



## مدل سازی رفتار دینامیکی آلومینیوم آلیاژی 5083 در فرآیند ماشین کاری

بهنام داودی<sup>1\*</sup>، محمد رضا اسلامی<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تبریز  
 \* تهران، صندوق پستی 163-16765، bdavoodi@iust.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 17 آبان 1394  
 پذیرش: 28 آبان 1394  
 ارائه در سایت: 03 اسفند 1394

کلید واژگان:

ماشین کاری

شبیه‌سازی اجزاء محدود

رفتار دینامیکی

معادله جانسون- کوک

## چکیده

کاربرد گسترده فرآیند ماشین کاری در تولید قطعات صنعتی، بهینه‌سازی این فرآیند را مورد توجه محققان قرار داده است. در این بین استفاده از شبیه‌سازی المان محدود بیشتر مورد توجه واقع شده است. اما میزان دقت و قابلیت اعتماد نتایج پیش بینی شده عمدتاً به انتخاب معادله بنیادی که تنش سیلان ماده را تحت شرایط برش (کرنش، نرخ کرنش و دما) بیان می‌نماید، وابسته است. یکی از دقیق‌ترین و کاربردی‌ترین معادلات ارائه شده به منظور بررسی رفتار دینامیکی مواد مختلف، معادله‌ی بنیادی جانسون- کوک است. به منظور مدل‌سازی رفتار مواد با استفاده از معادلات بنیادی، نیاز به تعیین ضرایب معادلات برای هر ماده می‌باشد. به منظور محاسبه ضرایب معادله جانسون- کوک در بیان رفتار دینامیکی آلومینیوم آلیاژی 5083، از ترکیب اطلاعات تنش سیلان تست‌های فشردن در نرخ کرنش پایین و تست‌های ماشین کاری متعامد با نرخ کرنش بالا، استفاده شده است. پس از تعیین ضرایب معادله، به منظور تعیین صحت آن، فرآیند ماشین کاری با استفاده از کد تجاری آباکوس به روش اجزاء محدود شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان دهنده صحت ضرایب بدست آمده و معادله برقرار شده برای آلومینیوم آلیاژی فوق می‌باشد. بنابر این با استفاده از این معادله می‌توان رفتار آلیاژ انتخابی را در سایر فرآیندهای ماشین کاری و شکل‌دهی مدل و از نتایج آن استفاده کرد.

## Modeling of dynamic behavior of aluminum alloy 5083 in machining process

Behnam Davoodi<sup>1\*</sup>, Mohammad Reza Eslami<sup>2</sup>

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University of Tabriz, Iran

\* P.O.B. 16765-163 Tehran, Iran, bdavoodi@iust.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 08 November 2015  
 Accepted 19 November 2015  
 Available Online 22 February 2016

## Keywords:

Machining  
 Finite Element Method  
 Dynamic Behavior  
 Johnson & Cook Equation

## ABSTRACT

Widespread applications of machining in various industrial sectors as well as acute needs for optimization are among attractive research topics for both academic and industrial institutions. Finite element analysis based techniques are available to simulate machining processes. Success and reliability of numerical models are very much dependent to work material flow stress models in strain, strain rate and temperature functions. One of the most accurate and useful material model is the Johnson-Cook model. The basic equation for modeling the behavior of each material is needed to determine the equation coefficients. In this study, the model parameters are determined by fitting the data from both quasi-static compression tests at low strain rates and machining tests at high strain rates. Therefore; the experimental results were then compared with those obtained through simulation works by Abaqus code. Experimental results confirmed the capability of material equation to determine the dynamic behavior of 5083 alloy.

## 1- مقدمه

است. از آن‌جا که انجام آزمایش‌های تجربی زمان و هزینه‌های زیادی بر پژوهشگران تحمیل می‌کند، مدل‌سازی فرآیندها به روش اجزاء محدود کاربرد فراوانی پیدا کرده است. اما صحت و دقت مدل‌سازی با استفاده از روش‌های اجزاء محدود عمدتاً به اطلاعات و داده‌های ورودی مربوط به خواص مکانیکی قطعه کار (مانند مدول الاستیسیته و تنش سیلان<sup>[1]</sup>)، خواص فیزیکی- حرارتی قطعه و ابزار (مانند چگالی و هدایت حرارتی)، شرایط تماسی ابزار و براده (مانند مکانیزم اصطکاک و ثابت‌های مربوط به آن) و شرایط تماس ابزار با سطح ماشین کاری شده قطعه بستگی دارد [2,3]. یکی از داده‌های ورودی

ماشین کاری یا برش فلزات به فرآیندهایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها لایه یا تکه نازکی از ماده، که براده یا تراشه نام دارد، توسط ابزاری با لبه‌ی گوه مانند تیز از قطعه بزرگ‌تر جدا می‌شود. در مهندسی، عبارت ماشین کاری، تمامی فرآیندهای تولید براده را در بر می‌گیرد [1]. به دلیل کثرت پارامترهای دخیل در فرآیند ماشین کاری، هنوز امکان برآورد و پیش بینی کامل خروجی و تغییرات شرایط حاکم بر آن در طی فرآیند به صورت کامل فراهم نشده است. واضح است که پیش بینی و امکان بررسی شرایط حاکم بر فرآیند از دیدگاه اقتصادی از اهمیت بسزایی برای دست‌اندرکاران صنعت ماشین کاری برخوردار

1- Flow Stress

Please cite this article using:

B. Davoodi, M. R. Eslami, Modeling of dynamic behavior of aluminum alloy 5083 in machining process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-7, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ماده‌ی مورد نظر در شرایط فرآیندی خاص می‌باشد. برای تعیین این ضرایب می‌توان از دستگاه تست دو میله‌ای فشاری هاپکینسون<sup>4</sup> و یا از تست‌های ماشین کاری متعامد استفاده کرد [5].

روش تست میله فشار هاپکینسون در اوایل قرن بیستم معرفی شده و برای مطالعه رفتار دینامیکی مواد در نرخ کرنش بالا و دماهای مختلف بسط و توسعه پیدا کرده است. شیراکاشی و ماکاوا [6] با اندکی تغییرات، از این تست برای استخراج رفتار دینامیکی مواد در ماشین کاری استفاده کرده‌اند. دستگاه تست هاپکینسون امکان ایجاد تغییر شکل‌های بیشتر همراه با نرخ کرنش بالا در دمای زیاد را با استفاده از یک تفنگ بادی فشار بالا و کوره القایی نصب شده بر روی دستگاه امکان‌پذیر می‌سازد. با توجه به افزایش سرعت و استفاده از کوره القایی، نرم شدن در اثر باز پخت و پیر سختی در قطعات رخ نمی‌دهد و می‌توان رفتار دینامیکی مواد تا نرخ کرنش<sup>1</sup>  $10^4 \text{ s}^{-1}$  را بدست آورد.

ترکیب روش‌های سنتی تست مواد با نرخ کرنش پایین با تست‌های ماشین کاری به منظور مطالعه رفتار دینامیکی و بدست آوردن معادله تنش سیلان توسط افراد مختلف به کار گرفته شده است. استیونسون [7] برای اینکه دمای برش حدوداً برابر دمای اتاق و محیط باشد، آلومینیوم را با سرعت‌های برشی بسیار پایین ماشین کاری کرده است. او نشان داد که تنش سیلان برشی در این بازه از سرعت‌های برشی، تقریباً با تست فشردن برابر است. اویان و تاکاشیما [8] تنش سیلان را با استفاده از تست‌های کشش در دماهای بالا بدست آورده و تنش‌های ماشین کاری را با برون یابی این اطلاعات حدس زدند. گیو [9] از ترکیب تست‌های فشردن در دمای محیط و نرخ کرنش بسیار پایین و تست‌های ماشین کاری با سرعت برشی کم، رفتار تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم 6061T6 را محاسبه کرد. کلیت روش براساس انطباق اطلاعات تنش سیلان بدست آمده از تست‌های با نرخ کرنش بالا و پایین روی یک معادله مفروض می‌باشد. بارزترین مشخصه معادله بدست آمده از این روش امکان تعیین تنش سیلان در بازه وسیعی از نرخ کرنش‌ها توسط معادله حاصله می‌باشد. بوکرمر [10] از تراش کاری متعامد و شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تعیین ضرایب معادله جانسون-کوک برای فولاد 1045 با براده پیوسته و سوپر آلیاژ اینکونل 718 با براده منقطع استفاده کرده است. فرآیند انتخابی، خان‌کشی بوده است. ازل و همکارانش [11] شرایط ماشین کاری را برای تعیین تنش سیلان ماده و خواص اصطکاکی به منظور کاربرد در شبیه سازی اجزاء محدود به کار گرفته‌اند. هدف اصلی این مقاله، نحوه‌ی تعیین ضرایب مدل جانسون-کوک با استفاده از تست‌های ماشین کاری متعامد و مدلسازی رفتار دینامیکی آلومینیوم آلیاژی 5083 در فرآیند ماشین کاری می‌باشد.

## 2- آزمایش‌های تجربی

### 2-1- تجهیزات انجام تست‌ها

برای اجرای تست‌های تراش کاری متعامد و بدست آوردن رفتار تنش سیلان، قطعه‌کار استوانه‌ای به قطر 60 میلی‌متر از جنس آلومینیوم 5083 تهیه و از دو طرف پیشانی تراشی، مته مرغ‌کزی و همچنین روتراشی شد تا در حین تراش کاری حالت تک محوری بودن آن کاملاً رعایت شود. جدول 1 عناصر آلیاژی موجود در آلیاژ 5083 را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین تراش انیورسال استفاده شده است که حداکثر قطر کارگیر آن 300 میلی‌متر و حداکثر کورس محور طولی (محور Z) آن 1000 میلی‌متر می‌باشد. حداکثر دور محور اسپیندل 2000 دور بر

مورد نیاز، تنش سیلان و یا تنش تسلیم آنی<sup>1</sup> است؛ تنش‌ی که ماده با رسیدن به آن وارد منطقه تغییر شکل پلاستیک می‌شود. در فرآیندهای تغییر شکل با توجه به این‌که شرایط ماده مرتباً در حال تغییر است، نمی‌توان تنش سیلان ماده را برابر با تنش تسلیم در شرایط شبه استاتیکی (مشابه آزمایش کشش تک محوری) در نظر گرفت. موفقیت و قابل اعتماد بودن نتایج شبیه سازی اجزاء محدود وابستگی شدید به اطلاعات تنش سیلان ماده به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما دارد [4]. توجه به این نکته که رفتار دینامیکی بسیاری از مواد نسبت به رفتار شبه استاتیکی آنها متفاوت است، در حل مسایل مختلف مهندسی از جمله ماشین کاری و شکل‌دهی فلزات حائز اهمیت و تاثیرگذار است. مواد مختلف، تحت تاثیر نرخ کرنش‌های بالا و درجه حرارت‌های زیاد، رفتاری متفاوت نسبت به شرایط شبه استاتیکی از خود نشان می‌دهند. توجه دقیق به تاثیر نرخ کرنش و درجه حرارت بر رفتار فلزات، از نکات مهم در طراحی سازه‌ها و قطعات مهندسی و همچنین محاسبات فرآیندهای مختلف ساخت و تولید می‌باشد. از دیگر دلایل نادرستی استفاده از اطلاعات بدست آمده از تست‌های استاندارد نظیر تست کشش و فشار برای برآورد تغییر شکل‌های بزرگ، تفاوت زیاد بازه تغییرات پارامترها در این نوع تغییر شکل‌ها نسبت به تست‌های استاندارد است. تغییر شکل در دماهای بالا با تغییر فازهای متالورژیکی که ریز ساختار را تحت تاثیر قرار می‌دهند نیز همراه است. تغییر شکل فلزات در فرآیند ماشین کاری که همراه با کرنش زیاد، نرخ کرنش بالا و دمای بالا می‌باشد، ارائه مدل دقیق برای تعیین رفتار سیلان فلز در ماشین کاری را پیچیده و دشوار ساخته است. برای مدل سازی ریاضی تنش سیلان در فرآیندهایی با تغییر شکل‌های بزرگ و سریع که فرآیند ماشین کاری بارزترین نمونه آن است، مدل‌های متفاوتی توسط محققین ارائه شده است. این مدل‌ها و یا معادلات بنیادی برای مدل سازی تنش سیلان بر پایه تئوری‌های فیزیکی و مشاهدات عملی ارائه شده و صحت آن‌ها در زمان ارائه به اثبات رسیده است اما در سایر تحقیقات مشابه که نیاز به استفاده از این معادلات بوده است، اکثر آن‌ها به علت پیچیدگی و دشواری تعیین ضرایب، کمتر مورد استفاده واقع شده‌اند. از جمله این معادلات می‌توان به معادلات ارائه شده توسط زریلی - آرمسترانگ، مک‌گریگور، ماریوسچ و معادله بنیادی جانسون-کوک که یکی از جامع‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها می‌باشد (معادله 1) اشاره کرد.

$$\sigma = [A + B\dot{\epsilon}^m][1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)][1 - T_h^m] \quad (1)$$

$$T_h = \frac{T - T_{Room}}{T_{Melt} - T_{Room}} \quad (2)$$

از میان معادلات ارائه شده، معادله جانسون-کوک و برخی فرم‌های ویرایش شده آن به صورت وسیع توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی فرآیندهای ماشین کاری و شکل‌دهی مورد استفاده قرار گرفته است. صحت نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی در فرآیندهای مختلف و مواد متفاوت با استفاده از این مدل تا جایی ادامه یافته است که امروزه تقریباً بیش‌رکدهای تجاری المان محدود از این معادله به صورت پیش فرض در کتابخانه اطلاعاتی<sup>2</sup> خود استفاده می‌کنند و نیازی به نوشتن زیر برنامه<sup>3</sup> جهت معرفی این مدل به بسته‌های نرم‌افزاری نمی‌باشد. سایر مدل‌های ارائه شده کاربرد زیادی پیدا نکرده‌اند و یا بندرت در شرایط و مواد خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند.

معادلات بنیادی ارائه شده دارای ثابت‌هایی می‌باشند و منظور از تعیین رفتار دینامیکی مواد، یافتن مقادیر ثابت‌ها و تعیین ضرایب معادلات برای

1- Instantaneous Yield Stress

2- Database library

3- Subroutine program

4- Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

جدول 1 عناصر آلیاژی آلومینیوم 5083

Table 1 Chemical composition of AA5083

عنصر	درصد
سیلیسیم (Si)	0.4
آهن (Fe)	0.4
مس (Cu)	0.1
منگنز (Mn)	0.4 - 1
منیزیم (Mg)	4 - 4.9
روی (Zn)	0.25
تیتانیوم (Ti)	0.15
کرم (Cr)	0.05 - 0.25
آلومینیوم (Al)	تبادل

تا کرنش 0.4 ثابت و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی بدست آمده در شکل 1 نشان داده شده است.

با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش بدست آمده واضح است که در بازه انتخاب شده برای نرخ کرنش، تنش سیلان تغییرات قابل توجهی نشان نمی‌دهد و رفتار ماده در بازه انتخابی به نرخ کرنش حساس نمی‌باشد. کم بودن حالت بشکه‌ای پس از تست، نشان از کم بودن نقش اصطکاک در آزمایش‌ها دارد و صرف نظر کردن از آن امکان‌پذیر می‌باشد.

### 2-3- تست‌های ماشین کاری متعامد

برای انجام تست‌های ماشین کاری متعامد روی بلوک استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم 5083، تعدادی شیار با عمق متوسط 9 میلی‌متر ایجاد شد تا در هنگام تست، با انجام ماشین کاری روی لبه‌های برجسته باقیمانده بین شیارها با ابزار شیارتراشی، حالت برش متعامد دوبعدی ایجاد گردد. منظور از برش دو بعدی آن است که نیروی محوری حذف و فقط نیروهای شعاعی و محیطی بر ابزار وارد شود. در این حال نیروی شعاعی همان نیروی پیشروی و نیروی محیطی همان نیروی برشی خواهد بود. پیکربندی ماشین تراش، ابزار و ابزارگیر، دینامومتر و قطعه در شکل 2 آورده شده است.

لازم به ذکر است که در تمامی حالات، زاویه آزاد اصلی برابر 12 درجه و زاویه براده صفر درجه در نظر گرفته شده است. در این حالت نیرو در راستای محور Z برابر نیروی برشی ( $F_c$ ) و در راستای محور X، برابر نیروی پیشروی ( $F_T$ ) خواهد بود. در انتخاب شرایط ماشین کاری و بوجود آوردن حالت کرنش

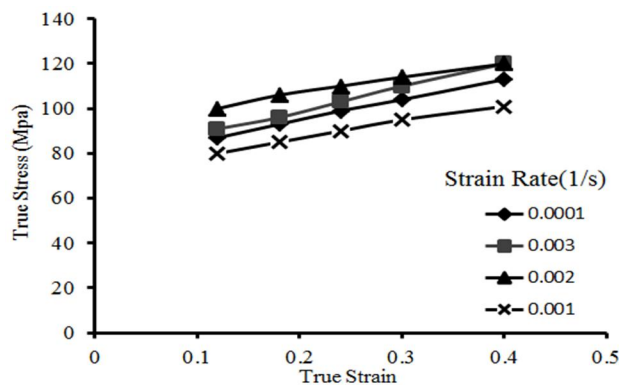


Fig. 1 True stress- True strain curves obtained from pressure tests

شکل 1 نمودار تنش-کرنش حقیقی بدست آمده از تست‌های فشردن

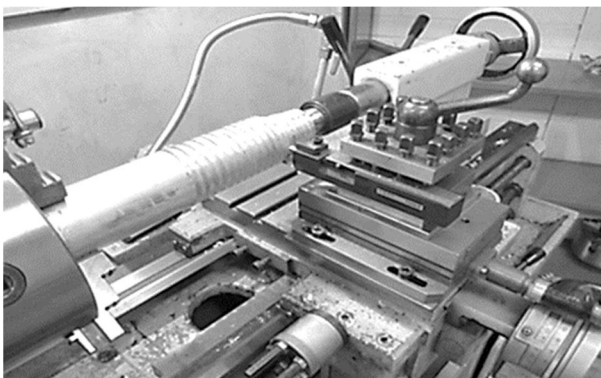


Fig. 2 Dynamometer, workpiece and tool setting in orthogonal machining

شکل 2 چیدمان دینامومتر، قطعه و ابزار در ماشین کاری متعامد

دقیقه بوده و سرعت پیشروی محورها از 0.052 تا 1.392 میلی‌متر بر دور در حالت پیشروی اتوماتیک در راستای محور طولی و از 0.014 تا 0.380 میلی‌متر بر دور در راستای محور عرضی دستگاه می‌باشد. قطعه کار توسط سه نظام مهار شده است. از ابزار شیار تراش کاربردی استفاده شده است.

اندازه‌گیری نیروها با استفاده از دینامومتر کیستلر<sup>1</sup> مدل 9257B انجام شده است. این دینامومتر دارای ظرفیت اندازه‌گیری نیرو در سه راستای X، Y و Z از -5 تا +5 کیلو نیوتن می‌باشد. کابل خروجی از دینامومتر به یک آمپلی فایر نوع 5019 وصل می‌شود که وظیفه آن افزایش دامنه اطلاعات رسیده از صفحه دینامومتر می‌باشد. اطلاعات تقویت شده در آمپلی فایر به برد اخذ اطلاعات کامپیوتر وارد می‌شود که وظیفه اصلی آن جمع‌آوری اطلاعات و تبدیل آن به فرمت نرم‌افزار داینور<sup>2</sup> است. برای انجام تست‌های فشردن، از پرس هیدرولیکی با حداکثر ظرفیت 10 تن و با محدوده سرعت 0.1 تا 5 میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است.

### 2-2- تست‌های فشردن

هدف از انجام تست‌های فشردن بدست آوردن اطلاعات تنش سیلان در بازه‌ای از پارامترهای تغییر شکل است که در آن‌ها بتوان اثر نرخ کرنش در تنش سیلان را حذف و به بررسی تاثیرات کرنش سختی (همراه با دما نرمی یا بدون آن) بر رفتار تنش سیلان پرداخت. بدین منظور نمونه‌های استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم 5083 با نسبت ارتفاع به قطر 2 (ارتفاع 26 میلی‌متر و قطر 13 میلی‌متر) طبق استاندارد ASTM (E9-89a) با استفاده از تراش-کاری با سرعت پایین تهیه شدند. به منظور کاهش تاثیر اصطکاک، دو سطح بالایی و پایینی نمونه‌ها با دقت پولیش کاری و تخت شده و سطوح بالایی و پایینی دستگاه نیز تا حد امکان صاف و صیقلی انتخاب شده‌اند. تدابیر یاد شده به منظور کاهش اصطکاک بین سطوح نمونه‌ها و فک‌های دستگاه می‌باشد تا بتوان از تاثیر پدیده اصطکاک در نتایج صرف نظر کرد. لازم به ذکر است که به منظور کاهش اصطکاک از روان کار بین سطوح تماس فک‌ها و نمونه‌ها استفاده شده است. پیش از شروع تست، برای جلوگیری از ایجاد ضربه در لحظه تماس، فک متحرک بالایی دستگاه دقیقاً در حالت تماس با سطح بالایی نمونه قرار داده شد.

نرخ کرنش‌های  $10^{-4}$ ،  $10^{-3}$ ،  $2 \times 10^{-3}$  و  $3 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$  برای انجام تست‌ها در نظر گرفته شد [13,12]. کلیه تست‌های فشار در دمای  $25^\circ\text{C}$  انجام شده است. با افزایش کرنش و رسیدن آن به مقادیر بیش از 0.4 در نمونه‌های مورد آزمایش ترک بوجود آمده است. به همین دلیل اطلاعات

1- Kistler 9257B  
2- DynoWare

مربوط به نرخ کرنش) روی منحنی تنش-کرنش بدست آمده از تست‌های فشردن با روش حداقل مربعات محاسبه می‌شوند. ضرایب بدست آمده برای آلیاژ آلومینیوم 5083 عبارتند از  $n=0.202$  و  $B=121.2$  مگاپاسکال.

خطی بودن تاثیر عبارت دما نرمی (یعنی  $m=1$ ) در معادله جانسون - کوک توسط تعداد زیادی از محققان پیشنهاد شده است [13-16]. آن‌ها طی محاسبات تئوریک و همچنین مدلسازی تحلیلی خود نشان داده‌اند که انتخاب  $m$  برابر با یک، نتایج مطلوب و قابل قبولی در خصوص برآورد تنش سیلان حاصل می‌سازد. جانسون و کوک نرخ کرنش مرجع را نرخ کرنشی معرفی کرده‌اند که تست کشش شبه استاتیکی ماده برای تعیین تنش تسلیم آن، تحت این نرخ کرنش صورت گرفته باشد و از این جهت این پارامتر برابر  $2 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$  انتخاب شده است [17].

برای محاسبه ضریب نرخ کرنش یا پارامتر  $C$ ، از ترکیب اطلاعات تنش سیلان تست‌های فشردن و ماشین کاری استفاده شده است. بدین ترتیب که در کرنشی مشخص از نتایج تست‌های ماشین کاری  $(\epsilon_M)$ ، تنش سیلان در ماشین کاری  $(\sigma_M)$  و فشار  $(\sigma_C)$  محاسبه می‌شوند. بدیهی است که تنش سیلان در کرنش‌های بالا در فرآیند ماشین کاری در نمودار حاصل از فشردن موجود نمی‌باشد [18]. به همین دلیل برای محاسبه تنش سیلان در فشردن برای کرنش‌های بالا از برون‌یابی استفاده می‌شود. سپس معادله جانسون - کوک برای هر دو نوع آزمایش نوشته شده،

$$\sigma_C = [A + B\epsilon_M^n][1 - T_{hC}^m] \quad (3)$$

$$\sigma_M = [A + B\epsilon_M^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_M/\dot{\epsilon}_0)][1 - T_{hM}^m] \quad (4)$$

و با ترکیب روابط (3) و (4) می‌توان نوشت:

$$C = \frac{[\sigma_M(1 - T_{hC}^m)/\sigma_C(1 - T_{hM}^m)] - 1}{\ln(\dot{\epsilon}_M/\dot{\epsilon}_0)} \quad (5)$$

با توجه به این‌که متغیرهای مستقل تست‌های ماشین کاری، سرعت برشی و ضخامت براده جدا نشده می‌باشند، می‌توان پارامتر  $C$  را به صورت تابعی از این دو متغیر نوشت. شکل 3 نمودار تغییرات پارامتر  $C$  نسبت به ضخامت براده جدا نشده و سرعت برشی که با استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>1</sup> ترسیم شده است را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 3، برای تعیین متغیر  $C$  به صورت تابعی از  $V$  و  $t_0$ ، از برازش اطلاعات نمودار ترسیمی استفاده شده است. معادله‌ی (6) بهترین نتیجه حاصل از بین معادلات درجه یک و دو، مار بر نقاط بدست آمده برای پارامتر  $C$  می‌باشد.

$$C = -0.2824 + 0.01579V + 1.017 t_0 - 0.000189 V^2 - 0.004794 V t_0 - 1.813 t_0^2 \quad (6)$$

بنابراین معادله‌ی جانسون - کوک مربوط به تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم

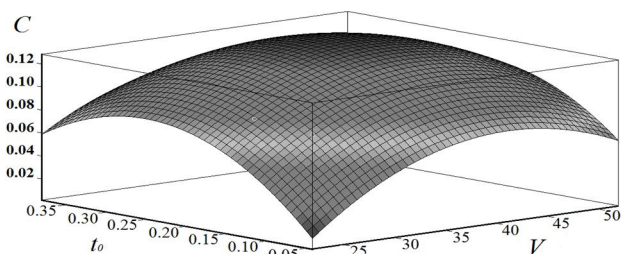


Fig. 3 Change of C parameter relative to the independent variable cutting speed and uncut chip thickness

شکل 3 پارامتر  $C$  نسبت به متغیرهای مستقل سرعت برش و ضخامت براده جدا نشده

1- Matlab

صفحه‌ای که پایه و اساس روابط تحلیلی ارائه شده توسط اکسلی می‌باشد، نسبت پهنای براده جدا نشده به ضخامت براده جدا شده باید مساوی یا بیشتر از 10 باشد. پس از انجام هر تست ضخامت براده‌ی بدست آمده، با کولیس دیجیتال با قدرت تفکیک 0.01 میلی‌متر در پنج مقطع متفاوت اندازه‌گیری و میانگین اعداد به عنوان ضخامت براده‌ی جدا شده ثبت گردید. جدول 2 نتایج و مقادیر ثبت شده را در شرایط متفاوت ماشین کاری ارائه می‌کند.

### 3- تعیین معادله‌ی بنیادی تنش سیلان

مدل بنیادی جانسون-کوک به عنوان شناخته شده‌ترین مدل پدیداری جریان تنش وابسته به کرنش، نرخ کرنش و دما بوده و با موفقیت برای گستره وسیعی از مواد با نرخ کرنش‌های متفاوت در دماهای گوناگون مورد استفاده قرار گرفته است (معادله 1). مدل جانسون-کوک به دلیل سهولت و فراگیری پارامترها برای گستره وسیع مواد بسیار موفق بوده است. در این معادله  $\sigma$  تنش جریان،  $\bar{\epsilon}$  کرنش پلاستیک،  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش پلاستیک،  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش پلاستیک مبنای  $T$  دمای لحظه‌ای قطعه‌کار،  $T_{room}$  دمای محیط،  $T_{melt}$  دمای ذوب ماده قطعه‌کار،  $A$  تنش تسلیم در دمای مرجع،  $B$  ضریب کرنش سختی،  $n$  توان کرنش سختی،  $C$  ضریب نرخ کرنش و  $m$  توان نرم شوندگی فلز در اثر حرارت است. ثابت  $A$  برای آلیاژ آلومینیوم 5083 برابر 136 مگاپاسکال است که از آزمایش فشردن بدست آمده است. پارامترهای  $B$  و  $n$  که مربوط به تاثیر کرنش سختی بر تنش جریان هستند، از برازش معادله توانی (با حذف کرشه

جدول 2 نتایج تست‌های ماشین کاری

Table 2 The experimental results of machining

شماره تست	مقدار پیشروی (mm/rev)	سرعت برشی (m/min)	نیروی برشی (N)	نیروی پیشروی (N)
1	0.044	50	55	24
2	0.044	75	75	33
3	0.044	100	60	26
4	0.044	125	66	30
5	0.044	150	63	27
6	0.044	175	87	38
7	0.094	50	45	20
8	0.094	75	80	35
9	0.094	100	90	42
10	0.094	125	92	40
11	0.094	150	80	35
12	0.094	175	105	47
13	0.141	50	143	65
14	0.141	75	133	59
15	0.141	100	117	52
16	0.141	125	131	60
17	0.141	150	174	82
18	0.141	175	156	70
19	0.188	50	131	63
20	0.188	75	162	72
21	0.188	100	147	67
22	0.188	125	153	69
23	0.188	150	157	70
24	0.188	175	66	31
25	0.282	50	149	65
26	0.282	75	188	83
27	0.282	100	189	87
28	0.282	125	185	81
29	0.282	150	149	62
30	0.282	175	93	47
31	0.380	50	97	41
32	0.380	75	233	108
33	0.380	100	158	75
34	0.380	125	188	83
35	0.380	150	145	73
36	0.380	175	41	23

5083 با استفاده از معادلات (7) الی (9) ارائه شده است:

$$\sigma = [136 + 121.2\varepsilon^{0.202}][1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/2 \times 10^{-3})][1 - T_h] \quad (7)$$

$$T_h = \frac{T - 25}{600} \quad (8)$$

$$C = -0.2824 + 0.01579V + 1.017 t_0 - 0.000189 V^2 - 0.004794 V t_0 - 1.813 t_0^2 \quad (9)$$

### 5- صحت سنجی نتایج

برای بررسی صحت شبیه سازی اجزاء محدود و تایید معادله انتخابی و ضرایب محاسبه شده برای آن، نیروهای برشی و پیشروی بدست آمده از شبیه سازی با نتایج تست های تجربی تراش کاری متعامد مقایسه شده اند. نتایج و مقدار خطا در جدول 4 نشان داده شده است. برای سهولت مقایسه، نتایج جدول 4 به صورت نمودار در اشکال 6 و 7 نشان داده شده اند.

نمودارهای فوق نشان می دهند که نیروهای بدست آمده از شبیه سازی با

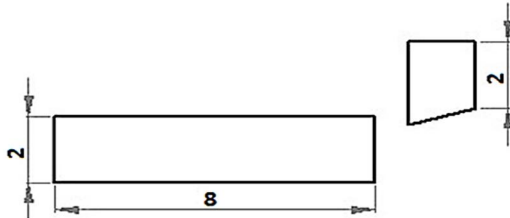


Fig. 4 Finite element model of 2-D machining process

شکل 4 مدل دو بعدی اجزاء محدود فرآیند ماشین کاری

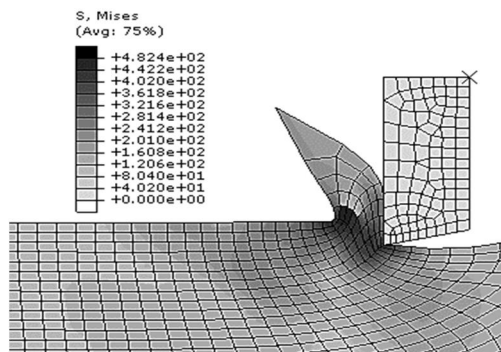


Fig. 5 Finite element model of orthogonal turning of AA5083

شکل 5 شبیه سازی اجزاء محدود تراش کاری متعامد آلیاژ آلومینیوم 5083

جدول 4 مقایسه نتایج تست های تجربی و شبیه سازی اجزاء محدود

Table 4 Comparison of the results from experimental tests and FE simulation

ردیف	ضخامت براده جدا شده (mm)	سرعت برش (m/min)	نیروی برش (N)		نیروی پیشروی (N)		خطا
			تجربی	شبیه سازی	تجربی	شبیه سازی	
1	0.044	25	60	39	26	18	31%
2	0.044	50	66	48	30	19	37%
3	0.094	26	90	75	42	32	24%
4	0.094	52	92	80	40	35	12.5%
5	0.141	24	117	110	52	48	8%
6	0.141	48	131	115	60	55	8%
7	0.188	24	147	150	67	63	6%
8	0.188	47	153	140	69	65	6%
9	0.282	25	189	200	87	75	14%
10	0.282	49	185	195	81	85	5%
11	0.380	22	158	175	75	90	20%
12	0.380	45	188	220	83	95	14%
	میانگین خطا		13.29%	میانگین خطا		15.46%	

### 4- شبیه سازی اجزاء محدود

در دهه های اخیر تکنیک های عددی مختلفی برای درک تئوری تغییر شکل های پلاستیک حجیم و همچنین حل مسائل غیرخطی توسعه یافته اند که آنالیز اجزاء محدود، یکی از روش های قابل اعتماد برای حل چنین مسائلی با کاهش هزینه آزمایش های تجربی و افزایش یکنواختی شرایط آزمایش می باشد. میزان دقت شبیه سازی وابسته به میزان دقت پارامترهای ورودی موثر از جمله خواص فیزیکی، مکانیکی و تنش سیلان مواد است. در این تحقیق به منظور شبیه سازی فرآیند تراش کاری متعامد و بدست آوردن نیروهای ماشین کاری از کد تجاری آباکوس استفاده شده است. جدول 3 خصوصیات و ویژگی های ابزار و قطعه کار را نشان می دهد.

مطابق آزمایش های تجربی صورت گرفته، برش به صورت متعامد دوبعدی می باشد. بنابراین مدل مورد استفاده در شبیه سازی، با مشخص کردن مختصات گوشه های یک مستطیل به صورت دو بعدی ایجاد شده است. با توجه به اندازه ضخامت براده جدا نشده در آزمایش های تجربی، ارتفاع مستطیل 2 میلی متر و طول آن 8 میلی متر در نظر گرفته شد (شکل 4). با محاسبه زاویه براده و آزاد ابزار، مدل هندسی آن ایجاد شد. شرایط مرزی برای قطعه کار دوبعدی با محدود کردن حرکت سطوح پایینی و سمت چپ قطعه بر روی محورها و گردش حول محورها اعمال شده است. برای تامین سرعت حرکت ابزار بر روی قطعه کار در راستای براده برداری، آزادی حرکت برای نقطه مرجع که بر روی ابزار صلب تعریف شده است، قرار داده شد.

از آنجا که اندازه المان های اولیه باید از ضخامت براده جدا نشده کوچکتر باشد تا با شروع برخورد ابزار و قطعه کار، جدایش المان ها و ایجاد براده رخ دهد و با توجه به ابعاد انتخابی قطعه کار، طول آن به 50 قسمت و عرض آن به 25 قسمت تقسیم شده است. با این شرایط زمان تحلیل قابل قبول بوده و نتایج بدست آمده نیز خطای کمتری را نشان می دهند.

جدول 3 خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد قطعه کار و ابزار

Table 3 The mechanical and physical properties of the workpiece and tool material

ویژگی	ابزار	قطعه کار (آلومینیوم 5083)
چگالی (tone/mm <sup>3</sup> )	1.5 × 10 <sup>-8</sup>	2.66 × 10 <sup>-9</sup>
مدول یانگ (GPa)	800	70-72
ضریب پواسون	0.2	0.33
گرمای ویژه	203	850
انبساط حرارتی	4.7 × 10 <sup>-7</sup>	22.5 × 10 <sup>-7</sup>
ضریب اصطکاک	0.2	0.2
دمای اتاق (T <sub>room</sub> (K))	293	293
هدایت حرارتی (W/m K)	46	118-130

## 6- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش، مدل سازی و تعیین رفتار دینامیکی یا به عبارت دیگر تعیین تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم 5083 تحت شرایط حاکم بر ماشین کاری بوده است. معادله تنش سیلان یکی از مهمترین ورودی های لازم برای شبیه سازی عددی فرآیندهای ماشین کاری و شکل دهی می باشد. به عبارت دیگر موفقیت و قابل اعتماد بودن نتایج شبیه سازی عددی وابستگی شدیدی به اطلاعات تنش سیلان ماده به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما دارد. از میان معادلات بنیادی و تئوری های ارائه شده در زمینه مدل سازی ریاضی تنش سیلان، معادله بنیادی پر کاربرد جانسون- کوک برای این آلیاژ به کار گرفته شده است. برای استخراج ضرایب معادله تنش سیلان این آلیاژ از ترکیب آزمایش هایی با نرخ کرنش پایین (آزمایش فشار) و آزمایش هایی با نرخ کرنش بالا (ماشین کاری) استفاده شده است. آزمایش های فشار در دمای اتاق و در نرخ کرنش های مختلف انجام گرفت. آزمایش های ماشین کاری نیز برای داشتن حالت برش متعادل به صورت دیسک تراشی با سرعت ها و پیشروی های مختلف انجام گرفت. سپس پارامترهای تغییر شکل (کرنش، نرخ کرنش، دما و تنش سیلان) در هر یک از آزمایش ها محاسبه شده و با استفاده از برازش منحنی و همچنین ترکیب اطلاعات بدست آمده از تست های صورت گرفته، ثابت های معادله برای این آلیاژ محاسبه شدند. برای برآورد میانگین پارامترهای تغییر شکل در ناحیه اول تغییر شکل در ماشین کاری، از تئوری تحلیلی اکسلی که مبتنی بر حالت کرنش صفحه ای در ماشین کاری متعادل با براده ی پیوسته بدون لبه ی انباشته می باشد، استفاده شده است. برای محاسبه پارامترهای تغییر شکل در حین ماشین کاری از شبیه سازی المان محدود برای تعیین ثابت نرخ کرنش در روابط تحلیلی اکسلی بهره گرفته شده است. شبیه سازی اجزاء محدود ماشین کاری متعادل با حالت کرنش صفحه ای با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام و از معادله تعیین ضرایب شده (7) برای مدل سازی ریاضی تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم 5083 استفاده شد.

همان طور که عنوان شد، نتایج حاصل از شبیه سازی با ضرایب محاسبه شده و نتایج تست های تجربی با یکدیگر مقایسه و مقدار خطای متوسط در برآورد نیروهای برشی 13.29٪ و نیروهای پیشروی 15.46٪ می باشد. این مقدار خطا با توجه به عوامل موثر در ایجاد خطا، قابل قبول می باشد. در نتیجه با توجه به عدم دسترسی به دستگاه تست دو میله ای هاپکینسون به منظور تعیین ضرایب معادلات بنیادی، می توان از روش ارائه شده در این مقاله با دقت قابل قبول استفاده کرد.

## 7- مراجع

- [1] E. M. Trent, P. K. Wriugh, *Metal Cutting*, 4<sup>th</sup> Edition, pp. 1-2, Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, Second Edition, pp. 35-62, Oxford: Science Publications, 2005.
- [3] T. H. C. Childs, K. Meakawa, T. Obinakawa, Y. Yamane, *Metal Machining, Theory and Applications*, 1<sup>st</sup> Edition, pp. 28-32, Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [4] T. H. C. Childs, Material Property Needs in Modelling Metal Machining, *Proceedings of CIRP Intemation Workshop on Modelling of Machining Operations*, Atlanta, USA, pp. 303-316, 1999.
- [5] R. Naghdabadi, M. J. Ashrafi, S. Sohrabpour, Experimental and Numerical Study of Parameters Shaping the Incident Pulse in Split Hopkinson Pressure Bar Test, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 71-80, 2010. (in Persian)
- [6] T. Shirakashi, K. Maekawa, E. Usui, Flow stress of low carbon steel at high temperature and strain Rate (Part 1: Propriety of incremental strain method in impact compression test with rapid heating and cooling systems, *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 161-166, 1983.

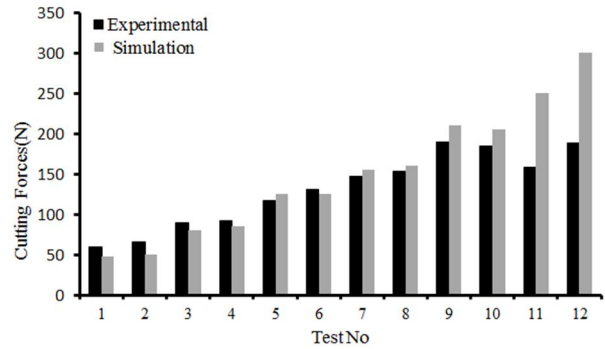


Fig. 6 Comparison between experimental and simulated cutting forces obtained from calculated equation

شکل 6 مقایسه نیروهای برشی تجربی و شبیه سازی شده با معادله بنیادی تعیین ضرایب شده

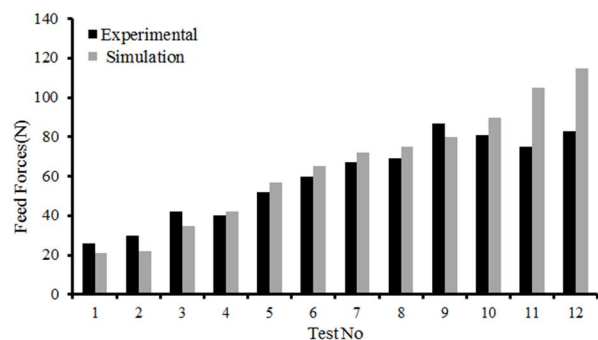


Fig. 7 Comparison between experimental and simulated feed forces obtained from calculated equation

شکل 7 مقایسه نیروهای پیشروی تجربی و شبیه سازی شده با معادله بنیادی تعیین ضرایب شده

ضرایب تعیین شده در مقایسه با تست های تجربی انجام گرفته، اختلاف اندکی دارد و می توان نتیجه گرفت که شبیه سازی انجام شده قابلیت پیش بینی نیروها در شرایط متفاوت ماشین کاری را دارا می باشد. علل مختلفی برای خطاهای موجود قابل بیان است. از جمله این که علی رغم پیش بینی های لازم برای کاهش تاثیر پدیده اصطکاک در انجام تست های فشردن، باید توجه کرد که تاثیر اصطکاک را نمی توان به صفر کاهش داد. از طرف دیگر نوع تغییر شکل در ماشین کاری از نوع برشی می باشد در حالی که در تست های فشردن، از نوع فشاری می باشد. همچنین شبیه سازی فرآیند ماشین کاری به روش المان محدود، طبق تئوری ماشین کاری متعادل بوده و در آزمایش های تجربی نیز سعی شده است که فرآیند بطور متعادل انجام شود. اما با انتخاب دیسک تراشی برای رسیدن به این هدف، ماشین کاری متعادل به صورت کامل محقق نمی شود. یکی دیگر از عوامل ایجاد خطا دستگاه تراش مورد استفاده برای اجرای تست های تجربی می باشد که از نوع سبک تراش بوده و در هنگام براده برداری مخصوصا در پیشروی های زیاد، دچار ارتعاش می شود. این موضوع نیز می تواند توجه کننده اختلاف مقادیر بدست آمده از تست های تجربی با نتایج شبیه سازی در پیشروی های بالا باشد.

در تمامی موارد اشاره شده، ترکیب منابع خطا منجر به ایجاد اختلاف در نتایج می شوند که جدا نمودن سهم هر کدام ممکن نخواهد بود. به همین دلیل در آزمایش های انجام گرفته، می توان نتایجی را که خطای کمتری دارند با توجه به خطاهای ذکر شده قابل قبول دانست.

- [13] P. Surya, R. Prakash, S.S. Bhattacharya, Some study on superplasticity in a fine grained AA5083 alloy, *International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering (ISRS 2004)*, Madras, India, 2004.
- [14] W. S. Lee, C. F. Lin, Plastic deformation and fracture behaviour of Ti-6Al-4V alloy loaded with high strain rate under various temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 241, pp. 48-59, 1998.
- [15] Ashvin J. Makadia, J. I. Nanavati, Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology, *Measurement*, Vol. 46, No. 1, pp. 1521-1529, 2013.
- [16] D. Umbrello, Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti- 6Al-4V alloy, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 96, No. 1, pp.79-87, 2008.
- [17] G. R. Johnson, W. H. Cook, Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains Strain Rates, Temperatures and Pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48, 1985.
- [18] M. J. Nategh, A Machining Force Model Developed for Ultrasonic Vibration-Assisted Turning, through Statistical Analysis of Influential Parameters, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 83-91, 2009. (in Persian فارسی)
- [7] R. Stevenson, Study on the Correlation of Work-piece Mechanical Properties from Compression and Cutting Tests, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 67-79, 1997.
- [8] M. Oyane, F. Takashima, K. Osakada, H. Tanaka, The behaviour of some steels under dynamic compression, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Japan Congress on Testing Materials*, Kyoto: Society of Materials Science, pp. 72-76, 1967.
- [9] Y. B. Guo, An Integral Method to Determine the Mechanical Behavior of Materials in Metal Cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 1, pp. 72-81, 2003.
- [10] F. Klocke, D. Lung, S. Buchkremer, Inverse identification of the constitutive equation of Inconel 718 and AISI 1045 from FE machining simulations, *14<sup>th</sup> CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, pp. 212-217, 2013.
- [11] T. Özel, E. Zeren, Determination of Work Matial Flow Stress and Friction for FEA of Machining Using Orthogonal Cutting Test, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 1019-1025, 2004.
- [12] H. Sheikh, S. Serajzadeh, Estimation of flow stress behavior of AA5083 using artificial neural networks with regard to dynamic strain ageing effect, *journal of materials processing technology*, Vol. 196 , No. 8, pp. 115–119, 2008.