R^2(z) - (z \tan i_0)^2}} dz \quad (6)$$

مشتق $R(z)$ نسبت به z می‌باشد و از رابطه (۱):

$$\frac{dR(z)}{dz} = \frac{R - z}{R(z)} \quad (7)$$

از تعریف زاویه تمایل (inclination angle) داریم:

$$ds \sin i(z) = R(z) d\theta \quad (8)$$

که در رابطه فوق، $i(z)$ زاویه تمایل لبه برش در فاصله z از نوک ابزار می‌باشد. با گرفتن دیفرانسیل از رابطه (۲) داریم:

$$d\theta = \frac{\tan i_0 [R(z) - z \frac{dR(z)}{dz}]}{R(z) \sqrt{R^2(z) - (z \tan i_0)^2}} dz \quad (9)$$

و بنابراین

$$i(z) = \sin^{-1} \frac{R(z) d\theta}{ds} \quad (10)$$

زاویه پیشانی مؤثر (α_e ، effective rake angle)، ابزار از معادله ذیل بدست می‌آید [۷]:

$$\sin \alpha_e = \sin \alpha_n \sin i \cos \eta_c + \sin \eta_c \sin i \quad (11)$$

که α_e زاویه پیشانی عمودی (i ، normal rake angle)، زاویه تمایل لبه برش و η_c زاویه جریان تراشه (chip flow angle) می‌باشند. برای $\alpha_n=20^\circ$ ، $i_0=10^\circ$ و $R=8\text{mm}$ ، تغییرات زاویه تمایل، زاویه مؤثر تراشه در امتداد محور z در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

زاویه بین تصویر برادر r در صفحه $x-y$ با محور $-y$ پس از دوران ابزار از حالت اولیه (شکل ۳) به اندازه زاویه Θ حول محور z ، از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$\psi(\Theta, z) = \Theta + \frac{2\Pi}{Z} - [\theta_0 - \theta(z)] \quad (12)$$

$$f_v = f \sin \Phi, f_h = f \cos \Phi \quad (۱۶)$$

زاویه Φ می تواند بزرگتر، کوچکتر و یا برابر صفر درجه باشد. در حالت $\Phi > 0$ علامت f_v مثبت و وقتی که $\Phi > 0$ ، علامت f_v منفی و اگر $\Phi > 0$ باشد معادله (۱۵) به شکل ساده $(\psi, 0)$ $f \sin(\Theta)$ تبدیل شده که توسط Martellotti پیشنهاد شده بود [۸ و ۹].

۳-۱- هندسه درگیری ابزار و قطعه کار

هندسه درگیری ابزار و قطعه کار (مورد نیاز برای محاسبه نیروهای ماشین کاری) شامل قسمت در حال ماشین کاری لبه برش با قطعه در حال ماشین کاری در هر موقعیت دورانی ابزار می باشد. به منظور هندسه درگیری، مدل توپر (solid model) ابزار فرز سر کروی و قطعه ماشین کاری در محیط نرم افزار تجاری مدل سازی هندسی ACIS می شوند. لبه برش همانگونه که در قسمت ۲-۱ بیان شد از تقاطع یک صفحه مایل با قسمت کروی ابزار ایجاد می گردد. قطعه در حال ماشین کاری بر اساس عرض و عمق برش و با انجام عمل تفاضل منطقی (boolean subtraction) بین قطعه و حجم جاروب شده توسط ابزار، ساخته می شود (شکل ۵-الف). همانگونه که در شکل (۵-ب) نشان داده شده وجه تماس (contact face) بین ابزار سر کروی و قطعه کار دارای سه لبه AB، BC و AC می باشد. لبه AB و BC از نوع B-Spline دایروی و لبه AC می باشند. برای هر موقعیت دورانی ابزار تقاطع بین لبه برش و لبه های وجه تماس قابل محاسبه بوده (نقاط P_1 و P_2 در شکل ۵-ب) و بنابراین هندسه درگیری لبه برش و قطعه کار قابل استخراج است. ارتفاع نقطه P_1 از نوک ابزار درگیری بالایی (z_1) می باشند.

۲- پیش بینی نیروهای ماشین کاری

برای محاسبه نیروهای ماشین کاری، قسمت در حال ماشین کاری لبه برش ابزار به المان های کوچک تقسیم شده و فرایند ماشین کاری در هر المان به صورت یک فرایند مایل مدل شده است. شکل ۶ نیروهای المانی مماسی، dF_{ct} ، شعاعی، dF_{cr} ، و محوری، dF_{ca} ، برای یک المان از لبه برش که در ارتفاع z و موقعیت دورانی Θ ابزار قرار دارد را نشان می دهد مقادیر این نیروهای المانی از روابط ذیل قابل محاسبه می باشند [۴]:

$$\begin{aligned} dF_{ct}(\Theta, z) &= k_t t_n(\Theta, z) db \\ dF_{cr}(\Theta, z) &= k_r t_n(\Theta, z) db \\ dF_{ca}(\Theta, z) &= k_a t_n(\Theta, z) db \end{aligned} \quad (۱۷)$$

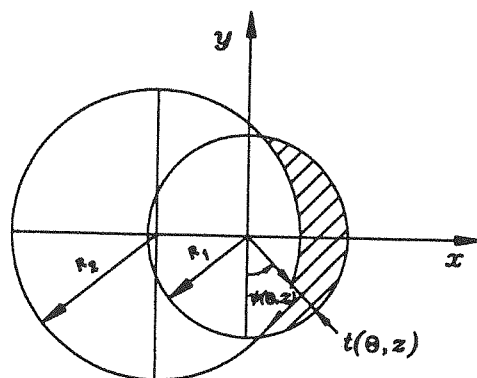
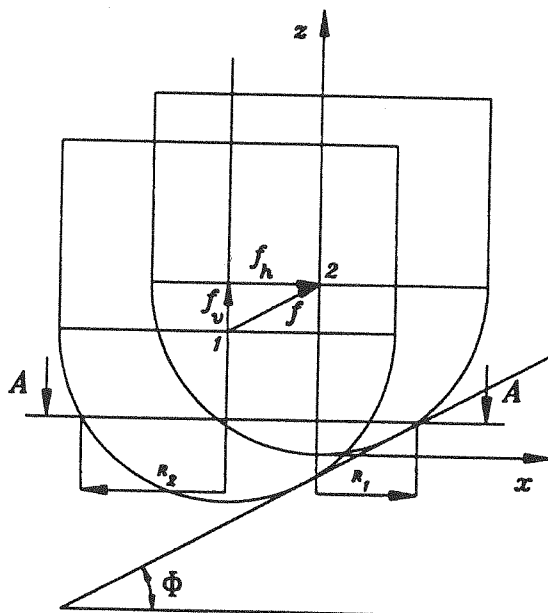
که در رابطه فوق $t(\Theta, z)$ ضخامت تراشه در موقعیت دورانی Θ ابزار و ارتفاع z ، f_h مؤلفه افقی تغذیه و R_1 و R_2 شعاع های ابزار در دو موقعیت متوالی می باشند. اختلاف بین R_1 و R_2 به واسطه اختلاف ارتفاع عمودی f_v بوده و می توان آن را به صورت ذیل نوشت:

$$R_2 - R_1 = - \frac{dR(z)}{dz} \quad (۱۴)$$

با قرار دادن معادله های (۷) و (۱۴) در معادله (۱۳) رابطه ذیل برای ضخامت تراشه استاتیکی حاصل می شود:

$$t(\Theta, z) = \frac{R - z}{\sqrt{R^2 - (R - z)^2}} f_v + f_h \sin \psi(\Theta, z) \quad (۱۵)$$

که با توجه به زاویه شیب Φ مسیر ابزار (شکل ۴):



Section A-A

شکل (۴) ضخامت تراشه در فرایند فرز کاری سه بعدی با ابزار سر کروی.

که

$$c = \sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta_c \sin \beta_n} \quad (19)$$

زاویه اصطکاک عمودی، β_n ، و زاویه برش عمودی، ϕ_n ، در ماشین کاری مایل بر حسب عبارت های ذیل می باشند:

$$\tan \beta_n = \tan \beta \cos \eta_c \quad (20)$$

$$\tan(\phi_n + \beta_n) = \frac{\cos \alpha_n \tan i}{\tan \eta_c - \sin \alpha_n \tan i} \quad (21)$$

و مطابق قانون جریان Stabler [7]:

$$\eta_c = i \quad (22)$$

و تنش برشی (shear stress)، τ ، زاویه اصطکاک (friction, β , angle) و زاویه برش (shear angle)، ϕ ، برای فولاد AISI 1045 با استفاده از روابط ذیل مدل شده اند [1]:

$$\tau = 1.586 (Vf)^{-0.25} + 67.703$$

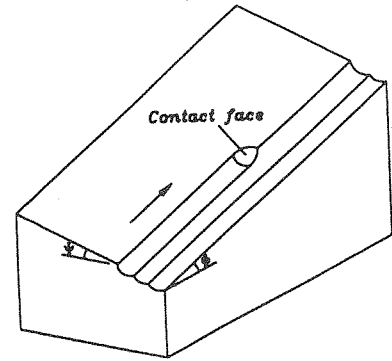
$$\phi = 106.7 (Vf)^{0.5} + 0.375 \alpha_e + 13.64$$

$$\beta = 48.4 (Vf)^{0.125} + 28.586 - \phi + \alpha_e \quad (23)$$

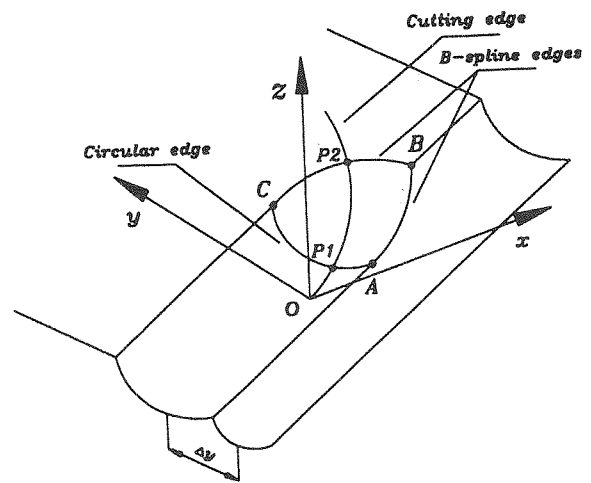
که در روابط فوق زاریه های β, ϕ, α_e بر حسب درجه، تنش برشی، τ ، بر حسب kgf/mm^2 و V ، سرعت برش، بر حسب m/min می باشند.

با توجه به شکل ۶ نیروهای المانی محاسبه شده بوسیله معادله (۱۷) به صورت ذیل به مختصات کارتیزین تبدیل می شوند:

$$\begin{cases} dF_{cx}(\Theta, z) \\ dF_{cy}(\Theta, z) \\ dF_{cz}(\Theta, z) \end{cases} = \begin{bmatrix} -\sin k \sin \psi(\Theta, z) & -\cos \psi(\Theta, z) & \cos k \sin \psi(\Theta, z) \\ \sin k \cos \psi(\Theta, z) & -\sin \psi(\Theta, z) & \cos k \cos \psi(\Theta, z) \\ \cos k & 0 & \sin k \end{bmatrix} \begin{cases} dF_{cr}(\Theta, z) \\ dF_{ct}(\Theta, z) \\ dF_{ca}(\Theta, z) \end{cases} \quad (24)$$



الف- قطعه در حال ماشینکاری و سطح تماس ابزار با آن



ب- قسمت در حال ماشینکاری لبه برش ابزار

شکل (۵)

که $k = \sin^{-1} \frac{R(z)}{R}$ و $db = \frac{dz}{\cos k}$ و $t = t(\Theta, z) \sin k$ ضرایب نیروهای ماشین کاری k_r, k_t, k_a بران روابط ذیل بدست می آیند [2]:

$$\begin{aligned} k_t &= \frac{\tau}{\sin \phi_n} \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) + \tan \eta_c \sin \beta_n \tan i}{c} \\ k_r &= \frac{\tau}{\sin \phi_n \cos i} \frac{\sin(\beta_n - \alpha_n)}{c} \\ k_a &= \frac{\tau}{\sin \phi_n} \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) \tan i - \tan \eta_c \sin \beta_n}{c} \end{aligned} \quad (18)$$

و نهایتاً نیروهای ماشین کاری در هر موقعیت دورانی ابزار از جمع مؤلفه های المانی بدست می آیند:

$$\{F_{cx}(\Theta), F_{cy}(\Theta), F_{cz}(\Theta)\} = \quad (25)$$

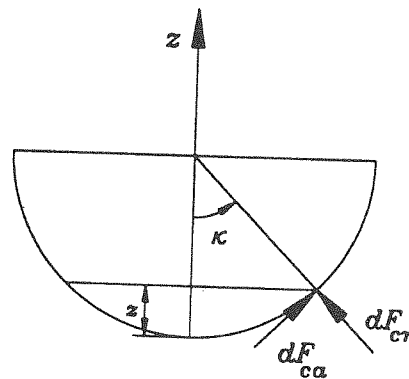
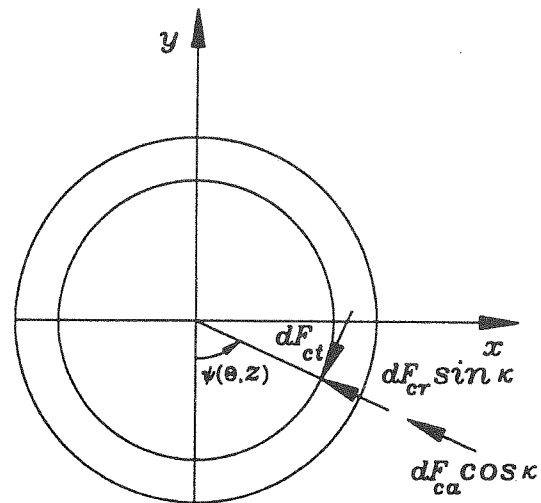
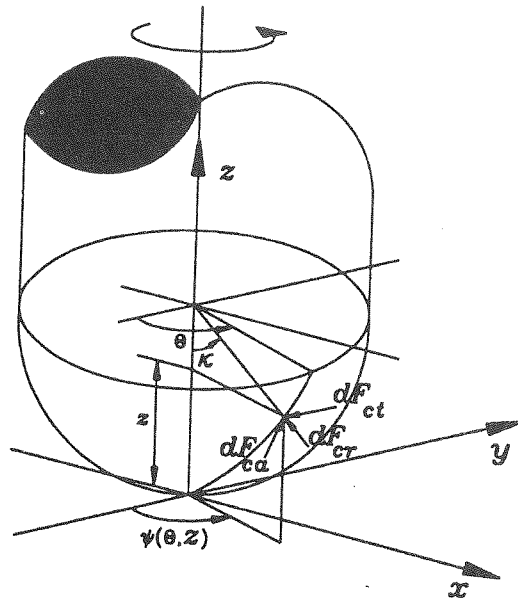
$$\int_{z_1(\Theta)}^{z_2(\Theta)} \{dF_{cx}(\Theta, z), dF_{cy}(\Theta, z), dF_{cz}(\Theta, z)\} dz$$

که حدود انتگرال گیری $Z_1(\Theta)$ و $Z_2(\Theta)$ ، میزان درگیری لبه برش با قطعه در حال ماشین کاری در موقعیت دورانی ابزار می باشند و از مدل سازی هندسی تشریح شده در قسمت (۲-۲) بدست می آیند.

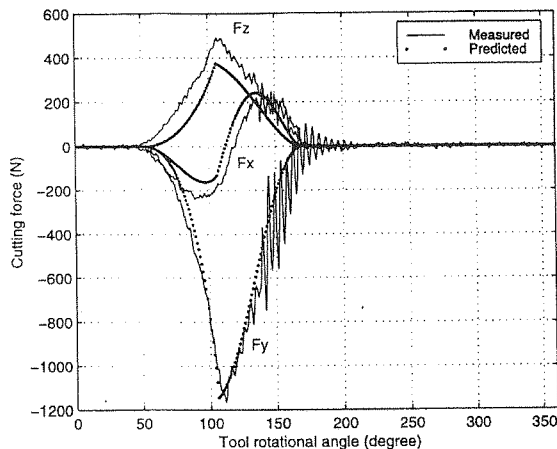
۳- مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایش

برای بررسی و مقایسه شبیه سازی کامپیوتری با نتایج تجربی آزمایش های متعددی در مرکز IMMRC دانشگاه McMaster کشور کانادا انجام گرفت. ترکیب آزمایش شامل یک دستگاه ماشین فرز CNC (۲½ محوره، دیناموتر Kistler از نوع 9255B برای اندازه گیری نیروهای ماشین کاری در امتدادهای z, y, x ، ابزار فرز سرکروی تک لبه با شعاع 8mm، زاویه پیشانی 20° و زاویه $i_s = 10^\circ$ می باشد. قطعات مورد آزمایش از جنس فولاد AISI 1045 بوده و کلیه آزمایش ها در مورد ماشین کاری مخالف با دور اسپیندل 600 rpm، عمق ماشین کاری 2mm، عرض ماشین کاری 4mm و تغذیه (f) 0.12 میلیمتر بر دندانه انجام شده اند. هندسه درگیری ابزار با قطعه کار برای دو هندسه مختلف سطح در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که شکل ۷ نشان می دهد در حالت $(\Phi 15^\circ, \Psi = 0^\circ)$ لبه برش از زاویه دورانی 54° تا زاویه 169° در حال ماشین کاری بوده ولی در حالت $(\Phi = -15^\circ, \Psi = 0^\circ)$ لبه برش در دوران کامل ابزار در حال ماشین کاری می باشد. مقایسه بین مؤلفه نیروهای ماشین کاری تجربی و نیروهای ماشین کاری شبیه سازی شده برای این دو هندسه سطح در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده اند. همانگونه که در دو شکل اخیر مشاهده می شود الگوی نیروهای ماشین کاری از الگوی هندسه درگیری ابزار با قطعه کار که در شکل ۷ نشان داده شده تبعیت می کند. به عبارت دیگر در حالیکه لبه برش با قطعه کار درگیر نیست کلیه مؤلفه های نیروهای ماشین کاری برابر صفر می باشند. مشاهده می شود که نتایج پیش بینی ها با مقادیر نیروهای اندازه گیری شده در حد قابل قبولی می باشد.

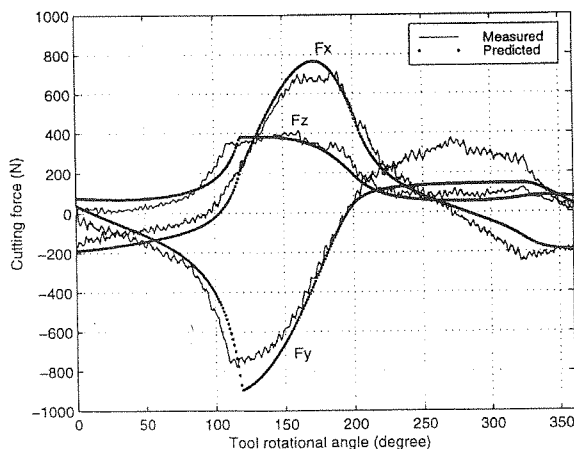
۴- نتیجه گیری



شکل (۶) نیروهای ماشین کاری المانی مماسی، عمودی و محوری وارد به يك المان از لبه برش.

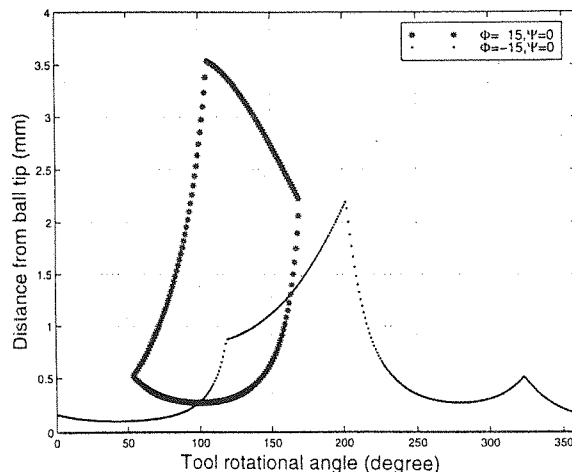


شکل (۸) نیروهای ماشین کاری شبیه سازی شده و تجربی برای $\psi = 0^\circ$ و $\Phi = 15^\circ$



شکل (۹) نیروهای ماشین کاری شبیه سازی شده و تجربی برای $\psi = 0^\circ$ و $\Phi = -15^\circ$

در این مقاله یک مدل نیرو برای پیش بینی نیروهای ماشین کاری در فرایند فرزکاری با ابزار فرز سر کروی ارایه شد. سطح پیچیده قالب به صورت المان های صفحه ای که دارای زاویه Φ نسبت به محور X و زاویه Ψ نسبت به محور Y می باشند تقریب زده شده است. بر اساس شرایط برش شامل عمق و عرض تراش، قطعه در حال ماشین کاری با انجام تفاضل منطقی بین قطعه ماشین کاری و حجم جاروب شده ماده توسط ابزار ساخته شده است. با یافتن سطح تماس بین ابزار سرکروی و قطعه در حال ماشین کاری قسمت های در حال ماشین کاری لبه برش در زوایای دورانی مختلف ابزار استخراج شده اند. با تحلیل فرایند ماشین کاری در هر المان لبه برش به صورت فرایند ماشین کاری مایل نیروهای المانی محاسبه و با جمع این نیروهای المانی در طول قسمت در حال ماشین کاری لبه برش، نیروهای ماشین کاری در هر موقعیت دورانی ابزار محاسبه شده اند.



شکل (۷) هندسه درگیری ابزار با قطعه کار بر حسب موقعیت دورانی ابزار در زاویه های سطح مختلف.

مراجع

- [1] Yang, M. and Park, H., "The Prediction of Cutting force in Ball-end Milling", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, No. 1, pp. 1059-1072, 1992.
- [2] Feng, H. and Menq, C. H., "The Prediction of Cutting force in The Ball-end Milling process - I. Model Formulation and Model Building Procedure", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 5, pp. 697-710, 1994.
- [3] Budak, G. Altintas, Y. and Armarego, E. J. A., "Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Data", ASME J. Manufact. Science and Eng., Vol. 118, pp. 216-224, 1996.
- [4] Lee, P. and Altintas, Y., "Prediction of Ball-end Milling Force from Orthogonal Cutting Data", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 5, pp. 1059-1072, 1996.
- [5] Imani, b. M. Sadeghi, M. H. and Elbestawi, M. A., "An Imporved Process Simulation For Ball-end Milling of Sculptured Surfaces", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 38, pp. 1089-1107, 1998.
- [6] ACIS Geometric Modeler Application Guide, Special Technology Inc., Colorado, USA 1975.
- [7] Shaw, M. C., Metal Cutting Principles, (1984), Clarendon Press, Oxford.
- [8] Martellotti, M., "An Analysis of the Milling Process", Trans. ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
- [9] Martellotti, M., "An Analysis of the Milling Process Part 2: Down Milling", Trans. ASME. Vol. 67, pp. 233-251, 1945.