مجموعه مقالات کنفرانس ماشین کاری و ماشینهای ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱۶ آبان ۱۳۹٤



مهندسی مکانیک مدرس



mme.modares.ac.ir

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

ايرج ليرابى ‹، حسين اميرآبادى ُ*

۱– دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند ۲– دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند *بیرجند، صندوق پستی ۸۵ hamirabadi@birjand.ac.ir

چکیدہ

با توسعه اینسرتهای ماشین کاری کارآیی فرآیند فرز کاری 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 ماشین کاری، در این مقاله مدلی دقیق برای عمق برش در فرآیند فرز کاری کفتراشی سطوح متشکل از برآمدگیهای سهمی شکل ارئه گردیده است. بدین منظور نخست توسط روابط ریاضی، هندسهی سطح متشکل از برآمدگیهای سهمی شکل، دیسک استوانهای و اینسرت مربعی با زاویهی درگیری محوری ۹۰ درجه میناشد. منحنیهای برخورد بررسی شده و توابع عمق برش مسئله از برآمدگیهای سهمی شکل، دیسک استوانهای و اینسرت مربعی با زاویه ی گرفته است. در این مقاله کارآمدی روش ارائه شده برای دستی بر این اعتبارسنجی مدل عمق برش می طرح مینوری موری این مقاله مذکل از برآمدگیهای سهمی شکل از برآمد گرفته است. در این مقاله کارآمدی روش ارائه شده برای دستیابی به پارامتر عمق برش محوری مازی پیزوی مین زیر محوری ۹۰ درجه میزی سری قرا کلید وا**رگان**: فرز کاری کفتراشی، برآمد شیای سی منحنی برخورد، 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 منحنی برخورد، مدل عمق برش میزی کاری نشان داده شده است.

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.

۱- مقدمه

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 دستیایی به سطحی یکیارچه مورد ماشین کاری قرار می گیرد. در

Please cite this article using:

فرآیند ساخت سریع یکی از حوزههای کاربرد روشهای جوشکاری 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 مرحلهی افزایشی جوشی، هندسهی تقریبی هر لایه با ساختار یکپارچهای از فلز بدست می آید. در این میان، روش قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی^۱ از پرکاربردترین روشهای جوشکاری برای اهداف ساخت سریع می باشد. نرخ رسوب گزارش شده برای جوشکاری قوس

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 فارسى)

¹⁻ Gas Metal Arc Welding



شکل ۱ لایهی نیمهماشین کاری شده [۴]

در زمینهی مدلسازی فرآیند لایهنشانی، برخی از تیمهای تحقیقاتی از مدلهای شبکهی عصبی مصنوعی به منظور پیش بینی پارامترهای هندسی مهرهی جوش [۵] استفاده نمودهاند. همچنین، اگر چه تمرکز در روش لایهنشانی دومرحلهای بر روی کاهش دورریز مواد در عملیات ماشین کاری می باشد، اما شکل مهرهی جوش نیز از اهمیت زیادی برخوردار می باشد.

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 سهمی شکل را برای مهرهی جوش ذکر کردند. برخی منابع دیگر نیز مهرهی جوش سهمی شکل 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 ست.

۲- مدلسازی برآمدگیهای سهمیشکل

پارامترهای فرآیند جوش کاری بر یکدیگر تاثیر متقابل می گذارند. به گونهای که هر گاه یک پارامتر تغییر کند، دیگر پارامترها نیز دستخوش تغییر می شوند تا قوس الکتریکی پایدار بماند. در یک فرآیند جوش کاری کنترل شده، شکل برآمدگی مهرهی جوش تنها متاثر از قطر سیم پر کننده (00)، سرعت تغذیهی سیم (vw)، سرعت پیشروی جوش کاری (vt) و گام بین دو مهرهی جوش (P) می باشد.

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 می گیرند.

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

(۱) بر حسب w و H بازنویسی کرد:
(۱)
$$a = H$$
 , $c = -\frac{4H}{w^2}$
(۱) بنابراین فرم هندسی سهمی مطابق رابطهی (۲) عبارتست از:
 $y = H \left[1 - \left(\frac{2x}{w}\right)^2 \right]$
(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 پارمترهای مهرهی جوش را محاسبه نمود [۴].

رابطهی هندسی مهرهی جوش به صورت معادلهی (۳) میباشد:
$$A = \frac{2wH}{3}$$
 (۳)

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

$$A = \frac{\pi v_w d_w^2}{4v_t} \tag{f}$$

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

بنابراین مطابق رابطهی (۵) داریم:

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

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

$$w = \frac{3\pi v_w d_w^2}{8H v_t} \tag{(5)}$$

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.

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

همچنین برای فرآیند جوش کاری با استفاده از سیم جوش ER70S6 و با قطر سیم جوش ۰/۸ میلیمتر ضرایب محاسبه ی h در معادله ی مربوطه به

 $C_1 = 0.29945E - 02,$

$$C_2 = 0.25610E + 01$$

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

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

چنان که 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 ۸/۴ متر بر دقیقه و سرعت تغذیهی





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

- 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:

$$y = r \sin \emptyset$$

$$x = r \cos \emptyset \qquad (\Lambda)$$

$$x = z$$

بنابراین، معادلهی ابزار به طبق رابطهی (۹) بدست میآید: (۹) $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$ (۹) در این رابطه r شعاع موثر ابزار و ۲ زاویهی درگیری محوری میباشد. با توجه به قرارگیری مرکز ابزار در مرکز دستگاه ، x_0 و y مغر میباشند.

۴- مدلسازی برخورد

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

۴-۱- منحنی برخورد ابزار با بر آمدگی جوش با عرض از مبداء صفر

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

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

با جایگذاری معادلهی (۹) در رابطهی (۱۰) طبق رابطهی (۱۰) داریم: $z = H + \left(\frac{4H}{w^2}\right) x^2 - \frac{4Hr^2}{w^2}$ (۱۱)

که در این رابطه مقدار x بر طبق معادلهی (۸) قابل محاسبه می باشد. مقدار زوایای ورود و خروج از در گیری ابزار (σ_{sr} و σ_{sr}) با توجه به شکل ۵ به صورت رابطهی (۱۲) محاسبه می شود:

$$(17) \begin{cases} \theta/2 = \arcsin\frac{w}{2r} \\ \phi_{st} = \pi - \theta/2 \\ \phi_{ex} = \pi + \theta/2 \end{cases}$$

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



شکل۴ مختصات لبهی برش خطی در دستگاه کارتزین



شکل۵ رابطهی زاویهای مهرهجوش و دیسک ابزار در وضعیت عرض از مبداء 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 مبداء غیرصفر مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲-منحنی برخورد ابزار با بر آمدگی جوش با عرض از مبداء غیرصفر

با عرض از مبداء غیرصفر، معادلهی (۱۰) به رابطهی (۱۳) تغییر می یابد: $z = H \left[1 - \left(\frac{2(y-y_0)}{w}\right)^2 \right]$ (۱۳)

که در این معادله y_0 عرض از مبداء مرکز سهمی میباشد. با جایگذاری معادلهی (۸) در رابطهی (۱۳) و مرتبسازی آن معادلهی (۱۴) بدست میآید: $z = H \left[1 - \frac{4}{w^2} \left(\sqrt{r^2 - x^2} \pm y_0 \right)^2 \right]$ (۱۴)

که در این معادله مقادیر ± با توجه به موقعیت سهمی شکل نسبت به مبداء مختصات در معادله لحاظ خواهد شد. در شکل ۷ برخورد مهره جوش و دیسک ابزار با همان مشخصات شکل ۶ اما با عرض از مبداء غیرصفر مشاهده می شود. رابطهی زاویه ای مهره جوش و دیسک ابزار در وضعیت عرض از مبداء غیر صفر نیز در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل۶ نمونهای از برخورد دیسک استوانهای با برآمدگی مهرهجوش در وضعیت عرض از مبداء صفر



شکل۷ نمونهای از برخورد دیسک استوانهای با برآمدگی مهرهجوش در وضعیت عرض از مبداء غیر صفر

مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژهنامه مجموعه مقالات کنفرانس CAMMT

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

$$\begin{cases} \phi_{st} = \pi - \arcsin\frac{w+c}{r} \\ \phi_{ex} = \pi - \arcsin\frac{c}{r} \end{cases}$$
(12)

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

۴–۳– منحنی برخورد همزمان ابزار با چندین بر آمدگی

با ترکیب نتایج برخورد در وضعیتهای مختلف عرض از مبداء 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 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 مقرار فاصلهی گام جوشها نیز برابر با عرض جوش در نظر گرفته است.



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



شکل۹ منحنی برخورد ابزار به طور همزمان با سه مهرهجوش

با توجه به روابط (۱۲) و (۱۵) زوایای ورود و خروج از درگیری برای هر

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 پرداخته شده است.

۵–۲– مدل مکانیستیک نیروی برش

(17)

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

$F \propto A_C$

که در این رابطه F نیروی ماشین کاری و A 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 ایزار و قطعه کار 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، K زاویهی درگیری محوری و a_p عمق برش محوری می باشد.



مقدار سطح مقطع براده از رابطهی (۱۸) قابل محاسبه میباشد:

 $h(\emptyset, \kappa) = f_t \sin \theta \sin \kappa \tag{1}$

با توجه به زاویهی درگیری محوری ۹۰ درجه فرض شده در محاسبات، رابطهی (۱۸) به صورت رابطهی (۱۹) بازنویسی میشود:

$$h(\emptyset) = f_t \sin \emptyset \tag{19}$$

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].

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

رابطهی (۲۰) به عنوان تابعی از ضخامت لحظهای براده ((Ø))، عرض دیفرانسیلی براده (b)، طول دیفرانسیلی لبهی برنده (dS) و ضرایب ،*K_{rc} ،K_{tc} ، K_{re} ،K_{te} ،K_t ,K_{te} ،K_{te} ،K_{te} ،K_{te} ،K_{te} ،K_{te} ،K_t ,K_{te} ،K_t ,K_t ,K_{te} ،K_t ,K_t ,K_t ,K_t ,K_t ,K_{te} ،K_t ,K_t ,K_{te} ،K_{te} ،K_t ,K_t ,K_t ,K_t ,K_t ,K_{te} ,K_t ,K_t ,K_t ,K_{te} ,K_t ,K_{te} ,K_t ,K_t*

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.

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\phi & -\sin\kappa\sin\phi & -\cos\kappa\sin\phi \\ \sin\phi & -\sin\kappa\cos\phi & -\cos\kappa\cos\phi \\ 0 & \cos\kappa & -\sin\kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t \\ dF_r \\ dF_a \end{bmatrix}$$
(1)

۵-۳- معادلهی انتگرالی نیروی ماشین کاری سطوح سهمی شکل

با فرض ابزار کفتراشی با یک لبهی برنده، میتوان نیروهای برش را برای ماشین کاری سطوح سهمی شکل با استفاده از رابطهی (۲۲) محاسبه نمود: (۲۲) $F_q(\phi) = \int_{z_1}^{z_2} dF_q(\phi)$; q=x, y, z

با توجه به مشخصات مسئله، عمق برش ₂ برابر با صفر و عمق برش ₂ z 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 ماشین کاری، مقدار z تابعی از زاویهی درگیری شعاعی لبهی برنده (۵) می باشد. بنابراین، طبق رابطهی (۲۳) و (۲۴) داریم:

$$F_q(\emptyset) = \int_0^{z_2(\emptyset)} dF_q(\emptyset) \quad ; q=x, y, z \tag{(YT)}$$

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

چنان که 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 سهمی شکل فراهم آمده است. از سوی دیگر، معادلهی (۲۴) نیروهای ماشین کاری را تنها با متغیر بودن پارامتر زاویهی درگیری شعاعی ابزار محاسبه مینماید. بنابراین، با در اختیار داشتن زوایای ورود و خروج از درگیری ابزار، چنان که در قسمت ۴ به آن پرداخته شد، میتوان انتگرال نیروهای ماشین کاری را در بازهی مربوطه و با داشتن مقدار زاویهی درگیری در هر گام انتگرال گیری محاسبه نمود.

با توجه به زاویهی درگیری محوری ۹۰ درجه، رابطهی (۲۵) برای لبهی برنده برقرار میباشد:

db = dS

(۲۵)

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

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

در زمینه ماشین کاری فولاد O2 AISI با استفاده از اینسرت ساخته شده از نیترید بر مکعبی، 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 ماشین کاری را مطابق جدول ۱ ارائه نمودهاند. همچنین ترکیب شیمیایی فولاد O2 را می توان در جدول ۲ مشاهده نمود.

اینسرت نیترید بر مکعبی 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 ۸/۰ میلی متر و زاویه ی براده ی صفر درجه می باشد [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 بهره گیری از دادههای مربوط به هندسه و جنس ابزار و قطعهی مورد نظر، در نرمافزار متلب برنامهی مربوط به نیروی مکانیستیک ماشین کاری نوشته شده است. در شکلهای ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نتایج بدست آمده برای نیروی برش در راستای x۰ y۰ 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 غیرد رگیر برابر با صفر می باشند.

٥-٥-بررسي نتايج

صحت مدل ریاضی عمق برش لحظهای توسط مدلسازی سهبعدی در نرمافزار 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]						
K _{te} (N/mm)	<i>K_{re}</i> (N/mm)	K _{ae} (N/mm)	<i>K_{tc}</i> (N/mm ²)	<i>K_{rc}</i> (N/mm ²)	K _{ac} (N/mm ²)	ضریب برشی
۵۸۱/۳۵	-726/61	۱۵۸/۹۶	۳۶۸۹/۱۱	-01.4/14	7707/14	مقدار میانگین



1. SolidWorks

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.45.5



نرمافزار، ارتفاع مهرهجوش در هر زاویهی درگیری دلخواه بر روی منحنی برخورد مربوطه قابلمحاسبه 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 ماشین کاری در شکل ۱۵، پیروی رفتار نیروها را از هندسه یمقطع برخورد نمایان می سازد. نیروی ماشین کاری مجموع (Ftotal) روند تغییرات نیرو برحسب زاویه ی درگیری شعاعی را نشان می دهد. از سوی دیگر، Ftotal بالاتر در زاویه ی درگیری شعاعی ۱۸۰ درجه نسبت به دو قله ی نیرویی دیگر ناشی از بیشینه بودن نرخ پیشروی $((\emptyset))$ 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 لحظهای در فرآیند کفتراشی سطوح متشکل از برآمدگیهای سهمیشکل ارئه شده است. بدین منظور

نخست توسط روابط ریاضی، هندسهی سطح متشکل از برآمدگیهای سهمیشکل، 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 ابعی وابسته ((گz2) 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

- 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.