

# شبیه سازی استاتیکی و دینامیکی فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی در ماشینکاری سطوح قالبها

## حشمت اله حقیقت

فارغ التحصیل دکترای بخش مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس

## محمد حسین صادقی

دانشیار بخش مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس

## امیر عبدالله

دانشیار بخش مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۷۹/۲/۴، تاریخ تصویب ۸۰/۸/۵)

## چکیده

در این مقاله روشی برای شبیه سازی هندسی، استاتیکی و دینامیکی فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی در ماشینکاری سطوح قالبها ارائه شده است. این روش قابلیت تخمین نیروهای ماشینکاری استاتیکی و دینامیکی و همچنین جابجایی نوک ابزار برای شرایط ماشینکاری مختلف را دارا می باشد. برای تعیین شکل منحنی لبه برش، ابزار و قطعه در حال ماشینکاری از یک نرم افزار مدل سازی هندسی استفاده شده است. قسمتهای در حال برش لبه برش در هر موقعیت زاویه ای ابزار از تقاطع منحنی لبه برش با لبه های وجه تماس بین ابزار و قطعه در حال ماشینکاری محاسبه می شوند. برای محاسبه نیروهای وارد بر ابزار، قسمت در حال ماشینکاری لبه برش به المانهای کوچک تقسیم شده و فرآیند ماشینکاری در هر المان به صورت مایل فرض شده است و نیروهای کل وارد بر ابزار در هر زاویه دوران ابزار از جمع نیروهای المانی محاسبه شده اند. در مدلسازی دینامیکی، ضخامت دینامیکی تراشه از جمع ضخامت تراشه استاتیکی، جابجایی نوک ابزار و اثرات جابجایی نوک ابزار در دوران قبلی ابزار محاسبه و نیروهای ماشینکاری دینامیکی محاسبه شده اند. برای محاسبه نیروهای شخم زنی، از مدل WU در فرآیند فرزکاری با ابزار سرکروی استفاده شده است. کل نیروهای وارد بر ابزار (شامل نیروهای ماشینکاری دینامیکی و نیروهای شخم زنی) به مدل ارتعاشی دو درجه آزادی سیستم ماشین ابزار اعمال و جابجایی نوک ابزار پیش بینی شده است. آزمایش های مختلف نیز برای بررسی صحت و سقم نتایج شبیه سازی انجام شده است.

**واژه های کلیدی:** فرزکاری، ابزار فرز سرکروی، ماشینکاری سطوح پیچیده قالبها، مدل سازی حجمی

## مقدمه

نیروی ماشینکاری در فرآیند تراشه برداری یکی از پارامترهای مهم بوده که بر روی تغییر شکل ابزار، پدید آمدن لبه های ابزار، سایش و ارتعاش ابزار اثر می گذارد. بنابراین تاکنون تحقیقات زیادی برای مدلسازی آن صورت گرفته است [۱، ۲، ۳، ۴، ۵]. مطالعات برای شبیه سازی دینامیکی فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی محدود به کارهای تحقیقاتی Abrari و Elbestawi [۶] و Lee و Altintas [۷] شده اند. Abrari و Elbestawi مدل نیروی استاتیک مرجع [۱] را با محاسبه ضخامت دینامیکی تراشه

فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی<sup>۱</sup> به طور وسیعی برای ماشینکاری سطوح پیچیده قالبها استفاده می شود. برخلاف ابزارهای فرز سرتخت<sup>۲</sup>، ابزارهای فرز سرکروی دارای شعاع، زاویه هلیکس<sup>۳</sup> و زاویه پیشانی<sup>۴</sup> متغییر در امتداد لبه برش<sup>۵</sup> می باشند. به واسطه کاهش شعاع، سرعت ماشینکاری<sup>۶</sup> 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.

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

$$r = z \tan i_0 i - \sqrt{R^2(z) - (z \tan i_0)^2} j + zk \quad (۴)$$

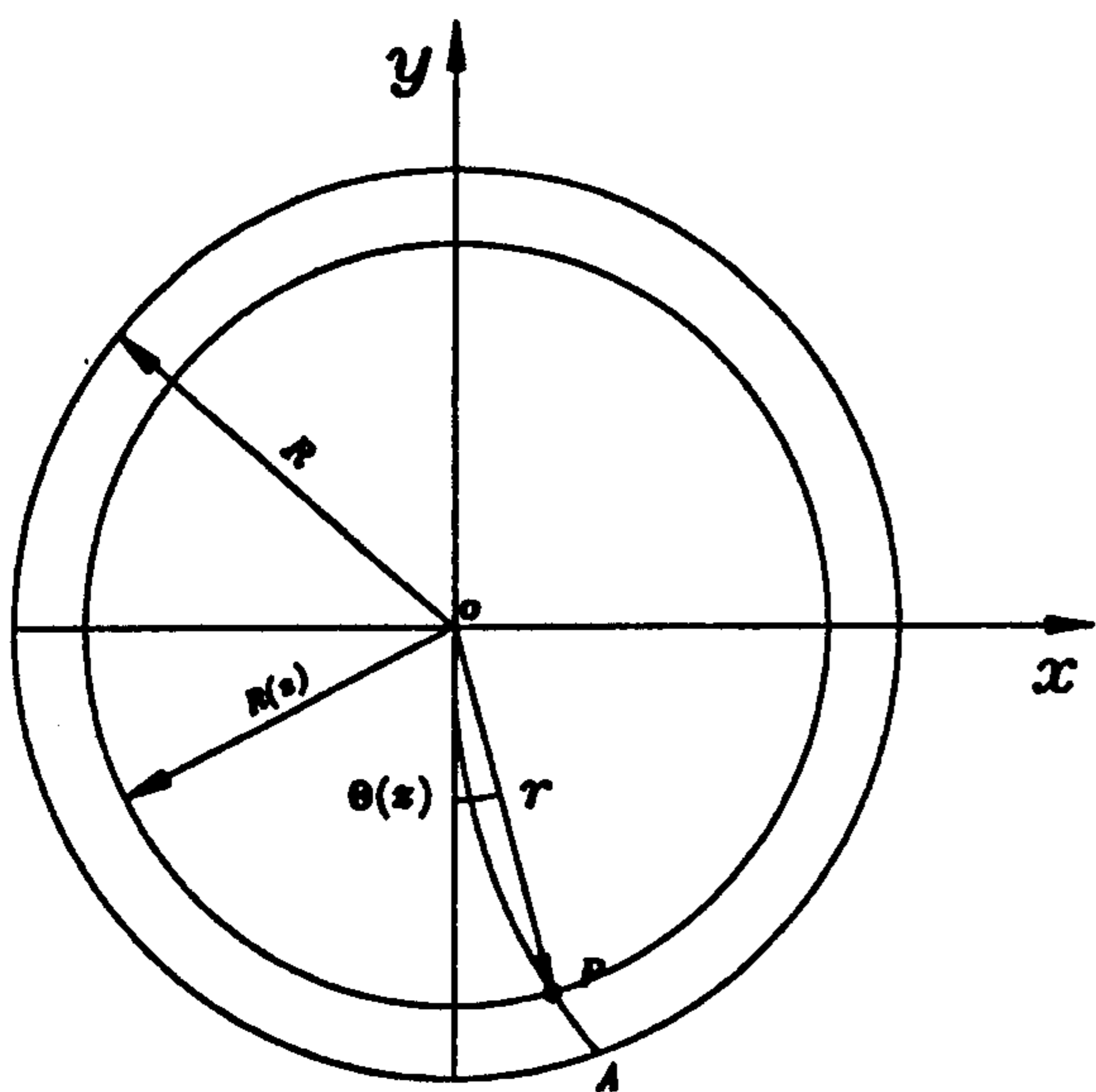
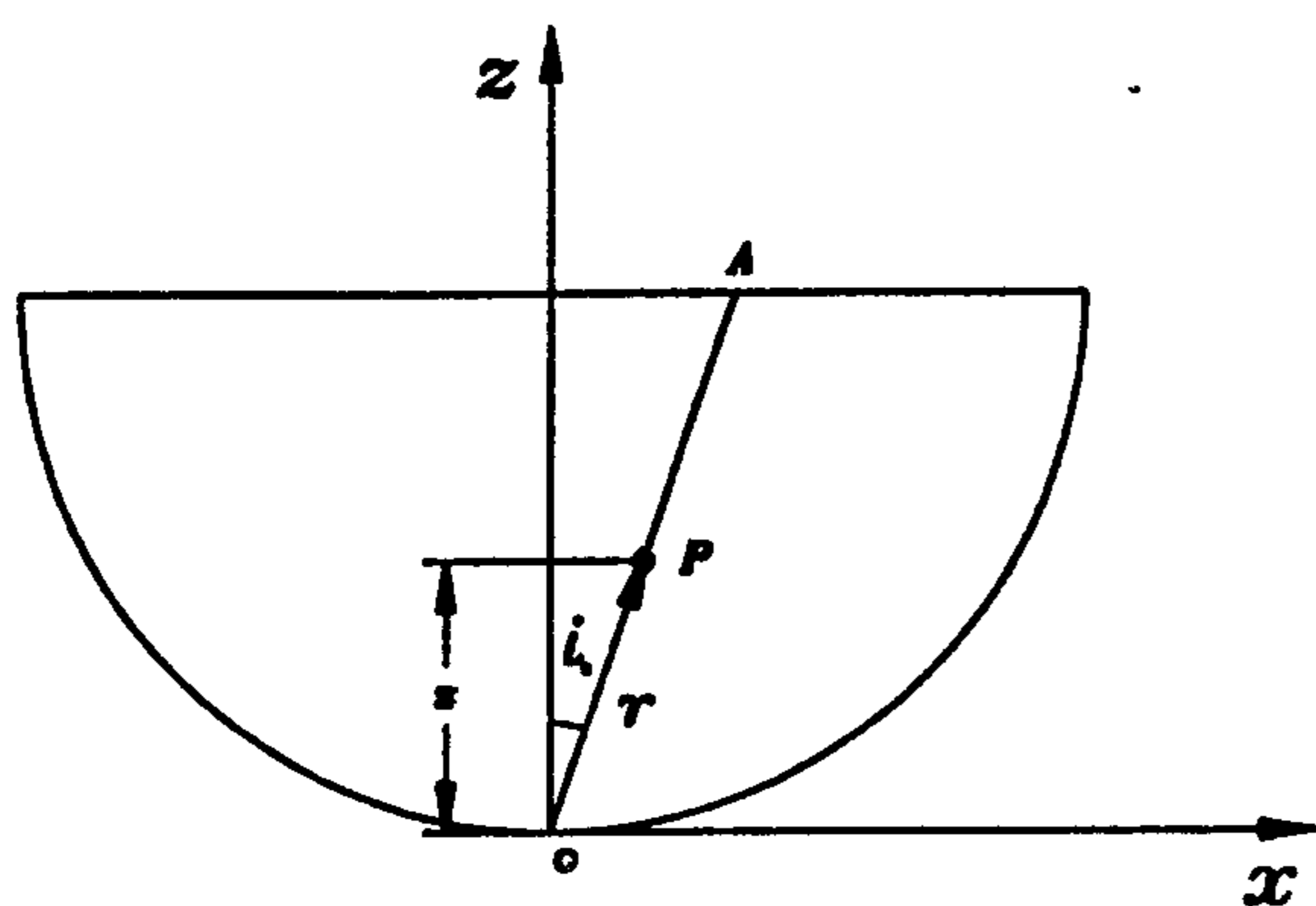
با گرفتن دیفرانسیل از رابطه فوق داریم:

$$dr = \left( \tan i_0 i - \frac{R(z) \frac{dR(z)}{dz} - z \tan^2 i_0}{\sqrt{R^2(z) - (z \tan i_0)^2}} j + k \right) dz \quad (۵)$$

و طول یک المان ( $ds$ ) از لبه برش که در ارتفاع  $z$  قرار دارد برابر اندازه بردار  $dr$  می باشد، بنابراین:

$$ds = \|dr\| = dz \sqrt{\tan^2 i_0 + \frac{[R(z) \frac{dR(z)}{dz} - z \tan^2 i_0]^2}{R^2(z) - (z \tan i_0)^2} + 1} \quad (۶)$$

$\frac{dR(z)}{dz}$  مشتق بردار  $R(z)$  نسبت به  $z$



شکل ۱: مدل هندسی ابزار و لبه برش.

به مدل دینامیکی گسترش دادند [۶]. Lee و Altintas نیز مدل استاتیکی مرجع [۴] را به مدل دینامیکی گسترش دادند [۷]. این مدل‌های استاتیکی و دینامیکی فقط قابل کاربرد برای شبیه سازی دینامیکی سطوح افقی می باشند. هدف از مقاله حاضر، توسعه یک مدل نیروی استاتیک و دینامیک برای فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی در ماشینکاری سطوح پیچیده قالبها می باشد. سطح یک قالب را می توان با مجموعه ای از سطوح که دارای زاویه  $\Phi$  نسبت به محور  $x$  و زاویه  $\Psi$  نسبت به محور  $y$  می باشند تقریب زد و برای نمایش قطعه در حال ماشینکاری، منحنی لبه برش و استخراج اطلاعات هندسی مورد لزوم در محاسبه نیروها از نرم افزار تجارتي ACIS استفاده شده است [۸].

## مدلسازی هندسی

### مدلسازی لبه برش

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

$$R(z) = \sqrt{R^2 - (R - z)^2} \quad (۱)$$

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:

$$\sin \theta(z) = \frac{z \tan i_0}{R(z)} \quad (۲)$$

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

$$r = R(z) \sin \theta(z) i - R(z) \cos \theta(z) j + zk \quad (۳)$$

می باشد و از رابطه (۱) :

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

از تعریف زاویه تمایل<sup>۸</sup> 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 می باشد. 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 موثر<sup>۹</sup>،  $\alpha_e$ ، ابزار از معادله ذیل بدست می آید [۹] :

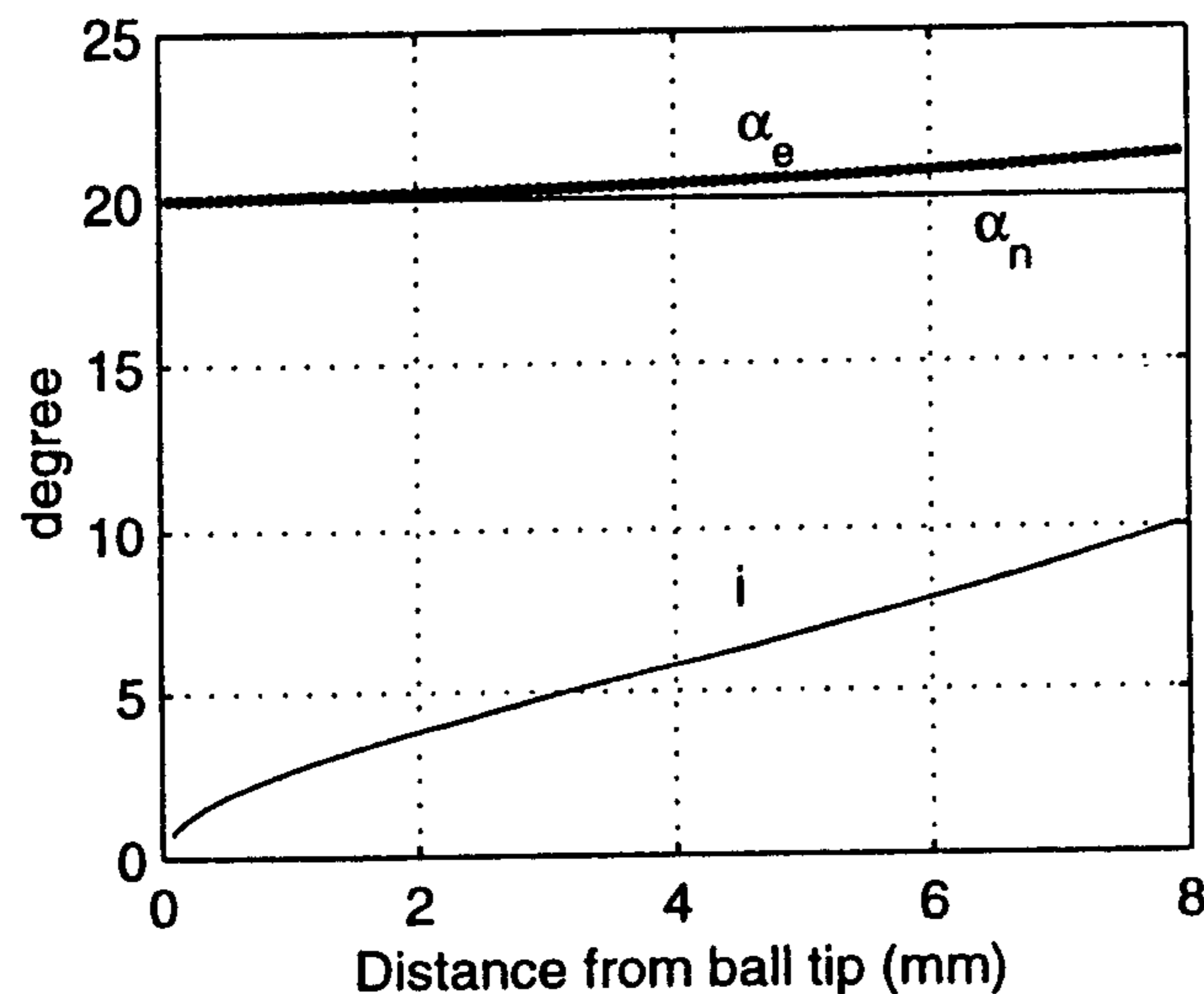
$$\sin \alpha_e = \sin \alpha_n \sin i \cos \eta_c + \sin \eta_c \sin i \quad (11)$$

که  $\alpha_n$  زاویه پیشانی عمودی<sup>۱۰</sup>،  $i$  زاویه تمایل لبه برش و  $\eta_c$  زاویه جریان تراشه<sup>۱۱</sup> می باشند. برای  $\alpha_n = 20^\circ$ ،  $i_0 = 10^\circ$  و  $R = 8 \text{ mm}$ ، تغییرات زاویه تمایل، زاویه موثر تراشه در امتداد محور  $z$  در شکل (۲) نشان داده شده اند.

زاویه بین تصویر بردار  $r$  در صفحه  $x-y$  با محور  $-y$  پس از دوران ابزار از حالت اولیه (شکل ۳) به اندازه زاویه  $\Theta$  حول محور  $z$ ، از رابطه ذیل محاسبه می شود :

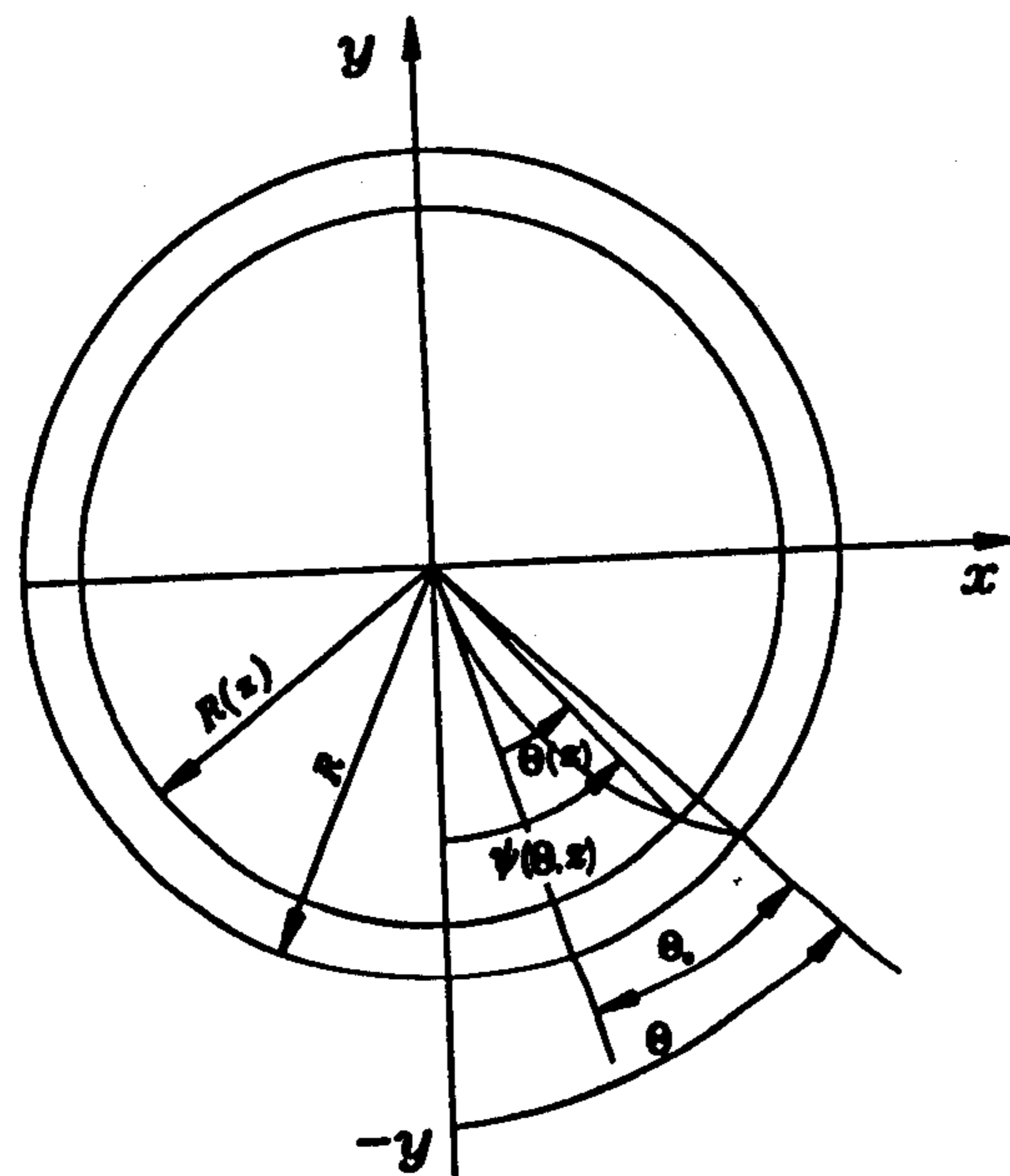
$$\psi(\Theta, z) = \Theta + \frac{2\Pi}{Z} - [\theta_0 - \theta(z)] \quad (12)$$

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



شکل ۲: تغییرات زاویه تمایل  $i$ ، و زاویه موثر تراشه،  $\alpha_e$ ، برای

$\alpha_n = 20^\circ$ ،  $i_0 = 10^\circ$  و  $R = 8 \text{ mm}$  در امتداد  $z$



شکل ۳: زاویه یک المان از لبه برش در صفحه  $x-y$  با محور  $-y$ .

**مدلسازی ضخامت تراشه استاتیکی و دینامیکی**  
مدلسازی ضخامت تراشه در فرآیند فرزکاری با امتداد تغذیه افقی اولین بار توسط Martellotti صورت گرفت [۱۰، ۱۱]. برای حالت فرزکاری سه بعدی با ابزار فرز سرکروی (شکل ۴) Lim و همکاران رابطه ذیل را برای ضخامت تراشه به فرض صلب بودن ابزار پیشنهاد

$$t_{sta}(\theta, z) = \frac{R-z}{\sqrt{R^2 - (R-z)^2}} f_v + f_h \sin \psi(\Theta, z) \quad (15)$$

که با توجه به زاویه شیب  $\Phi$  مسیر ابزار (شکل ۴):  
 $f_v = f \sin \Phi$  ,  $f_h = f \cos \Phi$  (۱۶)

در حالت دینامیکی به واسطه تغییر شکل ابزار در لحظه فعلی ( $u$ ) و همچنین موج<sup>۱۲</sup> سطح که از دوران قبلی ابزار بر روی سطح باقی مانده است ( $u_{-1}$ ) ضخامت دینامیکی تراشه به صورت زیر قابل محاسبه است [۱۳]:  
 $t_{dyn}(\Theta, z) = t_{sta}(\Theta, z) + u - u_{-1}$  (۱۷)

که در رابطه فوق:

$$u = x \sin \psi(\Theta, z) - y \cos \psi(\Theta, z) \quad (18)$$

$$u_{-1} = x_{-1} \sin \psi(\Theta, z) - y_{-1} \cos \psi(\Theta, z) \quad (19)$$

زاویه  $\Phi$  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  $f \sin \psi(\Theta, z)$  تبدیل شده که توسط Martellotti پیشنهاد شده بود [۱۰، ۱۱].

### هندسه درگیری ابزار و قطعه کار

هندسه درگیری ابزار و قطعه کار (مورد نیاز برای محاسبه نیروهای ماشینکاری) شامل قسمت در حال ماشینکاری لبه برش با قطعه در حال ماشینکاری در هر موقعیت دورانی ابزار می باشد. به منظور هندسه درگیری، مدل توپر<sup>۱۴</sup> ابزار فرز سرکروی و قطعه ماشینکاری در محیط نرم افزار تجاری مدلسازی هندسی ACIS می شوند. لبه برش همانگونه که در قسمت ۲-۱ بیان شد از تقاطع<sup>۱۵</sup> یک صفحه مایل با قسمت کروی ابزار ایجاد می گردد. قطعه در حال ماشینکاری بر اساس عرض و عمق برش و با انجام عمل تقاضل منطقی<sup>۱۶</sup> 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<sup>۱۷</sup> بین

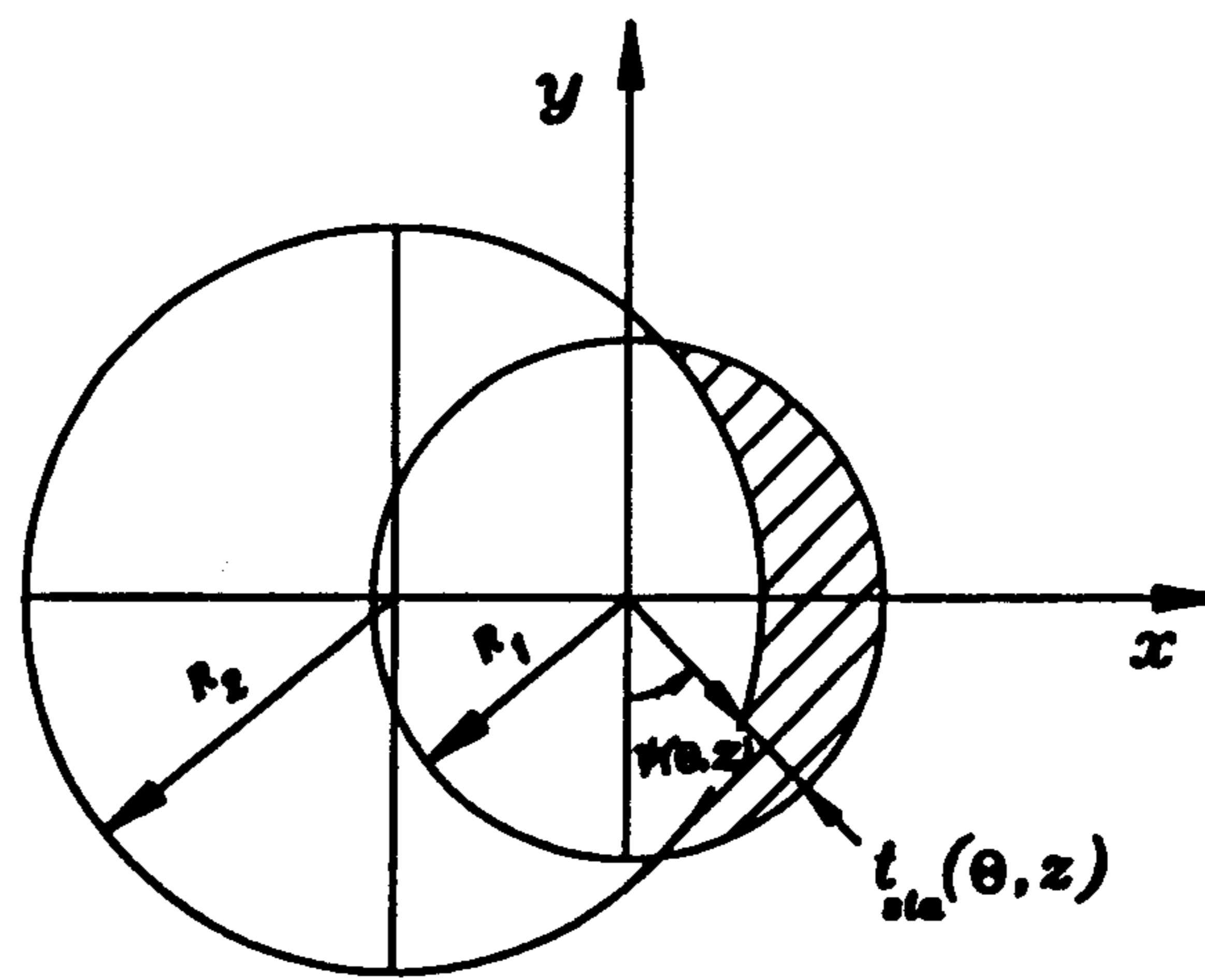
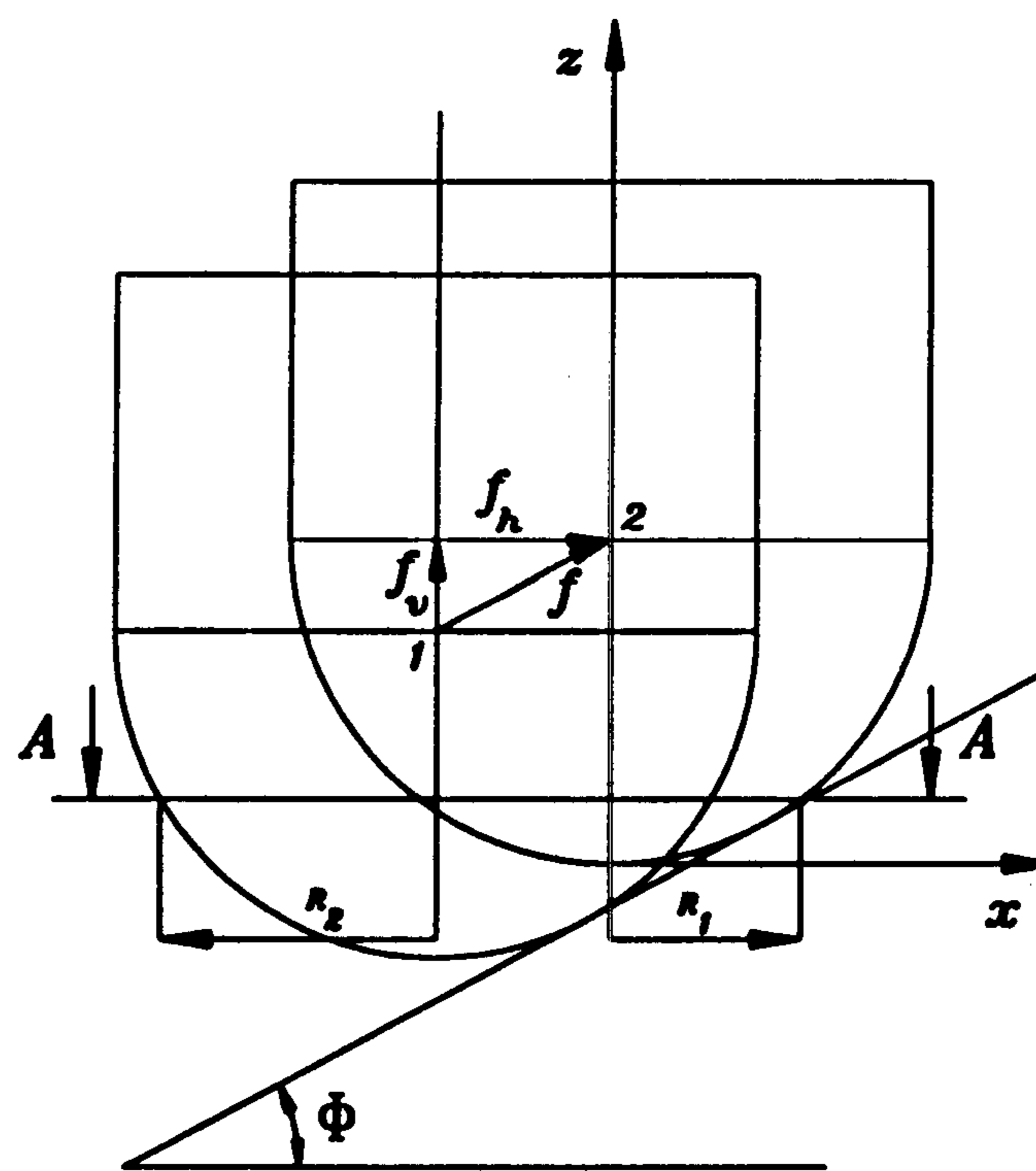
کردند [۱۲]:

$$t_{sta}(\Theta, z) = R_2 - R_1 + f_h \sin \psi(\Theta, z) \quad (13)$$

که در رابطه فوق  $t_{sta}(\Theta, z)$  ضخامت استاتیکی تراشه در موقعیت دورانی  $\Theta$  ابزار و ارتفاع  $z$ ، مولفه افقی تغذیه و  $R_1$  و  $R_2$  شعاعهای ابزار در دو موقعیت متوالی می باشند. اختلاف بین  $R_2$  و  $R_1$  به واسطه اختلاف ارتفاع عمودی  $f_v$  بوده و می توان آن را به صورت ذیل نوشت:

$$R_2 - R_1 = -\frac{dR(z)}{dz} \quad (14)$$

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



Section A-A

شکل ۴: ضخامت تراشه در فرآیند فرزکاری سه بعدی با ابزار سرکروی.

پیش بینی نیروهای ماشینکاری استاتیکی و دینامیکی  
 برای محاسبه نیروهای ماشینکاری، قسمت در حال  
 ماشینکاری لبه برش ابزار به المانهای کوچک تقسیم شده و  
 فرآیند ماشینکاری در هر المان به صورت یک فرآیند مایل  
 مدل شده است. شکل (۶) نیروهای المانی مماسی،  $dF_r$ ،  
 شعاعی،  $dF_r$ ، و محوری  $dF_a$ ، برای یک المان از لبه  
 برش که در ارتفاع  $Z$  و موقعیت دورانی  $\Theta$  ابزار قرار دارد را  
 نشان می دهد مقادیر این نیروهای المانی از روابط ذیل قابل  
 محاسبه می باشند [۴]:

$$\begin{aligned} dF_{ct}(\Theta, z) &= k_t t_n(\Theta, z) db \\ dF_{cr}(\Theta, z) &= k_r t_n(\Theta, z) db \\ dF_{ca}(\Theta, z) &= k_a t_n(\Theta, z) db \end{aligned} \quad (20)$$

که  $\kappa = \sin^{-1} \frac{R(z)}{R}$  و  $db = \frac{dz}{\cos \kappa}$

$t_n(\Theta, z) = t(\Theta, z) \sin \kappa$  ضرایب نیروهای  
 ماشینکاری  $k_a, k_r, k_t$  بر از روابط ذیل بدست می آیند [۴]:

$$k_t = \frac{\tau \cos(\beta_n - \alpha_n) + \tan \eta_c \sin \beta_n \tan i}{\sin \phi_n c}$$

$$k_r = \frac{\tau \sin(\beta_n - \alpha_n)}{\sin \phi_n \cos i c}$$

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

که

$$c = \sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta_c \sin^2 \beta_n} \quad (22)$$

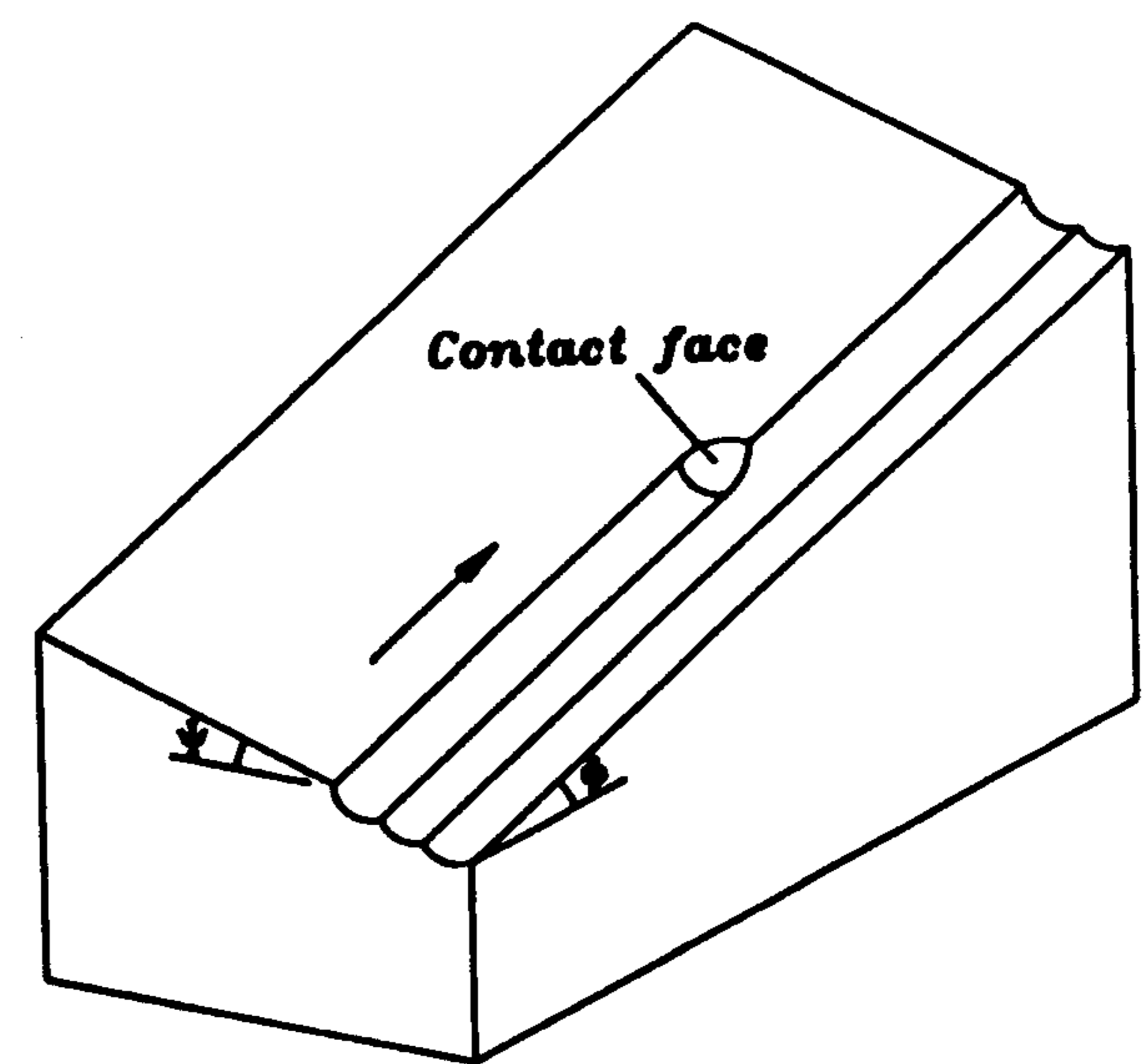
و زاویه اصطکاک عمودی،  $\beta_n$ ، و زاویه برش عمودی،  
 $\phi_n$ ، در ماشینکاری مایل بر حسب عبارتهای ذیل  
 می باشند [۳]:

$$\tan \beta_n = \tan \beta \cos \eta_c \quad (23)$$

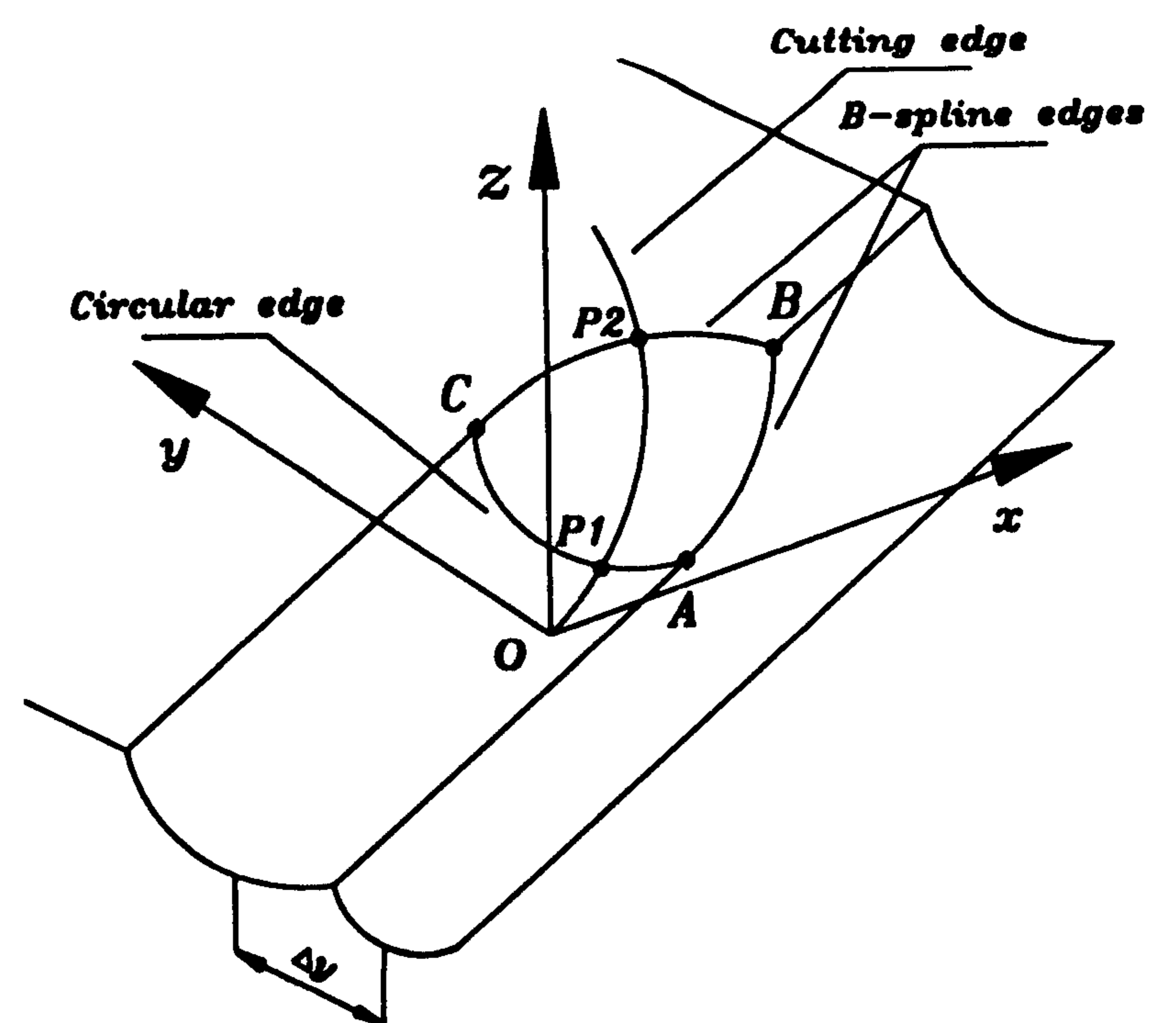
$$\tan(\phi_n + \beta_n) = \frac{\cos \alpha_n \tan i}{\tan \eta_c - \sin \alpha_n \tan i} \quad (24)$$

و مطابق قانون جریان Stabler [۹]:

ابزار سرکروی و قطعه کار دارای سه لبه AB، BC و AC  
 می باشد. لبه AB و BC از نوع B-Spline و لبه AC  
 دایروی 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 پایینی و ارتفاع نقطه  $P_2$  از نوک ابزار  
 درگیری بالایی ( $Z_2$ ) می باشند.

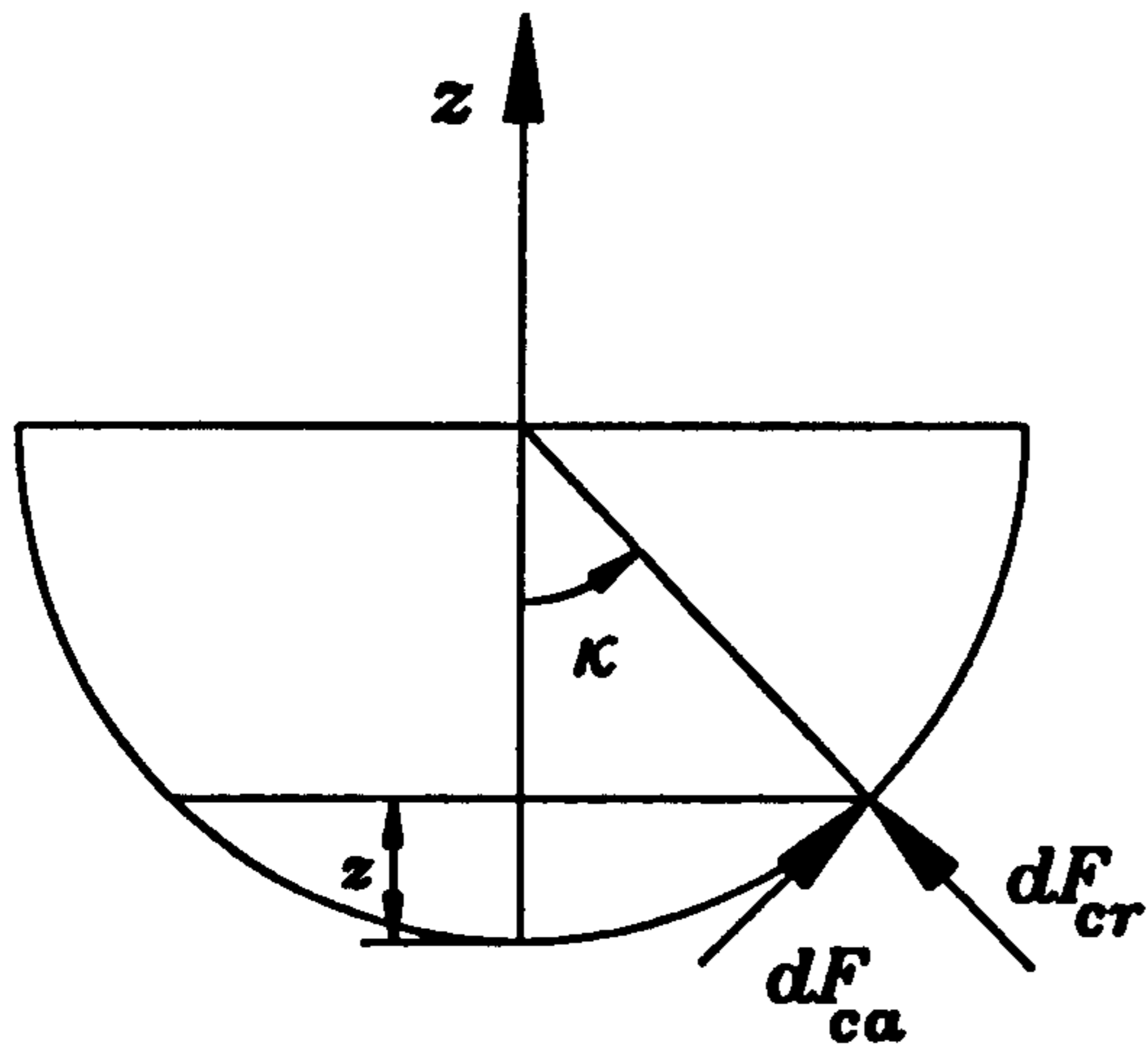


(الف)



(ب)

شکل ۵: (الف) - قطعه در حال ماشینکاری و سطح تماس ابزار با  
 آن (ب) - قسمت در حال ماشینکاری لبه برش ابزار.



شکل ۶: نیروهای ماشینکاری المانی مماسی، عمودی و محوری وارد به یک المان از لبه برش.

با توجه به شکل (۶) نیروهای المانی محاسبه شده بوسیله معادله (۲۰) به صورت ذیل به مختصات کارتیزین تبدیل می شوند:

$$\begin{Bmatrix} dF_{cx}(\Theta, z) \\ dF_{cy}(\Theta, z) \\ dF_{cz}(\Theta, z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \kappa \sin \psi(\Theta, z) & -\cos \psi(\Theta, z) & \cos \kappa \sin \psi(\Theta, z) \\ \sin \kappa \cos \psi(\Theta, z) & -\sin \psi(\Theta, z) & -\cos \kappa \cos \psi(\Theta, z) \\ \cos \kappa & 0 & \sin \kappa \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dF_{cr}(\Theta, z) \\ dF_{ct}(\Theta, z) \\ dF_{ca}(\Theta, z) \end{Bmatrix} \quad (27)$$

و نهایتاً نیروهای ماشینکاری در هر موقعیت دورانی ابزار از جمع مولفه های نیروهای المانی بدست می آیند:

$$\{F_{cx}(\Theta), F_{cy}(\Theta), F_{cz}(\Theta)\} = \int_{z_1(\Theta)}^{z_2(\Theta)} \{dF_{cx}(\Theta, z), dF_{cy}(\Theta, z), dF_{cz}(\Theta, z)\} dz \quad (28)$$

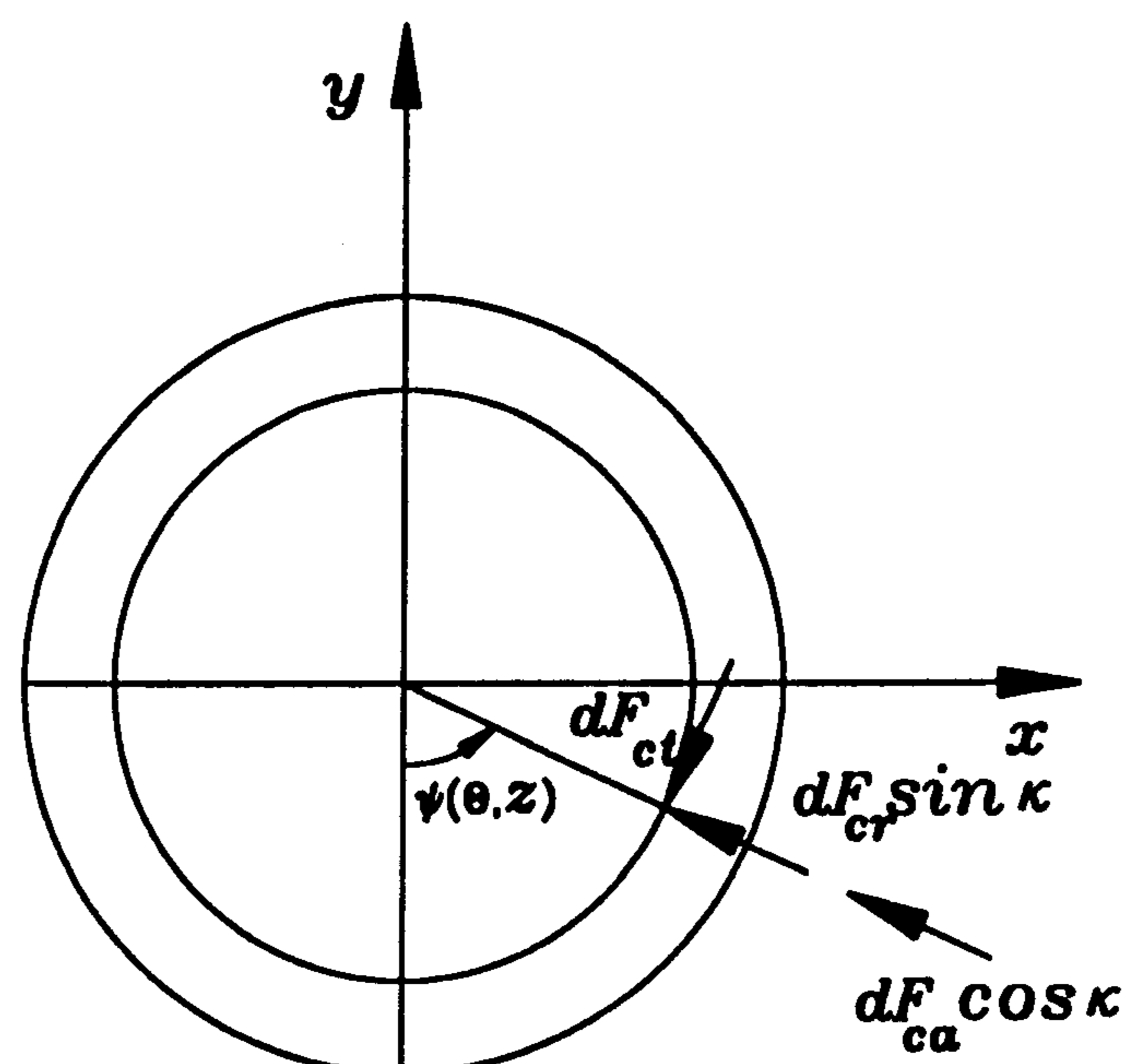
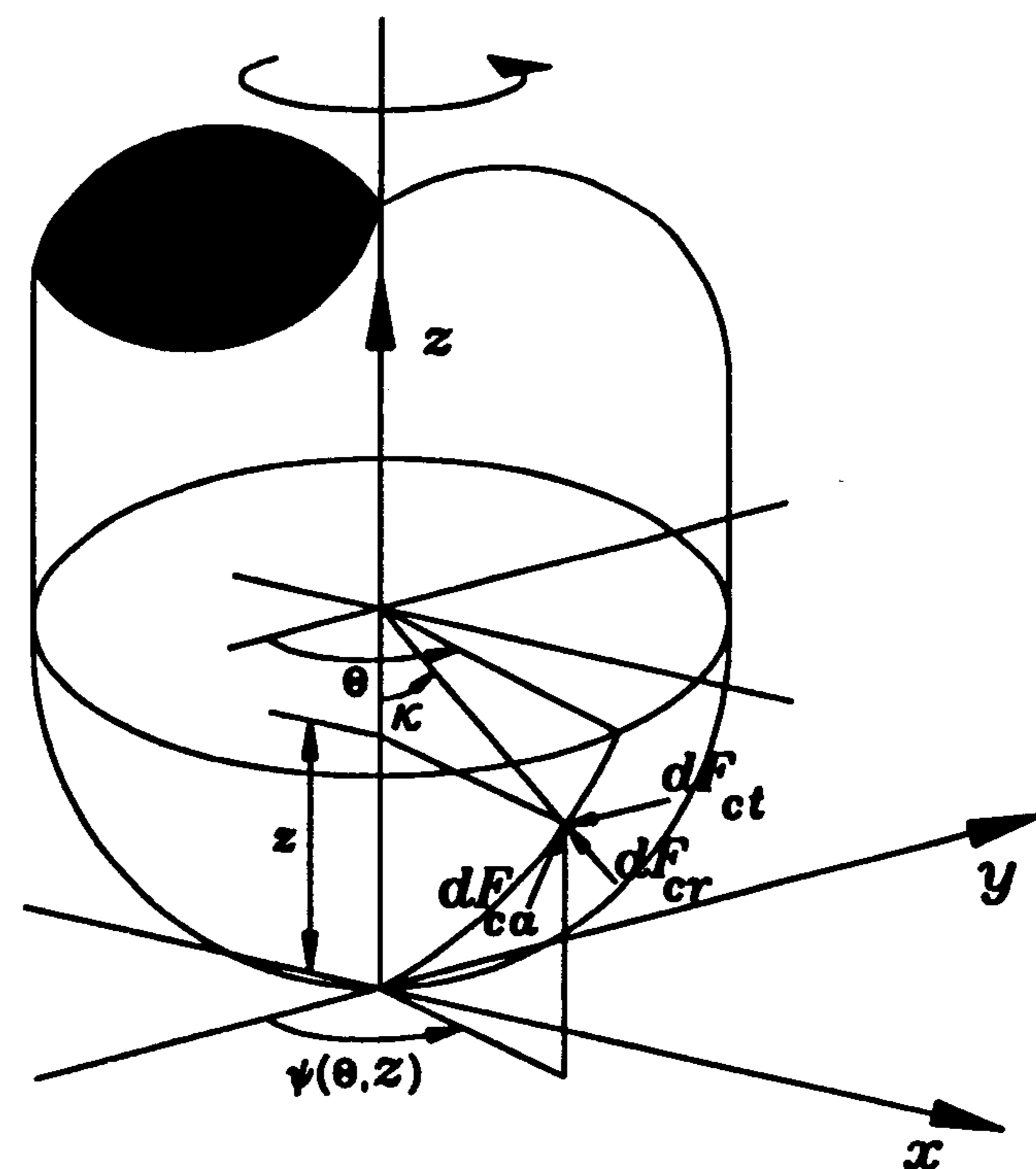
که حدود انتگرال گیری  $z_1(\Theta)$  و  $z_2(\Theta)$  میزان درگیری لبه برش با قطعه در حال ماشینکاری در موقعیت

$$\eta_c = i \quad (25)$$

و تنش برشی<sup>۱۸</sup>،  $\tau$ ، زاویه اصطکاک<sup>۱۹</sup>،  $\beta$ ، و زاویه برش<sup>۲۰</sup>،  $\phi$ ، برای فولاد AISI 1045 با استفاده از روابط ذیل مدل شده اند [۱]:

$$\begin{aligned} \tau &= 1.586(Vf)^{-0.25} + 67.703 \\ \phi &= 106.7(Vf)^{0.5} + 0.375\alpha_e + 13.64 \\ \beta &= 48.4(Vf)^{0.125} + 28.586 - \phi + \alpha_e \end{aligned} \quad (26)$$

که در روابط فوق زاویه های  $\beta, \phi, \alpha_e$  بر حسب درجه، سرعت برش،  $V$ ، بر حسب  $m/min$  و تنش برشی،  $\tau$ ، بر حسب  $kgf/mm^2$  می باشند.



### مدل ارتعاشی

مدل ارتعاشی استفاده شده در شبیه سازی دینامیکی فرآیند فرزکاری در چندین کار تحقیقاتی تشریح شده است [۱۳]. مدل ارتعاشی فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی در ماشینکاری یک المان از سطح پیچیده در شکل (۷) نشان داده شده است. این مدل یک سیستم ارتعاشی دو درجه آزادی می باشد و معادلات تعادل به صورت ذیل قابل بیان هستند:

$$m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = F_{cx} + F_{px}$$

$$m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = F_{cy} + F_{py}$$

که  $m_x$ ،  $c_x$  و  $k_x$  پارامترهای سازه ای در امتداد  $x$ ،  $m_y$ ،  $c_y$  و  $k_y$  پارامترهای سازه ای در امتداد  $y$ ،  $F_{cx}$  و  $F_{cy}$  به ترتیب نیروهای ماشینکاری در امتداد  $x$  و  $y$ ،  $F_{px}$  و  $F_{py}$  به ترتیب نیروهای شخم زنی در امتداد  $x$  و  $y$  می باشند. معادلات (۳۲) و (۳۳) با استفاده از روش عددی رانگ - کوتا حل می شوند. پارامترهای مورد استفاده در تعریف سیستم ارتعاشی از آزمایشهای مودال بدست آمده و عبارتند از [۱۵]:

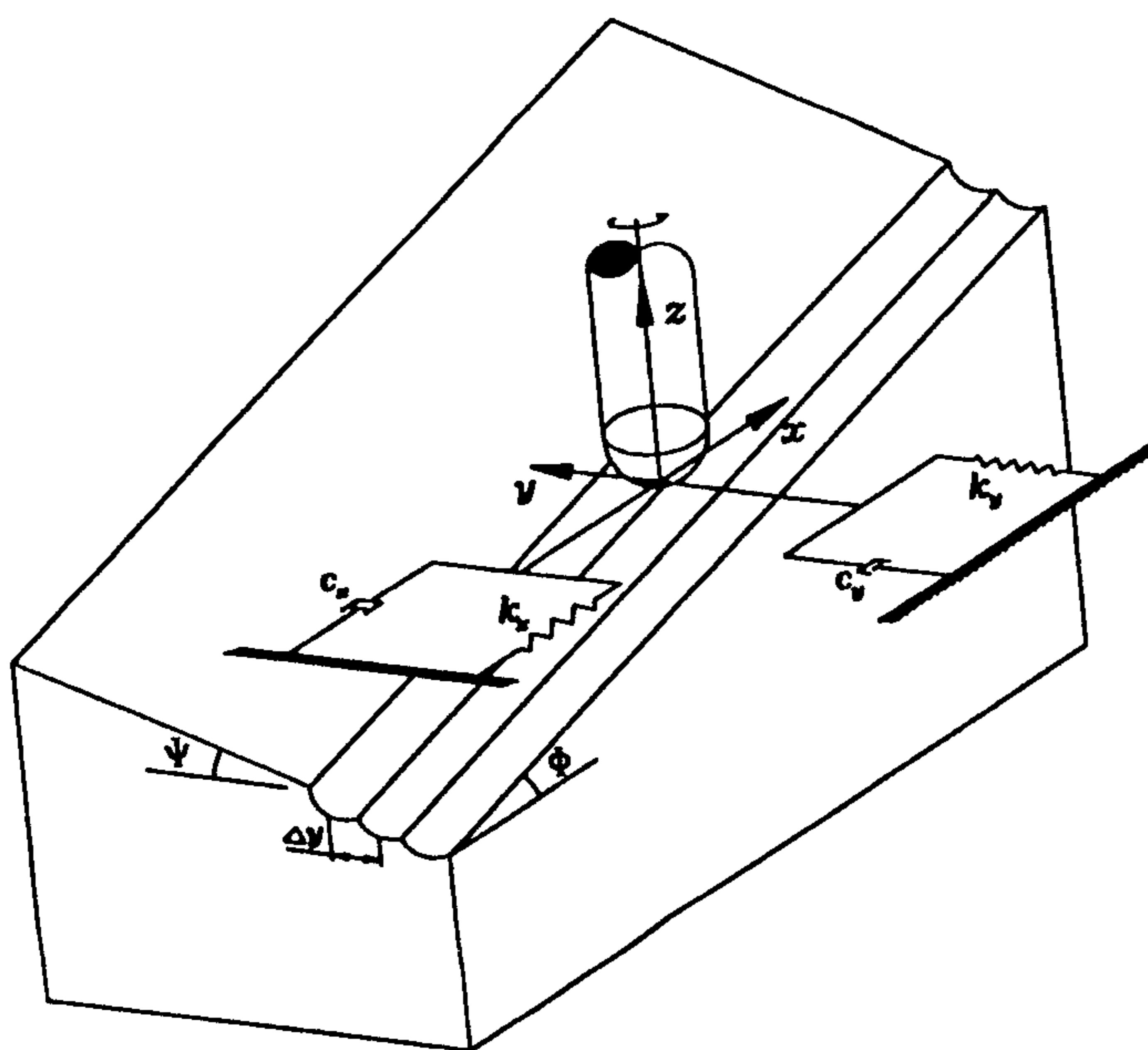
$$m_x = m_y = 0.11 \text{ kg}$$

$$\xi_x = \xi_y = 0.019$$

(۳۴)

(که  $\xi$  ضریب دمپینگ بوده و  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ )

$$k_x = 8.1 \times 10^6 \text{ N/m}, k_y = 7.7 \times 10^6 \text{ N/m}$$



شکل ۷: مدل ارتعاشی فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی.

دورانی  $\Theta$  ابزار می باشند و از مدلسازی هندسی تشریح شده در قسمت (۲-۳) بدست می آیند.

### نیروهای شخم زنی<sup>۲۱</sup>

نیروهای شخم زنی (به دلیل نفوذ ابزار در قطعه کار) که روی لبه برش ابزار عمل می کنند توسط  $WU$  به شکل زیر مدل شده اند [۱۴]:

$$df_{pr} = f_{sp} dv$$

$$df_{pt} = \mu_c df_{pr}$$

(۲۹)

که  $df_{pr}$  و  $df_{pt}$  به ترتیب مولفه های نیروهای شخم زنی در امتدادهای مماسی و شعاعی،  $\mu_c$  ضریب اصطکاک متوسط بین سطح آزاد ابزار و قطعه کار،  $dv$  حجم ماده قطعه جابجا شده بوسیله نفوذ ابزار و  $f_{sp}$  نیروی شخم زنی مخصوص می باشند. برای فولاد  $f_{sp} = 4.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^3$  و  $\mu_c = 0.3$  [۱۳]. برای محاسبه  $dv$  (حجم ماده جابجا شده توسط یک المان از لبه برش ابزار فرز سرکروی)، قسمت درگیر شده لبه برش به المانهای کوچک تقسیم فرآیند شخم زنی در هر المان شبیه فرآیند شخم زنی در ماشینکاری متعامد تحلیل شده و روابط موجود در مرجع [۱۴] که برای محاسبه  $dv$  است به فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی بسط داده شده اند: مولفه های نیروهای شخم زنی در مختصات کارتزین به شکل ذیل قابل محاسبه هستند:

$$\begin{Bmatrix} df_{px}(\Theta, z) \\ df_{py}(\Theta, z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \psi(\Theta, z) & -\cos \psi(\Theta, z) \\ \cos \psi(\Theta, z) & -\sin \psi(\Theta, z) \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} df_{pr} \\ df_{pt} \end{Bmatrix}$$

(۳۰)

و کل نیروهای شخم زنی در موقعیت دورانی  $\Theta$  ابزار در مختصات کارتزین از رابطه ذیل محاسبه می شوند:

$$\{F_{px}(\Theta), F_{py}(\Theta)\} = \int_{z_1(\Theta)}^{z_2(\Theta)}$$

$$\{dF_{px}(\Theta, z), dF_{py}(\Theta, z)\} dz$$

(۳۱)

## مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایش

برای بررسی و مقایسه نتایج شبیه سازی کامپیوتری با نتایج تجربی آزمایشهای متعددی در مرکز IMMRC دانشگاه McMaster کشور کانادا انجام گرفت. ترکیب آزمایش شامل یک دستگاه ماشین فرز CNC دو و نیم محوره، دینامومتر Kistler از نوع ۹۲۵۵B برای اندازه گیری نیروهای ماشینکاری در امتدادهای  $x, y, z$ ، ابزار فرز سرکروی تک لبه با شعاع ۸ mm، زاویه پیشانی  $20^\circ$ ، زاویه آزاد  $9^\circ$  و زاویه  $i_0 = 10^\circ$  می باشند. قطعات مورد آزمایش از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ بوده و کلیه آزمایشها در مود ماشینکاری مخالف با دور اسپیندل ۶۰۰ rpm، عمق ماشینکاری ۲ mm و عرض ماشینکاری ۴ mm انجام شده اند. هندسه درگیری ابزار با قطعه کار برای دو هندسه مختلف سطح در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که شکل (۸) نشان می دهد در حالت  $(\Psi = 0^\circ \text{ و } \Phi = 15^\circ)$  لبه برش از زاویه دورانی  $54^\circ$  تا زاویه  $169^\circ$  در حال ماشینکاری بوده ولی در حالت  $(\Psi = 0^\circ \text{ و } \Phi = -15^\circ)$  لبه برش در دوران کامل ابزار در حال ماشینکاری می باشد. مقایسه بین مولفه نیروهای ماشینکاری تجربی و نیروهای استاتیک ماشینکاری شبیه سازی شده برای این دو هندسه سطح در شکلهای (۹) و (۱۰) نشان داده شده اند. همانگونه که در دو شکل اخیر مشاهده می شود الگوی نیروهای ماشینکاری از الگوی هندسه درگیری ابزار با قطعه کار که در شکل ۸ نشان داده شده تبعیت می کند. به عبارت دیگر در حالیکه لبه برش با قطعه کار در گیر نیست کلیه مولفه های نیروهای ماشینکاری برابر صفر می باشند. شکل (۱۱) مولفه های نیروهای دینامیکی شبیه سازی شده و مقادیر آنها که از طریق تجربی اندازه گیری شده و همچنین تغییر شکل نوک

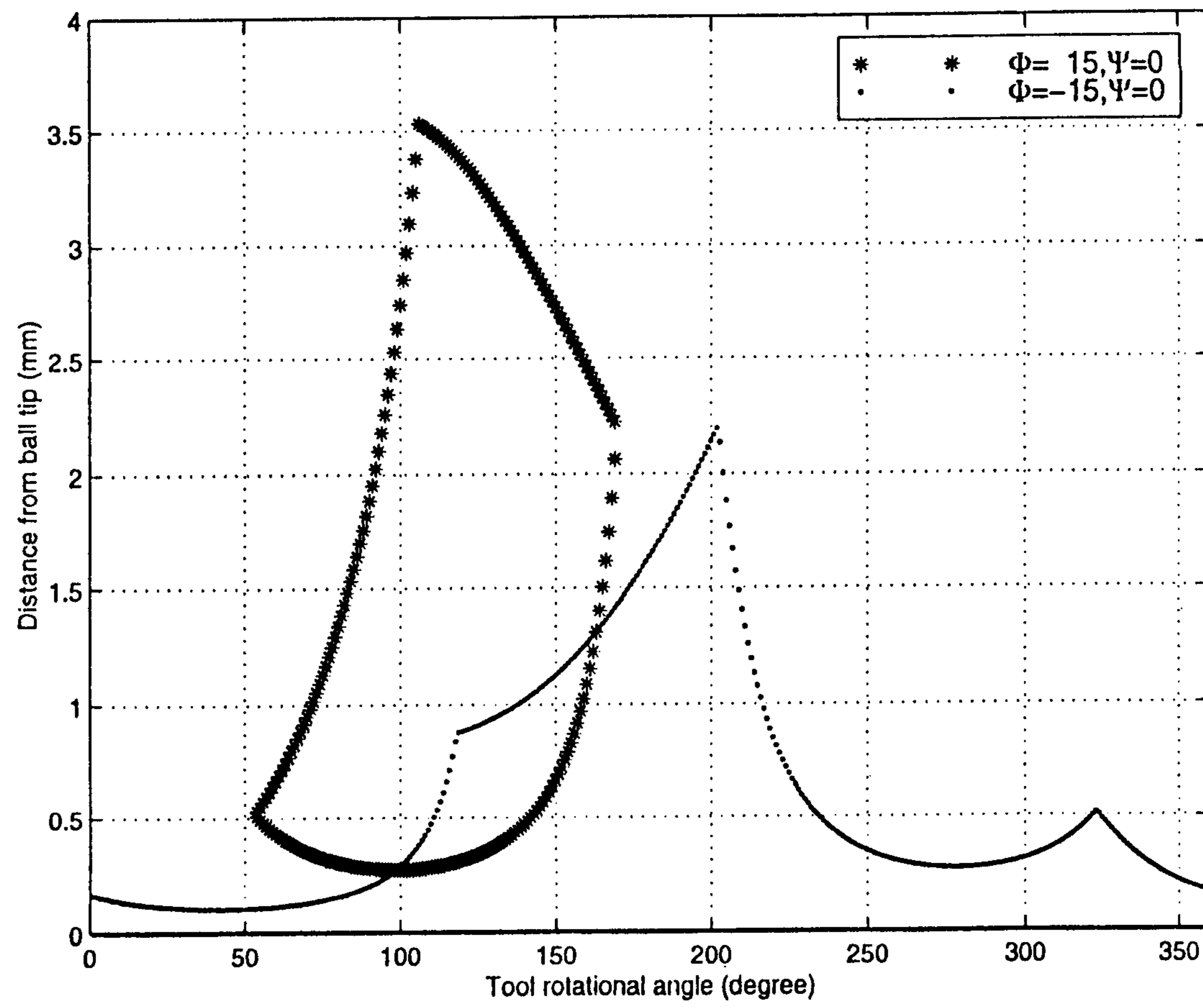
ابزار در امتدادهای  $x$  و  $y$  را نشان می دهد. دیده می شود که نتایج پیش بینی ها با مقادیر نیروها در حد قابل قبولی می باشد.

## نتیجه گیری

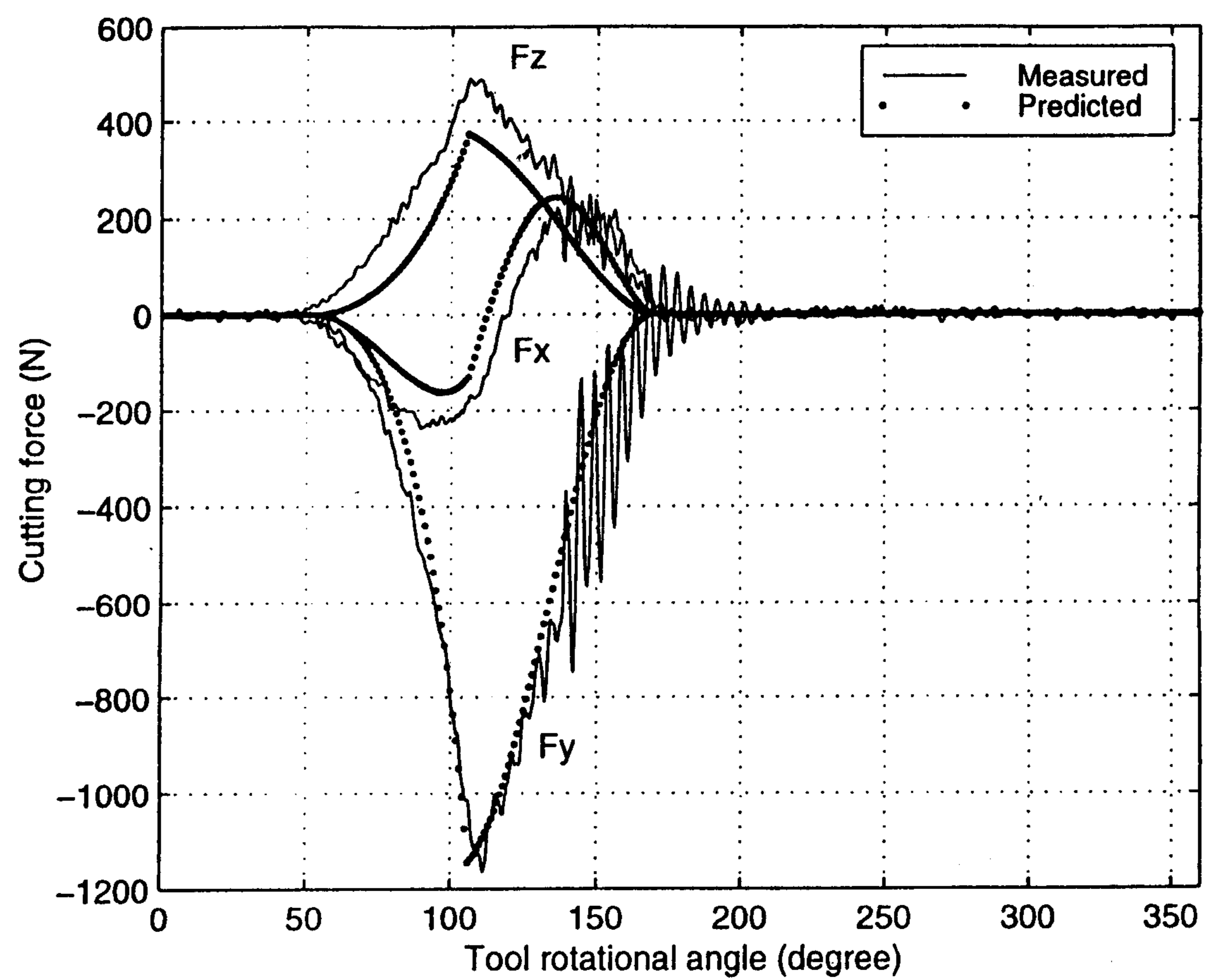
این مقاله به تشریح یک مدل نیرو برای پیش بینی نیروهای ماشینکاری استاتیکی و دینامیکی در فرآیند فرزکاری (با ابزار فرز سرکروی) سطوح پیچیده قالبها می پردازد. سطح پیچیده قالب به صورت المانهای صفحه ای که دارای زاویه  $\Phi$  نسبت به محور  $x$  و زاویه  $\Psi$  نسبت به محور  $y$  می باشند تقریب زده شده است. لبه برش ابزار فرز سرکروی و قطعه ماشینکاری با استفاده از نرم افزار تجاری مدلسازی هندسی (ACIS) مدل بر اساس شرایط برش شامل عمق و عرض تراش، قطعه در حال ماشینکاری با انجام تفاضل منطقی بین قطعه، ماشینکاری و حجم جاروب شده ماده توسط ابزار ساخته شده است. با یافتن سطح تماس بین ابزار سرکروی و قطعه در حال ماشینکاری قسمتهای در حال ماشینکاری لبه برش در زوایای دورانی مختلف ابزار استخراج شده اند.

با تحلیل فرآیند ماشینکاری در هر المان لبه برش به صورت فرآیند ماشینکاری مایل نیروهای المانی محاسبه و با جمع این نیروهای المانی در طول قسمت ماشینکاری لبه برش، نیروهای ماشینکاری در هر موقعیت دورانی ابزار محاسبه شده اند. با محاسبه ضخامت تراشه دینامیکی، نیروهای دینامیکی و با گسترش مدل Wu به فرآیند فرزکاری با ابزار فرز سرکروی، نیروهای شخم زنی محاسبه شده اند. جمع نیروهای ماشینکاری دینامیکی و نیروهای شخم زنی به مدل ارتعاشی دو درجه آزادی سیستم ماشین ابزار اعمال و جابجایی نوک ابزار محاسبه شده است.

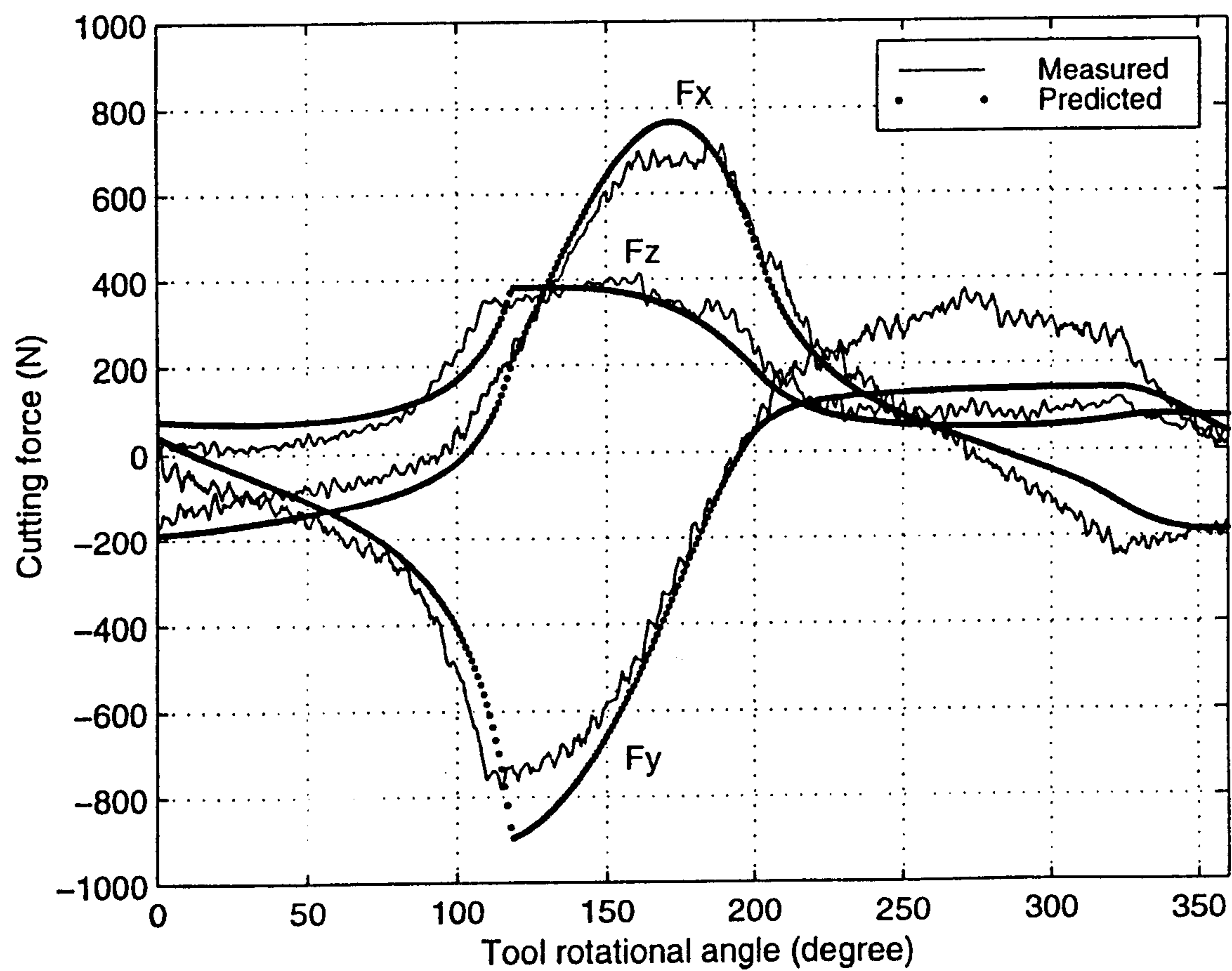




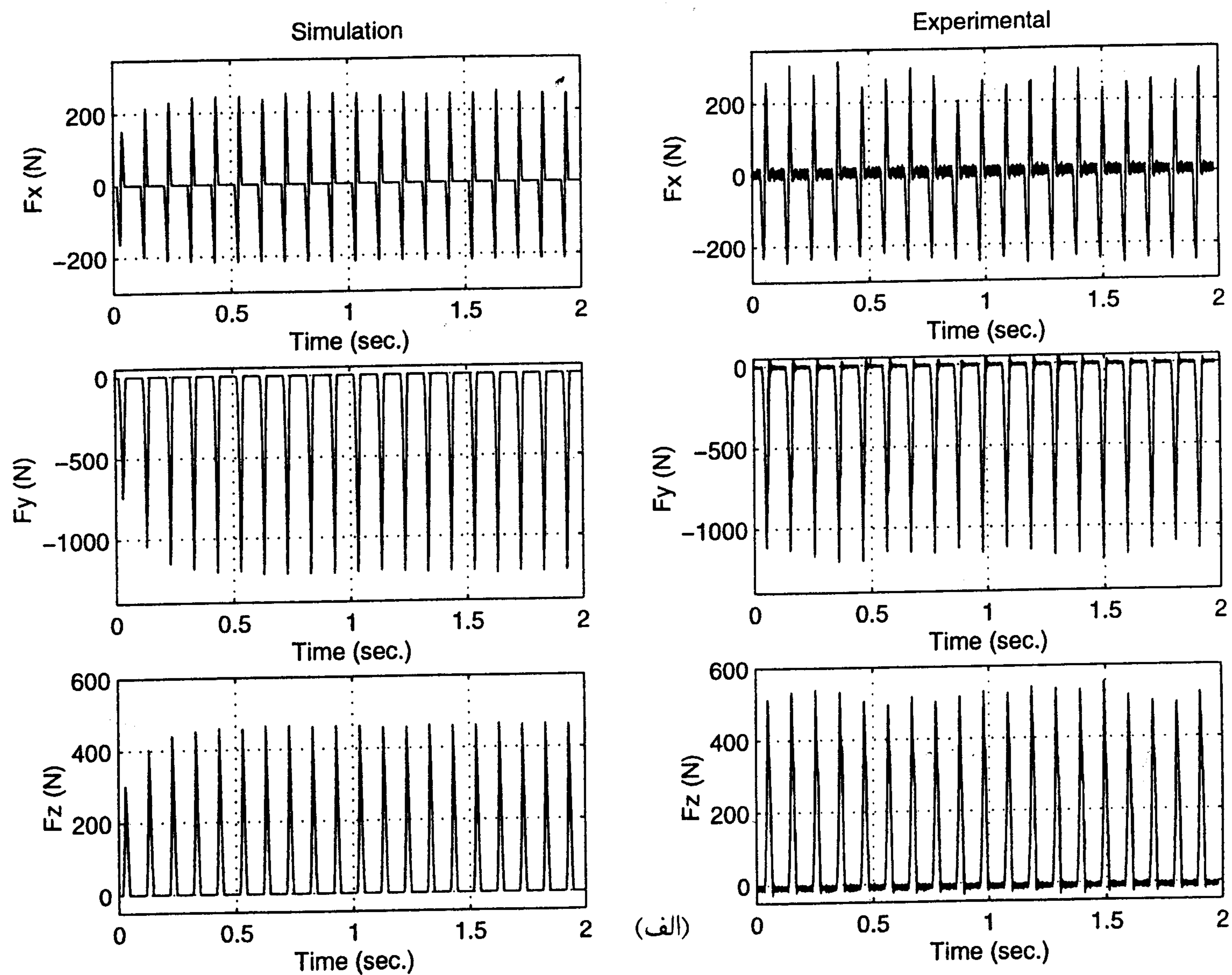
شکل ۸: هندسه درگیری ابزار با قطعه کار بر حسب موقعیت دورانی ابزار در زاویه های سطح مختلف.



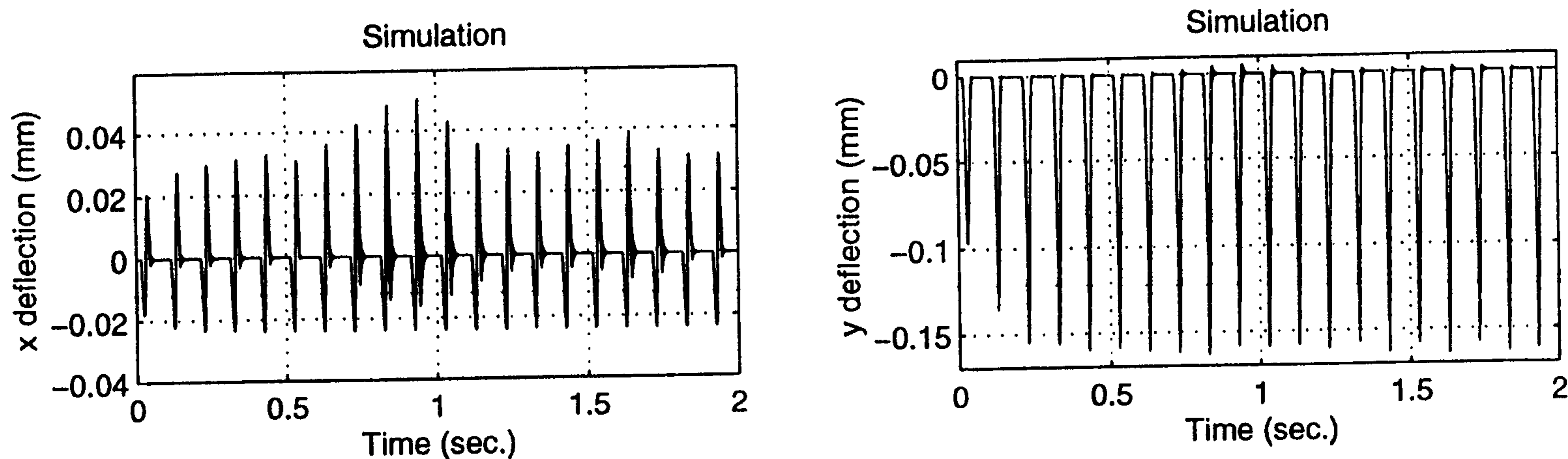
شکل ۹: نیروهای استاتیکی شبیه سازی شده و تجربی برای  $\Phi = 15^\circ, \Psi = 0^\circ$ .



شکل ۱۰: نیروهای ماشینکاری استاتیکی شبیه سازی شده و تجربی برای  $\Psi = 0^\circ$  و  $\Phi = -15^\circ$ .



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: (الف) - نیروهای ماشینکاری دینامیکی شبیه سازی شده و تجربی برای  $\Phi = +15^\circ$ ,  $\Psi = 0^\circ$  و (ب) جابجایی نوک ابزار در امتدادهای  $x, y$ .

## مراجع

- 1 - Yang, M. H. and Park, H. (1991). "The prediction of cutting force in ball-end milling." *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 31, No. 1, PP. 45-54.
- 2 - Feng, H. and Menq C. H. (1994). "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.
- 3 - Budak, G., Altintas, Y. and Armarego, E. J. A. (1996). "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data." *ASME J. Manufact. Science and Eng.*, Vol. 118, PP. 216-224.
- 4 - Lee, P. and Altintas, Y. (1996). "Prediction of ball-end milling force from orthogonal cutting data." *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 36, No. 9, PP. 1059-1072..
- 5 - Imani, B. M., Sadeghi, M. H. and Elbestawi, M. A. (1998). "An improved process simulation for ball-end milling of sculptured surfaces." *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 38, PP. 1089-1107.
- 6 - Abrari, F., Elbestawi, M. A. and Spence, A. D. (1998). "On the dynamics of ball-end milling: modeling of cutting force and stability analysis." *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 38, No. 3, PP. 215-237.
- 7 - Altintas, Y. and Lee, P. (1998). "Mechanics and dynamics Of ball-end milling." *ASME J. Manufact. Science and Eng.*, Vol. 120, PP. 684-691.
- 8 - ACIS Geometric Modeler Application Guide, (1975). Special Technology Inc., Colorado, USA.
- 9 - Shaw, M. C. (1984). *Metal cutting principles*, Clarendon Press, Oxford.
- 10 - Martellotti, M. (1941). "An analysis of the milling process ." *Trans. ASME*, Vol. 63, PP. 677-700.
- 11 - Martellotti, M. (1945). "An analysis of the milling process Part 2: down milling." *Trans. ASME.*, Vol. 67, PP. 233-251.

- 12 - Lim, E.M., Feng, H.Y., Menq, C.H. and Lin, Z. H. (1995). "The prediction of dimensional error for sculptured surface productions using the ball-end milling process, Part 1: chip geometry analysis and cutting force prediction." *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 8, PP.1149-1169.
- 13 - Tlustý, J. and Ismail, F. (1983). "Special aspects of chatter in milling." *ASME Journal of Vibration, Stress Reliability in Design*, Vol.105, PP. 24-32.
- 14 - Wu, D. W. (1989). "A new approach of formulating the transfer function for dynamic cutting processes." *ASME J. Eng. for Indust.*, Vol. 111, PP. 37-47.
- 15 - Ismail, F., Elbestawi, M. A., Du., R. and Urbasik, K. (1992). "Generation of milled surfaces including tool dynamic and wear." *ASME J. Eng. for Indust.*, Vol. 116, PP. 435- 439.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Ball-end Mill
  - 2 - Flat-end Mill
  - 3 - Helix Angle
  - 4 - Rake Angle
  - 5 - Cutting Edge
  - 6 - Cutting Speed
  - 7 - Insert Type
  - 8 - Inclination Angle
  - 9 - Effective Rake Angle
  - 10 - Normal Rake Angle
  - 11 - Chip Flow Angle
  - 12 - Undulation
  - 13 - Immersion Geometry
  - 14 - Solid Model
  - 15 - Intersection
  - 16 - Boolean Subtraction
  - 17 - Contact Face
  - 18 - Shear Stress
  - 19 - Friction Angle
  - 20 - Shear Angle
  - 21 - Ploughing Force
-