



اثر زاویه براده و سرعت برشی ابزار روی نیروهای برشی در فرآیند خانکشی با استفاده از مدل‌سازی المان محدود

محمد کاظمی نصرآبادی^{۱*}، علی نوری^۱، سید مرتضی حسینی^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

۲- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۳۸۴۶۷۳۴۱۱ kazemi@ssau.ac.ir

چکیده

فرآیند خانکشی عملیات براده‌برداری خاصی است که بهوسیله ابزارهایی به نام تیغه‌ها یا سوزن‌های خانکشی با دندانه‌های برنده متولی و با اندازه‌های در حال افزایش اجرا می‌شود و ابزار تراش اجراء از مسیر معینی که برایش در نظر گرفته شده عبور کرده و قطعه کار ساخته می‌شود. در فرآیند خانکشی نرخ براده برداری بالا است بنابراین نیروهای برشی نیز زیاد است. با توجه به این که تعییر مکان‌های زیاد در اثر نیروهای برشی زیاد بوجود می‌آید، این فرآیند ممکن است باعث ایجاد خطاهای سطحی زیادی گردد. به همین علت باید توجه دقیقی به طراحی و تحلیل هندسه ابزار خانکشی و همچنین شرایط فرآیند لحاظ نمود. از آنجایی که با استفاده از تجهیزات جانی و همچنین میز ماشین خانکشی نمی‌توان به راحتی دینامومتر را روی آن نصب کرد به منظور محاسبه نیروهای از مدل‌سازی المان محدود می‌توان استفاده نمود. در این تحقیق شبیه‌سازی فرآیند خانکشی در محیط نرم‌افزار آباکوس انجام می‌گردد. پس از مدل‌سازی فرآیند، اثر پارامترهای زاویه براده و سرعت برشی روی نیروهای برشی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلیدواژگان: فرآیند خانکشی، نیروهای برشی، زاویه براده، سرعت برشی

The effect of tool rake angle and cutting speed on cutting force during broaching process by using Finite Element Modeling

Mohammad Kazemi Nasrabai^{1*}, Ali Noori¹, Seyed Morteza Hosseini²

Department of aerospace Engineering, shahid sattari air University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1384673411, Tehran, Iran, kazemi@ssau.ac.ir

ABSTRACT

Broaching is a specific method of removing metal by tools that have successively increasing cutting edges, the part is made through tool moving in a certain path. The cutting force is high as a result of high removal rate in the broaching process. The process may have too many surface errors since high displacement arose by this cutting force. For this reason, proper attention should be paid in the broaching tool design, geometry analysis and the process conditions. Considering the broach machining table and accessories, the dynamometer installation is complicated. Therefore, the finite element modeling can be used for evaluating the cutting force. In this study, the simulation of broaching process is done using Abaqus Software. After modeling the process, the effect of rake angle and cutting speed parameters on cutting forces are investigated.

Keywords: Broaching Process, Cutting Forces, Cutting Speed, Rake Angle.

نیروهای برشی در فرآیند شیارتراشی و قلاویزکاری مقایسه نمودند. ساترنلند و همکاران [۳] یک مدل نیرویی برای خانکشی را بر مبنای آنالیز براده‌برداری مایل جهت مشخص نمودن نیروهای برشی در فرآیند خانکشی چرخدنده انجام دادند. مدل آن‌ها رابطه بین سطح تماس، مقدار بار و نیروهای برشی را نشان داد. ساجیو و همکاران [۴,۵] اثر پارامترهای خانکشی بر روی تعییر شکل ابزار و قطعه کار و نیز شکل نهایی هندسه خانکشی را مورد بررسی قرار دادند. بوداک [۶] کارآیی ابزار خانکشی برای براده‌برداری از قسمت انتهایی پره‌های توربین را مورد بررسی قرار داد.

در فرآیندهای ماشین‌کاری نظیر تراش کاری و فرزکاری پارامترهای سرعت برشی، پیشروعی و عمق برش به راحتی در طول عملیات قابل تغییر می‌باشند. بنابراین در صورتی که ابزار برشی به درستی انتخاب نشده باشد، به منظور اصلاح فرآیند می‌توان پارامترهای سرعت برشی، پیشروعی و عمق برش

۱- مقدمه

برای تولید قطعات با شکل‌های مختلف و پروفیل‌های پیچیده از عملیات ماشین‌کاری بطور گستردگی استفاده می‌شود. یکی از عملیات ماشین‌کاری فرآیند خانکشی است که برای ماشین‌کاری رنج وسیعی از پروفیل‌های داخلی و خارجی پیچیده دایره‌ای و غیردایره‌ای نظیر سوراخ‌ها، جای خارهای راه‌گاه‌ها و شیارهای روی دیسک‌های توربین مورد استفاده قرار گرفته است. در حالت عمومی فرآیند خانکشی یک فرآیند برش متعامد است. خانکشی بوسیله فشار یا کشش یک ابزار مخروطی از میان قطعه کار برای براده‌برداری به منظور تولید پروفیل موردنیاز انجام می‌گیرد. از مزایای فرآیند خانکشی نسبت به دیگر فرآیندهای ماشین‌کاری قابلیت تولید بالاتر و دسترسی به کیفیت سطح بهتر است [۱].

گیلورمنی و همکاران [۲] نیروهای برشی در خانکشی ساده را با

Please cite this article using:

M. Kazemi Nasrabai, A. Noori, S.M. Hosseini, The effect of tool rake angle and cutting speed on cutting force during broaching process by using Finite Element Modeling, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 34-38, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Kazemi Nasrabai, A. Noori, S.M. Hosseini, The effect of tool rake angle and cutting speed on cutting force during broaching process by using Finite Element Modeling, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 34-38, 2015 (in Persian)

در این تحقیق شبیه‌سازی فرآیند خانکشی در محیط نرم‌افزار آباکوس⁴ انجام می‌گردد. پس از مدل سازی فرآیند، اثر پارامترهای زاویه براده و سرعت برشی بر روی نیروهای ماشین کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل سازی المان محدود شامل المان محدود ماده قطعه‌کار، ابزار برش و جزئیات شبیه‌سازی در دو مین بخش از این تحقیق مطرح شده است. اثر زاویه براده و سرعت برشی روی نیروهای برشی موضوع را ائمه شده در بخش سوم و چهارم از این تحقیق است. نهایتاً در آخرین بخش، نتیجه حاصل از این تحقیق ارائه می‌شود.

۲- مدل سازی المان محدود فرآیند خانکشی

اولین قدم در تعریف فرآیند خانکشی مدل سازی فرآیند است. نیاز اصلی برای پیش‌بینی نتایج یک فرآیند ماشین کاری پیش‌بینی نیروها می‌باشد. نیروهای ماشین کاری می‌توانند برای پیش‌بینی توان کشش در طول فرآیند، تنش‌ها روی ابزارهای خانکش و خطاهای شکل روی قطعات مورد استفاده قرار گیرد. جهات نیروهای برشی وابسته به هندسه ابزار و جهت برش است. در فرآیند خانکشی با توجه به این که طراحی ابزار برش برای برش مایل مشکل بوده و طول برش افزایش می‌یابد غالباً ابزارها برای برش‌های متعامد طراحی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در برش متعامد نیروهای اعمال شده فقط در دو جهت به نظر می‌رسند. اولین آنها نیروی برش مسامی F_t است که در جهت حرکت ابزار نسبت به قطعه کار می‌باشد و نیروی دوام نیروی پیشروی در جهت ضخامت براده F_r است [۹].

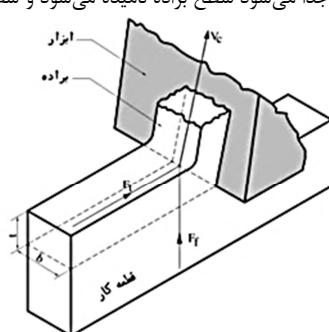
نیروهای برشی با استفاده از سطح براده جدا شده از قطعه کار و ضرایب نیروی برشی محاسبه می‌شوند. سطح براده از حاصل ضرب عرض براده⁵ (b) و عمق برش⁶ (t) محاسبه می‌شود.

$$F_r = K_r b t \quad (1)$$

در این رابطه K_r ضریب نیرو و t نشان‌دهنده جهت نیروی پیشروی یا مسامی است.

در این تحقیق یک ابزار خانکشی جای خار به‌طور دقیق آنالیز می‌شود و اثر پارامترهای زاویه براده و سرعت برشی روی نیروهای برشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار از یک نرم‌افزار آنالیز پیشرفته به نام آباکوس استفاده شده است. زوایای یک لبه از ابزار به صورت نشان داده شده در شکل ۴ تعریف می‌شود.

یک لبه از ابزار که به فرم گوشه می‌باشد اساساً متشکل از دو سطح است. که از تقاطع آن دو سطح، لبه ابزار به وجود می‌آید. سطحی که براده با تکیه به آن از قطعه کار جدا می‌شود سطح براده نامیده می‌شود و سطحی که باید



شکل ۳ شماتیک فرآیند برش متعامد [۹]

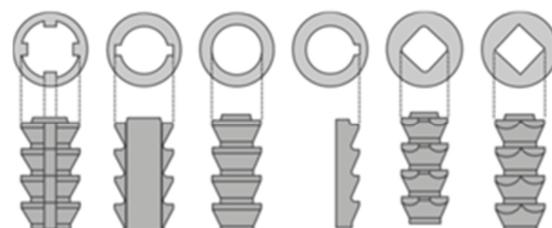
را تغییر داد اما در فرآیند خانکشی بجز سرعت برشی پارامترهای دیگر را نمی‌توان در طول فرآیند تغییر داد. بنابراین طراحی صحیح ابزار برشی نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی فرآیند تولید دارد [۷].

هر ابزار خانکش دارای دو پروفیل جانبی و جلویی مختلف است. پروفیل جلویی با توجه به هندسه برش تغییر می‌کند، در حالیکه پروفیل جانبی تقریباً در تمام ابزارهای خانکش مشابه هستند. شکل ۱ برخی از انواع پروفیل‌های جلویی ابزارهای خانکش را نشان می‌دهد.

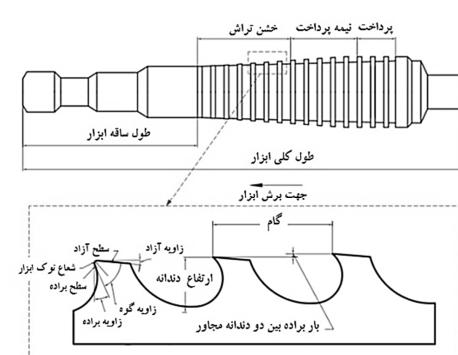
همان‌طور که در شکل فوق دیده می‌شود پروفیل جلویی وابسته به هندسه قطعه‌کار بوده و بر طبق آن باید طراحی شود. پروفیل جلویی ابزارهای خانکش از یک جای خار تکی تا یک شکل شش ضلعی تغییر می‌کند. و می‌تواند حتی موقع ماشین کاری شیارهای تعییش شده روی دیسک‌های توربین پیچیده‌تر نیز شود. شکل ۲ هندسه پروفیل جانبی را برای یک ابزار خانکش نوعی نشان می‌دهد.

پروفیل جانبی ابزار خانکش بوسیله خصوصیات ابزار از قبیل طول گام⁷ (P)، ارتفاع دندانه (h_b)، ضخامت دندانه در سطح نوک لند⁸ (f_b، زاویه براده⁹ α، زاویه آزاد¹⁰ β و پیشروی بر دندانه بیان می‌شود.

اگرچه زوایای براده مثبت، منفی و صفر به‌طور معمولی در عملیات ماشین-کاری استفاده می‌شوند ولی زاویه براده در ابزارهای خانکشی معمولاً مثبت است. زاویه براده مثبت ابزار برشی را تیز می‌کند، توان موردنیاز را کاهش می-دهد و به جریان براده روی سطح براده کمک می‌کند. باید توجه شود که زوایای براده کوچک مقاومت دندانه و نیروهای برشی را افزایش می‌دهند در حالی که زوایای برشی بزرگ نیروی برشی و مقاومت دندانه را کاهش می-دهند. به منظور داشتن نیروهای برشی مناسب و مقاومت کافی، زاویه براده باید در محدوده بهینه انتخاب شود.



شکل ۱ نمونه‌هایی از پروفیل‌های جلویی ابزارهای خانکش [۸]



شکل ۲ هندسه نوعی از پروفیل جانبی برای ابزارهای خانکش [۸]

4. Abaqus
5. with of cut
6. depth of cut

پارامترهای A, B, C, n و m ثابت‌های ماده هستند که برای آلیاز تیتانیوم $Ti6Al4V$ در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. همچنین T درجه حرارت ماده، E کرنش واقعی، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل که با نرخ کرنش رفنس $\dot{\epsilon}_0$ نرمالایز شده، هستند. در شبیه‌سازی ابزار یک ماده صلب ایده‌آل و قطعه کار یک ماده الاستو-پلاستیک در نظر گرفته شده است. در طول فرآیند برش، قطعه کار ثابت در نظر گرفته شده و ابزار نسبت به آن دارای حرکت است. خواص ابزار برشی و ماده قطعه کار در جدول ۲ داده شده است.

معیار شکست دینامیکی جانسون کوک زمانی که معیار آسیب از ۱ تجاوز کند اتفاق می‌افتد. پارامتر آسیب استفاده شده در این شبیه‌سازی به صورت معادله (۳) تعریف شده است.

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pi}}{\bar{\epsilon}_f^{pi}} \right) \quad (3)$$

در این رابطه $\Delta \bar{\epsilon}^{pi}$ نمکرنش پلاستیک معادل و $\bar{\epsilon}_f^{pi}$ کرنش در شکست تحت شرایط جاری است. بر طبق قانون آسیب جانسون کوک کرنش تجمعی در هر نمو از تحلیل تصحیح شده و عبارت عمومی کرنش در معیار شکست $\bar{\epsilon}_f^{pi}$ فرض می‌شود که به طور جداگانه با معادله (۴) داده شده است.

$$\bar{\epsilon}_f^{pi} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{P}{q})] [1 + d_4 \ln(\frac{\dot{\epsilon}^{pi}}{\dot{\epsilon}_0})] \quad (4)$$

$$[1 + d_5 \frac{T_r - T_m}{T_{melt} - T_r}]$$

در این رابطه d_1 تا d_5 پارامترهای شکست بوده و به صورت تجربی قابل محاسبه هستند. نسبت تنفس فشاری به تنفس ون-میسز (p/q) تعریف شده است. شکست برشی فیزیکی زمانی که پارامتر آسیب به ۱ برسد اتفاق می‌افتد. پارامترهای شکست برشی آلیاز $Ti6Al4V$ در جدول ۳ داده شده است.

جدول ۱ ثابت‌های مدل مواد جانسون کوک برای آلیاز $Ti6Al4V$

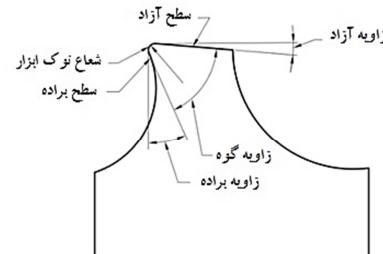
A	B	n	C	M	T_m	T_0
[MPa]	[MPa]				[°C]	[°C]
۸۶۲	۳۲۱	۰/۳۴	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	۱۶۵۰	۲۵

جدول ۲ مشخصه‌های مکانیکی - حرارتی ابزار و قطعه کار

پارامترهای مکانیکی و گرمایی	Ti6Al4V	(WC)	کاربید تنگستن
(kg/m³)	۴۴۳۰	۱۱۹۰۰	
مدول یانگ (GPa)	۱۱۰	۵۴۰	
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۲۲	
گرمای ویژه (J/Kg/°C)	۵۰۰/۵۲۵	۱۰۰	
هدایت حرارتی (W/m²°C)	۶۶	۵۰	

جدول ۳ پارامترهای قانون شکست جانسون کوک برای آلیاز $Ti6Al4V$

پارامترهای قانون آسیب	Ti-6Al-4V
کرنش شکست اولیه (d_1)	-۰/۰۹
فاکتور نمایی یا توانی (d_2)	۰/۲۵
فاکتور سه بعدی یا سه وجهی (d_3)	۰/۵
فاکتور نرخ کرنش (d_4)	۰/۰۱۴
فاکتور دما (d_5)	۳/۸۷



شکل ۴ شماتیک یک لبه از ابزار برشی

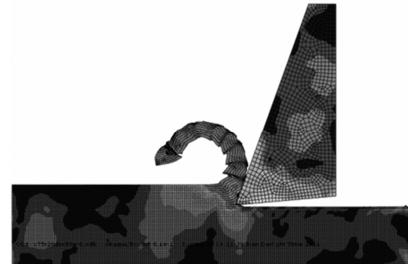
نسبت به سطح تراشیده شده قطعه کار آزاد باشد به سطح آزاد معروف است. یکی از متغیرهای بسیار مهم در براده‌برداری از روی قطعه کار شیب سطح جلویی لبه برند است که در براده‌برداری متعامد نسبت به امتداد عمود بر سطح براده‌برداری شده سنجیده می‌شود و به نام زاویه براده معروف است. سطح آزاد روی عمل براده‌برداری نقشی ندارد ولی زاویه بین سطح آزاد و سطح تراشیده شده از روی قطعه کار که به نام زاویه آزاد خوانده می‌شود تاثیر مستقیم روی نرخ فرسودگی ابزار دارد. مجموع زوایای براده، آزاد و گوه معادل ۹۰ درجه است [۱۰]. با توجه به این که فرآیند خانکشی ویژگی تقارن خوبی با برش متعامد دارد در شبیه‌سازی، مدل متعامد دو بعدی بجای مدل سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل هندسی فرآیند برش در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای ماده ابزار و قطعه کار از المان CPE4RT استفاده شده است. مدل اصطکاکی لغزشی بین سطح براده ابزار و براده براساس قانون اصطکاکی کولمب است. در این تحقیق به منظور کاهش زمان محاسبات شبیه‌سازی، ابعاد قطعه کار $1\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ ، طول ابزار 0.25 mm می‌لتر و ارتفاع ابزار 0.5 mm می‌لتر انتخاب شده است. پارامتر زاویه براده 5° ، 10° ، 15° و 20° درجه، زاویه آزاد 5° درجه، عمق برش 0.5 mm و سرعت برشی 3.0 m/min ، 1.5 m/min و 0.5 m/min و 0.4 m/min انتخاب شده است.

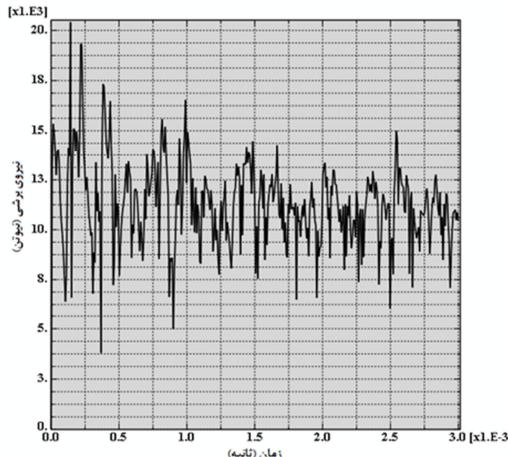
برای بررسی رفتار ماده و معیار جداسازی براده از مدل جانسون-کوک [۱۱] که برای تغییر شکل ماده در سرعت بالا و نرخ کرنش بالا مناسب است، طبق رابطه (۲) استفاده شده است [۱۲].

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T_r - T_m}{T_{melt} - T_r} \right)^m \right] \quad (2)$$

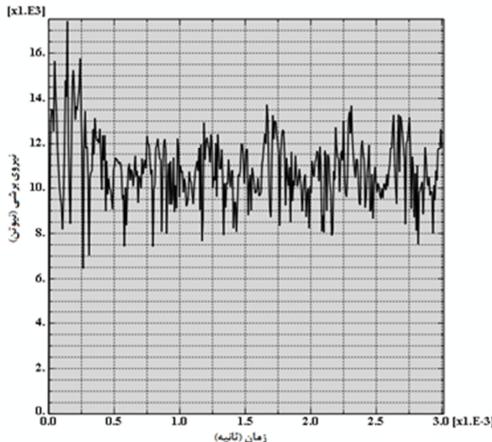
ارتباط بین تنفس، کرنش و حوزه‌های دمایی توسط این رابطه تعریف می‌شود. معادله (۲) تنفس واقعی را محاسبه می‌کند که برای شبیه‌سازی المان محدود در نرخ کرنش‌های بسیار بالا مناسب است. در این رابطه نرخ کرنش سختی در پرانتز اول، جریان تنفس در نرخ کرنش‌های زیاد در پرانتز دوم و نرخ نرم شدگی مواد در اثر براده‌برداری در پرانتز سوم تعریف می‌شود.



شکل ۵ شماتیک مدل هندسی فرآیند برش



شکل ۸ دیاگرام نیروی برشی برای زاویه براده ۱۵ درجه و سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۰۵ میلی متر



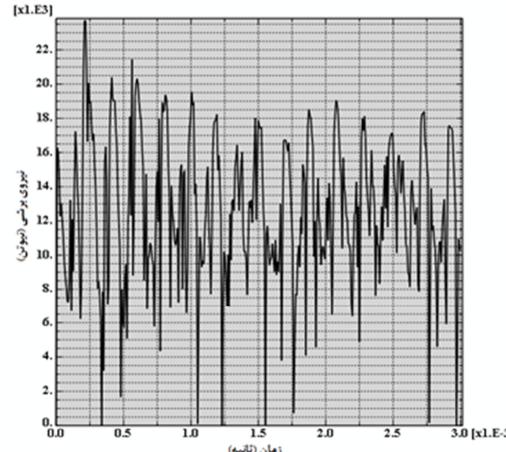
شکل ۹ دیاگرام نیروی برشی برای زاویه براده ۲۰ درجه و سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۰۵ میلی متر

۳- اثر زاویه براده روی نیروهای برشی

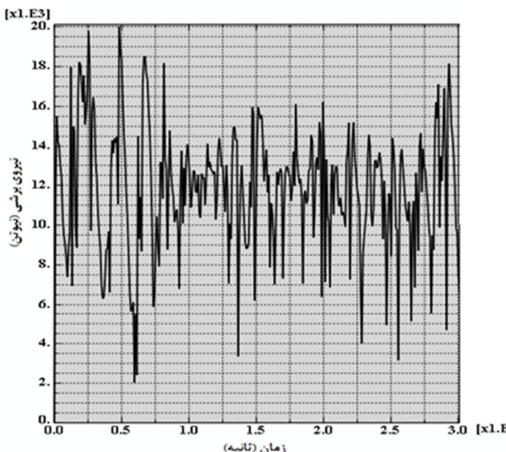
زاویه بین سطح برش و جهت عمود به سطح قطعه کار را زاویه براده می‌نامند. اگرچه زوایای براده مثبت، منفی و صفر در عملیات ماشین‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرند اما زاویه براده در فرآیند خانکشی عموماً مثبت است. زاویه براده اثر مهمی روی نیروهای برشی دارد.

شبیه‌سازی برای عمق برش ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه، زوایای برشی ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۷۵ متر بر دقیقه و زوایای براده ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه انجام شده است. شکل‌های ۶ تا ۹ نتایج شبیه‌سازی برای سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه، عمق برش ۰/۰۵ میلی‌متر و زوایای براده ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه را در نوک ابزار نشان می‌دهد.

قابل توجه‌ترین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که زاویه براده اثر مهمی روی نیروهای برشی دارد بطوریکه با افزایش زاویه براده همه سرعتهای برشی مورد بررسی نیروهای برشی کاهش می‌یابد. از آنجائیکه زاویه براده مثبت‌تر باعث تولید زاویه برشی بالاتری می‌شود ابزار برشی به آسانی داخل قطعه کار نفوذ کرده و بنا بر این به کاهش نیروی برشی ممکن می‌کند. نتایج حاصله گرایش مشابهی با نتایج ارائه شده توسط مراجع [۱۶، ۱۵] دارد.



شکل ۶ دیاگرام نیروی برشی برای زاویه براده ۵ درجه و سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۰۵ میلی متر



شکل ۷ دیاگرام نیروی برشی برای زاویه براده ۱۰ درجه و سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۰۵ میلی متر

۴- اثر سرعت برشی روی نیروهای ماشین کاری

یکی از پارامترهایی که روی نیروهای برشی تأثیر دارد سرعت برشی است. عموماً در فرآیند خانکشی سرعت برشی در مقایسه با دیگر فرآیندهای ماشین کاری نظیر تراش کاری و فرزکاری خیلی پایین است. در این بخش اثر سرعت برشی روی نیروهای برشی در فرآیند خانکشی با استفاده از نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

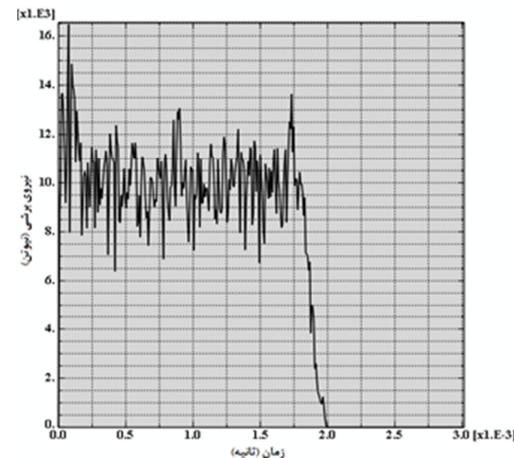
به منظور بررسی اثر سرعت برشی روی نیروی برشی فرآیند شبیه‌سازی برای زاویه براده ۲۰ درجه، عمق برش ۰/۰۵ میلی‌متر و سرعت برشی ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۷۵ متر بر دقیقه انجام شده است. شکل ۱۰ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی برای مقدار زاویه براده ۲۰ درجه، عمق برش ۰/۰۵ میلی‌متر و سرعت برشی ۳۰ متر بر دقیقه را در نوک ابزار نشان می‌دهد. نیروی برشی در شبیه‌سازی گذرا ناپایدار و بصورت نوسانی بوده و در شبیه‌سازی حالت یکنواخت، ثابت باقی می‌ماند. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۱۰، نیروی برشی اندازه‌گیری شده حدود ۱۰ KN است.

دیگر نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بصورت نمودار نشان داده شده در شکل ۱۱ آمده است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برشی از ۱۵ به ۷۵ متر بر دقیقه نیروی برشی کاهش می‌یابد.

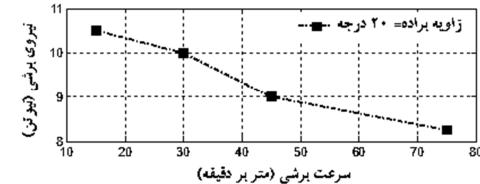
می دهد. در این حالت جریان براده ملائم تر و همچنین تغییر فرم پلاستیک پاپین تری نیاز می شود. بنابراین تغییر در زاویه براده در جهت مثبت اثر مثبتی روی نیروهای برشی دارد. همچنین در صورت تغییر سرعت برشی مثلاً از ۱۵ متر بر دقیقه تا ۷۵ متر بر دقیقه، نیروهای برشی نیز کاهش می یابند. نتایج حاصله گرایش مشابهی با نتایج ارائه شده توسط مراجع [۱۶، ۱۵] دارد.

۶- مراجع

- [1] Ertunga C. Ozelkan, OzkanOzturk, ErhanBudak, Optimization of Broaching Design , *Industrial Engineering Research Conference Proceedings*, 2007
- [2] P. Gilormini, E. Felder, L. Tronchet, F. Leroy, F. Le Maitre, A comparative analysis of three machining processes: broaching, tapping and slotting, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 33 (1984) 19-22.
- [3] J. Sutherland, E. Salisbury, F. Hoge, A model for the cutting force system in the gear broaching process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (1997) 1409-1421.
- [4] V. Sajeev, L. Vijayaraghavan, U. Rao, An analysis of the effects of burnishing in internal broaching, *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 28 (2000) 163-173.
- [5] V. Sajeev, L. Vijayaraghavan, U. Rao, Effect of tool-work deflections on the shape of a broached hole, *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 28 (2000) 88.
- [6] E. Budak, Broaching process monitoring, in: *Proceedings of Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining*, Metz-France, 2001, pp. 251-260.
- [7] Sayyed Ali Hosseini, B. Sc., M. Sc., *model based simulation of broaching operation: cutting mechanics, surface integrity and process optimization*, A Thesis Submitted in Partial fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Ontario Institute of Technology, April 2013
- [8] F.D. Jones, D.T. Hamilton, C.L. Lucas, *Broaching*, The Industrial press, 1914.
- [9] E.Budak, Y. Altintas, and E.J., Armergo, Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data, *Trans. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 18: 216-224. 1996
- [10] Rajender Singh, *Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology*,2006
- [11] Johnson G R and Cook W H., Fracture characteristics of three metals subjected to various strain rates, temperature and pressure *Engineering Fracture Mechanics*, 2 31-48, 1985
- [12] Iqbal S A, Mativenga P T and Sheikh M A, Characterization of machining of AISI 1045steel over a wide range of cutting speeds. Part 2: evaluation of flow stress models and interfacefriction distribution schemes, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221 917-926, 2007
- [13] Johnson, G. and Holmquist, T.: *Test data and computational strengthen and fracture model constants for 23 materials subjected to large strain, high-strain rates, and high temperatures*. Los Alamos National laboratory, p. 425, 11463-MS. (Cited on pages 9, 31, and 32.)
- [14] Johnson, G.R.: Strength and fracture characteristics of a titanium alloy (.06al, .04v) subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressure. Naval Surface Weapons Center NSWC, pp. 86, U-144, 1985. (Cited on pages xiii and 37.)
- [15] David Christian Bowes, Numerical Modelling of Ti6Al4V Machining: *A Combined FEA and Unified Mechanics of Cutting Approach*, March 2013
- [16] Santosh P. Rahane Sangammer, Prof. V. D. Wakchhare, Influence of Rake Angle and Cutting Speed on Residual Stresses Developed in the Cutting Tool During Orthogonal Cutting, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3 Issue 3, March - 2014, ISSN: 2278-0181
- [17] E. Ceretti, P. Fallböhmer, W. T. Wu, and T. Altan, Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59 (1996): 169-181.



شکل ۱۰ دیاگرام نیروی برشی در فرایند شبیه سازی برای زاویه براده ۲۰ درجه، سرعت برشی ۳۰ متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۰۵ میلی متر

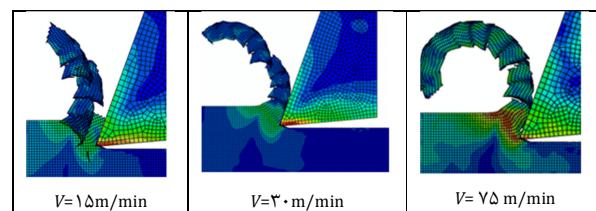


شکل ۱۱ تغییرات نیروی برشی با افزایش سرعت برشی

مدل شبیه سازی شده قادر به پیش بینی شکل گیری براده بصورت براده های دندانه ارمای یا منقطع همانند ماشین کاری واقعی آلیاژ تیتانیوم است. شکل گیری براده در سرعت های برشی ۱۵، ۳۰، ۷۵ و ۰/۰۵ میلی متر بر دقیقه برای عمق برش ۰/۰۵ میلی متر و زاویه براده ۲۰ درجه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود شکل ۱۲ در سرعت برشی ۷۵ متر بر دقیقه هموارتر است. لازم به ذکر است که سرتی ۱ و همکاران [۱۷] نیز شکل گیری براده های حلقوی را در سرعت های برشی بالاتر ارائه داده اند.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر زاویه براده و سرعت برشی روی نیروهای برشی در فرآیند خانکشی با استفاده از مدل سازی المان محدود در نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که زاویه براده اثر مهمی روی نیروهای برشی دارد به طوری که با افزایش زاویه براده مثلاً از ۵ درجه تا ۲۰ درجه برای همه سرعت های برشی مورد بررسی نیروهای برشی کاهش می یابد. برای زوایای براده بالاتر، زاویه برشی افزایش یافته و ابزار به آسانی داخل قطعه کار نفوذ می کند و در نتیجه نیروهای برشی را کاهش



شکل ۱۲ شکل گیری براده با عمق برش ۰/۰۵ میلی متر و زاویه براده ۲۰ درجه