



شبیه سازی فرآیند ماشین کاری متعامد آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) به روش المان محدود

محمد رضا ذاکریان^{*}، میلاد ابراهیمی، یاسین فتحعلی زاده آبادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۶۴۷۶۸۷۸۱۱، Haghdoost@ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله هدف شبیه سازی فرآیند ماشین کاری متعامد آلیاژ تیتانیوم با استفاده از روش المان محدود می باشد. شبیه سازی به روش المان محدود درک فرآیند برش را آسان و طراحی ابزار را در جهت افزایش عمر ابزار و کاهش نیروهای ماشین کاری بهینه می نماید. شبیه سازی به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم افزار ABAQUS^{۱۳} انجام شده است. تاثیر تغییرات پارامترهای ماشین کاری شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی بر روی نیروهای اصلی و تنش برشی و عمر ابزار بررسی گردیده است. برای صحت گذاری بر نتایج نرم افزار، از آزمایش های تجربی انجام شده در این زمینه استفاده گردیده و نتایج با مقادیر حاصل از آزمایش های مذکور مقایسه گردیده اند. بررسی ها نتایج نشان می دهد که نتایج حاصل از شبیه سازی تطابق خوبی با مقادیر تجربی دارد.

کلید واژگان: ماشین کاری متعامد، ABAQUS 6.13، شبیه سازی المان محدود، هندسه ابزار، پارامترهای ماشین کاری

Simulation of orthogonal machining process of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by finite element method

Mohammadreza Zakerian^{*}, Milad Ebrahimi, Yasin Fathalizadeh

Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B 1647687811, Tehran, Iran, Haghdoost@ut.ac.ir

ABSTRACT

This study aims to simulate the orthogonal machining process of titanium alloy using finite element method. Simulation with finite element method makes the cutting process easy to understand, increases tool life and reduces the cutting forces. Three-dimensional simulation was performed using the Abaqus software. The effects of machining parameters include the cutting speed and feed rate on the cutting and feed forces, shear stress and tool life were assessed. To validate the results of the application, the experiments were carried out in the field and the results were compared with the values obtained from the tests. The results showed that the simulation results are in good agreement with the experimental data.

Keywords: Abaqus, Finite Element Method, Machining Parameters, Orthogonal Cutting, Tool Geometry

است که واپیش المان ها بسیار زیاد است [۳]. هدف ما بررسی تاثیر پارامترهای ماشین کاری شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی بر روی نیروهای ماشین کاری شامل نیروی اصلی و نیروی پیشروی با استفاده از روش المان محدود است. سپس نتایج با مقادیر تجربی صحت گذاری شده اند.

۲- مدل سازی خواص مواد

تنش تسلیم و استحکام لحظه ای مواد تحت کارسختی بستگی به دما، نرخ کرنش و کرنشی دارد که در آن ماده تحت کار سختی قرار می گیرد. تخمین استحکام و جریان تنش مواد معمولاً به صورت تجربی و از طریق انجام آزمایش تعیین می شود و مدل های متنوعی برای توصیف منحنی جریان تنش مواد وجود دارد. یکی از این مدل ها که در این مقاله از آن استفاده شده است مدل جانسون-کوک است. این مدل در دهه ۸۰ میلادی توسعه پیدا کرد و برای تغییر شکل های سریع و یا تغییر شکل هایی که کرنش در آنها بالاست- مثل فرآیند ماشین کاری- کاربرد دارد [۴]. رابطه جانسون-کوک شامل نرخ کرنش پلاستیک، کرنش پلاستیک، توان کرنش سختی m ، نرخ کرنش پلاستیک اولیه، دمای ذوب (T_{melt})، دمای اتاق (T_{room}) و توان حساسیت نرخ کرنش m است. A و B و C ثابت های معادله هستند.

۱- مقدمه

ماشین کاری یکی از روش های مهم در بین فرآیندهای تولید بوده و دارای گستره بسیار بزرگی از عملیات های مختلف از قبیل فرزکاری، سنگ زنی، تراش کاری، سوراخ کاری و غیره است. آزمایش ها و مطالعات بسیاری برای شبیه سازی، پیش بینی و بهینه کردن این فرآیند در سال های گذشته انجام شده است. پژوهش هایی در زمینه نحوه حرکت براده، نیروهای وارد بر آن برای فرآیند ماشین کاری متعامد حین سرعت های ۱۵ تا ۲۰۰ متر بر دقیقه انجام شده است [۱]. همچنین آزمایش هایی برای تشخیص حرکت براده در سرعت های بالا در بازه ۳۰۰ تا ۴۸۰۰ متر بر دقیقه نیز انجام گرفته است [۲]. این مقاله برای شبیه سازی از نرم افزار ABAQUS^{۱۳} بهره گرفته که در آن از روش لاگرانژین برای شبیه سازی فرآیند استفاده شده است. این روش برای مواردی که واپیش نسبتاً کم و تغییر شکل زیاد نیست، مناسب است. برای شبیه سازی برش فلزات روش لاگرانژین ارجحیت دارد زیرا تشکیل براده از ابتدای فرآیند تا رسیدن به حالت پایدار را، راحت تر شبیه سازی می کند. هندسه براده در این روش قابل پیش بینی نیست و آن را تابعی از تغییر شکل، پارامترهای ماشین کاری و خواص ماده در نظر می گیرند. از معایب این روش در مقایسه با سایر روش ها افزایش زمان و همچنین کاهش پایداری در مواقعی

Please cite this article using:

M.R. Zakerian, M. Ebrahimi, Y. Fathalizadeh, Simulation of orthogonal machining process of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by finite element method, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 1-4, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

آزادی به جز در راستای محور X گرفته شده و در سمت چپ آن قطعه فقط در راستای Y آزاد است. ابزار از سمت راست به چپ با سرعتی که نشانگر سرعت برشی است حرکت می‌کند.

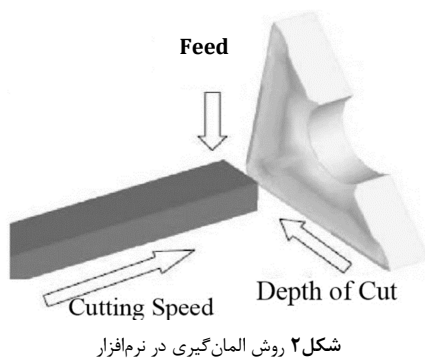
۳- معرفی نرم‌افزار

نرم‌افزار آباکوس قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار مدل موردنظر را پس از ایجاد، المان‌بندی کرده و با استفاده از روش انتگرال‌گیری ضمنی آن را تحلیل می‌کند. این نرم‌افزار این توانایی را دارد که با مشخص کردن پارامترهای مربوط به جنس ابزار و قطعه کار و همچنین پارامترهای ماشین‌کاری و هندسه ابزار، خروجی‌های از قبیل نیروهای اصلی و پیشروی و همچنین توزیع دما، کرنش و نرخ کرنش را محاسبه کند. مدل المان فرض شده به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای انجام شبیه‌سازی ابتدا فرایند به صورت یک کوپل حرارتی-مکانیکی معرفی شده و از المان RT4CPE که یک المان چهار گره‌ای دو بعدی با فرض کرنش صفحه‌ای است برای تحلیل استفاده می‌شود. با این روش می‌توان کرنش‌ها، آهنگ‌های کرنش و حالت تغییر شکل را برای کوچک‌ترین جز از جسم به صورت موضعی توصیف نمود. در این کار شبیه‌سازی، قطعه کار به عنوان یک مدل الاستو-پلاستیک به صورت یک مستطیل و مشخص کردن ابعاد المان‌ها و پارتیشن‌بندی مناسب مش‌بندی می‌شود. سپس در قسمت نوع المان^۱، حالت حل این مسئله را به دلیل وجود تغییرشکل‌های زیاد و احتمال خرابی مش‌ها، حل صریح^۲ را در نظر می‌گیریم و همچنین حالت حذف المان‌ها را فعال می‌کنیم تا کنده شدن براده را نیز شاهد باشیم. ابزار نیز به صورت یک مدل الاستیک با زاویه براده صفر درجه و زاویه آزاد پنج درجه آن‌جائی که شعاع نوک دماغه ۰/۰۲ است مدل‌سازی و مش‌بندی می‌شود. پارامترهای ماشین‌کاری در این حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده است: سرعت برشی ۳۰۰ متر بر دقیقه نرخ پیشروی ۰/۲ میلی‌متر بر دور عمق برش ۲ میلی‌متر. در شکل ۳ نوع قرارگیری ابزار و قطعه کار نسبت به یکدیگر به صورت دو بعدی نمایش داده شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی انجام شده، جنس ابزار فولاد تندبر و جنس قطعه کار آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) می‌باشد و آزمایش‌های تجربی صرفاً به دلیل صحت‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



1. Element Type
2. Explicit

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \frac{\epsilon^p}{\epsilon_0^p})(1 - (\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}})^m) \quad (1)$$

زمانی شکست در قطعه اتفاق می‌افتد که پارامتر شکست D در ماده از حد معین شده برای آن تجاوز کند. پارامتر شکست به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$D = \sum (\frac{\Delta \epsilon^p}{\epsilon_f^p}) \quad (2)$$

که $\Delta \epsilon$ نمو کرنش پلاستیک معادل و ϵ کرنش معادل برای شکست تحت نرخ کرنش، دما، فشار و تنش معادل در حالت مشابه است، که به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

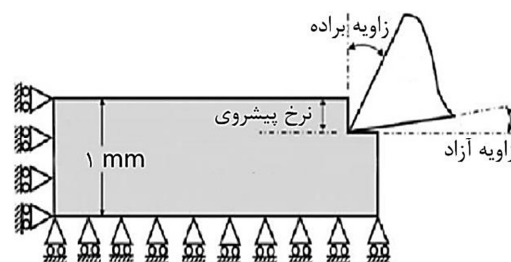
$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})] [1 + d_4 \ln(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0^p})] [1 + d_5 \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}] \quad (3)$$

که p فشار، q تنش فون مایسز و d_1 و d_5 ثابت‌هایی هستند که با آزمایش تعیین می‌شوند.

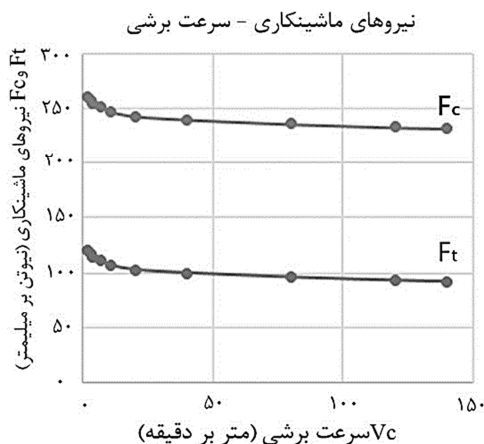
خصوصیات حرارتی و مکانیکی قطعه کار و ابزار در جدول ۱ بیان شده است. توانایی نرم‌افزارهای المان محدود در مش‌زنی مجدد و تولید شبکه مش بسیار فشرده در نزدیکی نوک ابزار که ناحیه‌ای است که در آن تغییرات شدید کرنش، نرخ کرنش و دما وجود دارد، بسیار مهم است. در این زمینه تعریف معیاری برای جدایش براده و حذف مش‌های معیوب ضروری است. به علاوه فشرده‌گی بالای مش‌ها در اطراف لبه برنده این اجازه را می‌دهد که مش‌های دارای واپیچش زیاد در این ناحیه به‌طور خودکار حذف شوند بدون این‌که هیچ وقف‌های در فرایند ایجاد شود. در نرم‌افزار در صورتی که مقدار تغییر شکل و کرنش مش‌ها از یک حد بحرانی از پیش تعیین شده تجاوز کند، قطعه مش‌زنی مجدد می‌شود. همچنین یک حد بحرانی تخریب برای جدایش ماده از قطعه کار تعیین شده است. بنابراین المان‌ها در نوک ابزار زمانی حذف می‌شوند که به یک اندازه بحرانی تخریب برسند. برای این کار از مقیاس تخریب کاکرافت-لادم استفاده شده است [۵]. همچنین نرم‌افزار این توانایی را دارد که ابزار را به‌عنوان یک جسم الاستیک در نظر گرفته و توزیع تنش را در ابزار پیش‌بینی کند. در این مقاله برای شبیه‌سازی المان محدود برش متعادل، قطعه کار آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) و ابزار فولاد تندبر (HSS) در نظر گرفته شده است. قطعه کار به صورت الاستیک-پلاستیک و ابزار به صورت جسم الاستیک مدل‌سازی شده‌اند. روش تعریف شرایط مرزی در قطعه کار در شکل ۱ نشان داده شده است. در پایین المان نشان داده شده، تمام درجات

جدول ۱ مشخصه‌های مکانیکی - حرارتی ابزار و قطعه کار

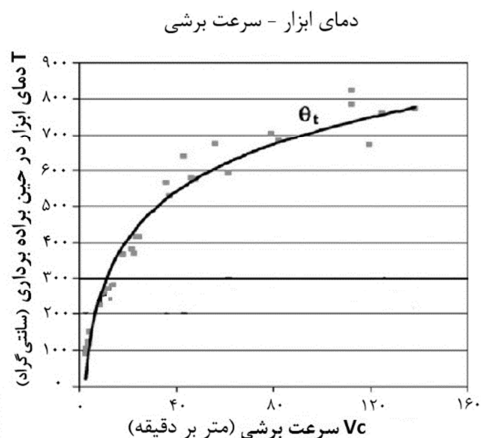
	Ti-6Al-4V	HSS
چگالی (g/cm ³)	۴۴۳۵	۷۸۰۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۱۰	۲۱۰
ضریب پواسون	۰/۳۵	۰/۳
گرمای ویژه (J/Kg/°C)	۶۱۲	۵۶۵
رسانش گرمایی (W/m°C)	۶/۸	۳۷/۲
ضریب انبساط (μm/m°C)	۴/۷	۱/۰۷



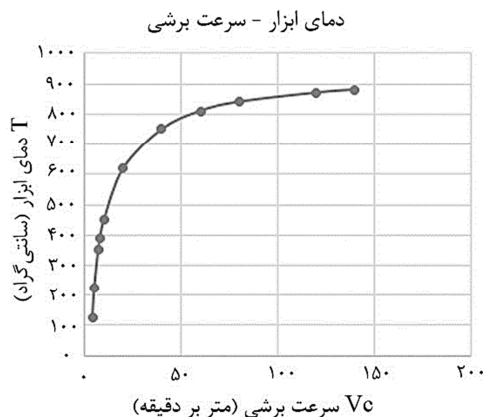
می‌کند پس با توجه به نمودار شکل ۶ و ۷ هرچه سرعت برشی افزایش پیدا کند عمر ابزار کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این امر ضعیف شدن ابزار، در دمای بالا می‌باشد [۷]. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در سرعت‌های برشی بالای ۱۲۰ متر بر دقیقه دمای ابزار به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد.



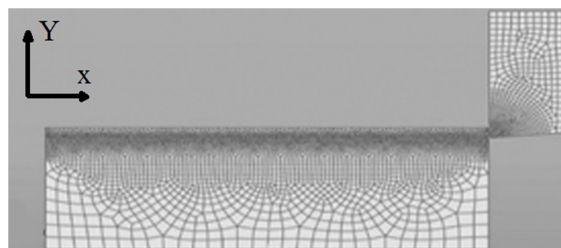
شکل ۵ نمودار المان محدود تغییرات نیروها به سرعت برشی



شکل ۶ نمودار تجربی تغییرات دمای ابزار به سرعت برشی [۶]



شکل ۷ نمودار المان محدود تغییرات دمای ابزار به سرعت برشی



شکل ۸ شبیه‌سازی و نحوه قرارگیری ابزار برشی و قطعه‌کار

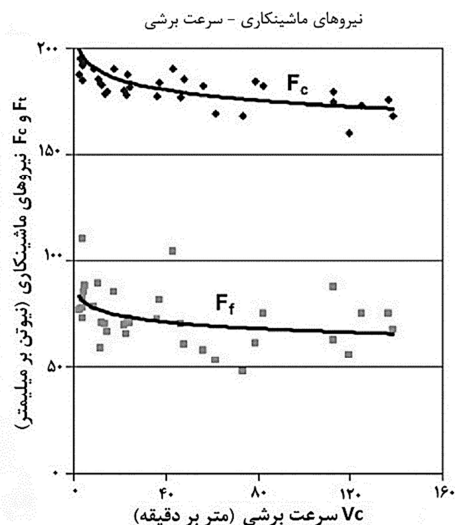
۴-۱- بررسی تأثیر سرعت برشی بر نیروهای ماشین‌کاری

نتایج تجربی به همراه نتایج المان محدود برای تغییرات سرعت برشی در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش سرعت برشی، تغییر شکل براده و در نتیجه نیروی وارد به قلم کاهش پیدا می‌کند، لذا انرژی مخصوص تراش کمتر می‌شود. با افزایش سرعت برشی براده نازک‌تر شده و نیروهای برش کاهش می‌یابند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نیز این مطلب را تایید می‌کند. دلایل کاهش نیرو با افزایش سرعت برشی عبارتند از: الف) با افزایش سرعت برش مساحت صفحه برش و حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش می‌یابد. زاویه صفحه برش کاهش یافته و در نتیجه انرژی کمتری صرف جدا شدن براده می‌گردد.

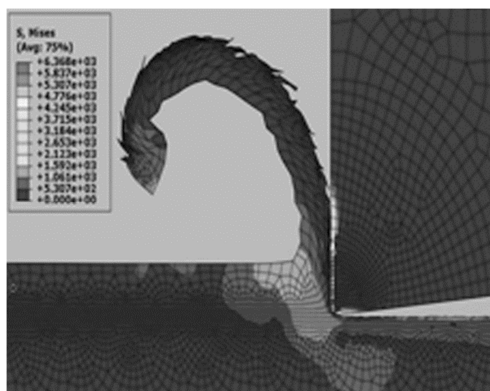
ب) در صورتی که لبه انباشته تشکیل نشود، با افزایش سرعت برش نیروی اصطکاک روی سطح قلم کاهش می‌یابد. همچنین به علت کاهش سطح تماس براده و کاهش مقاومت برشی ماده، نیرو کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت برشی ماده به این دلیل است که با افزایش سرعت برشی، درجه حرارت افزایش یافته و در نهایت مقاومت برشی افت می‌کند [۷]. همان‌طور که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود در سرعت‌های برشی بالای ۱۲۰ متر بر دقیقه نیروی ماشین‌کاری به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد.

۴-۲- بررسی تأثیر سرعت برشی بر عمر ابزار

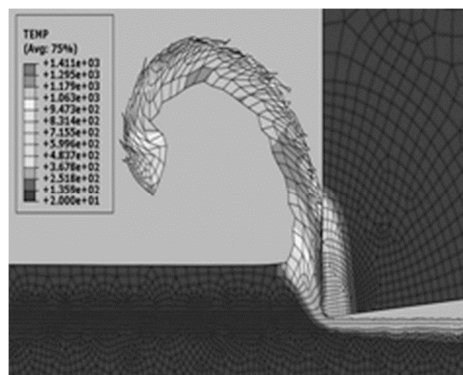
در عملیات ماشین‌کاری انرژی مکانیکی در نتیجه تغییر شکل پلاستیک به انرژی حرارتی تبدیل می‌گردد. این افزایش ناگهانی دما منجر به کاهش عمر ابزار می‌شود. شکل رابطه سرعت برشی با درجه حرارت ابزار را نشان می‌دهد. از طرفی هرچه درجه حرارت در ابزار افزایش یابد، عمر ابزار کاهش پیدا



شکل ۹ نمودار تجربی تغییرات نیروها به سرعت برشی [۶]



شکل ۱۱ توزیع تنش هنگام ماشین‌کاری تیتانیوم



شکل ۸ توزیع حرارت هنگام ماشین‌کاری تیتانیوم

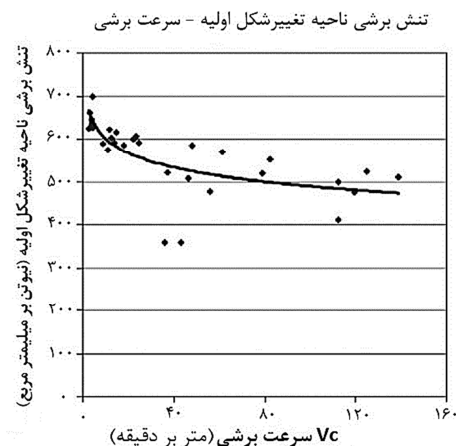
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری متعامد با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.13 انجام شده است. تاثیر تغییرات پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی بر روی نیروهای اصلی و پیشروی و تنش برشی و عمر ابزار بررسی گردید. برای صحت‌گذاری بر نتایج نرم‌افزار، از آزمایش‌های تجربی انجام شده در این زمینه استفاده گردیده و نتایج با مقادیر حاصل از آن آزمایش‌ها مقایسه گردید. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برشی نیروی اصلی ماشین‌کاری نیز افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش سرعت برشی دمای ابزار بالا رفته، موجب کاهش عمر ابزار و باعث افزایش تنش برشی در ناحیه تغییر شکل اولیه می‌شود. نتایج بیان می‌کند که در سرعت‌های برشی بالا افزایش سرعت برشی تأثیر محسوسی بر نتایج نداشته و نمودار روند تقریباً ثابتی را طی می‌کند.

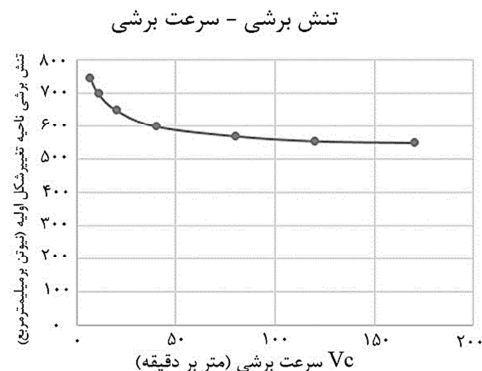
۶- مراجع

- [1] J. Barry, G. Byrne, D. Lennon, Observations on Chip formation and Acoustic Emission in Machining Ti-6Al-4V Alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001.
- [2] A. Gente, H. Hoffmeister, *Chip formation in Machining Ti-6Al-4V at Extremely High Cutting Speeds, Annuals of the CIRP*, 2001.
- [3] J. Zouhar, M. Piska, Modelling The Orthogonal Maching Process Using Cutting Tools With Different Geometry, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008.
- [4] Halil Bil, S. Engin Kilic, A. Erman Tekkaya, A comparison of Orthogonal Cutting Data From Experiments With Three Different Finite Element Models, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004.
- [5] Tugrul Ozel, The influence of friction models on finite element simulations of machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006.
- [6] Matthew Catterell, Gerry Byrne, Characterisation of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1, 2008.
- [7] M. razfar, *Machining and Machine tools principles*, Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran, 2000. (In Persian)

۳-۴- بررسی تأثیر سرعت برشی تنش برشی ناحیه تغییر شکل اولیه ناحیه تغییر شکل اولیه^۱ ناحیه‌ای بین لبه برنده قلم و تقاطع بیرونی سطح براده با سطح ماشین‌کاری است. این ناحیه، ناحیه اصلی تغییر فرم پلاستیک است و بیشترین حرارت در این ناحیه ایجاد شده و سهم زیادی از توان مصرفی ماشین‌کاری تحت شکل‌گیری را دارا می‌باشد [۷]. شکل ۹ و ۱۰ رابطه سرعت برشی با تنش برشی در ناحیه تغییر شکل اولیه را بیان می‌کند. با توجه به این نمودار با افزایش سرعت برشی تنش برشی در ناحیه مذکور کاهش می‌یابد.



شکل ۹ نمودار تجربی تغییرات تنش برشی به سرعت برشی [۶]



شکل ۱۰ نمودار المان محدود تغییرات تنش برشی نسبت به سرعت برشی