



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

محمد کاظمی نصرآبادی<sup>۱\*</sup>، علی نوری<sup>۱</sup>، سید مرتضی حسینی<sup>۲</sup>

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

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

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

### چکیده

فرآیند خان‌کشی عملیات براده‌برداری خاصی است که به وسیله ابزارهایی به نام تیغه‌ها یا سوزن‌های خان‌کشی با دندانه‌های برنده متوالی و با اندازه‌های در حال افزایش اجرا می‌شود و ابزار تراش اجباراً 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 تغییر مکان‌های زیاد در اثر نیروهای برشی زیاد بوجود می‌آید، این فرآیند ممکن است باعث ایجاد خطاهای سطحی زیادی نیز گردد. به همین علت باید توجه دقیقی به طراحی و تحلیل هندسه ابزار خان-کشی و همچنین شرایط فرآیند لحاظ نمود. از آنجایی که با استفاده از تجهیزات جانبی و همچنین میز ماشین خان‌کشی نمی‌توان به راحتی دینامومتر را روی آن نصب کرد به منظور محاسبه نیروها، 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.

کلید واژگان: 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<sup>1\*</sup>, Ali Noori<sup>1</sup>, Seyed Morteza Hosseini<sup>2</sup>

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. ساترلند و همکاران [۳] یک مدل نیرویی برای خان‌کشی را بر مبنای آنالیز براده‌برداری مایل جهت مشخص نمودن نیروهای برشی در فرآیند خان‌کشی چرخنده انجام دادند. مدل آن‌ها رابطه بین سطح تماس، مقدار بار و نیروهای برشی را نشان داد. ساجیو و همکاران [۵،۴] اثر پارامترهای خان‌کشی بر روی تغییر شکل ابزار و قطعه‌کار و نیز شکل نهایی هندسه خان‌کشی را مورد بررسی قرار دادند. بوداک [۶] کارایی ابزار خان‌کشی برای براده‌برداری از قسمت انتهایی پرده‌های توربین را مورد بررسی قرار داد.

در فرآیندهای ماشین‌کاری نظیر تراش‌کاری و فرزکاری پارامترهای سرعت برشی، پیشروی 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، پیشروی و عمق برش

### ۱- مقدمه

برای تولید قطعات با شکل‌های مختلف و پروفیل‌های پیچیده از عملیات ماشین‌کاری بطور گسترده‌ای 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 خارها، 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 قطعه‌کار برای براده‌برداری به منظور تولید پروفیل مورد نیاز انجام می‌گیرد. از مزایای فرآیند خان‌کشی نسبت به دیگر فرآیندهای ماشین‌کاری قابلیت تولید بالاتر و دسترسی به کیفیت سطح بهتر است [۱].

گیلورمینی 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:

در این تحقیق شبیه‌سازی فرآیند خان‌کشی در محیط نرم‌افزار آباکوس<sup>۴</sup> انجام می‌گردد. پس از مدل‌سازی فرآیند، اثر پارامترهای زاویه براده و سرعت برشی بر روی نیروهای ماشین‌کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی المان محدود شامل مدل المان محدود ماده قطعه‌کار، ابزار برش و جزئیات شبیه‌سازی در دومین بخش از این تحقیق مطرح شده است. اثر زاویه براده و سرعت برشی روی نیروهای برشی موضوع ارائه شده در بخش سوم و چهارم از این تحقیق است. نهایتاً در آخرین بخش، نتیجه حاصل از این تحقیق ارائه می‌شود.

## ۲- مدل‌سازی المان محدود فرآیند خان‌کشی

اولین قدم در تعریف فرآیند خان‌کشی مدل‌سازی فرآیند است. نیاز اصلی برای پیش‌بینی نتایج یک فرآیند ماشین‌کاری پیش‌بینی نیروها می‌باشد. نیروهای ماشین‌کاری می‌تواند برای پیش‌بینی توان کشش در طول فرآیند، تنش‌ها روی ابزارهای خان‌کشی و خطاهای شکل روی قطعات مورد استفاده قرار گیرد. جهت نیروهای برشی وابسته به هندسه ابزار و جهت برش است. در فرآیند خان‌کشی با توجه به این‌که طراحی ابزار برای برش مایل مشکل بوده و طول برش افزایش می‌یابد غالباً ابزارها برای برش‌های متعام طراحی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در برش متعام نیروهای اعمال شده فقط در دو جهت به نظر می‌رسند. اولین آنها نیروی برش مماسی  $F_t$  است که در جهت حرکت ابزار نسبت به قطعه کار می‌باشد و نیروی دوم نیروی پیشروی در جهت ضخامت براده  $F_f$  است [۹].

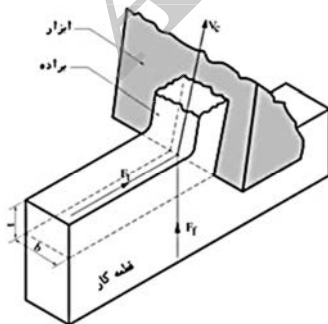
نیروهای برشی با استفاده از سطح براده جدا شده از قطعه کار و ضرایب نیروی برشی محاسبه می‌شوند. سطح براده از حاصل ضرب عرض براده<sup>۵</sup> ( $b$ ) و عمق برش<sup>(۶)</sup> ( $t$ ) محاسبه می‌شود.

$$F_f = K_f b t \quad (1)$$

در این رابطه  $K$  ضریب نیرو و  $i$  نشان‌دهنده جهت نیروی پیشروی یا مماسی است.

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

یک لبه از ابزار که به فرم گوه 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 متعام [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 خان‌کشی 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 خان‌کشی مشابه هستند. شکل ۱ برخی از انواع پروفیل‌های جلویی ابزارهای خان‌کشی را نشان می‌دهد.

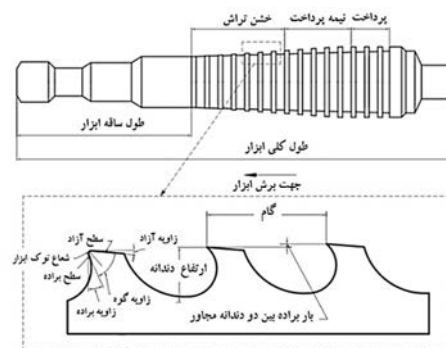
همان‌طور که در شکل فوق دیده می‌شود پروفیل جلویی وابسته به هندسه قطعه‌کار بوده و بر طبق آن باید طراحی شود. پروفیل جلویی ابزارهای خان‌کشی از یک جای خار تکی تا یک شکل شش ضلعی تغییر می‌کند. و می‌تواند حتی موقع ماشین‌کاری شیارهای تعبیه شده روی دیسک‌های توربین پیچیده‌تر نیز شود. شکل ۲ هندسه پروفیل جانبی را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

پروفیل جانبی ابزار خان‌کشی بوسیله خصوصیات ابزار از قبیل طول گام  $(P)$ ، ارتفاع دندان  $(h_d)$ ، ضخامت دندانه در سطح نوک لند<sup>۱</sup>  $(f_n)$ ، زاویه براده<sup>۲</sup>  $\alpha$ ، زاویه آزاد<sup>۳</sup>  $\beta$  و پیشروی بر دندانه بیان می‌شود.

زاویه براده، زاویه بین سطح برشی و جهت عمود به سطح قطعه کار است. اگرچه زوایای براده مثبت، منفی و صفر به‌طور معمولی در عملیات ماشین‌کاری استفاده می‌شوند ولی زاویه براده در ابزارهای خان‌کشی معمولاً مثبت است. زاویه براده مثبت ابزار برشی را تیز می‌کند، توان موردنیاز را کاهش می‌دهد 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 حالی‌که زوایای برشی بزرگ نیروی برشی و مقاومت دندانه‌ها را کاهش می‌دهند. به منظور داشتن نیروهای برشی مناسب و مقاومت کافی، زاویه براده باید در محدوده بهینه انتخاب شود.



شکل ۱ نمونه‌هایی از پروفیل‌های جلویی ابزارهای خان‌کشی [۸]



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

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

1. land  
2. Rake Angle  
3. Clearane Angle

پارامترهای  $A, B, C, n$  و  $m$  ثابت‌های ماده هستند که برای آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. همچنین  $T$  درجه حرارت ماده،  $T_r$  درجه حرارت رفرنس،  $T_m$  درجه حرارت ذوب ماده،  $\dot{\epsilon}$  کرنش واقعی،  $\dot{\epsilon}_0$  کرنش پلاستیک معادل که با نرخ کرنش رفرنس  $\dot{\epsilon}_0$  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  $\Delta \bar{\epsilon}^{pi}$  نموکرنش پلاستیک معادل و  $\bar{\epsilon}^{pi}$  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 به‌طور جداگانه با معادله (۴) داده شده است.

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

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

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

**جدول ۱** ثابت‌های مدل مواد جانسون کوک برای آلیاژ Ti6Al4V [۱۳]

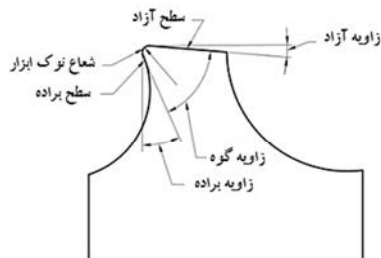
A	B	n	C	M	$T_m$ °C	$T_0$ °C
[MPa]	[MPa]					
۸۶۲	۳۳۱	۰/۳۴	۰/۰۱۴	۰/۸	۱۶۵۰	۲۵

**جدول ۲** مشخصه‌های مکانیکی - حرارتی ابزار و قطعه کار [۱۳]

پارامترهای مکانیکی و گرمایی	Ti6Al4V (WC)	کاربید تنگستن <sup>۱</sup>
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۴۴۳۰	۱۱۹۰۰
مدول یانگ (GPa)	۱۱۰	۵۴۰
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۲۲
گرمای ویژه (J/Kg/°C)	۵۰۰/۵۲۵	۱۰۰
هدایت حرارتی (W/m°C)	۶/۶	۵۰

**جدول ۳** پارامترهای قانون شکست جانسون کوک برای آلیاژ Ti6Al4V [۱۴]

پارامترهای قانون آسیب	Ti-6Al-4V
کرنش شکست اولیه ( $d_1$ )	-۰/۰۹
فاکتور نمایی یا توانی ( $d_2$ )	۰/۲۵
فاکتور سه بُعدی 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

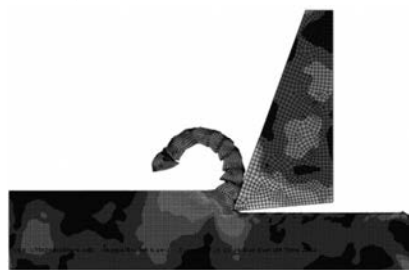
نسبت به سطح تراشیده شده قطعه کار آزاد باشد به سطح آزاد معروف است. یکی از متغیرهای بسیار مهم در براده‌برداری از روی قطعه کار شیب سطح جلویی لبه برنده است که در براده‌برداری متعامد نسبت به امتداد عمود بر سطح براده‌برداری شده سنجیده می‌شود و به نام زاویه براده معروف است. سطح آزاد روی عمل براده‌برداری نقشی 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 ۱mm x ۰/۲mm و طول ابزار ۰/۲۵ میلی متر و ارتفاع ابزار ۰/۵ میلی متر انتخاب شده است. پارامتر زاویه براده ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه، زاویه آزاد ۵ درجه، عمق برش ۰/۰۵ mm و سرعت برشی ۱۵m/min، ۳۰m/min، ۴۵m/min و ۷۵m/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].

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

ارتباط بین تنش، کرنش و حوزه‌های دمایی توسط این رابطه تعریف می‌شود. معادله (۲) تنش 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 تنش 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

2. Tungsten Carbide

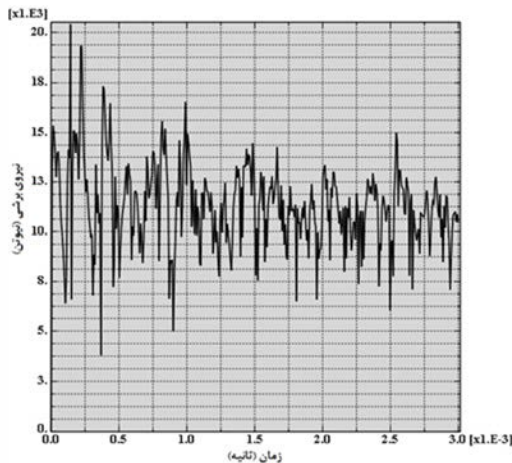
1. Four-Node bilinear Displacement & Temperature

### ۳- اثر زاویه براده روی نیروهای برشی

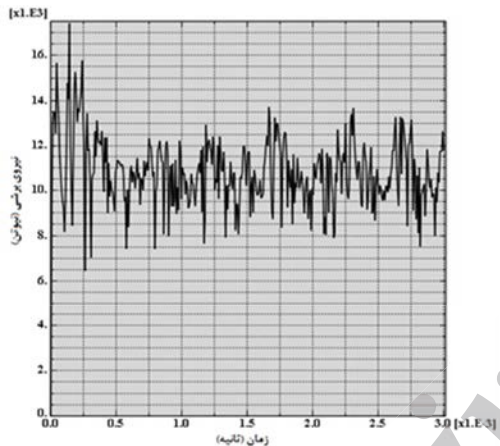
زاویه بین سطح برش و جهت عمود به سطح قطعه کار را زاویه براده می‌نامند. اگرچه زوایای براده مثبت، منفی و صفر در عملیات ماشین‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرند اما زاویه براده در فرآیند خان‌کشی عموماً مثبت است. زاویه براده اثر مهمی روی نیروهای برشی دارد.

شبیه‌سازی برای عمق برش  $0.05$  میلی‌متر بر دقیقه، زوایای برشی  $15$ ،  $30$ ،  $45$ ،  $75$  متر بر دقیقه و زوایای براده  $5$ ،  $10$ ،  $15$  و  $20$  درجه انجام شده است. شکل‌های ۶ تا ۹ نتایج شبیه‌سازی برای سرعت برشی  $15$  متر بر دقیقه، عمق برش  $0.05$  میلی‌متر و زوایای براده  $5$ ،  $10$ ،  $15$  و  $20$  درجه را در نوک ابزار نشان می‌دهد.

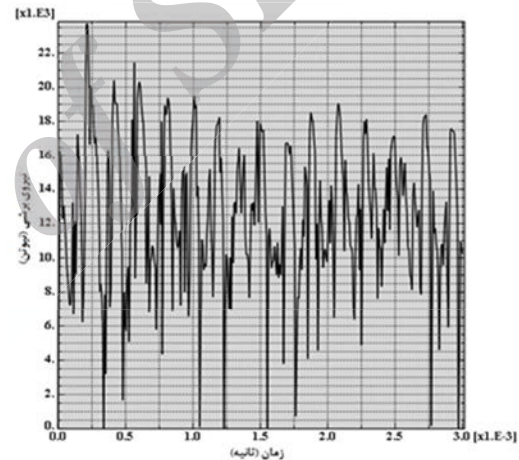
قابل توجه‌ترین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که زاویه براده اثر مهمی روی نیروهای برشی دارد بطوریکه با افزایش زاویه براده برای همه سرعت‌های برشی مورد بررسی نیروهای برشی کاهش می‌یابد. از آنجائیکه زاویه براده مثبت‌تر باعث تولید زاویه برشی بالاتری می‌شود ابزار برشی به آسانی داخل قطعه کار نفوذ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



شکل ۸: دیاگرام نیروی برشی برای زاویه براده  $15$  درجه و سرعت برشی  $15$  متر بر دقیقه و عمق برش  $0.05$  میلی‌متر



شکل ۹: دیاگرام نیروی برشی برای زاویه براده  $20$  درجه و سرعت برشی  $15$  متر بر دقیقه و عمق برش  $0.05$  میلی‌متر



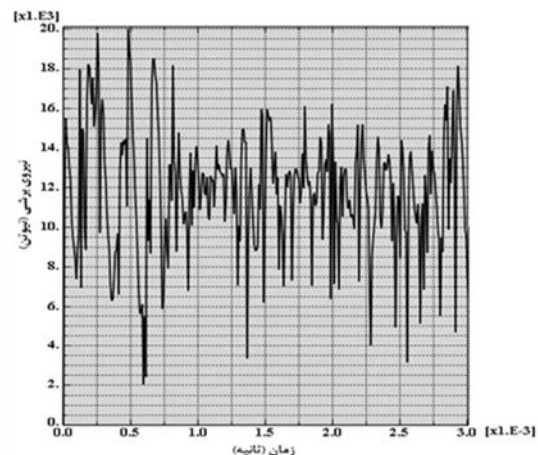
شکل ۶: دیاگرام نیروی برشی برای زاویه براده  $5$  درجه و سرعت برشی  $15$  متر بر دقیقه و عمق برش  $0.05$  میلی‌متر

### ۴- اثر سرعت برشی روی نیروهای ماشین‌کاری

یکی از پارامترهایی که روی نیروهای برشی تاثیر دارد سرعت برشی است. عموماً در فرآیند خان‌کشی سرعت برشی در مقایسه با دیگر فرآیندهای ماشین‌کاری نظیر تراش‌کاری 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  $20$  درجه، عمق برش  $0.05$  میلی‌متر و سرعت برشی  $15$ ،  $30$ ،  $45$ ،  $75$  متر بر دقیقه انجام شده است. شکل ۱۰ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی برای مقدار زاویه براده  $20$  درجه، عمق برش  $0.05$  میلی‌متر و سرعت برشی  $30$  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  $10$  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  $15$  به  $75$  متر بر دقیقه نیروی برشی کاهش می‌یابد.

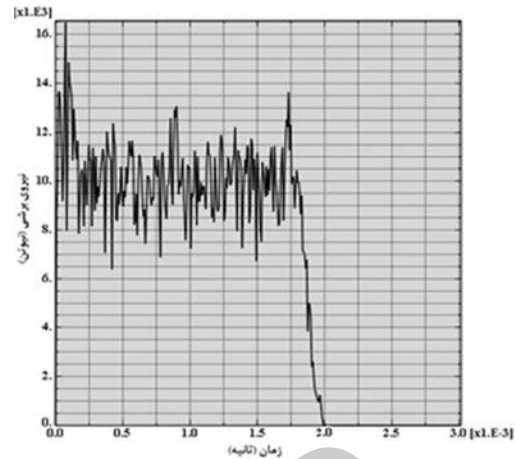


شکل ۷: دیاگرام نیروی برشی برای زاویه براده  $10$  درجه و سرعت برشی  $15$  متر بر دقیقه و عمق برش  $0.05$  میلی‌متر

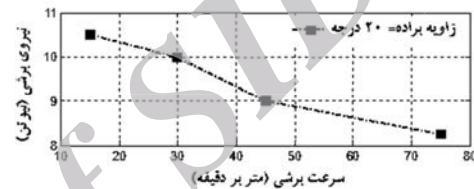
می‌دهد. در این حالت جریان براده ملایم‌تر و همچنین تغییر فرم پلاستیک پایین‌تری نیاز می‌شود. بنابراین تغییر در زاویه براده در جهت مثبت اثر مثبتی روی نیروهای برشی دارد. همچنین در صورت تغییر سرعت برشی مثلاً از ۱۵ متر بر دقیقه تا ۷۵ متر بر دقیقه، نیروهای برشی نیز کاهش می‌یابند. نتایج حاصله گرایش مشابهی با نتایج ارائه شده توسط مراجع [۱۶، ۱۵] دارد.

#### ۶- مراجع

- [1] Ertunga C. Ozelkan, OzkanOztürk, 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 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 2: evaluation of flow stress models and interface friction 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 strength 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 Sangamner, Prof. V. D. Wakchuare, 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. Fallabomer, 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 فرآیند شبیه‌سازی برای زاویه براده ۲۰ درجه، سرعت برشی ۳۰ متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۰۵ میلی‌متر

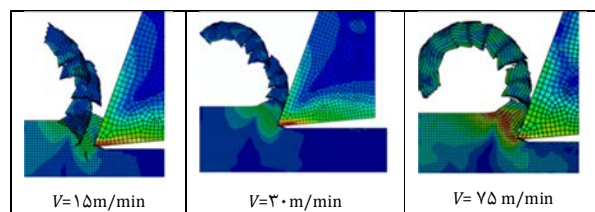


شکل ۱۱ تغییرات نیروی برشی با افزایش سرعت برشی

مدل شبیه‌سازی شده قادر به پیش‌بینی شکل‌گیری براده بصورت براده‌های دندان‌اره‌ای یا منقطع همانند ماشین‌کاری واقعی آلیاژ تیتانیوم است. شکل‌گیری براده در سرعت‌های برشی ۱۵، ۳۰ و ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه برای عمق برش ۰/۰۵ میلی‌متر و زاویه براده ۲۰ درجه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود شکل براده در سرعت برشی ۷۵ متر بر دقیقه هموارتر است. لازم به ذکر است که سرتی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۷] نیز شکل‌گیری براده‌های حلقه‌ای را در سرعت‌های برشی بالاتر ارائه داده‌اند.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر زاویه براده و سرعت برشی روی نیروهای برشی در فرآیند شان‌کشی با استفاده از مدل‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که زاویه براده اثر مهمی روی نیروهای برشی دارد به‌طوری‌که با افزایش زاویه براده مثلاً از ۵ درجه تا ۲۰ درجه برای همه سرعت‌های برشی مورد بررسی نیروهای برشی کاهش می‌یابد. برای زوایای براده بالاتر، زاویه برشی افزایش یافته و ابزار به آسانی داخل قطعه‌کار نفوذ می‌کند و در نتیجه نیروهای برشی را کاهش



شکل ۱۲ شکل‌گیری براده با عمق برش ۰/۰۵ میلی‌متر و زاویه براده ۲۰ درجه