

پیش بینی سطح ایجاد شده در فرایند فرز کاری با ابزارهای سرتخت و سرکروی

امیر جدیری فیضی^۲

محمد رضا موحدی^{۱*}

* نویسنده مسئول: movahhed@sharif.edu

چکیده

مدل سازی سطح فرز کاری شده با انگشتی های استوانه ای و سرکروی ماریچ با در نظر گرفتن سینماتیک واقعی حرکت، خیز استاتیکی و خارج از مرکز بودن ابزار ارائه شده است. نیروهای برش توسط یک مدل نیمه تجربی، بر اساس داده های آزمایشات برش قائم و به کمک معادلات تبدیل برش قائم به مایل محاسبه شد. به کمک معادلات خیز تیر یک سرگردار، خیز ابزار مدل گردید. ضخامت براده جدا شده به عنوان بحرانی ترین پارامتر متاثر از خارج از مرکز بودن ابزار مورد تحلیل قرار گرفت. در نهایت با در نظر گرفتن مختصات هر یک از نقاط سطح و مقدار خیز در همان نقطه، سطح نهائی بدست آمد.

واژه های کلیدی: فرز کاری- انگشتی سرکروی و استوانه ای-خیز ابزار- پروفیل سطح-خارج از مرکزیت

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۱- مقدمه

عملیات فرزکاری یکی از متداولترین عملیات های ماشینکاری در صنایع هوا-فضا، خودرو و قالبسازی بشمار می رود. در این صنایع پارامترهای مهمی از جمله عمر ابزار، کیفیت سطح ماشینکاری شده، دقت ابعادی و راندمان عملیات مطرح می باشد. سطح ماشینکاری شده نقش مهمی در عمر خستگی، جذب و نگهداری روانکار، سایش، مقاومت در برابر خوردگی، عمر خزشی، خواص پوشش دهی سطح، انتقال حرارت و دقت عملکرد قطعه دارد. پیش بینی نرم افزاری پروفیل سطح فرزکاری شده نقش مهمی در کاهش هزینه ها، پرهیز از دوباره کاری و عدم استفاده از روش سعی و خطا در دستیابی به سطح مورد نظر دارد. در این مقاله نتایج حاصل از شبیه سازی سطح سه بعدی حاصل از فرزکاری سطوح افقی و تخت از طریق مدل سازی نیروهای ماشینکاری، مدل سازی مسیر حرکت واقعی لبه های برشی و مدل سازی خیز ابزار، در محیط Matlab ارائه شده است.

۲- مدل سازی نیروهای برش

نیروهای برشی مهمترین پارامتری هستند که بر دقت ماشینکاری، کیفیت سطح، ارتعاشات ماشین ابزار، توان مصرفی و عمر ابزار موثر می باشند. کنترل و مدل سازی دقیق نیروها نقش تعیین کننده ای در پیش بینی نتیجه ماشینکاری دارد. سمیت و تلوستی، ۴ مدل پیش بینی نیرو را مطرح کرده اند [۱]. در این مقاله از مدل دوم آنها یعنی مدل سازی صلب - لحظه ای^۱ برای پیش بینی نیروهای برش استفاده می شود.

۳- مدل سازی نیروهای برش در انگشتی استوانه ای

در مدل سازی نیروهای برشی ضخامت براده جدا نشده مهم ترین نقش را دارد. با توجه به هندسه ساده تر ابزار استوانه ای در مقایسه با ابزار سرکروی، ضخامت براده در صفحه افقی از معادله Martellotti [۲ و ۳] محاسبه می شود:

$$t_n = f \cdot \sin(\phi) \quad (1)$$

ابزار در امتداد محور به المانهای با ضخامت جزئی تقسیم می شود. زاویه تاخیر^۲ برابر خواهد بود:

$$\psi = \frac{Z \cdot \tan(\beta)}{R} \quad (2)$$

زاویه غوطه وری هر نقطه از لبه برشی در ارتفاع Z واقع روی لبه برشی J ام برابر است با:

$$\Phi_j = \phi + (j-1) \cdot \Phi_p - \psi, \quad j=1,2,3,\dots,Nf \quad (3)$$

برای هر یک از المانهای محوری در زاویه غوطه وری ϕ نیروهای برش متناسب با مساحت براده^۳ فرض می شوند. با فرض دستگاه مختصات rta در راستاهای شعاعی (r)، محوری (a) و مماسی (t) نیروهای برش در این سه راستا برای المانهای لبه برشی J ام بصورت زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned} dF_{t,j} &= K_{te} \cdot dZ + K_{tc} \cdot dZ \cdot t_{n,j}(\Phi_j) \\ dF_{r,j} &= K_{re} \cdot dZ + K_{rc} \cdot dZ \cdot t_{n,j}(\Phi_j) \\ dF_{a,j} &= K_{ae} \cdot dZ + K_{ac} \cdot dZ \cdot t_{n,j}(\Phi_j) \end{aligned} \quad (4)$$

به کمک ماتریس تبدیل T_1 نیروهای برشی از دستگاه rta به دستگاه کارترین انتقال داده می شوند:

$$\begin{aligned} \{dF_{xyz}\} &= [T_1] \{dF_{rta}\} \\ \begin{bmatrix} dF_{x,j} \\ dF_{y,j} \\ dF_{z,j} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sin(\Phi_j) & -\sin(\Phi_j) & 0 \\ \sin(\Phi_j) & -\cos(\Phi_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_{r,j} \\ dF_{t,j} \\ dF_{a,j} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

۴- مدل سازی هندسی ابزار سرکروی

توسعه مدل های پیش بینی نیرو که منجر به ایجاد مدل های پیش بینی سطح و ... گردیده است، بدون مدل سازی هندسی آن فرایند غیر ممکن است. مدل های پیش بینی نیرو به اطلاعات هندسی ای نیاز دارند که باید از طریق مدل سازی هندسی آن فرایند استخراج شود. ابزار سرکروی یک انگشتی استوانه ای است که یک بخش نیمه کروی به انتهای آن اضافه شده است. بر اساس نحوه قرارگیری لبه های برشی طرح های مختلفی از انگشتی های سرکروی وجود دارد [۴]، ولی بیشتر مطالعات بر روی ابزارهای با گام مارپیچ ثابت^۴ انجام شده است [۵، ۶، ۷، ۸، ۹]. شعاع ابزار در صفحه افقی شعاع محلی یا

2 - Lag angle

3 - Chip load

4 - Constant helix lead

1 - Instantaneous rigid force model

افقی است، برای ابزار سرکروی این مقدار باید روی صفحه It محاسبه شود:

$$t_n = f \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\kappa) \quad (10)$$

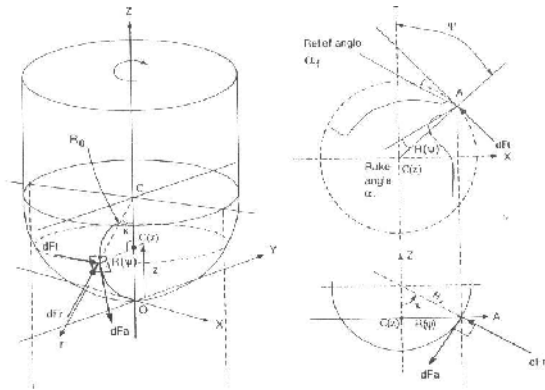
برای محاسبه زاویه K خواهیم داشت:

$$\sin(\kappa) = \frac{R(Z)}{R_0} \quad (11)$$

عرض براده در صفحه It اندازه گیری می شود و برابر است با:

$$db = \frac{dZ}{\sin(\kappa)} \quad (12)$$

بدین ترتیب نیروهای مماسی، شعاعی و محوری دیفرانسیلی از روابط زیر محاسبه می شوند [۹]:



شکل (۱) دستگاه مختصاتی rta برای ابزار سرکروی [۹]

$$\begin{aligned} dF_t &= K_{te} \cdot ds + K_{tc} \cdot t \cdot db \\ dF_r &= K_{re} \cdot ds + K_{rc} \cdot t \cdot db \\ dF_a &= K_{ae} \cdot ds + K_{ac} \cdot t \cdot db \end{aligned} \quad (13)$$

به کمک ماتریس تبدیل T_2 نیروهای برشی از دستگاه rta به دستگاه کارترین انتقال داده می شوند:

$$\{dF_{xyz}\} = [T_2] \{dF_{rta}\}$$

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\kappa) \cdot \sin(\phi) & -\cos(\phi) & -\cos(\kappa) \cdot \sin(\phi) \\ -\sin(\kappa) \cdot \cos(\phi) & \sin(\phi) & -\cos(\kappa) \cdot \cos(\phi) \\ \cos(\kappa) & 0 & -\sin(\kappa) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{bmatrix}$$

در معادلات فوق همانند انگشتی استوانه ای، در محاسبه نیروهای برشی نیروهای محض برشی و نیروهای شخم یا لبه جداگانه لحاظ و محاسبه شده اند. ضرائب لبه در امتداد لبه برشی ثابت می باشند و ضرائب برشی از طریق معادلات

موثر (effective or local radius) نامیده شده و برابر خواهد بود با [۹]:

$$R(Z) = \sqrt{R_0^2 - (R_0 - Z)^2} \quad (6)$$

زاویه تاخیر در هر نقطه واقع روی لبه برشی در ارتفاع Z از تعمیم معادلات (۲) و (۳) قابل دسترسی است [۸].

در ابزارهای سنگزنی شده با گام ماریچج ثابت رابطه زیر بین شعاع موثر و زاویه ماریچج محلی برقرار است:

$$\frac{\tan(i(Z_1))}{\tan(i(Z_2))} = \frac{R(Z_1)}{R(Z_2)} \quad (7)$$

بردار مکان $\vec{r}(Z)$ که از مبدا واقع در نوک ابزار رسم شده و مکان هندسی نقاط واقع روی لبه برشی است بصورت زیر خواهد بود:

$$\vec{r}(Z) = R(Z) \cdot \sin(\psi) \vec{i} + R(Z) \cdot \cos(\psi) \vec{j} + Z \vec{k} \quad (8)$$

با دیفرانسیل گیری از رابطه فوق نسبت به Z بردار $d\vec{r}(Z)$ بدست می آید. طول یک المان دیفرانسیلی از لبه برشی در

ارتفاع Z برابر است با طول بردار $d\vec{r}(Z)$:

$$ds = \left\| d\vec{r}(Z) \right\| = dZ \cdot \sqrt{\tan^2(i_0) + \frac{[R(Z) \frac{dR(Z)}{dZ} - Z \cdot \tan^2(i_0)]^2}{R_0^2 - (Z \cdot \tan(i_0))^2} + 1}$$

۵- مدل سازی نیروهای برش در ابزار سرکروی

اشاره شد در مدل سازی نیروهای برشی محاسبه ضخامت براده جدا نشده مهمترین نقش را دارد. در این مقاله از تحلیل Lee و Altintas [۹] در مدل سازی ضخامت براده در فرزکاری افقی با ابزار سرکروی استفاده می شود. روی هر نقطه از سطح کروی ابزار دستگاه مختصاتی rta در راستای شعاع کره t ، راستای سرعت برشی t و عمود بر آن دو a ، مانند شکل ۱ در نظر گرفته شده است. ضخامت براده در صفحه عمود بر لبه برشی (صفحه It) اندازه گیری می شود. ضخامت براده تابع زاویه غوطه وری و موقعیت محوری نقطه برشی است. عبارت $f \cdot \sin(\phi)$ ضخامت براده در صفحه

تبدیل برش قائم به مایل با انجام آزمایشاتی تحت برش قائم محاسبه می شوند.

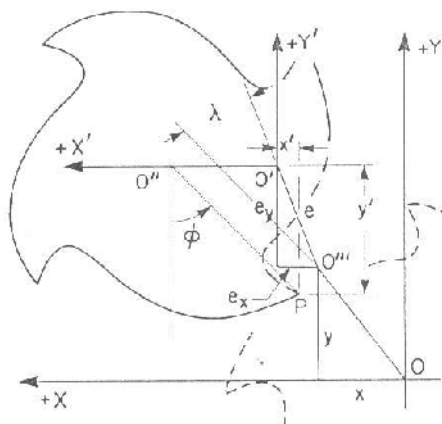
۶- مدل سازی سطح فرزکاری شده

برای مدل سازی سطح فرزکاری شده از سینماتیک واقعی نقاط واقع روی لبه برشی استفاده می شود. Martellotti [۳ و ۲] نشان داده است که مسیر واقعی این نقاط یک مسیر فرفره ای (trochoidal) به معادلات زیر می باشد:

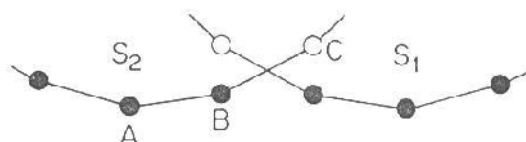
$$x' = -R \cdot \sin(\phi) + \frac{f \cdot \phi}{2\pi} \quad (15)$$

$$y' = -R \cdot \cos(\phi) \quad (16)$$

شکل ۲ مسیر واقعی طی شده توسط یک نقطه از لبه برشی را نشان می دهد و پروفیل بجای مانده روی سطح قطعه بدلیل حرکت فرفره ای ابزار در شکل ۳ آورده شده است.



شکل (۴) تغییر مسیر حرکت ابزار در اثر خیز و خارج از مرکزیت [۱۱]

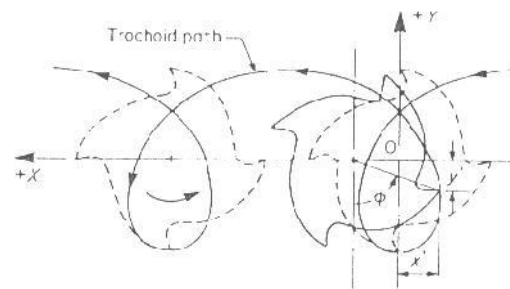
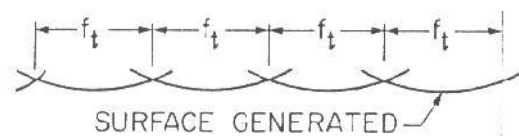


شکل (۵) ماهیت تکه ای بودن سطح و تلاقی دو مسیر متوالی [۱۰]

$$\begin{aligned} e_x &= e \cdot \sin(\phi - \lambda) \\ e_y &= e \cdot \cos(\phi - \lambda) \end{aligned} \quad (19)$$

هرگاه S1 و S2 مطابق شکل ۵ دو مسیر متوالی از نقاط متناظر دو لبه برشی باشند سطح فرزکاری شده با انتخاب بیرونی ترین نقاط مسیر حرکت، یعنی دایره های توپر مشخص شده در شکل ۵ ایجاد می شود.

شکل (۲) مسیر واقعی طی شده توسط یک نقطه از لبه برشی [۱۰]



شکل (۳) پروفیل بجای مانده از حرکت فرفره ای ابزار روی سطح قطعه [۱۰]

۷- مدل سازی خیز ابزار

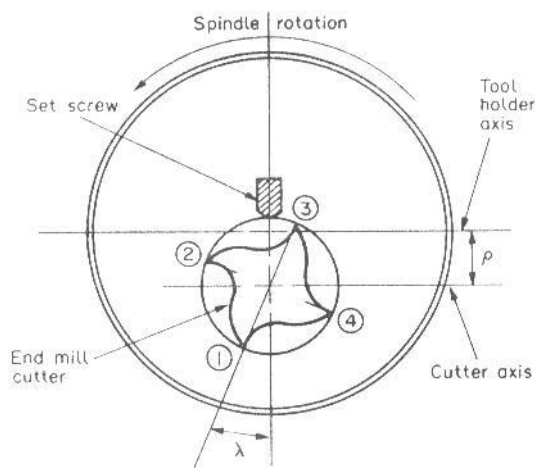
خطاهای فرم در فرزکاری علل زیادی دارد. از جمله علل خطاهای فرم می توان به خیز ابزار، اثرات حرارتی، خطاهای هندسی ماشین ابزار، ارتعاشات دینامیکی و سایش ابزار اشاره کرد. ادعا شده است [۷ و ۴] خیز ابزار در اثر نیروهای برش مهمترین علت خطاهای فرم است. انگشتی ها انعطاف پذیرترین بخش سیستم فرزکاری محسوب می شوند [۴]. معمولاً در مدل سازی خیز ابزار، ابزارگیر کاملاً صلب و ابزار تیر الاستیک استوانه ای یک سرگیردار (cantilever beam) فرض می شود. ممان اینرسی مقطع انگشتی بر اساس قطر موثر ابزار یعنی 0.8-0.85 برابر قطر اسمی ابزار در هر ارتفاع، برای

خیز استاتیکی و خارج از محور بودن ابزار (شکل ۴)، معادلات (۱۵) و (۱۶) را به معادلات زیر تبدیل می کند [۱۰ و ۱۱]:

$$x'' = x' + e_x + x \quad (17)$$

$$y'' = y' + e_y + y \quad (18)$$

مقادیر e_x و e_y ، از روابط زیر تعیین می شود [۱۰]:



شکل (۶) خارج از مرکزیت در اثر محکم کردن ابزار در ابزارگیر از نوع پیچی [۱۲]

۹- نتایج مدل سازی

بطور کلی اساس مدل سازی بر ناپیوسته کردن (digitize) عملیات پیوسته فرزکاری استوار است. ابزار به اندازه زاویه های جزئی $\Delta\phi = 0.01 - 0.1 \text{ deg}$ چرخانده می شود. در هر یک از این چرخش ها ابزار در امتداد محورش به المانهای دیسکی با ضخامت جزئی dZ تقسیم می شود. سپس برای هر لبه برشی با توجه به زاویه گام و ماریچ، زاویه غوطه وری از معادله (۳) محاسبه می گردد. اگر این زاویه در ناحیه غوطه وری، بین زاویه ورود و خروج (ϕ_{st}, ϕ_{ex}) قرار داشته باشد نیروها بر اساس روابط (۵) و (۱۴) محاسبه می گردند. این کار برای همه المانهای محوری تکرار شده و از جمع نیروهای المانی نیروهای کل بدست می آیند. مدل سازی برای ماده Ti_6Al_4V و بر اساس داده های معلوم این ماده از برش قائم انجام شد. این داده ها در جدول ۱ آورده شده است [۹].

جبران مناطق خالی ابزار محاسبه می شود. برای محاسبه خیز ابزار در ارتفاع Z از نوک ابزار در اثر نیروی وارد بر المان m ام در فاصله v_m از ابزارگیر معادلات زیر بکار می رود [۷۴]:

$$\delta(Z_k, m) = \begin{cases} \frac{\Delta F_m \cdot v_k^2}{6EI} (3v_m - v_k) & \text{if } 0 < v_k < v_m \\ \frac{\Delta F_m \cdot v_m^2}{6EI} (3v_k - v_m) & \text{if } v_k > v_m \end{cases} \quad (20)$$

۸- مدل سازی خارج از مرکز بودن ابزار

خارج از مرکز بودن ابزار در همه فرایندهای ماشینکاری با ابزارهای چند لبه روی می دهد. در فرزکاری با انگشتی معمولاً علت خارج از مرکز بودن، حرکت محور ابزار (offset) نسبت به محور دورانی اسپیندل در اثر محکم کردن ابزار است. خارج از مرکز بودن ابزار منجر به تغییر هندسه برش، شعاع موثر، ضخامت براده، زاویه ورود و خروج می گردد. بدین ترتیب موضوعاتی نظیر شکست ابزار، سایش لبه برشی، مکانیزم تولید سطح و رفتار دینامیکی ماشین ابزار تحت تاثیر واقع می شوند. گرچه عمده شرایط برشی در حضور خارج از مرکزیت تغییر می کنند ولی بحرانی ترین پارامتر متاثر از خارج از مرکزیت، ضخامت براده می باشد [۱۲]. در این مقاله صرفاً خارج از مرکزیت در جهت موازی با محور ابزار در اثر محکم کردن ابزار در ابزارگیر از نوع پیچی (set-screw type) مورد بررسی قرار گرفته است. این موضوع در شکل ۶ نشان داده شده است. هرگاه e_y خارج از مرکزیت در راستای Y باشد، شعاع موثر هر یک از لبه های برشی از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۲]:

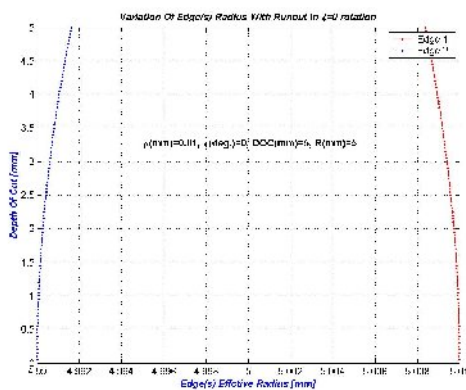
$$RAD(i, k) = R + e_y \cdot \cos[\psi \cdot \lambda - \lambda + (k-1) \cdot \Phi_p] \quad (21)$$

بدین ترتیب شعاع موثر هر یک از لبه های برشی بدلیل خارج از مرکزیت ابزار از مقدار نامی تغییر یافته و باعث اضافه شدن یک عبارت دیگر به معادله ضخامت براده می شود [۱۲]:

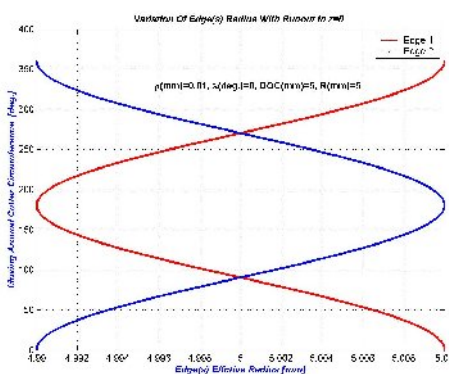
$$t_n = f \cdot \sin(\phi) + \underbrace{[RAD(i, k) - RAD(i, k-1)]}_{\text{due to runout}} \quad (22)$$

جدول (۱) پارامترهای برش قائم Ti_6Al_4V [۹].

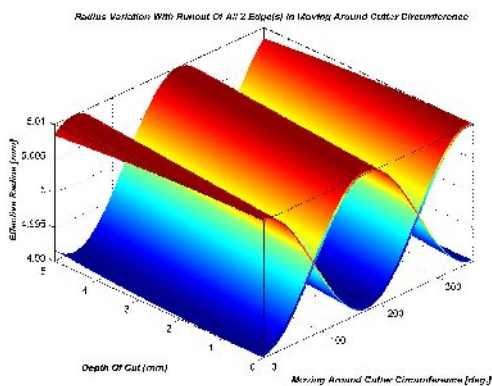
Shear stress	613 Mpa
Friction angle	$191 + 0.29\alpha$
Chip compression ratio	ph^q
p	$1.755 - 0.028\alpha$
q	$0.331 - 0.0082\alpha$
Tangential edge force Kte	24 N/mm
Radial edge force Kre	43 N/mm
Axial edge force Kae	-3 N/mm



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۸) الف) تغییرات شعاع هر دو لبه برشی بعلا خارج از مرکزیت در یک مقطع خاص در حرکت روی محیط ابزار. ب) تغییرات شعاع هر دو لبه ابزار در امتداد عمق برش ج) شکل سه بعدی تغییرات شعاع هر دو لبه بعلا خارج از مرکز بودن. شرایط مدل سازی:

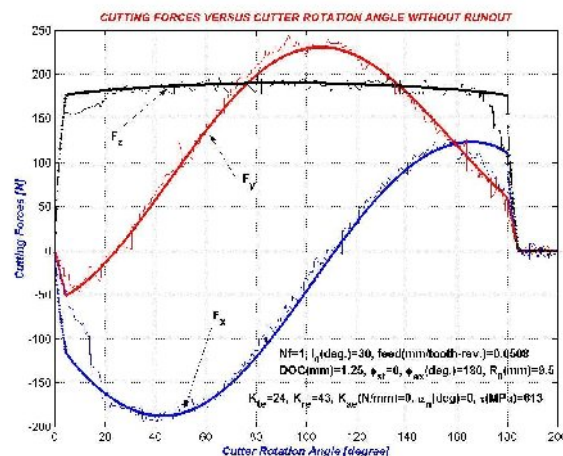
$$R = 5, Nf = 2, \beta = 30, DOC = 5,$$

$$f = 0.1, \alpha = 2, \tau = 613$$

$$K_{te} = K_{re} = K_{ae} = 0, \rho = 0.01, \lambda = 0$$

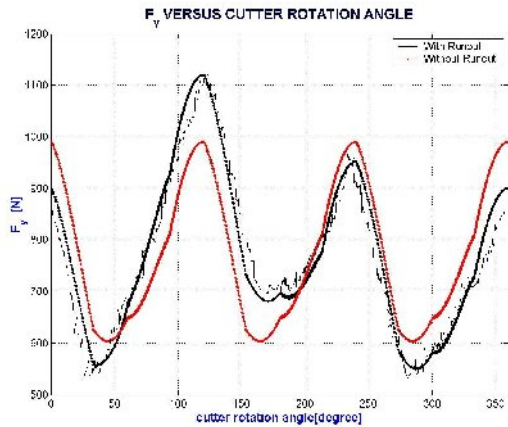
شکل ۷ نیروهای مدل سازی شده و نتایج اندازه گیری شده برای انگشتی سرکروی را نشان می دهد. از آنجا که ابزار تک لبه است وضعیت نیروها در حالت با خارج از مرکزیت و حالت بدون خارج از مرکزیت تفاوتی نخواهد داشت، چرا که هر لبه برشی سطح بجای مانده از خودش را ماشینکاری خواهد کرد لذا هیچ اختلاف شعاعی که منجر به تغییر نیروها شود وجود نخواهد داشت.

در شکل ۸ نتیجه مدل سازی شعاع موثر انگشتی استوانه ای با دو لبه برشی نشان داده شده است. در شکل ۸-الف حرکت روی محور افقی از $R - e_y$ تا $R + e_y$ معادل حرکت روی محیط مرکزیت بر شعاع ابزار را در محدوده عمق برش برای هر لبه برشی نشان داده است. زاویه ماریچ علت تغییرات شعاع است. در ابزارهای با لبه های مستقیم هر یک از لبه های برشی در یک شعاع ثابت ولی متفاوت با شعاع اسمی ابزار قرار خواهند گرفت. شکل ۸-ج وضعیت سه بعدی این تغییرات را نشان می دهد.

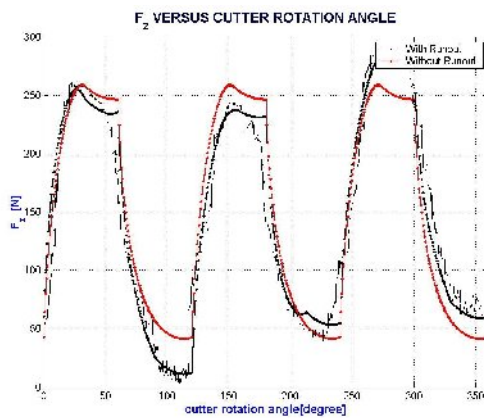


شکل (۷) نیروهای مدل سازی شده برای انگشتی سرکروی و مقایسه با

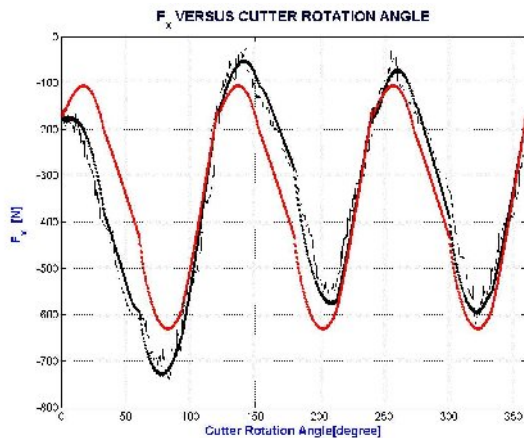
نتایج آزمایشگاهی [۹]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۹) الف) نیروی F_x با خارج از مرکز و بدون آن ب) نیروی F_y با خارج از مرکز و بدون آن ج) نیروی F_z با خارج از مرکز و بدون آن.

شرایط مدل‌سازی:

$$R = 5, N_f = 3, i_0 = 30, DOC = 5,$$

$$f = 0.1, \alpha = 2, \tau = 613$$

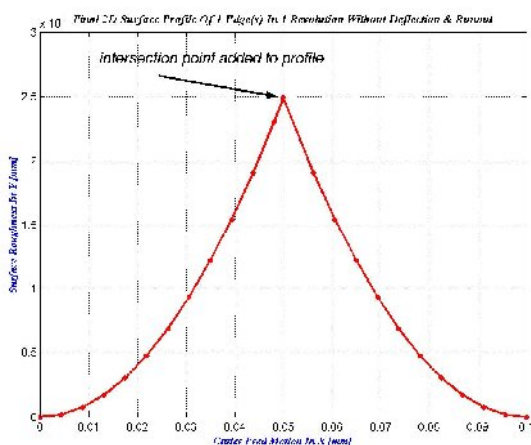
$$K_{te} = K_{re} = K_{ae} = 0, \rho = 0.01, \lambda = 0$$

شکل ۹ نتیجه مدل‌سازی نیرو و مقادیر آزمایشگاهی برای ابزار سرکروی سه لبه در دو حالت بدون خارج از مرکز و با خارج از مرکز نشان می‌دهد. دیده می‌شود که وجود خارج از مرکزیت ابزار مقدار نیروی حداکثر (peak force) را افزایش داده است. این موضوع با توجه به حضور یک جمله اضافی در معادله (۲۲) مورد انتظار بود. مدل‌سازی نشان می‌دهد (نتایج در مقاله آورده نشده است) با افزایش خارج از مرکزیت ابزار نسبت نیروی حداکثر به نیروی متوسط افزایش می‌یابد.

مدل‌سازی خیز ابزار برای انگشتی‌های استوانه‌ای و سرکروی با تعمیم معادله (۲۰) برای دو راستای X و Y انجام یافت. در الگوریتم مدل‌سازی نیرو بخشی گنجانده شد تا نیروی ΔF_m برای دو راستای مذکور محاسبه شود. نتیجه نهایی برای خیز انگشتی در محدوده عمق برش در شکلهای ۱۰ برای ابزار سرکروی آورده شده است. مقادیر این پروفیل خیز با مختصات مسیر حرکت جمع شده و سطح نهایی مدل شده است.

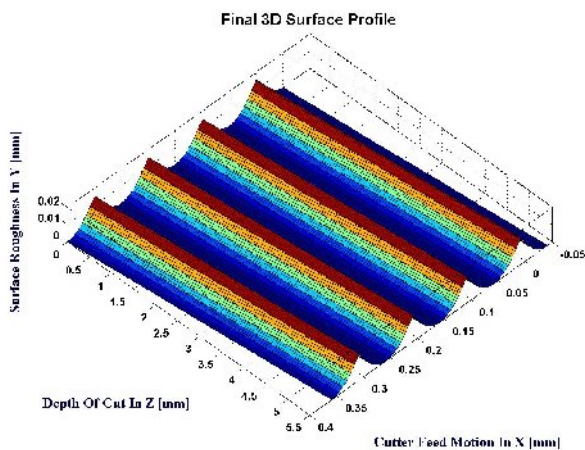
در شکل ۱۱ مسیر واقعی فرفره‌ای پیموده شده توسط یک نقطه از لبه برشی طبق معادلات (۱۵) و (۱۶) مدل شده است. بخش بالایی این مسیر، پروفیل سطح بجای مانده روی قطعه را می‌سازد. لذا الگوریتمی طراحی شد تا مسیر حرکت لبه‌های برشی در مجاورت سطح (شکل ۱۲) و سپس بیرونی‌ترین نقاط آن سطح انتخاب شوند. برای بالا بردن دقت پروفیل سطح مدل شده، الگوریتم دیگری طراحی شد تا نقطه تلاقی مسیرهای مجاور هم یافته شود (شکل ۱۳). از کنار هم قرار دادن این نقاط و سه بعدی کردن آن به اندازه عمق برش پروفیل سطح سه بعدی ساخته شد (شکل ۱۴). تصویر واقعی سطح فرزکاری شده نظیر شرایط برشی شکل ۱۴ در شکل ۱۵ آورده شده است. همین عملیات برای ابزار سرکروی تعمیم داده شده و در نهایت سطح سه بعدی نظیر شکل ۱۶ ایجاد گردید. از جمع زدن مقادیر خیز ابزار در مختصات‌های مناسب با پروفیل سه بعدی شکل ۱۶ بعنوان پروفیل نهایی سطح بدست آمد.

$(R = 5mm, f = 3mm / tooth - rev.)$



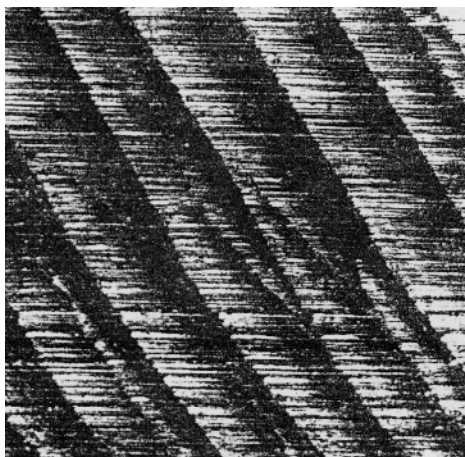
شکل (۱۳) پروفیل سطح نهایی برای انگشتی استوانه ای لبه ۱

$(R = 5mm, f = 0.1mm / tooth - rev.)$

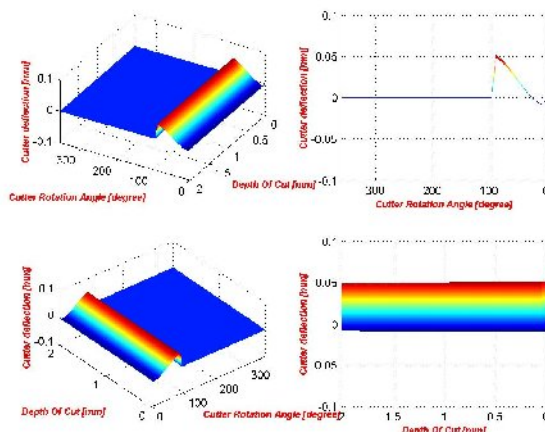


شکل (۱۴) پروفیل سه بعدی سطح در ۱ دور دوران ابزار

$(R = 5mm, f = 0.1mm / tooth - rev., N_f = 4, DOC = 5.5mm, \beta = 30 deg.)$

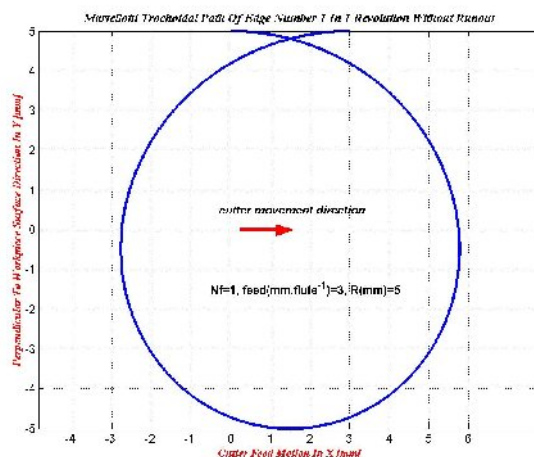


شکل (۱۵) تصویر واقعی سطح فرزکاری شده نظیر شکل [۱۰]۱۴



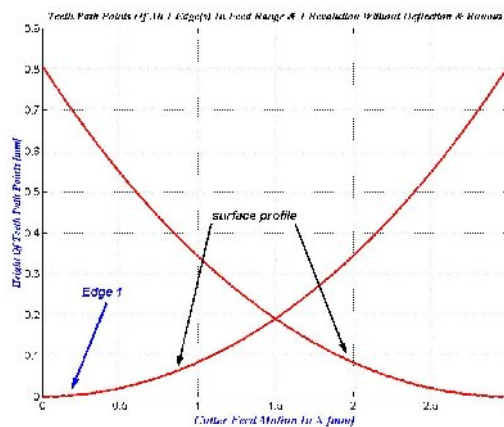
شکل (۱۰) پروفیل سه بعدی خیز ابزار در راستای X (سمت چپ) و راستای Y (سمت راست) برای انگشتی سرکروی لبه ۱

$(R_0 = 9mm, f = 0.1mm / tooth - rev., i_0 = 30 deg., DOC = 2, Le = 55mm, E = 200000MPa, \varphi_{st} = 0, \varphi_{ex} = 90 deg.)$



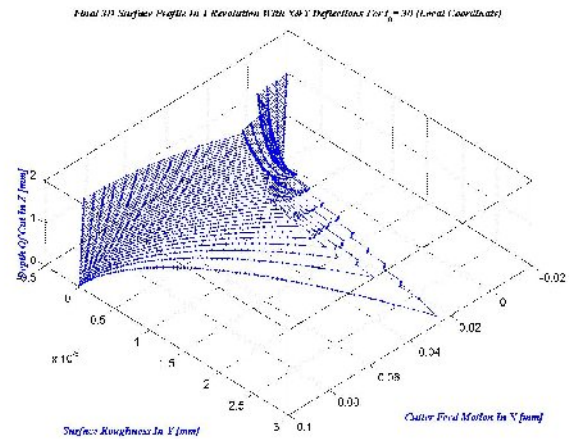
شکل (۱۱) مسیر واقعی پیموده شده توسط لبه های برشی

$(R = 5mm, f = 3mm / tooth - rev.)$



شکل (۱۲) مسیر حرکت لبه های برشی در مجاورت سطح

λ	radian	زاویه قرار گیری لبه برشی
$\delta(Z_k, m)$	mm	خیز ابزار در ارتفاع Z_k ناشی از نیروی المانی m
V_m	mm	فاصله المان نیرویی m از ابزار گیر
V_k	mm	فاصله المان محاسبه خیز از ابزار گیر
t_n	mm	ضخامت براده جدا نشده
F	mm/tooth h-rev	پیشروی
Z	mm	فاصله محوری از نوک ابزار
dZ	mm	ارتفاع المانهای محوری شعاع اسمی انگشتی استوانه ای
R	mm	ای
dF_x, dF_y, dF_z	N	نیروهای دیفرانسیلی مماسی، شعاعی و محوری
dF_x, dF_y, dF_z	N	نیروهای دیفرانسیلی در دستگاه کارترین
K_{te}, K_{re}, K_{ae}	N/mm	ضرائب لبه
K_{to}, K_{ro}, K_{ao}	N/mm ²	ضرائب برشی
X, Y, Z	mm	مختصات سطح کروی انگشتی سرکروی
R_0	mm	شعاع بخش کروی انگشتی سرکروی
$R(Z)$	mm	شعاع موثر در ارتفاع Z از نوک انگشتی
i_0		زاویه مارپیچ نامی انگشتی سرکروی
$i(Z)$		زاویه مارپیچ در ارتفاع Z
dS		طول یک المان دیفرانسیلی از لبه برشی در ارتفاع Z
db		عرض براده در صفحه it
x, y	mm	خیزهای استاتیکی در جهات X و Y
x', y'	mm	مختصات مسیر فرفره ای نوک ابزار
x'', y''	mm	مختصات مسیر با در نظر گرفتن خیز و خارج از مرکزیت



شکل (۱۶) پروفیل سه بعدی سطح در یک دور دوران ابزار برای انگشتی سرکروی یک لبه

$$(R_0 = 9mm, f = 0.1mm / tooth - rev., i_0 = 30 deg., DOC = 2, Le = 55mm, E = 200000MPa, \varphi_{st} = 0, \varphi_{ex} = 90 deg.)$$

۹- نتیجه گیری

مدل سازی نیرو بر اساس مدل نیروی صلب-لجظه ای و خیز بر اساس مدل استاتیکی و با فرض تیر استوانه ای الاستیک برای انگشتی استوانه ای و سرکروی انجام یافت. در مدل سازی نیرو، نیروهای شخم یا لبه و محض برشی در نظر گرفته شد. ضرائب معادلات نیرو توسط آزمایشات برش قائم و معادلات تبدیل برش قائم به مایل بدست آمد. سطح ایجاد شده توسط هر یک از انواع انگشتی ها با در نظر گرفتن سینماتیک واقعی حرکت نقاط در گیر برش لبه ها مدل سازی شد. معادله توسعه یافته ضخامت براده برای خارج از مرکزیت در معادلات، محاسبات نیرو و سطح وارد و مدل سازی شد.

۱۰- فهرست علائم

β	زاویه مارپیچ انگشتی استوانه ای
κ	زاویه محوری نقطه برشی
ϕ	زاویه غوطه وری
ψ	زاویه تاخیر
Φ_j	زاویه غوطه وری در ارتفاع Z روی لبه j ام
Φ_p	زاویه گام $2\pi / N_f =$

	Data, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 36, No. 9, 1996, pp. 1059	e_x, e_y, e_z, X, Y	mm	خارج از مرکزیت ابزار در جهات شعاعی
[10]	F. Ismail, and M. A. Elbastawi, Generation Of Milled Surfaces Including Tool Dynamics And wear, Int. J. Of Engineering For Industry, Vol. 115, 1993, pp. 245	ΔF_m	N	مجموع نیروهای المانی ام
		E	MPa	مدول الاستیسیته ابزار
		I	mm^4	ممان اینرسی موثر مقطع ابزار
[11]	F. Ismail, and M. A. Elbastawi, Surface Topography Characterization In Finish Milling, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 2, 1994, pp. 245	L_e	mm	طول موثر ابزار
		$RAD(I,k)$	mm	شعاع موثر لبه کلم در المان محوری ام
[12]	W. A. Kline, and R. E. Devor, The Effect Of Runout On Cutting Geometry And Forces In End Milling, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 23, No. 2/3, 1983, pp. 123	N_f		تعداد لبه های برشی

مراجع

- [1] S. Smith, J. Tlustý, An Overview Of Modeling and Simulation Of The Milling Process, J. of Eng. For Industry, Vol. 113, 1991, pp. 169
- [2] M. Martellotti, An Analysis Of Milling Process, Part 2: Down-Milling, Transactions Of The ASME, Vol. 67, 1945, pp. 233
- [3] M. Martellotti, An Analysis Of Milling Process, Transactions Of The ASME, Vol. 63, 1941, pp. 667
- [4] Y. Mizugaki, and K. Kikkawa, Geometric Generating Mechanism Of Machined Surface By Ball-Nosed End Milling, Annals Of The CIRP, Vol. 50, No. 1, 2001, pp. 69
- [5] Ee Meng Lim, His Feng, 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, 1995, pp. 1149
- [6] G. Yucesan, and Y. Altintas, Prediction Of Ball End Milling Forces, J. Engineering For Industry, Vol. 118, 1996, pp.95
- [7] B. Ikua, and H. Tanaka, Prediction Of Cutting Force And Machining Error In Ball End Milling Of Curved Surfaces. 1-Theoretical Analysis, Int. J. Of Precision Engineering, Vol. 25, 2001, pp. 266
- [8] Y. Altintas, and P. Lee, Mechanics And Dynamics Of Ball End Milling, Transactions Of ASME, Vol. 120, 1998, pp. 684
- [9] Y. Altintas, and P. Lee, Prediction Of Ball – End Milling Forces From Orthogonal Cutting