



تخمین ضرایب نیروی برشی برای تیغه فرز انگشتی سر تخت با اندازه گیری خطای سطح

یوسف محمدی¹، حسین امیرآبادی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، hamirabadi@birjand.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

در این مقاله روشی جدید برای به دست آوردن ضرایب ماشین کاری، که عمده ترین و مهمترین عامل در محاسبه و پیش بینی نیروهای ماشین کاری می باشد، برای تیغه فرزهای انگشتی سر تخت ارائه شده است. نیروی ماشین کاری که در حین فرایند برش کاری بر تیغه فرز اعمال می شود، مهمترین عامل خیز برداشتن و ایجاد خطای سطح ماشین کاری در نظر گرفته شده است و از دیگر عوامل، که منجر به خیز برداشتن ابزار و در نتیجه ایجاد خطای سطح می شوند، در مقابل نیروهای ماشین کاری چشم پوشی شده است. در این مقاله مدل نیرویی ارائه شده توسط وینگ لی که قابلیت خوبی در مدل سازی مکانیکی فرایند فرز کاری دارد، انتخاب شده است. ضرایب برشی مربوط به این مدل نیرویی در این روش با یک بار بغل تراشی سطح و سپس با استفاده از دستگاه CMM خطای سطح روی یک پروفیل از سطح ماشین کاری شده در راستای تیغه فرز اندازه گیری شده و با وابسته کردن خطای ایجاد شده در راستای این پروفیل به خیز ابزار و رابطه میان خیز ابزار و نیروهای ماشین کاری وارد شده به ابزار، به دست می آیند. با استفاده از آزمایش، دیده می شود که نتایج به دست آمده برای نیروهای ماشین کاری و خطای سطح حاصل از به کار بردن ضرایب برشی جدید محاسبه شده با مدل ارائه شده در این مقاله، دقت خوبی دارند.

ضرایب نیروی برشی
تیغه فرز انگشتی
نیروهای برش کاری
خیز ابزار، خطای سطح

Estimation of Cutting Force Coefficients for Flat End Mills by Measuring of Surface Error

Yousef Mohammadi, Hossein Amirabadi*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

Keywords

Cutting Force Coefficients
Flat End Mill
Cutting Forces
Tool deflection
surface error

Abstract

In this paper, a new approach for calculation of the cutting force coefficients which are the most important and significant factor in prediction of machining forces, is presented for flat end mills. The proposed methodology models a practical mechanism for collecting and analyzing experimental data. The surface error is the measured parameter used for defining the cutting-force coefficients. Neglecting the effects of other factors that cause to deflect cutting tools, in cutting process, the machining forces imposed on flat end mills are considered as the most important factor in deflection of machining tool that leading surface error. In this research, The Ving-Lee model which is an appropriate force model with a good ability on milling process mechanical modeling is used. In proposed method, the related cutting force coefficients of the force model are calculated by measuring the surface error on a profile of the machined surface along End Mill that caused by tool deflection under machining forces, and by correlate error along this profile to tool deflection and use of equation between tool deflection and cutting force. The resulted forces and surface error, when applying the new cutting-force coefficients show a good agreement between the predicted and measured.

1- مقدمه

مدل سازی نیروهای برشی در فرایند فرز کاری انجام شده است. در این میان مدل های مکانیکی، معمول ترین و رایج ترین روش برای محاسبه و پیش بینی نیروهای برشی بوده اند. در این مدل ها فرایند را با استفاده از هندسه عملیات ماشین کاری، هندسه ابزار برشی، شرایط ماشین کاری و ضرایب ماشین کاری شبیه سازی می کنند. با وجود گسترش و پیشرفت های وسیع در زمینه مدل های مکانیکی و مدل های متنوعی که در این زمینه ارائه

یکی از اساسی ترین نیازها در تحلیل و شبیه سازی فرایندهای گوناگون فرز کاری، تخمین و مدل سازی نیروهای ماشین کاری می باشد. پیش بینی و محاسبه نیروهای برشی در ارزیابی قابلیت ماشین کاری، ظرفیت فرایند، سایش و عمر ابزار، دقت ماشین کاری، زبری سطح و طراحی و انتخاب ابزار و ماشین ابزار مهم و ضروری است [1]. تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص

Please cite this article using:

Y. Mohammadi, H. Amirabadi, Estimation of Cutting Force Coefficients for Flat End Mills by Measuring of Surface Error, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 50-59, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مشترک، در همه روش‌ها نیاز به استفاده از تجهیزات جدید و گران‌قیمت و تجربه، مهارت و آموزش می‌باشد. لذا هدف از این پژوهش ارائه روشی برای محاسبه ضرایب برشی می‌باشد که بدون نیاز به اندازه‌گیری نیروهای برشی توسط سنسورهای نیرو و سنخ، با استفاده از اندازه‌گیری خطای سطح حاصل از فرایند و بکارگیری این خطاها ضرایب نیروی برشی را محاسبه کرد. با استفاده از این روش نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و اپراتورهای مجرب نمی‌باشد. در پژوهش حاضر همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده، ابتدا نیروها سپس ضرایب برشی محاسبه می‌گردند و با استفاده از این ضرایب در شرایط برشی متنوع نیروهای برش‌کاری قابل پیش‌بینی می‌باشند.

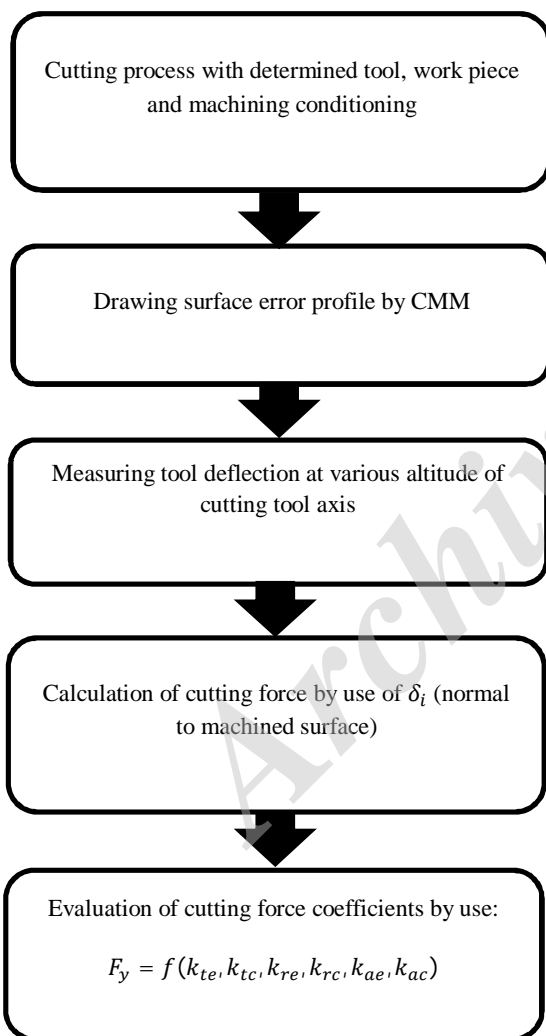


Fig. 1 Calculation flowchart of cutting force coefficients in this paper
شکل 1 نمودار روند محاسبه ضرایب برشی در این مقاله

2- وابسته کردن پروفیل سطح تراشیده شده به خیز ابزار
همان‌گونه که گفته شد عامل اصلی به وجود آورنده خطای سطح ایجاد شده تغییر شکل ابزار می‌باشد و از دیگر عوامل اثرگذار که

شده‌اند پیش‌بینی نیروهای ماشین‌کاری هنوز به ضرایب برشی که از طریق آزمایش به‌دست می‌آیند، وابسته می‌باشد. لذا فرایند به‌دست آوردن ضرایب برشی دقیق و قابل اعتماد برای شبیه‌سازی دقیق عملیات برش‌کاری مورد نیاز و ضروری می‌باشد. صحت تخمین نیروهای ماشین‌کاری به دقت در محاسبه ضرایب ماشین‌کاری برمی‌گردد، به گونه‌ای که اگر این ضرایب به درستی تعیین نشوند نتایج به‌دست آمده از محاسبه نیروها قابل اطمینان نخواهند بود. که این موضوع در صنعت و در جاهایی که مخصوصاً تولید تکی یا دسته‌ای دارند، جاهایی که تنوع در مواد مصرفی دارند، فرایندهای برش‌کاری و هندسه ابزار تنوع زیادی دارد و قطعات تولیدی نیازمند دقت ابعادی و کیفیت سطح بالا می‌باشند، ضروری است.

بر اساس مطالعات انجام شده توسط پژوهشگرهای مختلف، برای محاسبه ضرایب برشی، ابتدا نیروهای برشی با استفاده از روش‌های تجربی محاسبه می‌شوند و با استفاده از نیروهای برشی تجربی اندازه‌گیری شده و به‌کار بردن روابط نیرویی مربوط به مدل مورد نظر و برازش منحنی‌های نیرویی ضرایب نیروی برشی را محاسبه می‌کنند [2]. روش‌های به‌دست آوردن نیروهای برشی به صورت تجربی برای محاسبه ضرایب برشی عبارتند از: اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از دینامومتر [2]، اندازه‌گیری با استفاده از صفحه نیرویی و حلقه‌های نیرویی [3، 4]، اندازه‌گیری نیروی یاتاقان با جایگذاری گیج‌های کرنشی در یاتاقان اسپیندل [5]، اندازه‌گیری با استفاده از پین‌ها و سنسورهای انبساطی [6]، اندازه‌گیری جریان و توان موتور اسپیندل [7، 8]. توان موتور اسپیندل [9] و جریان موتور اسپیندل [10] برای تخمین و به‌دست آوردن گشتاور برشی استفاده می‌شوند. لذا با استفاده از مدل جریان و توان موتور اسپیندل ضرایب برشی را برای نیروی مماسی به‌دست می‌آورند. با اندازه‌گیری متوسط توان موتور، ضرایب نیروی برشی مماسی (K_{tc}, K_{te}) هنگام ماشین‌کاری با شرایط برشی و هندسه درگیری معلوم قابل محاسبه است.

با مطالعه پژوهش‌های انجام شده نتیجه گرفته می‌شود که محاسبه ضرایب ماشین‌کاری برای تخمین و پیش‌بینی صحیح نیروهای ماشین‌کاری بسیار مهم می‌باشد. روش‌های محاسبه ضرایب برشی در عملیات فرز‌کاری به طور گسترده بر این اساس هستند که ابتدا نیروهای برشی برای یک دور گردش کامل ابزار محاسبه می‌شود و سپس بر اساس داده‌های تجربی نیروها، ضرایب برشی محاسبه می‌شوند. لذا صحت و دقت ضرایب ماشین‌کاری به شدت به روش تجربی اندازه‌گیری نیروهای ماشین‌کاری، و وسایل اندازه‌گیری وابسته می‌باشد و نکته

چرخشی ابزار است و بر حسب rpm¹ است. ارتفاع نقطه B نسبت به نقطه A با W نشان داده شده است و از رابطه (2) محاسبه می شود.

$$W = \frac{R \cdot \phi}{\tan \alpha_H} \quad (2)$$

R شعاع ابزار و α_H زاویه ماریچج ابزار است.

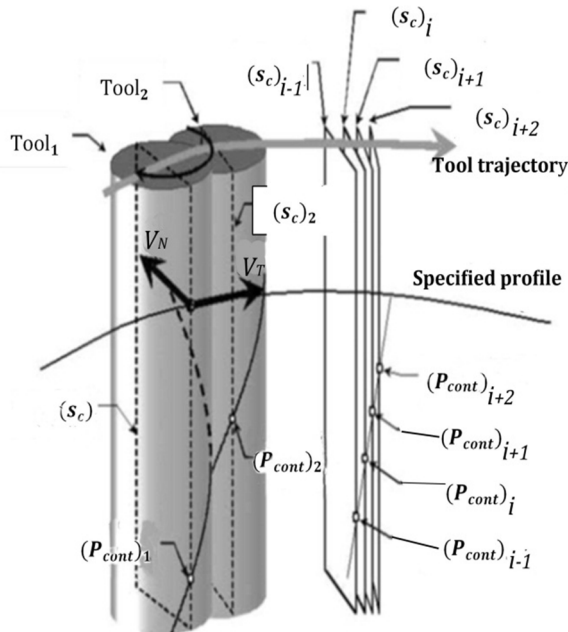


Fig. 2 Geometrical definition of contact points [11]

شکل 2 تعریف هندسی نقطه تماس [11]

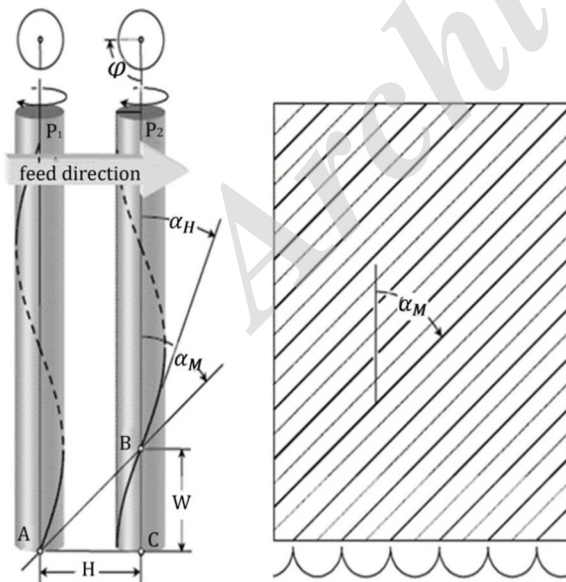


Fig. 3 Mark leave on the part by the tools flute [11]

شکل 3 خط اثر ناشی از لبه برشی ابزار روی سطح ماشین کاری شد [11]

تاثیر آنها در مقابل تغییر شکل ابزار خیلی کم است، صرف نظر می شود. به این منظور باید پروفیل سطح تراشیده شده را به تغییر شکل ابزار وابسته کرد؛ لذا ابتدا مدلی که بر اساس آن ابزار و قطعه کار در هر لحظه با همدیگر در تماس هستند، مشخص می شود و در گام بعدی مدل تغییر شکل ابزار بر اساس موقعیت اعمال و میزان نیرو توضیح داده می شود.

2-1- رویکرد نقطه تماس ابزار-قطعه کار

در این روش تغییرات نیروی برشی به عنوان تابعی از موقعیت زاویه ای ابزار برشی در نظر گرفته می شود [11,12]. نقطه تماس، نقطه تقاطع بین شیار ابزار و قطعه کار است. هنگامی که ابزار در حال تراشیدن سطح ماشین کاری است، بی نهایت نقطه تماس بین قطعه کار و لبه برشی ابزار وجود دارد. تجمع نقاط تماس سطح نهایی را به وجود می آورند. بنابراین نقطه تماس به عنوان نقطه تقاطع لبه ابزار و صفحه ایست که محور ابزار را دربر می گیرد و بر پروفیل مشخص شده (مسیر حرکت ابزار یا مسیر پیشروی ابزار روی قطعه کار) عمود می باشد. همان طور که از تعریف پیدا است نقطه تماس نقطه ای است که لبه برشی ابزار در هر لحظه در آن نقطه بر سطح تراشیده شده مماس است.

شکل 2، ابزار برشی را در دو موقعیت متوالی نمایش می دهد (که با ابزار شماره یک و شماره دو نشان داده شده است). این ابزارها صفحاتی دارند که با $S_{c,1}$ و $S_{c,2}$ نشان داده شده اند و دربرگیرنده محور ابزار و بردار V_n می باشند (V_n بردار عمود بر موقعیت روی پروفیل مسیر پیشروی). همان طور که قبلاً تعریف شد نقاط تماس بین ابزار و قطعه کار $P_{cont,1}$ و $P_{cont,2}$ هستند. وقتی که ابزار حرکت می کند و می چرخد نقطه $P_{cont,1}$ به سمت نقطه $P_{cont,2}$ حرکت می کند که این حرکت یک اثر بر روی سطح قطعه کار برجای می گذارد. حرکت این نقطه باعث ایجاد سطح تراشیده شده، در فاصله بین این دو نقطه می شود.

شکل 3 ابزار و قطعه کار را در دو موقعیت ابزار نشان می دهد. که نقاط A و B دو نقطه تماس بین منحنی D_1 و قطعه کار، در دو موقعیت P_1 و P_2 می باشند. وقتی ابزار از موقعیت P_1 به طرف موقعیت P_2 حرکت می کند، ابزار به اندازه زاویه ϕ می چرخد و نقطه تماس روی یک خط مستقیم حرکت می کند. اگر H فاصله بین دو موقعیت P_1 و P_2 باشد، به منظور به دست آوردن این فاصله از رابطه (1) استفاده می شود [11].

$$H = \frac{f \cdot \phi}{2\pi \cdot V_R} \quad (1)$$

f سرعت پیشروی بر حسب (mm/min) و V_R سرعت

¹. Revolution Per Minute

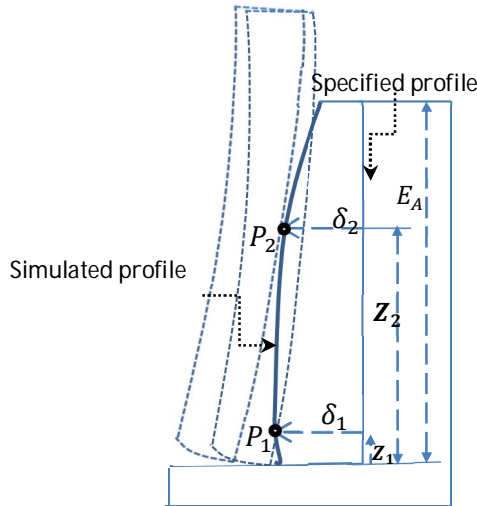


Fig. 4 Mark for one contact point

شکل 4 اثر یک نقطه تماس روی لبه برشی

3- مدلی برای محاسبه تغییر شکل ابزار

با استفاده از یک مدل استاتیک، ابزار تیر یک سرگردار در نظر گرفته می‌شود. که این تیر از دو قسمت تشکیل می‌شود یعنی یک تیر استوانه‌ای دو قسمتی، در قسمتی از تیر که لبه برشی وجود دارد قطر معادل آن در نظر گرفته می‌شود که با قطر قسمت انتهایی ابزار که لبه برشی وجود ندارد، متفاوت است. برای محاسبه قطر معادل برای ابزار با چهار لبه برشی، از روشی که کپس¹، ارائه داده است استفاده می‌شود [13]. با توجه به مدلی که توسط داچوا² بیان شده است [14]، انحراف ابزار در ارتفاع $h = z_i$ در طول محور z به دلیل نیروی برشی F در نتیجه خیز و تغییر شکل زاویه‌ای قسمت استوانه‌ای بدون لبه δ_s و θ_s و خیز قسمت لبه دار ابزار برشی (δ_t) که در شکل 5 نشان داده شده است، از رابطه (5) محاسبه می‌شود [14].

$$\delta(h) = \delta_s + \theta_s(h) + \delta_t(h) \quad (5)$$

در رابطه (5) انحراف ابزار در نتیجه نیروی وارد شده بر لبه می‌باشد.

$$\delta_s = \frac{F_Y}{6E \cdot I_s} [-(L_{ct} - L_t)^3 + 3(L_{ct} - L_t)^2(L_{ct} - Z_F)] \quad (6)$$

$$\theta_s(h) = \frac{F_Y}{2E \cdot I_s} [-(L_{ct} - L_t)^2 + 2(L_{ct} - L_t)(L_{ct} - Z_F)](L_t - h) \quad (7)$$

$$\delta_t(h) = \frac{F_Y}{6E \cdot I_t} [(\max(0, Z_F - h))^3 - (L_t - h)^3 + 3(L_t - h)^2(L_t - Z_F)] \quad (8)$$

ابزار در هنگام براده برداری و ایجاد سطح ماشین کاری علاوه بر حرکت چرخشی حول محور z در راستای محور x حرکت پیشروی نیز دارد که در نتیجه این دو حرکت، خط اثر AB در راستای محور z نمی‌باشد، بلکه با محور ابزار (z) زاویه α_M را می‌سازد که این زاویه از رابطه (3) به دست می‌آید [11].

$$\alpha_M = \tan^{-1} \left(\frac{f \cdot \tan \alpha_H}{2\pi R \cdot V_R} \right) \quad (3)$$

با در نظر گرفتن خیز ابزار نقاط تماس بر روی خط مستقیم P_2 و P_1 قرار نمی‌گیرند. این نقاط برحسب تغییرات خیز ابزار که وابسته به موقعیت زاویه‌ای ابزار است روی یک منحنی که بر سطح تراشیده مماس است حرکت می‌کند. با توجه به این که سطح ماشین کاری شده حاصل اثر نقطه تماس ابزار است در نتیجه این سطح تابع موقعیت زاویه‌ای θ ابزار و مختصات آن نقطه در صفحه yz که وابسته به خیز ابزار است، می‌باشد. اثر نقطه تماس در شکل 4 نشان داده شده است. در این شکل دو نقطه تماس $P_{cont,1}$ و $P_{cont,2}$ در نظر گرفته شده‌اند. و موقعیت آنها به وسیله $\delta(z_1, \theta_1)$ و $\delta(z_2, \theta_2)$ نشان داده می‌شود، که مقدار آن وابسته به موقعیت زاویه‌ای ابزار و ارتفاع نقطه روی محور z می‌باشد [11].

نیروهای وارد بر ابزار در حین فرایند برش به طور وابسته به زاویه چرخش ابزار تغییر می‌کنند در نتیجه میزان انحراف ابزار نیز متغیر است. یعنی در ارتفاع‌های مختلف از عمق برشی روی سطح قطعه کار میزان انحراف و خیز ابزار متفاوت است. رابطه بین ارتفاع نقطه (z) و موقعیت زاویه‌ای به صورت رابطه (4) بیان می‌شود.

$$z = \frac{R \cdot \theta}{\tan \alpha_H} \quad z \in [0; E_A] \quad (4)$$

خط اثر نقطه تماس ابزار خمیده شده به صورت تابعی از متغیر θ بیان شده است. اگر $T/N_D \leq E_A$ باشد (T کمترین ارتفاع در راستای محور z که لبه برشی یک دور به دور ابزار پیچیده است، E_A عمق محوری برش و N_D تعداد لبه برشی ابزار) پروفیل تغییر شکل یافته قطعه کار به وسیله چندین نقطه تماس تولید می‌شو و ابزار در یک لحظه در صفحه تراشیده شده، در چند نقطه با قطعه کار در تماس است. از آنجا که در سراسر عملیات براده برداری فرایند گفته شده در بالا تکرار می‌شود. لذا در ارتفاع‌های یکسان از عمق برشی میزان تغییر شکل ابزار و در نتیجه خطاهای سطحی ناشی از انحراف ابزار با هم برابر هستند. با توجه به این موضوع می‌توان زاویه α_M را نادیده گرفت و پروفیل خط اثر که همان پروفیل سطح ماشین کاری شده است، را در راستای محور z رسم کرد (شکل 4).

¹ Kops
² Datcheva

[16] به منظور به دست آوردن نیروها استفاده شده است. ابزار برشی در راستای محور ابزار به دیسک‌هایی با ضخامت dz تقسیم شده است که برای هر کدام از این دیسک‌ها جزء نیروهای مماسی، شعاعی و محوری که بر طول جزئی dS از لبه وارد می‌شود (شکل 6)، از رابطه (11) به دست می‌آیند [17].

$$\begin{cases} dF_t(\varnothing, z) = K_{te} \cdot dS + K_{tc} \cdot t_n(\varnothing, z, \kappa) \cdot db \\ dF_r(\varnothing, z) = K_{re} \cdot dS + K_{rc} \cdot t_n(\varnothing, z, \kappa) \cdot db \\ dF_a(\varnothing, z) = K_{ae} \cdot dS + K_{ac} \cdot t_n(\varnothing, z, \kappa) \cdot db \end{cases} \quad (11)$$

$t_n(\varnothing, z, \kappa)$ ضخامت براده تراشیده نشده در جهت عمود بر لبه برشی است و با تغییر موقعیت نقطه برشی روی لبه ابزار تغییر می‌کند. db طول تصویر المان بسیار کوچک لبه برشی در راستای سرعت برشی است و dS طول المان از لبه برشی است [18].

نیروهای برشی در هر جهت شامل دو قسمت می‌باشند. مؤلفه نیروی لبه‌ای (e) و مؤلفه نیروی برشی (c) K_{te}, K_{re}, K_{ae} . ضرایب برشی لبه‌ای، بر حسب $\frac{N}{mm}$ و مربوط به لبه برشی ابزار هستند. K_{tc}, K_{rc}, K_{ac} ثوابت مربوط به نیروی برشی می‌باشند. κ زاویه محوری می‌باشد. این زاویه در هر نقطه از لبه برش، عبارت است از زاویه بین خطی که محور ابزار را قطع می‌کند و بطور عمود بر لبه برش در آن نقطه از لبه برشی می‌گذرد (شکل 5). ضرایب لبه برشی با استفاده از آزمایش‌های تجربی به دست می‌آیند.

نیروهای حاصل از برش کاری در مختصات کارتیزین با استفاده از ماتریس تبدیل T و به کارگیری رابطه‌های (12) محاسبه می‌شوند [19].

$$\begin{cases} dF_{xyz} \end{cases} = [T] \begin{cases} dF_{rta} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\kappa) \sin(\varnothing) & -\cos(\varnothing) & -\cos(\kappa) \sin(\varnothing) \\ -\sin(\kappa) \cos(\varnothing) & \sin(\varnothing) & -\cos(\kappa) \cos(\varnothing) \\ \cos(\kappa) & 0 & -\sin(\kappa) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{bmatrix} \quad (12)$$

بطور کلی نیروی F که روی شیار با عمق محوری z وارد می‌شود از رابطه (13) محاسبه می‌شود [19].

$$\{F\} = \int dF \quad (13)$$

با استفاده از روابط (11-13) نیروی وارد شده بر هر لبه در محورهای مختصات کارتیزین از رابطه (14) محاسبه می‌شود [19]. نیروهای به دست آمده از انتگرال‌های رابطه (14) نیروهای وارد شده بر هر لبه در موقعیت زاویه‌ای θ ابزار می‌باشد.

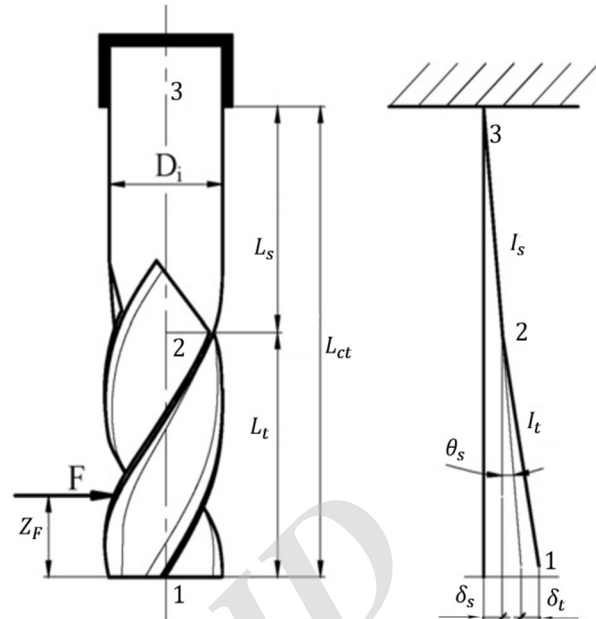


Fig. 5 Cutting tool as a two-step cylindrical cantilever beam [15]

شکل 5 ابزار برشی به عنوان یک تیر یک سر گیردار که از دو قسمت استوانه‌ای تشکیل شده است [15]

E مدول الاستیسیته یانگ، I_s ممان سطحی دوم قسمت بدنه و I_t ممان سطحی دوم قسمت لبه دار ابزار، h ارتفاع نقطه تماس با سطح (که میزان انحراف ابزار در همین نقطه باید به دست آورده شود)، Z_F مرکز اعمال نیرو متمرکز روی هر لبه می‌باشد. با توجه به روابط گفته شده انحراف کلی ابزار در موقعیت زاویه‌ای \varnothing از رابطه (9) به دست می‌آید.

$$\delta_{total}(h) = \sum_{j=1}^N \delta_j(h) \quad (9)$$

رابطه (5) به صورت روابط (10) نوشته می‌شود:

$$\delta(h) = F_Y \left(\frac{1}{6E \cdot I_s} (\dots) + \frac{1}{2E \cdot I_s} (\dots) + \frac{1}{6E \cdot I_t} (\dots) \right)$$

$$\delta(h) = F_Y \cdot A_{Y1}$$

$$A_{Y1} = \left[\frac{1}{6E \cdot I_s} [-(L_{ct} - L_t)^3 + 3(L_{ct} - L_t)(L_{ct} - Z_F)] \right. \\ \left. + \frac{1}{2E \cdot I_s} [-(L_{ct} - L_t)^2 + 2(L_{ct} - L_t)(L_{ct} - Z_F)] (L_t - h) + \frac{F_Y}{6E \cdot I_t} [(\max(0, Z_F - h))^3 - (L_t - h)^3 + 3(L_t - h)^2(L_t - Z_F)] \right] \quad (10)$$

4- مدل سازی نیروهای ماشین کاری

4-1- مدل نیروهای ماشین کاری

در پژوهش حاضر از مدل نیرویی ارایه داده شده توسط لی¹

¹ Ving Lee

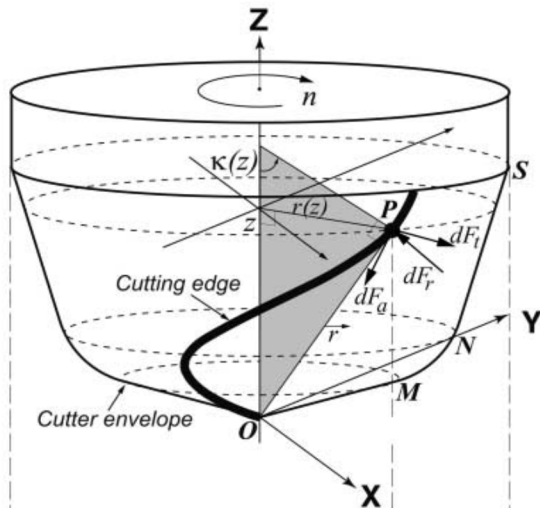


Fig. 7 General Tools for displaying of geometrical parameters of Cutting Tool [7]

شکل 7 نمای کلی یک تیغه فرز انگشتی جهت نشان دادن پارامترهای هندسی [7]

$$\frac{dz(\phi_j)}{d\phi_j} = -\frac{D}{2\tan i_0} \quad (20)$$

برای تیغه فرز سر تخت انگشتی چون فاصله شعاعی $r(z)$ عددی ثابت است و برابر شعاع ابزار است پس $r'(\phi_j) = 0$ است. و معادله طول دیفرانسیلی لبه برشی به صورت رابطه (21) ساده می شود.

$$ds = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + 0 + \left(\frac{-D}{2\tan i_0}\right)^2} \times \frac{-2\tan i_0}{D} = \frac{dz}{\cos i_0} \quad (21)$$

برای ابزار برشی با توجه به شکل استوانه ای ابزار زاویه $\kappa = \pi/2$ و db و t_n از رابطه (22) محاسبه می شود.

$$db = \frac{dz}{\sin \kappa} = dz \quad \text{و} \quad t_n = h * \sin \phi_j \quad (22)$$

h پیشروی ابزار می باشد. برای ابزار تیغه فرز انگشتی سر تخت با توجه به رابطه های (16-22) رابطه (11) به صورت رابطه (23) و رابطه (12) به صورت رابطه (24) نوشته می شود.

$$\begin{cases} dF_t(\theta, z) = (K_{te} + K_{tc}h)dz \\ dF_r(\theta, z) = (K_{re} + K_{rc}h)dz \\ dF_a(\theta, z) = (K_{ae} + K_{ac}h)dz \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} dF_x(\phi_j) &= -dF_t \cdot \cos \phi_j - dF_r \cdot \sin \phi_j \\ dF_y(\phi_j) &= +dF_t \cdot \sin \phi_j - dF_r \cdot \cos \phi_j \end{aligned} \quad (24)$$

با استفاده از معادلات روابط (23، 24) و انتگرال گیری عددی در طول محور ابزار برای هر لبه نیروی برش در ابزار در راستاهای y, x برای هر لبه برشی از رابطه (25) به دست می آید. و برای محاسبه نیروی کل وارد بر ابزار برش در هر راستا با جایگذاری رابطه (25) در رابطه (15) محاسبه می شود.

$$\begin{cases} F_{xj}[\theta(z)] = \int_{z_1}^{z_2} (-dF_{rj} \cdot \sin(\kappa_j) \cdot \sin(\phi_j) - dF_{tj} \cdot \cos(\phi_j) - dF_{aj} \cdot \cos(\kappa_j) \cdot \sin(\phi_j)) dz \\ F_{yj}[\theta(z)] = \int_{z_1}^{z_2} (-dF_{rj} \cdot \sin(\kappa_j) \cdot \cos(\phi_j) + dF_{tj} \cdot \sin(\phi_j) - dF_{aj} \cdot \cos(\kappa_j) \cdot \cos(\phi_j)) dz \\ F_{zj}[\theta(z)] = \int_{z_1}^{z_2} (dF_{rj} \cdot \cos(\kappa_j) - dF_{aj} \cdot \sin(\kappa_j)) dz \end{cases} \quad (14)$$

برای محاسبه نیروی وارد شده بر ابزار باید مجموع نیروهای وارد شده بر همه لبه ها را محاسبه کرد. لذا نیروی وارد شده بر ابزار در موقعیت زاویه ای θ از رابطه (15) به دست می آید [19]

$$\begin{aligned} F_x[\theta(z)] &= \sum_{j=1}^N F_{xj}[\theta(z)] \quad \& \quad F_y[\theta(z)] = \sum_{j=1}^N F_{yj}[\theta(z)] \\ F_z[\theta(z)] &= \sum_{j=1}^N F_{zj}[\theta(z)] \end{aligned} \quad (15)$$

2-4- معادلات نیرویی برای ابزار استوانه ای سر تخت

طول دیفرانسیلی (dS) که المان دیفرانسیلی لبه برشی می باشد از رابطه (16) محاسبه می شود [18].

$$dS = |dr| = \sqrt{r^2(\phi) + (r'(\phi))^2 + (z'(\phi))^2} d\phi, \quad r'(\phi) = \frac{dr(\phi)}{d\phi}, \quad z'(\phi) = \frac{dz(\phi)}{d\phi} \quad (16)$$

لبه برشی مارپیچ پیرامون ابزار پیچیده شده است (شکل 7). با در نظر گرفتن نوک ابزار به عنوان مبدا مختصات و رسم کردن بردارهایی از مبدا مختصات به نقطه دلخواه p معادله کلی بردار \vec{r} را به صورت رابطه (17) بیان کرد [18].

$$\vec{r} = x_j \vec{i} + y_j \vec{j} + z_j \vec{k} = r(\phi_j)(\sin \phi_j \vec{i} + \cos \phi_j \vec{j}) + z(\phi_j) \vec{k} \quad (17)$$

در رابطه (17)، ϕ_j زاویه نفوذ شعاعی نقطه p روی لبه برشی λ_m می باشد. زاویه نفوذ شعاعی به صورت تابعی از زاویه دوران θ ، زاویه موقعیت لبه ϕ_{pj} و زاویه مارپیچ محلی i_0 در نقطه p تغییر می کند. اولین لبه به عنوان لبه مرجع در نظر گرفته می شود و زاویه دوران آن در ارتفاع $z=0$ می باشد. زاویه نفوذ شعاعی برای لبه λ_m در ارتفاع از رابطه (18) به دست می آید [18].

$$\phi_j(z) = \theta + \sum_{j=1}^n \phi_{pj} - \psi(z) \quad (18)$$

ϕ_{pj} زاویه گام بین لبه های برنده است. زاویه تاخیر شعاعی $\psi(z)$ به دلیل زاویه مارپیچ محلی i_0 ایجاد می گردد. با توجه به هندسه ابزار برشی سر تخت از رابطه (19) به دست می آید [18].

$$\psi(z) = \frac{2 \cdot z \cdot \tan i_0}{D} \quad (19)$$

با جایگزینی رابطه (19) در رابطه (18) و مشتق گیری از این رابطه نسبت به θ رابطه (20) حاصل می شود.

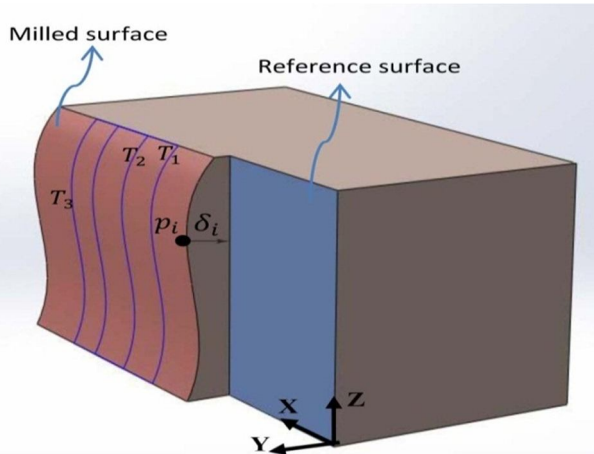


Fig. 8 Milled surface and trajectories for measurement of surface errors
شکل 8 سطح فرزکاری شده و مسیرهای اندازه‌گیری خطای سطح

جدول 1 شرایط آزمایش برای محاسبه ضرایب برشی برای ابزار سر تخت

مقدار	پارامترهای برش کاری
6	عمق محوری برش (mm)
5	عمق شعاعی برش (mm)
400	سرعت اسپیندل دستگاه (RPM)
80	سرعت پیشروی میز (mm/min)
0/05	پیشروی به ازای یک دندانه در یک دور (mm)

جدول 2 شرایط آزمایش برای صحت سنجی ابزار سر تخت

مقدار	پارامترهای برش کاری
10	عمق محوری برش (mm)
5	عمق شعاعی برش (mm)
400	سرعت اسپیندل دستگاه (RPM)
100	سرعت پیشروی میز (mm/min)
0/625	پیشروی به ازای یک دندانه در یک دور (mm)

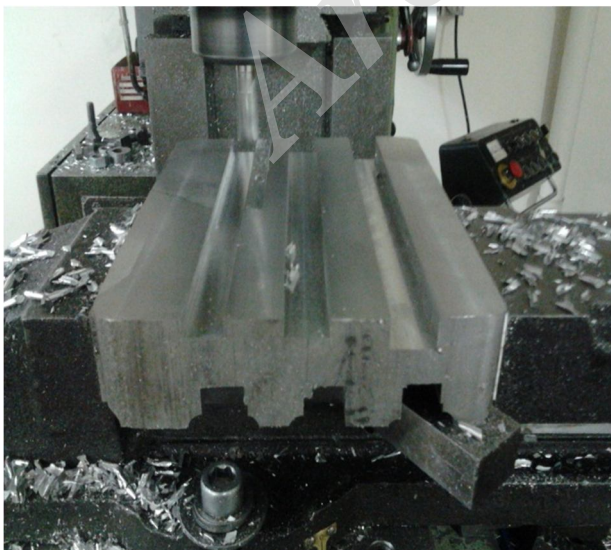


Fig. 9 Setup for tool and work piece an direction of feeding

شکل 9 نمایی از نحوه بستن قطعه کار و مسیر حرکت ابزار برشی

5- محاسبه ضرایب نیروی برشی

گام اول: N نقطه روی مسیر T_j (مشخص شده روی سطح تراشیده شده در شکل 7) انتخاب می‌شوند، و هر نقطه با P_i بطوری که $i \in [1, 2, \dots, N]$ مشخص می‌شود (شکل 5). گام دوم: فاصله هر نقطه P_i از سطح مرجع اندازه‌گیری می‌شود که این فاصله δ_i (در شکل 7 با بردار δ_i نشان داده شده است) همان خیز ابزار در ارتفاع Z_i از ابزار است. جهت بالا بردن دقت می‌توان مقدار δ_i را در ارتفاع Z_i یکسان بر روی چندین مسیر T_j اندازه‌گیری و مقدار میانگین δ_i بر روی این مسیرها را به عنوان δ_i نهایی مورد استفاده قرار داد. (در شکل 8 چهار مسیر اندازه‌گیری خطای سطح T_1 تا T_4 نشان داده شده است). گام سوم: با استفاده از رابطه (4) زاویه θ_i مربوط به Z_i محاسبه می‌شود. گام چهارم: با داشتن Z_i ، δ_i و θ_i و بکارگیری رابطه (10) مقدار نیروی F_y در زاویه چرخش ابزار θ_i محاسبه می‌شود. گام پنجم: با داشتن مقادیر نیروی F_y بر حسب زاویه θ_i و برآزش منحنی رابطه نیروی برشی (رابطه 15) که تابعی است از متغیرهای هندسی فرایند و ضرایب برشی، متغیرهای مجهول این معادله نیرویی که همان ضرایب برشی می‌باشند محاسبه می‌شوند.

6- صحت‌سنجی و نتیجه‌گیری

روش‌ها و الگوریتم‌های بیان شده در بخش‌های قبل برای به‌دست آوردن ضرایب نیروی برشی، در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و ضرایب مذکور محاسبه شدند. به منظور اعتبارسنجی با استفاده از ابزار سر تخت DIN844 HSS BN R 30° 4F Short $10 \times 10 \times 30 \times 75$ مسیرهایی بر روی یک قطعه کار از جنس آلومینیم 7001T6، با شرایط آزمایشگاهی که در جدول‌های 1 و 2 بیان شده است، بغل تراشی شده و منحنی موج نیرویی وارد شده در این مسیر با استفاده از دستگاه دینامومتر کیسلر¹ و همچنین خطای سطحی به‌وجود آمده با استفاده از دستگاه CMM موجود در شرکت ایپکو²، اندازه‌گیری شده است. در شکل 9 نحوه بستن قطعه کار و مسیر حرکت پیشروی ابزار روی قطعه کار نشان داده شده است.

6-1- محاسبه ضرایب برشی با استفاده از خطای سطح برای

ابزارهای سر تخت

با استفاده از ابزار سر تخت مسیر مستقیمی بر روی قطعه کار با شرایط آزمایش گفته شده در جدول 1 فرزکاری شده است.

¹. Kistler Dynamometer

². Iran Khodro Power train company

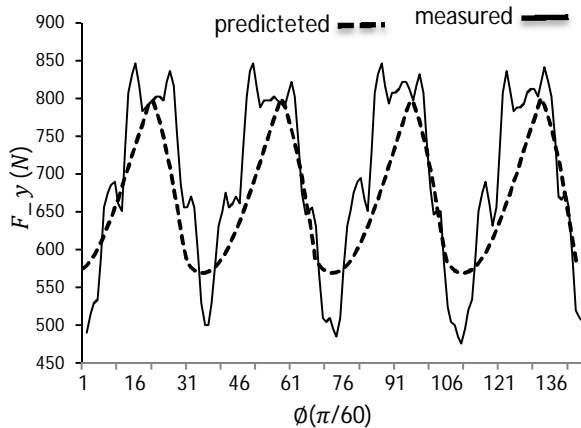


Fig. 10 The comparison of measured force with predicted force in perpendicular to milled surface direction

شکل 10 مقایسه نیروی اندازه‌گیری شده با نیروی پیش‌بینی شده در راستای محور عمود بر سطح فرز کاری شده

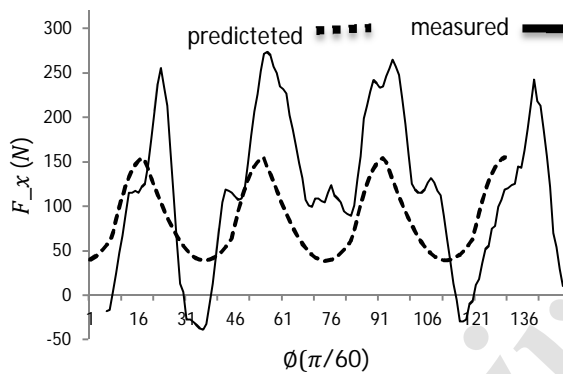


Fig. 11 the comparison of measured force with predicted force in direction of tool movement

شکل 11 مقایسه موج نیرویی اندازه‌گیری شده با موج نیرویی پیش‌بینی شده در راستای حرکت ابزار

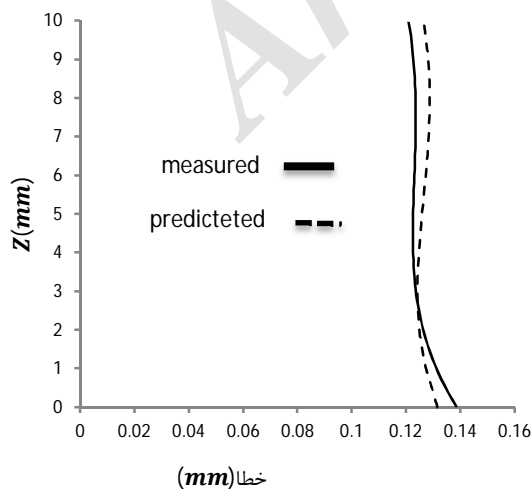


Fig. 12 The comparison of measured surface error with predicted surface error

شکل 12 مقایسه خطای سطح اندازه‌گیری شده با خطای سطح پیش‌بینی شده

نیروهای وارده شده در فرایند فرزکاری اندازه‌گیری شده و خطای سطح ایجاد شده در این برش‌کاری با استفاده از دستگاه CMM اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از کد نوشته شده در نرم افزار متلب و به‌کارگیری این خطاها به عنوان داده‌های ورودی و استفاده از روش حداقل مربعات ضرایب برشی به صورت زیر به دست آمده‌اند.

$$\begin{aligned} k_{te} &= -9.942 & k_{tc} &= 643.171 \\ k_{re} &= 10.6 & k_{rc} &= 462.004 \end{aligned}$$

2-6- اعتبار سنجی ضرایب برشی برای ابزار سر تخت

برای این منظور نیروهای اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشی جدول 2 با نیروهای پیش‌بینی شده مقایسه شده‌است در شکل‌های 8 و 9 نمودار این نیروها به صورت مقایسه‌ای ترسیم شده‌است. و خطای سطح اندازه‌گیری شده با دستگاه CMM در آزمایش جدول 2 با خطای سطح پیش‌بینی شده، در شکل 10 به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است.

با توجه به نمودار شکل 10 و مقایسه بین منحنی اندازه‌گیری شده و منحنی پیش‌بینی شده نیرو، دیده می‌شود که روند تغییرات نیرو برای هردو نمودار از لحاظ کیفی شبیه می‌باشند و هردو نمودار به طور کلی از نوع نمودارهای سینوسی می‌باشند. در شکل 10 که نمودار نیرویی مربوط به نیرو در راستای محور y می‌باشد مقدار خطا در محاسبه بیشترین نیرو 5/8 درصد است و میزان خطا در پیش‌بینی کمترین مقدار نیرو 14 درصد می‌باشد که این میزان خطا قابل قبول است. برای شکل 10 که نیرو در راستای محور x را نشان داده است برای مقدار متوسط نیروی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب 90 و 120 می‌باشد. که مقدار خطا در پیش‌بینی نیرو 25 درصد است.

در شکل 11 مقایسه خطای سطح اندازه‌گیری شده با خطای سطح پیش‌بینی شده برای این آزمایش نشان داده شده‌است. دیده می‌شود که روند نمودار تغییرات خطای سطح در هر دو نمودار پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده از نظر کیفی مشابه می‌باشد ولی از لحاظ کمی، مقداری با هم تفاوت دارند. با توجه به کل 12 دیده می‌شود که برای هردو نمودار بیشترین مقدار خطای سطح در ارتفاع $z=0$ و کمترین مقدار خطا در ارتفاع $z=10$ می‌باشد. در ارتفاع $z=0$ مقدار خطای سطح اندازه‌گیری شده 0/1341 و مقدار خطای سطح پیش‌بینی شده 0/1387 است. بیشترین خطا برای نمودار خطای پیش‌بینی شده در ارتفاع $z=0$ است و برابر 0/0073 میلی‌متر است و این مقدار خطا در مقابل مقدار متوسط خطای سطح اندازه‌گیری شده (0/127) مقدار ناچیزی است.

3-6- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری و پروفیل خطای آن ترسیم شده است. با مقایسه پروفیل خطای پیش‌بینی شده و خطای اندازه‌گیری شده، دیده می‌شود که این دو پروفیل به همدیگر نزدیک و با هم مشابه هستند. عدم تطابق نتایج بدست آمده با مقدار اندازه‌گیری شده نیرو به دلایل مختلف از جمله صرفنظر کردن اثرات حرارتی، خطای دستگاه، لنگی ابزار و غیره می‌باشد که در مقابل خطای مورد مطالعه این مقاله مقداری ناچیز می‌باشد و نزدیکی نتایج آزمایش به نتایج پیش‌بینی شده نیز تایید کننده این مطلب می‌باشد.

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر دیده می‌شود که حساسیت این روش به خطاهای ماشین‌کاری زیاد است. همچنین ضرایب برشی برای ابزار سر تخت در راستای محور ابزار، را نمی‌توان با روش ارائه شده در این پژوهش محاسبه کرد (هرچند که محاسبه این ضرایب از آنجا که در راستای بیشترین صلبیت ابزار می‌باشند جهت به‌دست آوردن خطای ابزار قابل صرف نظر کردن هستند). با توجه به مقایسه نمودارهای نیرویی دیده می‌شود که نیروهای پیش‌بینی شده (با استفاده از ضرایب برشی محاسبه شده با روش گفته شده در پژوهش حاضر) در راستای عمود بر سطح تراشیده شده نسبت به راستاهای دیگر دارای خطای خیلی کمتری می‌باشد (که جهت پیش‌بینی خطای سطح پیش‌بینی شده مطلوب است).

7- مراجع

- [1] J.H. Ko, W.S. Yun, D.W. Cho, K.F. Ehmann, Development of a virtual machining system, Part 1: approximation of size effect for cutting force prediction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, pp.1595-1605, 2002.
- [2] W.S. Yun, D.W. Cho, an improved methods for the determination of 3D cutting coefficient and runout parameters in end milling, *int j Adv Manuf Technol*, Vol.16, No. 12, pp.851-858, 2000.
- [3] S.S. Park, Y. Altintas, Dynamic compensation of spindle integrated force sensors with kalman filter. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.126, No. 3, pp. 443-452, 2004.
- [4] J. Chae, S.S. Park, High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 9, pp. 1433-1441, 2007.
- [5] G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. Knig, and R. Teti. Tool condition monitoring (TCM) the status of research and industrial application. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 44, No.2, pp. 541-567, 1995.

در این پژوهش با استفاده از مدل نیرویی ارائه شده توسط لی و به‌کارگیری مدل هندسی ابزار ارائه شده توسط آلتینتاس¹، نیروهای وارد شده بر ابزار فرز انگشتی سر تخت در فرایند فرزکاری (بغل تراشی) مدل شده‌اند. در معادلات روابط این نیروها ضرایب برشی به صورت مجهول هستند که باید محاسبه شوند. در این مقاله از روش ساده‌ای برای محاسبه ضرایب برشی استفاده شده است: خطای سطح ماشین‌کاری شده اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از پروفیل خطای سطح ضرایب برشی محاسبه می‌شوند. در این روش هم زمان کمتری برای به‌دست آوردن ضرایب برشی صرف می‌شود (در این روش یک آزمایش فرزکاری بیشتر نیاز نیست) و هم هزینه کمتری دارد (نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و کاربر متخصص ندارد).

به طور کلی می‌توان نتایج این مقاله را به صورت زیر بیان نمود:
- چگونگی ایجاد خطای سطح ناشی از خیز ابزار با ارایه مدلی براساس رویکرد نقطه تماس ابزار-قطعه کار توضیح داده شد است.

- مدلی برای محاسبه تغییر شکل ابزار به دلیل نیروی برشی اعمال شده به آن با در نظر گرفتن ابزار برش به عنوان یک تیر یک سر گیردار دارای دو مقطع متفاوت و اعمال نیرو به صورت متمرکز در نقطه تماس ابزار-قطعه کار ارایه شده است.

- با به‌کارگیری یک مدل نیرویی برشی، ضرایب این نیروی برشی محاسبه شده‌اند

- مدلی جهت محاسبه ضرایب نیروی برشی براساس اندازه‌گیری پروفیل خطای سطح، ارایه شده است.

- بر اساس اندازه‌گیری پروفیل خطای سطح، برای به‌دست آوردن ضرایب برشی، آزمایش برش‌کاری با شرایط مشخص شده در جدول 1، انجام شده و سپس ضرایب محاسبه شده است.

- برای اعتبارسنجی ضرایب برشی به‌دست‌آمده برای ابزار سر تخت، آزمایش برش‌کاری با شرایط آزمایشی دیگری (شرایط ذکر شده در جدول 2) انجام شده است. در این آزمایش قطعه کار بر روی دینامومتر (کالیبره شده با میز ماشین فرز) بسته شده است و نیروهای برش‌کاری حین فرایند اندازه‌گیری می‌شود و موج نیرویی اندازه‌گیری شده، در راستای هر کدام از محورهای مختصات ترسیم و ثبت می‌شود. با مقایسه منحنی نیروهای اندازه‌گیری شده و منحنی نیروهای پیش‌بینی شده، دیده می‌شود که این دو نوع منحنی با همدیگر هم‌خوانی خوبی دارند. همین‌طور خطای سطح در این آزمایش با استفاده از CMM

¹. Altintas

- and *Manufacture*, Vol. 34, No. 5, pp. 697-717, 1994.
- [13] L. Kops, D.T. Vo, Determination of the equivalent diameter of an end mill based on its compliance, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 39, No. 1, pp.93-96, 1990.
- [14] M. Dotcheva, H. Millward, A practical approach for identification of cutting force coefficients, *In Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Research*, Cranfield University, pp. 234-246, 2005.
- [15] M. Dotcheva, H. Millward, A. Lewis, The evaluation of cutting coefficients using surface error measurements, *Journal of material processing technology*, Vol. 196, No. 1-3, pp. 42-51, 2008.
- [16] K. Dunwoody, *Automated identification of cutting force coefficients and tool dynamics on CNC machines*, M.Sc Thesis, The University Of British Columbia, Vancouver, 2010.
- [17] M. Habibi, *Geometrical and tool deflection (force) error compensation for 5-axis CNC machine tools (by G-code modification)*, M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, 2011. (In Persian فارسی)
- [18] E. Budak, Y. Altintas, E.J. Armarego, Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, No. 2, pp. 216-224, 1996.
- [19] S. Engin, Y. Altintas, Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 41, No.15, pp. 2195-2212, 2001.
- [6] M. Santochi, G. Dini, G. Tantussi, and M. Beghini. A sensor integrated tool for cutting force monitoring. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 1, pp. 49-52, 1997.
- [7] Y. Altintas, Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurements. *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 14, No. 4, 1992.
- [8] T.Y. Kim and J. Kim. Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 8, pp.925 - 937, 1996.
- [9] N. Constantinides and S. Bennett. An investigation of methods for the on-line estimation of tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 27, No. 2, pp. 225-237, 1987.
- [10] Y. Oh, W. Kwon, and C. Chu. Drilling torque control using spindle motor current and its effect on tool wear. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 327-334, 2004.
- [11] Ph. De'pince', J.Y. Hascoe, Active integration of tool deflection effects in end milling. Part 1. Prediction of milled surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 9, pp. 937-944, 2006.
- [12] H.Y. Feng't" And Ch.H. Menq, The Prediction of Cutting Forces In The Ball-End Milling Process--I. Model Formulation and Model building Procedure, *International Journal of Machine Tools*