



## مدل سازی هندسی کف تراشی سطوح متشکل از برآمدگی های سهمی شکل توسط اینسرت مستطیلی در وضعیت هم راستایی پیشروی ابزار با امتداد برآمدگی ها

ایرج لیرابی<sup>۱</sup>، حسین امیرآبادی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\*پیرچند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، hamirabadi@birjand.ac.ir

### چکیده

با توسعه اینسرت های ماشین کاری کارآیی فرآیند فرزکاری کف تراشی افزایش چشمگیری یافته است. در این مقاله مدل سازی هندسی فرآیند کف تراشی سطوح متشکل از برآمدگی های سهمی شکل صورت پذیرفته است. این سطوح توسط فرآیند جوش ایجاد شده و برای بازسازی هندسه ای از دست رفته، افزایش مقاومت به سایش و خوردگی و پیاده سازی رویکرد ساخت سریع کاربرد دارند. به منظور حذف قسمت های ناخواسته و ایجاد سطحی یکپارچه، رویه برداری از این سطوح ناهموار ضروری می باشد. از سوی دیگر، به دلیل الگوی سطح، عمق براده برداری در هر لحظه متغیر می باشد. با توجه به تاثیر مستقیم عمق برش بر نیروهای ماشین کاری، در این مقاله مدلی دقیق برای عمق برش در فرآیند فرزکاری کف تراشی سطوح متشکل از برآمدگی های سهمی شکل ارائه گردیده است. بدین منظور نخست توسط روابط ریاضی، هندسه ای سطح متشکل از برآمدگی های سهمی شکل، دیسک استوانه ای و اینسرت مربعی با زاویه ای درگیری محوری ۹۰ درجه تعریف شده است. در ادامه منحنی های برخورد بررسی شده و توابع عمق برش مسئله استخراج گردیده است. در پایان اعتبارسنجی مدل عمق برش صورت پذیرفته و نحوه ادغام آن در مدل مکانیستیک نیرو مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله کارآمدی روش ارائه شده برای دستیابی به پارامتر عمق برش لحظه ای و مدل یکپارچه ای نیروی ماشین کاری نشان داده شده است.

**کلید واژگان:** فرزکاری کف تراشی، برآمدگی های سهمی شکل، منحنی برخورد، مدل عمق برش متغیر، مدل مکانیستیک نیرو

## Geometrical model for rectangular-inserted face milling of surfaces with parabolic cross-sections in parallel direction with machining feed

Iraj Lirabi, Hossein Amirabadi\*

Department of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran  
\*P.O.B. 97175-615 Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

### ABSTRACT

Developments in face milling inserted cutters have considerably contributed to the efficiency of the process. In this article, a geometrical model for face milling of surfaces with parabolic cross-sections has been considered. These surfaces are produced by welding techniques for purposes such as retrieving lost geometry, improving wear and fatigue properties and implementation of rapid manufacturing concept. So as to obtain an integral flat surface, the produced layer has to be truncated. On the other hand, machining depth is not constant due to special cross-section of the weld beads. A precise model for definition of depth of cut in face milling of surfaces with parabolic cross-sections is presented owing to have the most important effect on machining forces. First, the parabolic cross-sections and rectangular inserted disc with 90 degree axial immersion were defined using mathematical relations. Next, intersection curves were extracted and the related depths of cut were calculated. Finally, the depth of cut model was verified and the method to incorporate the results in the mechanistic force model was discussed. It is shown that the proposed method is very effective in finding the proper instantaneous depths of cut for use in the unified machining model.

**Keywords:** Face Milling, Intersection Curve, Mechanistic Force Model, Parabolic Cross-section, Variable Depth of Cut Model.

الکتریکی در حدود ۵۰ تا ۱۳۰ گرم بر دقیقه می باشد که با مدیریت حرارتی درست این نرخ رسوب تا ۸۰۰ گرم بر دقیقه نیز امکان پذیر است. این میزان در مقایسه با نرخ رسوب فرآیندهای جوش کاری لیزری و پرتوی الکترونی که به ترتیب حدود ۲ تا ۱۰ گرم در هر دقیقه می باشند، بسیار بیشتر است [۲]. با وجود کاهش بازدهی غالباً هر لایه پس از جوش کاری برای رفع عیوب احتمالی و دستیابی به سطحی یکپارچه مورد ماشین کاری قرار می گیرد. در شکل ۱، لایه ای در حین ماشین کاری نشان داده شده است. توانایی منحصربه فرد روش ساخت سریع توسط فرآیند جوش کاری برای ساخت قطعات کامپوزیتی (ساخته شده از چند نوع فلز) که دارای هندسه پیچیده ای هستند به خوبی به اثبات رسیده است [۴].

### ۱- مقدمه

فرآیند ساخت سریع یکی از حوزه های کاربرد روش های جوش کاری می باشد که امروزه توجه فراوانی را به خود جلب نموده است. در این رویکرد قطعات فلزی را می توان با ترکیب فرآیندهای افزایشی و کاهشی ایجاد نمود [۱]. با انجام مرحله ای افزایشی جوشی، هندسه ای تقریبی هر لایه با ساختار یکپارچه ای از فلز بدست می آید. در این میان، روش قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکتروود مصرفی<sup>۱</sup> از پرکاربردترین روش های جوش کاری برای اهداف ساخت سریع می باشد. نرخ رسوب گزارش شده برای جوش کاری قوس

1- Gas Metal Arc Welding

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

I. Lirabi, H. Amirabadi, Geometrical model for rectangular-inserted face milling of surfaces with parabolic cross-sections in parallel direction with machining feed, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 176-181, 2015 (in Persian)

(۱) بر حسب  $w$  و  $H$  بازنویسی کرد:

$$a = H, c = -\frac{4H}{w^2} \quad (۱)$$

بنابراین فرم هندسی سهمی مطابق رابطه‌ی (۲) عبارتست از:

$$y = H \left[ 1 - \left( \frac{2x}{w} \right)^2 \right] \quad (۲)$$

از سوی دیگر، نوشتن رابطه‌ی سهمی برحسب پارامترهای ورودی فرآیند جوش کاری نیز مفید می‌باشد. با استفاده از مساوی قرار دادن مساحت سطح مقطع مهره‌ی جوش ( $A$ ) بدست آمده از رابطه‌ی هندسی با رابطه‌ی بدست آمده از پارامترهای فرآیند جوش کاری می‌توان پارامترهای مهره‌ی جوش را محاسبه نمود [۴].

رابطه‌ی هندسی مهره‌ی جوش به صورت معادله‌ی (۳) می‌باشد:

$$A = \frac{2wH}{3} \quad (۳)$$

مساحت سطح مقطع مهره‌ی جوش برحسب پارامترهای فرآیند جوش - کاری نیز به صورت رابطه‌ی (۴) می‌باشد:

$$A = \frac{\pi v_w d_w^2}{4v_t} \quad (۴)$$

که در این رابطه  $v_w$  سرعت تغذیه‌ی سیم و  $v_t$  سرعت پیشروی مشعل جوش کاری می‌باشد.

بنابراین مطابق رابطه‌ی (۵) داریم:

$$A = \frac{2Hw}{3} = \frac{\pi v_w d_w^2}{4v_t} \quad (۵)$$

با توجه به رابطه‌ی (۵)، عرض مهره‌ی جوش ( $w$ ) را می‌توان به صورت معادله‌ی (۶) بدست آورد:

$$w = \frac{3\pi v_w d_w^2}{8Hv_t} \quad (۶)$$

سوریاکومار و همکارانش [۴] با استفاده از آزمایش‌های تجربی خود و انطباق نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایش و انجام رگرسیون معادله‌ی (۷) را برای ارتفاع مهره جوش ارائه کرده‌اند.

$$H = C_1 v_w^2 + C_2 v_t^2 + C_3 v_w v_t + C_4 v_w + C_5 v_t + C_6 \quad (۷)$$

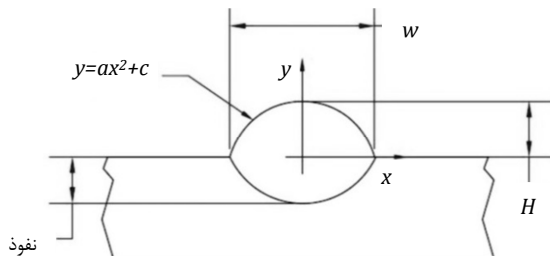
همچنین برای فرآیند جوش کاری با استفاده از سیم جوش ER70S6 و با قطر سیم جوش ۰/۸ میلی‌متر ضرایب محاسبه‌ی  $h$  در معادله‌ی مربوطه به صورت زیر گزارش شده است [۴]:

$$C_1 = 0.29945E - 02, \quad C_2 = 0.25610E + 01$$

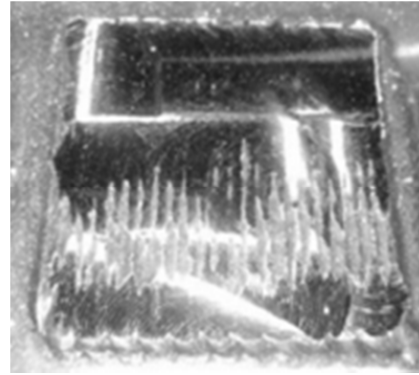
$$C_3 = -0.13833E + 00, \quad C_4 = 0.18947E + 00$$

$$C_5 = -0.49778E + 01, \quad C_6 = 0.30299E + 01$$

چنان‌که در شکل ۳ نشان داده شده است، مدل مهره‌ی جوش تکی همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. در ادامه نتایج برخورد برای مهره جوش به‌دست آمده در سرعت پیشروی ۰/۴ متر بر دقیقه و سرعت تغذیه‌ی



شکل ۲. مقطع مهره‌ی جوش سهمی شکل و معادله‌ی مربوطه [۴]



شکل ۱ لایه‌ی نیمه‌ماشین کاری شده [۴]

در زمینه‌ی مدل‌سازی فرآیند لایه‌نشانی، برخی از تیم‌های تحقیقاتی از مدل‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی پارامترهای هندسی مهره‌ی جوش [۵] استفاده نموده‌اند. همچنین، اگر چه تمرکز در روش لایه‌نشانی دومرحله‌ای بر روی کاهش دورریز مواد در عملیات ماشین‌کاری می‌باشد، اما شکل مهره‌ی جوش نیز از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بسیاری از پژوهشگران استفاده از جوش‌کاری قوس الکتریکی را برای ساخت قطعات بررسی نموده‌اند. تیم تحقیقاتی دیکنز [۶] از جمله پیشگامان تحقیق در این زمینه می‌باشد. برخی از محققین هندسه‌ی مهره‌ی جوش را برای فرآیند ساخت سریع بررسی نموده‌اند. اییتی و همکارانش [۷] جوش - کاری با قوس پلاسما را برای ساخت اشکال هندسی استفاده نموده‌اند. آنها در بررسی خود مهره‌های جوش را به صورت منحنی‌های دایروی در نظر گرفتند. چان و همکارانش [۵] تخمین سهمی‌شکل را برای مهره‌ی جوش ذکر کردند. برخی منابع دیگر نیز مهره‌ی جوش سهمی‌شکل را پیشنهاد نموده‌اند [۶]. در تحقیق حاضر از مدل هندسی درگیری مهره‌جوش‌ها و ابزار برش به منظور ادغام در مدل‌سازی نیروهای ماشین‌کاری بهره گرفته شده است. در ادامه در قسمت دوم به بررسی مدل هندسی جوش پرداخته شده است.

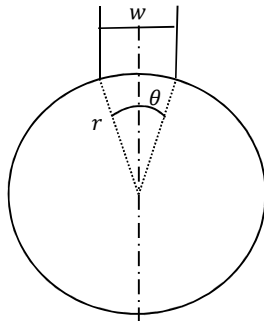
## ۲- مدل‌سازی برآمدگی‌های سهمی شکل

پارامترهای فرآیند جوش‌کاری بر یکدیگر تاثیر متقابل می‌گذارند. به گونه‌ای که هر گاه یک پارامتر تغییر کند، دیگر پارامترها نیز دستخوش تغییر می‌شوند تا قوس الکتریکی پایدار بماند. در یک فرآیند جوش‌کاری کنترل شده، شکل برآمدگی مهره‌ی جوش تنها متاثر از قطر سیم پرکننده ( $d_0$ )، سرعت تغذیه‌ی سیم ( $v_w$ )، سرعت پیشروی جوش‌کاری ( $v_t$ ) و گام بین دو مهره‌ی جوش ( $P$ ) می‌باشد.

برخی از مدل‌های جوش ارائه شده جنبه‌های مختلفی همچون رابطه‌ی بین پارامترهای فرآیند جوش‌کاری و هندسه‌ی مهره‌ی جوش را مد نظر قرار داده‌اند. این مدل‌ها سه پارامتر هندسی مهره‌ی جوش که عبارتند از عرض جوش ( $w$ ) ارتفاع جوش ( $H$ ) و عمق جوش (ناحیه‌ی نفوذ) را به عنوان خروجی‌های مدل در نظر می‌گیرند.

مدل‌سازی مهره‌ی جوش به‌منظور برقراری ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند جوش‌کاری ضروری می‌باشد. پروفیل مهره‌ی جوش مربوط به این برآمدگی‌ها در این مقاله به صورت سهمی و مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است.

پارامترهای  $a$  و  $c$  نشان داده شده در شکل ۲ را می‌توان مطابق رابطه‌ی



شکل ۵ رابطه‌ی زاویه‌ای مهره‌جوش و دیسک ابزار در وضعیت عرض از مبدا صفر

در شکل ۶ نمونه‌ای از منحنی برخورد مربوطه نشان داده شده است. قطر موثر ابزار برابر با ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع اینسرت برابر با ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. پارامترهای مهره‌جوش نیز عبارت از ۵/۱ میلی‌متر برای عرض جوش و ۲/۰۷ میلی‌متر برای ارتفاع جوش در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه برخورد ابزار با مهره‌جوش دارای عرض از مبدا غیرصفر مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۲- منحنی برخورد ابزار با برآمدگی جوش با عرض از مبدا غیرصفر

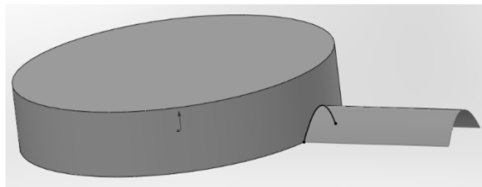
با عرض از مبدا غیرصفر، معادله‌ی (۱۰) به رابطه‌ی (۱۳) تغییر می‌یابد:

$$z = H \left[ 1 - \left( \frac{2(y-y_0)}{w} \right)^2 \right] \quad (13)$$

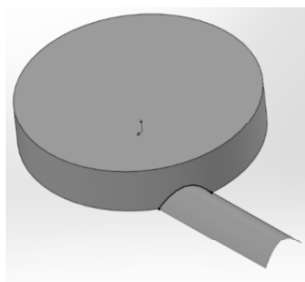
که در این معادله  $y_0$  عرض از مبدا مرکز سهمی می‌باشد. با جای‌گذاری معادله‌ی (۸) در رابطه‌ی (۱۳) و مرتب‌سازی آن معادله‌ی (۱۴) بدست می‌آید:

$$z = H \left[ 1 - \frac{4}{w^2} (\sqrt{r^2 - x^2} \pm y_0)^2 \right] \quad (14)$$

که در این معادله مقادیر  $\pm$  با توجه به موقعیت سهمی شکل نسبت به مبدا مختصات در معادله لحاظ خواهد شد. در شکل ۷ برخورد مهره‌جوش و دیسک ابزار با همان مشخصات شکل ۶ اما با عرض از مبدا غیرصفر مشاهده می‌شود. رابطه‌ی زاویه‌ای مهره‌جوش و دیسک ابزار در وضعیت عرض از مبدا غیرصفر نیز در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۶ نمونه‌ای از برخورد دیسک استوانه‌ای با برآمدگی مهره‌جوش در وضعیت عرض از مبدا صفر



شکل ۷ نمونه‌ای از برخورد دیسک استوانه‌ای با برآمدگی مهره‌جوش در وضعیت عرض از مبدا غیر صفر

سیم ۰/۶ متر بر دقیقه مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به سیم جوش ER70S6 و با قطر سیم جوش ۰/۸ میلی‌متر و برطبق روابط (۶) و (۷)، عرض و ارتفاع مهره جوش مربوطه برابر با ۵/۱ و ۲/۰۷ میلی‌متر بدست می‌آید.

#### ۳- مدل دیسک ابزار و اینسرت مستطیلی

با توجه به زاویه‌ی درگیری محوری ۹۰ درجه، دیسک ابزار را می‌توان به صورت مدلی استوانه‌ای در نظر گرفت. در شکل ۶ لبه‌ی برنده ابزار در مختصات کارتزین نشان داده شده است. روابط تبدیل مختصات کارتزین به استوانه‌ای به صورت معادله‌ی (۸) می‌باشد:

$$\begin{cases} y = r \sin \theta \\ x = r \cos \theta \\ z = z \end{cases} \quad (8)$$

بنابراین، معادله‌ی ابزار به طبق رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (9)$$

در این رابطه شعاع موثر ابزار و  $\kappa$  زاویه‌ی درگیری محوری می‌باشد. با توجه به قرارگیری مرکز ابزار در مرکز دستگاه  $x_0$  و  $y_0$  صفر می‌باشند.

#### ۴- مدل‌سازی برخورد

در این قسمت معادلات برخورد ابزار و برآمدگی جوش در دو حالت عرض از مبدا صفر و غیرصفر مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱- منحنی برخورد ابزار با برآمدگی جوش با عرض از مبدا صفر

با توجه به دستگاه مختصات شکل ۴ و معادله‌ی (۲)، برآمدگی سهمی شکل در صفحه‌ی  $yz$  با عرض از مبدا صفر، بر طبق رابطه‌ی (۱۰) بدست می‌آید:

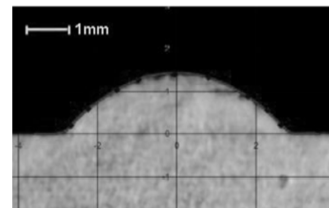
$$z = H \left[ 1 - \left( \frac{2y}{w} \right)^2 \right] \quad (10)$$

با جای‌گذاری معادله‌ی (۹) در رابطه‌ی (۱۰) طبق رابطه‌ی (۱۱) داریم:

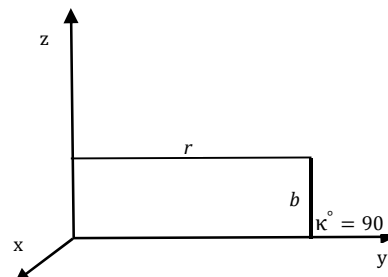
$$z = H + \left( \frac{4H}{w^2} \right) x^2 - \frac{4Hr^2}{w^2} \quad (11)$$

که در این رابطه مقدار  $x$  بر طبق معادله‌ی (۸) قابل محاسبه می‌باشد. مقدار زوایای ورود و خروج از درگیری ابزار ( $\theta_{ex}$  و  $\theta_{st}$ ) با توجه به شکل ۵ به صورت رابطه‌ی (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \theta/2 = \arcsin \frac{w}{2r} \\ \theta_{st} = \pi - \theta/2 \\ \theta_{ex} = \pi + \theta/2 \end{cases} \quad (12)$$



شکل ۳ انطباق مهره جوش پیش‌بینی شده و تصویر مقطع جوش [۴]



شکل ۴ مختصات لبه‌ی برش خطی در دستگاه کارتزین

با توجه به روابط (۱۲) و (۱۵) زوایای ورود و خروج از درگیری برای هر کدام از برآمدگی‌های مهره‌جوش به صورت رابطه‌ی (۱۶) بدست می‌آید:

$$\begin{cases} \phi_{st1} = 142.625^\circ \\ \phi_{ex1} = 168.23^\circ \\ \phi_{st2} = 168.23^\circ \\ \phi_{ex2} = 191.77^\circ \\ \phi_{st3} = 191.77^\circ \\ \phi_{ex3} = 217.375^\circ \end{cases} \quad (16)$$

با استفاده از زوایای ورود و خروج بدست آمده و بکارگیری رابطه‌ی (۱۴)، برنامه‌ی مربوط به عمق برش لحظه‌ی در نرم‌افزار متلب نوشته شده است. در شکل ۱۰ منحنی مربوط به عمق باز لحظه‌ی مربوط به درگیری ابزار با سه مهره‌جوش نشان داده شده است. چنان که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، دو سهمی شکل کناری دارای عرض بیشتری نسبت به سهمی شکل میانی هستند و دلیل آن را می‌توان در طول بیشتر درگیری در مهره‌جوش‌های کناری جستجو نمود. در شکل‌های ۶ و ۷ نیز این موضوع به صورت سه‌بعدی آورده شده است.

در ادامه به موضوع ادغام مدل عمق برش لحظه‌ای در مدل مکانیستیک نیرو و پرداخته شده است.

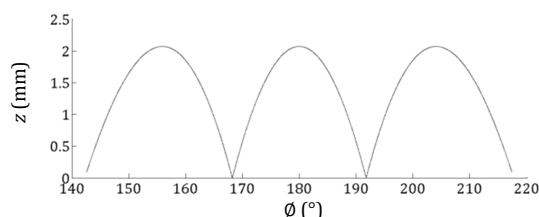
#### ۵-۲- مدل مکانیستیک نیروی برش

مدل مکانیستیک نیروی ماشین‌کاری بر مبنای تناسب نیروهای برشی با سطح مقطع براده‌ی تغییر شکل نیافته استوار می‌باشد. در معادله‌ی (۱۷) این تناسب نشان داده شده است [۸].

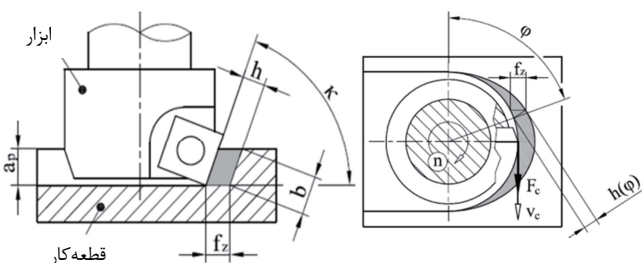
$$F \propto A_c \quad (17)$$

که در این رابطه  $F$  نیروی ماشین‌کاری و  $A_c$  سطح مقطع براده‌ی تغییر شکل نیافته می‌باشد. ضرایب ثابت این تناسب، ضرایب ویژه‌ی برش نامیده می‌شوند. این ضرایب وابسته به شرایط برشی، هندسه‌ی برش و ویژگی‌های جنس ابزار و قطعه‌کار می‌باشند.

در شکل ۱۱ شمایی از هندسه‌ی برش به همراه سطح مقطع تغییر شکل نیافته برای اینسرت با لبه‌ی برنده‌ی خطی نشان داده شده است. در این شکل ضخامت براده‌ی تغییر شکل نیافته،  $b$  عرض براده،  $f_z$  نرخ پیش‌روی به ازای هر دندانه،  $\kappa$  زاویه‌ی درگیری محوری و  $a_p$  عمق برش محوری می‌باشد.



شکل ۱۰ منحنی عمق برش لحظه‌ای برای درگیری ابزار با سه مهره‌جوش ابزار



شکل ۱۱ شمایی از هندسه‌ی فرآیند کف‌تراشی [۹]

مقدار زوایای ورود و خروج از درگیری با توجه به شکل ۸ به صورت رابطه‌ی (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \phi_{st} = \pi - \arcsin \frac{w+c}{r} \\ \phi_{ex} = \pi - \arcsin \frac{c}{r} \end{cases} \quad (15)$$

در ادامه به بررسی منحنی برخورد دیسک کف‌تراشی با چندین برآمدگی مهره‌جوش پرداخته شده است.

#### ۴-۳- منحنی برخورد همزمان ابزار با چندین برآمدگی

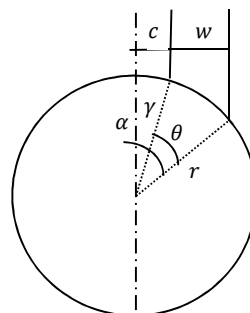
با ترکیب نتایج برخورد در وضعیت‌های مختلف عرض از مبدا مهره‌جوش، می‌توان منحنی برخورد همزمان ابزار با چندین برآمدگی سهمی شکل را استخراج نمود. در شکل ۹ برخورد همزمان ابزار با سه مهره‌جوش نشان داده شده است. این منحنی از ترکیب نتایج برخورد نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ بدست آمده است.

در ادامه به بررسی مدل نیروی برش یکپارچه در ماشین‌کاری برآمدگی‌های سهمی شکل مهره‌جوش پرداخته شده است.

#### ۵- مدل نیروی برش یکپارچه

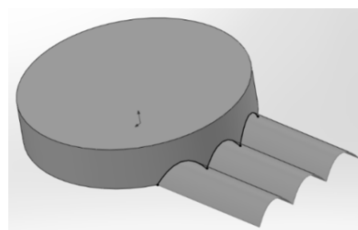
##### ۵-۱- مدل عمق برش

به منظور دستیابی به مدلی یکپارچه برای عمق برش که بتواند در شرایط درگیری همزمان چندین مهره‌جوش با دیسک فرزکاری، مقدار لحظه‌ای این پارامتر را محاسبه نماید، بایستی زوایای ورود و خروج از درگیری را برای هر مهره‌جوش محاسبه نموده و معادلات مربوط به هر مهره‌جوش را در مدل کلی عمق برش ادغام نمود. در این مقاله مدل‌سازی عمق برش برای برخورد همزمان ابزار با سه مهره‌جوش مطابق شکل ۹ تحت شرایط قطر موثر ابزار برابر با ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع اینسرت برابر با ۵ میلی‌متر و همچنین عرض جوش ۵/۱ میلی‌متر و ارتفاع جوش ۲/۰۷ میلی‌متر مدنظر قرار گرفته است. مقدار فاصله‌ی گام جوش‌ها نیز برابر با عرض جوش در نظر گرفته شده است.



شکل ۸ رابطه‌ی زاویه‌ای مهره‌جوش و دیسک ابزار در وضعیت عرض از

مبداء غیرصفر



شکل ۹ منحنی برخورد ابزار به طور همزمان با سه مهره‌جوش

$$db = dS \quad (25)$$

در ادامه نتایج محاسبات نیروی مکانیستیک ماشین کاری برای هندسه ی مقطع سهمی شکل ارائه شده در شکل ۱۰ و همچنین ابزار برش اینسرتی با زاویه ی درگیری محوری ۹۰ درجه و زاویه ی براده ی صفر درجه ارائه شده است.

#### ۴-۵- نیروی مکانیستیک برای ماشین کاری فولاد AISI 02 و اینسرت CBN

در زمینه ی ماشین کاری فولاد AISI 02 با استفاده از اینسرت ساخته شده از نیتريد بر مکی، تیلان و همکارانش [۱۰] کارهای آزمایشگاهی گسترده ای را به انجام رسانده اند. آن ها برای اینسرت های مستطیلی با زاویه ی براده ی صفر درجه و زاویه ی درگیری محوری ۹۰ درجه ضرایب ویژه ی نیروی ماشین کاری را مطابق جدول ۱ ارائه نموده اند. همچنین ترکیب شیمیایی فولاد 02 را می توان در جدول ۲ مشاهده نمود.

اینسرت نیتريد بر مکی مورد بررسی دارای شناسه ی SNEN0903ENE-M06 در سیستم ایزو می باشد که دارای طول لبه ی برش ۹/۵۲۵ میلی متر، ضخامت اینسرت ۳/۱۸ میلی متر، شعاع نوک لبه ی برش ۰/۸ میلی متر و زاویه ی براده ی صفر درجه می باشد [۱۰].

در ادامه با استفاده از روابط استخراج شده جهت محاسبه ی عمق برش لحظه ای برای هندسه ی مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ و همچنین با بهره گیری از داده های مربوط به هندسه و جنس ابزار و قطعه ی مورد نظر، در نرم افزار متلب برنامه ی مربوط به نیروی مکانیستیک ماشین کاری نوشته شده است. در شکل های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نتایج بدست آمده برای نیروی برش در راستای x، y، z و همچنین نیروی کل برش در ازای یک دور چرخش ابزار برشی نشان داده شده است. لازم به ذکر است ابزار برش به صورت تک اینسرت در نظر گرفته شده است و نیروهای ماشین کاری در زوایای غیر درگیر برابر با صفر می باشند.

#### ۵-۵- بررسی نتایج

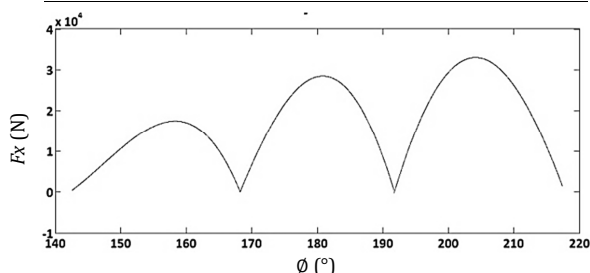
صحت مدل ریاضی عمق برش لحظه ای توسط مدل سازی سه بعدی در نرم افزار سالیدورکز ۱ بررسی شده است. با بهره گیری از ابزار اندازه گیری موجود در

جدول ۱ ضرایب نیروی برشی برای ماشین کاری فولاد 02 توسط اینسرت CBN [۱۰]

| ضریب برشی     | $K_{te}$ | $K_{re}$ | $K_{ae}$             | $K_{tc}$             | $K_{rc}$             | $K_{ac}$             |
|---------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| (N/mm)        | (N/mm)   | (N/mm)   | (N/mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) | (N/mm <sup>2</sup> ) |
| مقدار میانگین | ۵۸۱/۳۵   | ۷۲۴/۴۷   | ۱۵۸/۹۶               | ۳۶۸۹/۱۱              | -۵۸۰۴/۸۹             | ۲۲۵۷/۱۴              |

جدول ۲ ترکیب شیمیایی فولاد 02 [۱۰]

| عنصر | C    | Si   | Mn   | Cr   | P     | S     | V    |
|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| درصد | ۰/۸۸ | ۰/۲۹ | ۲/۰۷ | ۰/۲۶ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۸ |



1. SolidWorks

مقدار سطح مقطع براده از رابطه ی (۱۸) قابل محاسبه می باشد:

$$h(\phi, \kappa) = f_t \sin \phi \sin \kappa \quad (18)$$

با توجه به زاویه ی درگیری محوری ۹۰ درجه فرض شده در محاسبات، رابطه ی (۱۸) به صورت رابطه ی (۱۹) بازنویسی می شود:

$$h(\phi) = f_t \sin \phi \quad (19)$$

در روش مکانیستیک، لبه ی برش اینسرت در چندین نقطه به المان های کوچکی تقسیم می شود و نیروهای برش در هر یک از این المان ها در هر زمانی که در ناحیه ی برش قرار گیرند محاسبه می شوند. محاسبات نیروهای برش دیفرانسیلی مماسی ( $dF_t$ )، شعاعی ( $dF_r$ ) و محوری ( $dF_a$ ) به مطابق رابطه ی (۲۰) می باشد [۸].

$$\begin{cases} dF_t = K_{tc} \cdot h(\phi) \cdot db + K_{te} \cdot dS \\ dF_r = K_{rc} \cdot h(\phi) \cdot db + K_{re} \cdot dS \\ dF_a = K_{ac} \cdot h(\phi) \cdot db + K_{ae} \cdot dS \end{cases} \quad (20)$$

رابطه ی (۲۰) به عنوان تابعی از ضخامت لحظه ای براده ( $h(\phi)$ )، عرض دیفرانسیلی براده ( $b$ )، طول دیفرانسیلی لبه ی برنده ( $dS$ ) و ضرایب  $K_{rc}$ ،  $K_{tc}$ ،  $K_{ac}$ ،  $K_{re}$ ،  $K_{te}$ ،  $K_{ae}$  بیان می شود [۸]. ضرایب نیرو را می توان به دو گروه ضرایب برشی  $K_{tc}$  و ضرایب لبه ی برنده  $K_{te}$  دسته بندی نمود.

دست یابی به نیروهای برش دیفرانسیلی در راستای x، y و z از روی نیروهای مماسی، شعاعی و محوری در هر نقطه از لبه ی برنده با استفاده از ماتریس انتقال و رابطه ی (۲۱) امکان پذیر می باشد.

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \phi & -\sin \phi \sin \phi & -\cos \phi \sin \phi \\ \sin \phi & -\sin \phi \cos \phi & -\cos \phi \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t \\ dF_r \\ dF_a \end{bmatrix} \quad (21)$$

#### ۵-۳- معادله ی انتگرالی نیروی ماشین کاری سطوح سهمی شکل

با فرض ابزار کف تراشی با یک لبه ی برنده، می توان نیروهای برش را برای ماشین کاری سطوح سهمی شکل با استفاده از رابطه ی (۲۲) محاسبه نمود:

$$F_q(\phi) = \int_{z_1}^{z_2} dF_q(\phi) ; q=x, y, z \quad (22)$$

با توجه به مشخصات مسئله، عمق برش  $z_1$  برابر با صفر و عمق برش  $z_2$  توسط رابطه ی (۱۴) برای هر گام انتگرال گیری با توجه به زاویه ی درگیری لحظه ای محاسبه می شود. به بیان دیگر با توجه به هندسه ی خاص سطوح مورد ماشین کاری، مقدار  $z_2$  تابعی از زاویه ی درگیری شعاعی لبه ی برنده ( $\phi$ ) می باشد. بنابراین، طبق رابطه ی (۲۳) و (۲۴) داریم:

$$F_q(\phi) = \int_0^{z_2(\phi)} dF_q(\phi) ; q=x, y, z \quad (23)$$

$$\begin{cases} z_2(\phi) = H \left[ 1 - \frac{4}{w^2} (\sqrt{r^2 - x^2} \pm y_0) \right]^2 \\ x(\phi) = r \cos(\phi) \end{cases} \quad (24)$$

چنان که در معادله ی (۲۳) و (۲۴) قابل مشاهده می باشد، با استفاده از روابط هندسی و ریاضی موجود، امکان محاسبات تحلیلی نیروهای ماشین کاری سطوح متشکل از برآمدگی های سهمی شکل فراهم آمده است. از سوی دیگر، معادله ی (۲۴) نیروهای ماشین کاری را تنها با متغیر بودن پارامتر زاویه ی درگیری شعاعی ابزار محاسبه می نماید. بنابراین، با در اختیار داشتن زوایای ورود و خروج از درگیری ابزار، چنان که در قسمت ۴ به آن پرداخته شد، می توان انتگرال نیروهای ماشین کاری را در بازه ی مربوطه و با داشتن مقدار زاویه ی درگیری در هر گام انتگرال گیری محاسبه نمود.

با توجه به زاویه ی درگیری محوری ۹۰ درجه، رابطه ی (۲۵) برای لبه ی برنده برقرار می باشد:

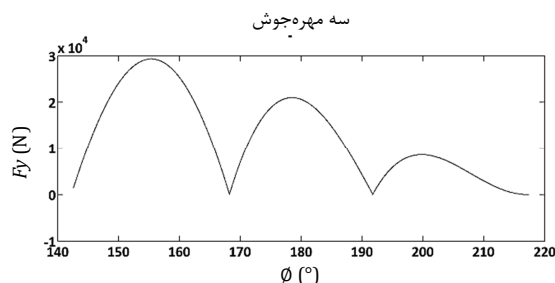
نخست توسط روابط ریاضی، هندسه ی سطح متشکل از برآمدگی های سهمی شکل، دیسک استوانه ای و اینسرت مربعی با زاویه ی درگیری محوری

۹۰ درجه تعریف گردیده است. در ادامه منحنی برخورد در حالت های مختلف بررسی شده و تابع عمق برش لحظه ای استخراج گردید. سپس به منظور مدل سازی مکانیستیک نیروها، با توجه به وابستگی پارامتر عمق برش لحظه ای به زاویه ی درگیری شعاعی ابزار، کران بالای انتگرال گیری به عنوان تابعی وابسته  $(\phi_2)$  تعریف و در معادلات انتگرال گیری در نرم افزار متلب ادغام گردید. نتایج بدست آمده تطابق خوبی با شبیه سازی سه بعدی و روابط تئوری برش فلزات نشان می دهد. در این مقاله کارآمدی روش ارائه شده برای دستیابی به مدل ماشین کاری یکپارچه برای سطوح متشکل از برآمدگی های سهمی شکل به خوبی نشان داده شده است.

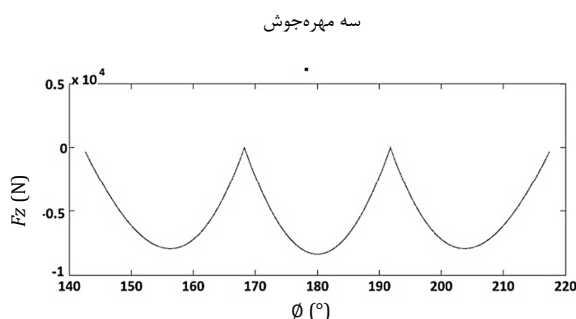
## ۷- مراجع

- [1] K. Karunakaran, A. Sreenathbabu, P. Vishal, Hybrid layered manufacturing: direct rapid metal tool-making process, *I MECH E Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, No. B12, pp. 1657-65, 2004.
- [2] A. Sreenathbabu, KP. Karunakaran, C. Amarnath, Statistical process design for hybrid adaptive layer manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 11, No. 4, pp. 235-48, 2005.
- [3] K. Karunakaran, S. Suryakumar, Vishal Pushpa, Retrofitment of a CNC machine for hybrid layered manufacturing, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 45, pp. 690-703, 2009.
- [4] S. Suryakumar et al, Weld bead modeling and process optimization in HLM, *Computer-Aided Design*, Vol. 43, pp. 331-344, 2011.
- [5] B. Chan, J. Pacey, M. Bibby, Modelling gas metal arc weld geometry using artificial neural network technology, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 38, No.1, pp. 43-51, 1999.
- [6] J. Spencer, P. Dickens, C. Wykes, Rapid prototyping of metal parts by threedimensional welding, *I MECH E Journal of Engineering Manufacture Part B*, Vol. 212, pp. 175-82, 1998.
- [7] W. Aiyiti, W. Zhao, B. Lu, Y. Tang, Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 165-72, 2006.
- [8] Engin S. and Altintas Y., Mechanics and Dynamics of General Milling Cutters. Part II: Inserted Cutters, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp: 2213-2231, 2001.
- [9] I. Biró, et al., Experimental Model for the Main Cutting Force in Face Milling of a High Strength Structural Steel, *Period. Polytech. Mech. Eng.*, Vol. 59, pp: 16-22, 2015.
- [10] F. Taylan, O. Colak, M. Cengiz, Investigation of TiN coated and CBN cutting tool performance in hard milling application, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 57, pp: 417-424, 2011.

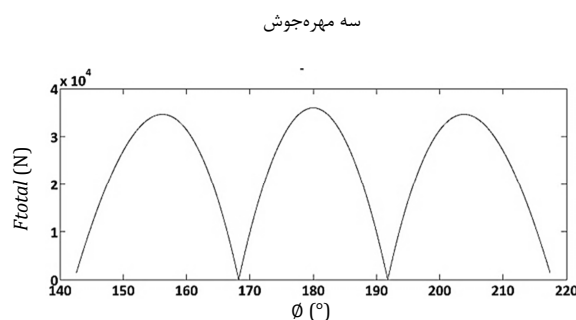
شکل ۱۲ نیروی برش در راستای x برای هندسه ی سهمی شکل متشکل از



شکل ۱۳ نیروی برش در راستای y برای هندسه ی سهمی شکل متشکل از



شکل ۱۴ نیروی برش در راستای z برای هندسه ی سهمی شکل متشکل از



شکل ۱۵ نیروی برش کل برای هندسه ی سهمی شکل متشکل از

سه مهره جوش

نرم افزار، ارتفاع مهره جوش در هر زاویه ی درگیری دلخواه بر روی منحنی برخورد مربوطه قابل محاسبه می باشد. نتایج مقایسه حاکی از انطباق کامل مدل ریاضی با مدل سه بعدی و دقت بالای آن برای استفاده در مدل نیروی ماشین کاری می باشد. مدل سه بعدی مربوطه در شکل ۹ آورده شده است.

نتایج نیروهای ماشین کاری در شکل ۱۵، پیروی رفتار نیروها را از هندسه ی مقطع برخورد نمایان می سازد. نیروی ماشین کاری مجموع  $(F_{total})$ ، روند تغییرات نیرو برحسب زاویه ی درگیری شعاعی را نشان می دهد. از سوی دیگر،  $F_{total}$  بالاتر در زاویه ی درگیری شعاعی ۱۸۰ درجه نسبت به دو قله ی نیرویی دیگر ناشی از بیشینه بودن نرخ پیشروی  $(h(\phi))$  در این زاویه می باشد. تطابق این مسئله با روابط ریاضی حاکی از دقت مدل سازی یکپارچه ی ارائه شده می باشد. در ادامه به جمع بندی مطالب پرداخته شده است.

## ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله مدلی دقیق برای عمق برش لحظه ای در فرآیند کف تراشی سطوح متشکل از برآمدگی های سهمی شکل ارائه شده است. بدین منظور