



مدل‌سازی هندسی کف‌تراشی سطوح متشکل از برآمدگی‌های سهمی شکل توسط اینسرت مستطیلی در وضعیت همراستایی پیشروی ابزار با امتداد برآمدگی‌ها

ایرج لیرابی^۱، حسین امیرآبادی^{۲*}

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

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

*hamirabadi@birjand.ac.ir، ۰۹۷۱۷۵/۶۱۵

چکیده

با توسعه اینسرت‌های ماشین‌کاری کارآیی فرآیند فرزکاری کف‌تراشی افزایش چشمگیری یافته است. در این مقاله مدل‌سازی هندسی فرآیند کف‌تراشی سطوح متشکل از برآمدگی‌های سهمی شکل صورت پذیرفته است. این سطوح توسط فرآیند جوش ایجاد شده و برای بازسازی هندسه‌ی از دست رفته، افزایش مقاومت به سایش و خوردگی و پیاده‌سازی رویکرد ساخت سریع کاربرد دارند. به منظور حذف قسمت‌های ناخواسته و ایجاد سطحی یکپارچه، رویه‌برداری از این سطوح ناهموار ضروری می‌باشد. از سوی دیگر، به دلیل الگوی سطح، عمق براده‌برداری در هر لحظه متغیر می‌باشد. با توجه به تاثیر مستقیم عمق برش بر نیروهای ماشین‌کاری، در این مقاله مدلی دقیق برای عمق برش در فرآیند فرزکاری کف‌تراشی سطوح متشکل از برآمدگی‌های سهمی شکل ارائه گردیده است. بدین منظور نخست روابط ریاضی، هندسه‌ی سطح متشکل از برآمدگی‌های سهمی شکل، دیسک استوانه‌ای و اینسرت مربعی با زاویه‌ی درگیری محوری ۹۰ درجه تعریف شده است. در ادامه منحنی‌های برخورد بررسی شده و توابع عمق برش مسئله استخراج گردیده است. در پایان اعتبارسنجی مدل عمق برش صورت پذیرفته و نحوه‌ی ادغام آن در مدل مکانیستیک نیرو مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله کارآمدی روش ارائه شده برای دستیابی به پارامتر عمق برش لحظه‌ای و مدل یکپارچه‌ی نیروی ماشین‌کاری نشان داده شده است. **کلیدواژه‌ها:** فرزکاری کف‌تراشی، برآمدگی‌های 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.

الکتريکی در حدود ۵۰ تا ۱۳۰ گرم بر دقیقه می‌باشد 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 جوشکاری لیزری و پرتوی الکترونی که به ترتیب حدود ۲ تا ۱۰ گرم در هر دقیقه می‌باشند، بسیار بیشتر است [۲]. با وجود کاهش بازدهی غالباً هر لایه پس از جوشکاری برای رفع عیوب احتمالی و دستیابی به سطحی یکپارچه مورد ماشین‌کاری قرار می‌گیرد. در شکل ۱، لایه‌ای در حین ماشین‌کاری نشان داده شده است. توانایی منحصربه‌فرد روش ساخت سریع توسط فرآیند جوشکاری برای ساخت قطعات کامپوزیتی (ساخته شده از چند نوع فلز) که دارای هندسه‌ی پیچیده‌ای هستند به خوبی به اثبات رسیده است [۴].

۱- مقدمه

فرآیند ساخت سریع یکی از حوزه‌های کاربرد روش‌های جوشکاری می‌باشد که امروزه توجه فراوانی را به خود جلب نموده است. در این رویکرد قطعات فلزی را می‌توان با ترکیب فرآیندهای افزایشی و کاهشی ایجاد نمود [۱]. با انجام مرحله‌ی افزایشی جوشی، هندسه‌ی تقریبی هر لایه با ساختار یکپارچه‌ای از فلز بدست می‌آید. در این میان، روش قوس الکتريکی با گاز محافظ و الکتروود مصرفی^۱ از پرکاربردترین روش‌های جوشکاری برای اهداف ساخت سریع می‌باشد. نرخ رسوب گزارش شده برای جوشکاری 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) (فارسی)

(۱) بر حسب w و H بازنویسی کرد:

$$a = H, c = -\frac{4H}{w^2} \quad (1)$$

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

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

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:

$$A = \frac{2wH}{3} \quad (3)$$

مساحت سطح مقطع مهره‌ی جوش برحسب پارامترهای فرآیند جوش -

کاری نیز به صورت رابطه‌ی (۴) می‌باشد:

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

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

بنابراین مطابق رابطه‌ی (۵) داریم:

$$A = \frac{2wH}{3} = \frac{\pi v_w d_w^2}{4v_t} \quad (5)$$

با توجه به رابطه‌ی (۵)، عرض مهره‌ی جوش (w) را می‌توان به صورت

معادله‌ی (۶) بدست آورد:

$$w = \frac{3\pi v_w d_w^2}{8Hv_t} \quad (6)$$

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.

$$H = C_1 v_w^2 + C_2 v_t^2 + C_3 v_w v_t + C_4 v_w + C_5 v_t + C_6 \quad (7)$$

همچنین برای فرآیند جوش کاری با استفاده از سیم جوش ER70S6 و با

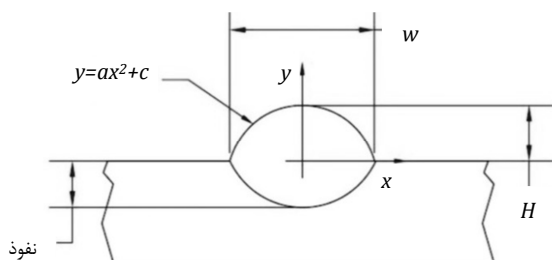
قطر سیم جوش 0.8 میلی‌متر ضرایب محاسبه‌ی h در معادله‌ی مربوطه به صورت زیر گزارش شده است [۴]:

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

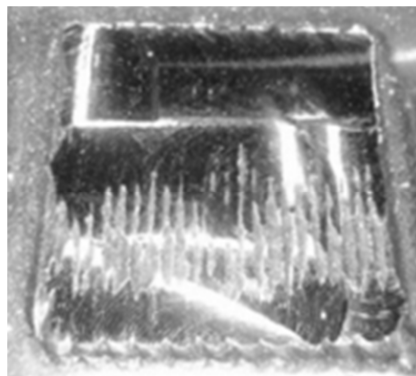
$$C_3 = -0.13833E + 00, \quad C_4 = 0.18947E + 00$$

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

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 $1/4$ متر بر دقیقه و سرعت تغذیه‌ی



شکل ۲ مقطع مهره‌ی جوش سهمی‌شکل 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 جوش کاری 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.

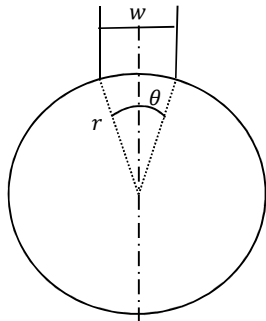
۲- مدل‌سازی برآمدگی‌های سهمی‌شکل

پارامترهای فرآیند جوش کاری 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 جوش کاری کنترل شده، شکل برآمدگی مهره‌ی جوش تنها متأثر از قطر سیم پرکننده (d_0)، سرعت تغذیه‌ی سیم (v_w)، سرعت پیشروی جوش کاری (v_t) و گام بین دو مهره‌ی جوش (P) می‌باشد.

برخی از مدل‌های جوش ارائه شده جنبه‌های مختلفی همچون رابطه‌ی بین پارامترهای فرآیند جوش کاری 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 جوش کاری 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

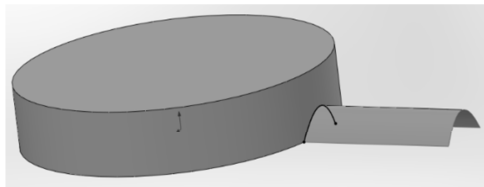
با عرض از مبدا غیرصفر، معادله‌ی (۱۰) به رابطه‌ی (۱۳) تغییر می‌یابد:

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

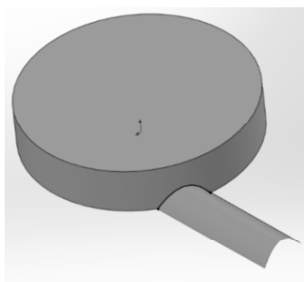
که در این معادله y_0 عرض از مبدا مرکز سهمی می‌باشد. با جای‌گذاری معادله‌ی (۸) در رابطه‌ی (۱۳) و مرتب‌سازی آن معادله‌ی (۱۴) بدست می‌آید:

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

که در این معادله مقادیر \pm با توجه به موقعیت سهمی‌شکل 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 r شعاع موثر ابزار و K 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 سهمی‌شکل در صفحه‌ی yz با عرض از مبدا صفر، بر طبق رابطه‌ی (۱۰) بدست می‌آید:

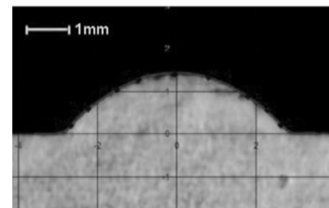
$$z = H \left[1 - \left(\frac{2y}{w} \right)^2 \right] \quad (10)$$

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

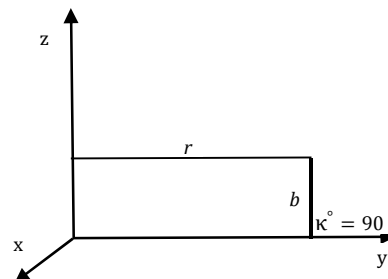
$$z = H + \left(\frac{4H}{w^2} \right) x^2 - \frac{4Hr^2}{w^2} \quad (11)$$

که در این رابطه مقدار x بر طبق معادله‌ی (۸) قابل محاسبه می‌باشد. مقدار زوایای ورود و خروج از درگیری ابزار (θ_{st} و θ_{ex}) 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 سهمی‌شکل کناری دارای عرض بیشتری نسبت به سهمی‌شکل 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 پرداخته شده است.

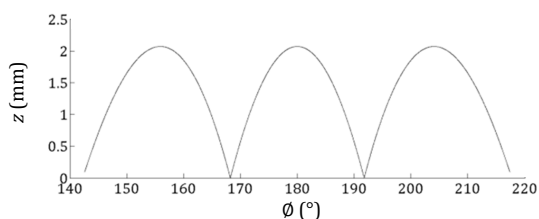
۵-۲- مدل مکانیستیک نیروی برش

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

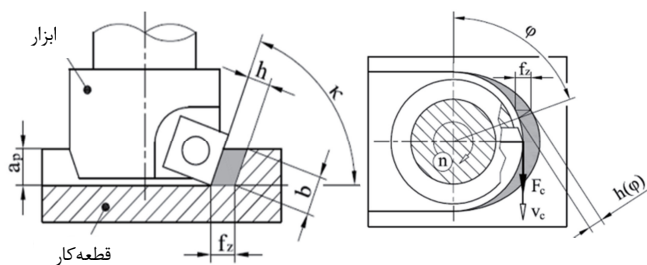
$$F \propto A_c \quad (17)$$

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 تغییرشکل نیافته برای اینسرت با لبه‌ی برنده‌ی خطی نشان داده شده است. در این شکل h ضخامت براده‌ی تغییرشکل نیافته، b عرض براده، f_z نرخ پیش‌روی به ازای هر دندانه، κ 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

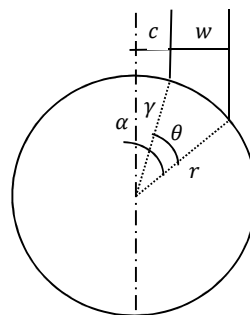
با ترکیب نتایج برخورد در وضعیت‌های مختلف عرض از مبدا مهره‌جوش، می‌توان منحنی برخورد همزمان ابزار با چندین برآمدگی سهمی‌شکل را استخراج نمود. در شکل ۹ برخورد همزمان ابزار با سه مهره‌جوش نشان داده شده است. این منحنی از ترکیب نتایج برخورد نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ بدست آمده است.

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

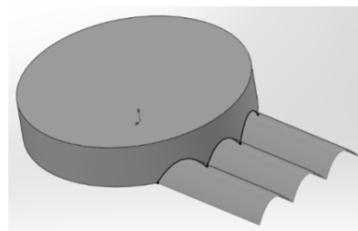
۵- مدل نیروی برش یکپارچه

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 زوایای مهره‌جوش و دیسک ابزار در وضعیت عرض از مبدا غیرصفر



شکل ۹ منحنی برخورد ابزار به طور همزمان با سه مهره‌جوش

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

در ادامه نتایج محاسبات نیروی مکانیستیک ماشین‌کاری برای هندسه‌ی مقطع سهمی‌شکل ارائه شده در شکل ۱۰ و همچنین ابزار برش اینسرتی با زاویه‌ی درگیری محوری ۹۰ درجه و زاویه‌ی براده‌ی صفر درجه ارائه شده است.

۴-۵- نیروی مکانیستیک برای ماشین‌کاری فولاد AISI O2 و اینسرت CBN

در زمینه‌ی ماشین‌کاری فولاد AISI O2 با استفاده از اینسرت ساخته شده از نیتريد بر مگنیتی، تیلان و همکارانش [۱۰] کارهای آزمایشگاهی گسترده‌ای را به انجام رسانده‌اند. آن‌ها برای اینسرت‌های مستطیلی با زاویه‌ی براده‌ی صفر درجه و زاویه‌ی درگیری محوری ۹۰ درجه ضرایب ویژه‌ی نیروی ماشین‌کاری را مطابق جدول ۱ ارائه نموده‌اند. همچنین ترکیب شیمیایی فولاد O2 را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود.

اینسرت نیتريد بر مگنیتی مورد بررسی دارای شناسه‌ی SNEN0903ENE-M06 در سیستم ایزو می‌باشد که دارای طول لبه‌ی برش ۹/۵۲۵ میلی‌متر، ضخامت اینسرت ۳/۱۸ میلی‌متر، شعاع نوک لبه‌ی برش ۰/۸ میلی‌متر و زاویه‌ی براده‌ی صفر درجه می‌باشد [۱۰].

در ادامه با استفاده از روابط استخراج شده جهت محاسبه‌ی عمق برش لحظه‌ای برای هندسه‌ی مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ و همچنین با بهره‌گیری از داده‌های مربوط به هندسه و جنس ابزار و قطعه‌ی مورد نظر، در نرم‌افزار متلب برنامه‌ی مربوط به نیروی مکانیستیک ماشین‌کاری نوشته شده است. در شکل‌های 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 تک‌اینسرت در نظر گرفته شده است و نیروهای ماشین‌کاری در زوایای غیردرگیر برابر با صفر می‌باشند.

۵-۵- بررسی نتایج

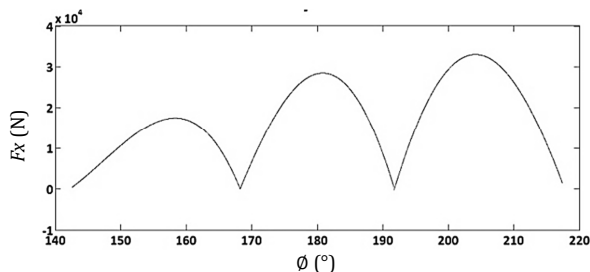
صحت مدل ریاضی عمق برش لحظه‌ای توسط مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار سالیدورکز ۱ بررسی شده است. با بهره‌گیری از ابزار اندازه‌گیری موجود در

جدول ۱ ضرایب نیروی برشی برای ماشین‌کاری فولاد O2 توسط اینسرت CBN [۱۰]

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

جدول ۲ ترکیب شیمیایی فولاد O2 [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 رابطه‌ی (۱۸) قابل محاسبه می‌باشد:

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

با توجه به زاویه‌ی درگیری محوری ۹۰ درجه فرض شده در محاسبات،

رابطه‌ی (۱۸) به صورت رابطه‌ی (۱۹) بازنویسی می‌شود:

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

در روش مکانیستیک، لبه‌ی برش اینسرت در چندین نقطه به المان‌های

کوچکی تقسیم می‌شود و نیروهای برش در هر یک از این المان‌ها در هر زمانی که در ناحیه‌ی برش قرار گیرند محاسبه می‌شوند. محاسبات نیروهای برش دیفرانسیلی مماسی (dF_t)، شعاعی (dF_r) و محوری (dF_a) به مطابق رابطه‌ی (۲۰) می‌باشد [۸].

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

رابطه‌ی (۲۰) به عنوان تابعی از ضخامت لحظه‌ای براده ($h(\phi)$)، عرض

دیفرانسیلی براده (b)، طول دیفرانسیلی لبه‌ی برنده (dS) و ضرایب K_{tc} ، K_{rc} ، K_{ac} ، K_{te} ، K_{re} ، K_{ae} بیان می‌شود [۸]. ضرایب نیرو را می‌توان به دو گروه ضرایب برشی K_{tc} و ضرایب لبه‌ی برنده K_{re} دسته‌بندی نمود.

دست‌یابی به نیروهای برش دیفرانسیلی در راستای x، y و z از روی نیروهای مماسی، شعاعی و محوری در هر نقطه از لبه‌ی برنده با استفاده از ماتریس انتقال و رابطه‌ی (۲۱) امکان‌پذیر می‌باشد.

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

۳-۵- معادله‌ی انتگرالی نیروی ماشین‌کاری سطوح سهمی‌شکل

با فرض ابزار کف‌تراشی با یک لبه‌ی برنده، می‌توان نیروهای برش را برای ماشین‌کاری سطوح سهمی‌شکل با استفاده از رابطه‌ی (۲۲) محاسبه نمود:

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

با توجه به مشخصات مسئله، عمق برش z_1 برابر با صفر و عمق برش z_2

توسط رابطه‌ی (۱۴) برای هر گام انتگرال‌گیری با توجه به زاویه‌ی درگیری لحظه‌ای محاسبه می‌شود. به بیان دیگر با توجه به هندسه‌ی خاص سطوح مورد ماشین‌کاری، مقدار z_2 تابعی از زاویه‌ی درگیری شعاعی لبه‌ی برنده (ϕ) می‌باشد. بنابراین، طبق رابطه‌ی (۲۳) و (۲۴) داریم:

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

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

چنان‌که در معادله‌ی (۲۳) و (۲۴) قابل مشاهده می‌باشد، با استفاده از

روابط هندسی و ریاضی موجود، امکان محاسبات تحلیلی نیروهای ماشین-

کاری سطوح متشکل از برآمدگی‌های سهمی‌شکل فراهم آمده است. از سوی دیگر، معادله‌ی (۲۴) نیروهای ماشین‌کاری را تنها با متغیر بودن پارامتر زاویه‌ی درگیری شعاعی ابزار محاسبه می‌نماید. بنابراین، با در اختیار داشتن زوایای ورود و خروج از درگیری ابزار، چنان‌که در قسمت ۴ به آن پرداخته شد، می‌توان انتگرال نیروهای ماشین‌کاری را در بازه‌ی مربوطه و با داشتن مقدار زاویه‌ی درگیری در هر گام انتگرال‌گیری محاسبه نمود.

با توجه به زاویه‌ی درگیری محوری ۹۰ درجه، رابطه‌ی (۲۵) برای لبه‌ی

برنده برقرار می‌باشد:

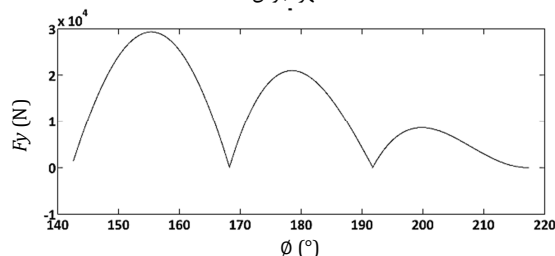
نخست توسط روابط ریاضی، هندسه‌ی سطح متشکل از برآمدگی‌های سهمی شکل، دیسک استوانه‌ای و اینسرت مربعی با زاویه‌ی درگیری محوری

۹۰ درجه تعریف گردیده است. در ادامه منحنی برخورد در حالت‌های مختلف بررسی شده و تابع عمق برش لحظه‌ای استخراج گردید. سپس به منظور مدل‌سازی مکانیستیک نیروها، با توجه به وابستگی پارامتر عمق برش لحظه‌ای به زاویه‌ی درگیری شعاعی ابزار، کران بالای انتگرال‌گیری به عنوان تابعی وابسته ($z_2(\theta)$) تعریف و در معادلات انتگرال‌گیری در نرم‌افزار متلب ادغام گردید. نتایج بدست آمده تطابق خوبی با شبیه‌سازی سه‌بعدی و روابط تئوری برش فلزات نشان می‌دهد. در این مقاله کارآمدی روش ارائه شده برای دستیابی به مدل ماشین‌کاری یکپارچه برای سطوح متشکل از برآمدگی‌های سهمی شکل به خوبی نشان داده شده است.

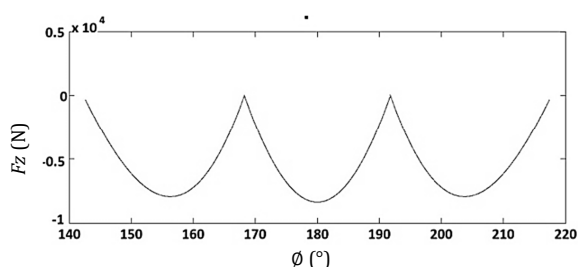
۷- مراجع

- [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.

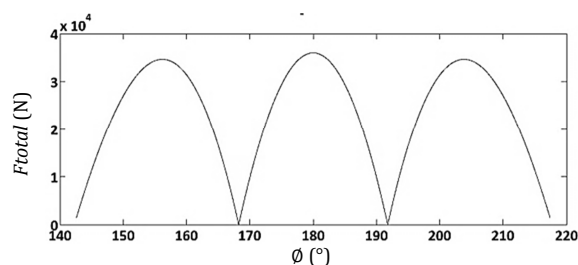
شکل ۱۲ نیروی برش در راستای x برای هندسه‌ی سهمی شکل متشکل از سه مهره‌جوش



شکل ۱۳ نیروی برش در راستای y برای هندسه‌ی سهمی شکل متشکل از سه مهره‌جوش



شکل ۱۴ نیروی برش در راستای z برای هندسه‌ی سهمی شکل متشکل از سه مهره‌جوش



شکل ۱۵ نیروی برش کل برای هندسه‌ی سهمی شکل متشکل از سه مهره‌جوش

نرم‌افزار، ارتفاع مهره‌جوش در هر زاویه‌ی درگیری دلخواه بر روی منحنی برخورد مربوطه قابل محاسبه می‌باشد. نتایج مقایسه حاکی از انطباق کامل مدل ریاضی با مدل سه‌بعدی و دقت بالای آن برای استفاده در مدل نیروی ماشین‌کاری می‌باشد. مدل سه‌بعدی مربوطه در شکل ۹ آورده شده است. نتایج نیروهای ماشین‌کاری در شکل ۱۵، پیروی رفتار نیروها را از هندسه‌ی مقطع برخورد نمایان می‌سازد. نیروی ماشین‌کاری مجموع (F_{total})، روند تغییرات نیرو برحسب زاویه‌ی درگیری شعاعی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، F_{total} بالاتر در زاویه‌ی درگیری شعاعی ۱۸۰ درجه نسبت به دو قله‌ی نیرویی دیگر ناشی از بیشینه بودن نرخ پیشروی ($h(\theta)$) در این زاویه می‌باشد. تطابق این مسئله با روابط ریاضی حاکی از دقت مدل‌سازی یکپارچه‌ی ارائه شده می‌باشد. در ادامه به جمع‌بندی مطالب پرداخته شده است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی دقیق برای عمق برش لحظه‌ای در فرآیند کف‌تراشی سطوح متشکل از برآمدگی‌های سهمی شکل ارائه شده است. بدین منظور