مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1395، دوره 16، شماره 3، ص‌ص 1-7

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی رفتار دینامیکی آلومینیوم آلیاژی 5083 در فرآیند ماشین‌کاری

بهنام داودی[1*]، محمد رضا اسلامی[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تبریز
* تهران، صندوق پستی16765-163، 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:
ماشین‌کاری
شبیه‌سازی اجزاء محدود
رفتار دینامیکی
معادله جانسون– کوک

چکیده

کاربرد گسترده فرآیند ماشین‌کاری 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 عمدتا 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 ماشین‌کاری متعامد با نرخ کرنش بالا، استفاده شده است. پس از تعیین ضرایب معادله، به منظور تعیین صحت آن، فرآیند ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری و شکل‌دهی مدل و از نتایج آن استفاده کرد.

Modeling of dynamic behavior of aluminum alloy 5083 in machining process

Behnam Davoodi[1*], Mohammad Reza Eslami[2]

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

ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری، تمامی فرآیندهای تولید براده را در بر می‌گیرد [1]. به دلیل کثرت پارامترهای دخیل در فرآیند ماشین‌کاری، 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 ماشین‌کاری برخوردار 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 عمدتا به اطلاعات و داده‌های ورودی مربوط به خواص مکانیکی قطعه‌کار (مانند مدول الاستیسیته و تنش سیلان[1])، 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 ماشین‌کاری شده قطعه بستگی دارد [3،2]. یکی از داده‌های ورودی

1- Flow Stress

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.23.0]

مورد نیاز، تنش سیلان و یا تنش تسلیم آنی[1] است؛ تنشی که ماده با رسیدن به آن وارد منطقه تغییر شکل پلاستیک می‌شود. در فرآیندهای تغییر شکل با توجه به این‌که شرایط ماده مرتبا 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 ماشین‌کاری 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 دلائل 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 متالوژیکی که ریز ساختار را تحت تاثیر قرار می‌دهند نیز همراه است. تغییر شکل فلزات در فرآیند ماشین‌کاری که همراه با کرنش زیاد، نرخ کرنش بالا و دمای بالا می‌باشد، ارائه مدل دقیق برای تعیین رفتار سیلان فلز در ماشین‌کاری را پیچیده و دشوار ساخته است. برای مدل سازی ریاضی تنش سیلان در فرآیندهایی با تغییر شکل‌های بزرگ و سریع که فرآیند ماشین‌کاری بارزترین نمونه آن است، مدل‌های متفاوتی توسط محققین ارائه شده است. این مدل ها 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، ماریوسیچ و معادله بنیادی جانسون– کوک که یکی از جامع‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها می‌باشد (معادله 1) اشاره کرد.

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

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

از میان معادلات ارائه شده، معادله جانسون- کوک و برخی فرم‌های ویرایش شده آن به‌صورت وسیع توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی فرآیندهای ماشین‌کاری 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 جائی ادامه یافته است که امروزه تقریبا بیشرکدهای تجاری المان محدود از این معادله به‌صورت پیش فرض در کتابخانه اطلاعاتی[2] خود استفاده می‌کنند و نیازی به نوشتن زیر برنامه[3] جهت معرفی این مدل به بسته های 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 ماده‌ی مورد نظر در شرایط فرآیندی خاص می‌باشد. برای تعیین این ضرایب می‌توان از دستگاه تست دو میله‌ای فشاری هاپکینسون[4] و یا از تست‌های ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری 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 $10^4\ s^{-1}$ را بدست آورد.

ترکیب روش‌های سنتی تست مواد با نرخ کرنش پایین با تست‌های ماشین‌کاری به‌منظور مطالعه رفتار دینامیکی و بدست آوردن معادله تنش سیلان توسط افراد مختلف به‌کار گرفته شده است. استیونسون [7] برای اینکه دمای برش حدودا برابر دمای اتاق و محیط باشد، آلومینیوم را با سرعت‌های برشی بسیار پایین ماشین‌کاری کرده است. او نشان داد که تنش سیلان برشی در این بازه از سرعت‌های برشی، تقریبا با تست فشردن برابر است. اویان و تاکاشیما [8] تنش سیلان را با استفاده از تست‌های کشش در دماهای بالا بدست آورده و تنش‌های ماشین‌کاری را با برون یابی این اطلاعات حدس زدند. گیو [9] از ترکیب تست‌های فشردن در دمای محیط و نرخ کرنش بسیار پایین و تست‌های ماشین‌کاری 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 تراش‌کاری 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 ماشین‌کاری را برای تعیین تنش سیلان ماده و خواص اصطکاکی به منظور کاربرد در شبیه سازی اجزاء محدود به‌کار گرفته‌اند. هدف اصلی این مقاله، نحوه‌ی تعیین ضرایب مدل جانسون- کوک با استفاده از تست‌های ماشین‌کاری متعامد و مدل‌سازی رفتار دینامیکی آلومینیوم آلیاژی 5083 در فرآیند ماشین‌کاری می‌باشد.

2- آزمایش‌های تجربی

2-1- تجهیزات انجام تست‌ها

برای اجرای تست‌های تراش‌کاری 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 مرغک‌زنی و همچنین روتراشی شد تا در حین تراش‌کاری حالت تک محوری بودن آن کاملا 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

1- Instantaneous Yield Stress
2- Database library
3- Subroutine program
4- Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.23.0]

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)	تعادل

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. قطعه‌کار توسط سه نظام مهار شده است. از ابزار شیار تراش کاربیدی استفاده شده است.

اندازه‌گیری نیروها با استفاده از دینامومتر کیستلر[1] 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 داینوور[2] است. برای انجام تست‌های فشردن، از پرس هیدرولیکی با حداکثر ظرفیت 10 تن و با محدوده سرعت 0.1 تا 5 میلی متر 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 تراش‌کاری با سرعت پایین تهیه شدند. به‌منظور کاهش تاثیر اصطکاک، دو سطح بالایی و پایینی نمونه‌ها با دقت پولیش‌کاری و تخت شده و سطوح بالایی و پایینی دستگاه نیز تا حد امکان صاف و صیقلی انتخاب شده‌اند. تدابیر یاد شده به‌منظور 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 به‌منظور کاهش اصطکاک از روان‌کار 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 دقیقا در حالت تماس با سطح بالایی نمونه قرار داده شد.

نرخ کرنش‌های $10^{-4}\ S^{-1}$، $10^{-3}\ S^{-1}$، $2\times10^{-3}\ S^{-1}$ و $3\times10^{-3}\ S^{-1}$ برای انجام تست‌ها در نظر گرفته شد [13,12]. کلیه تست‌های فشار در دمای 25°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 تا کرنش 0.4 ثبت 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.

3-2- تست‌های ماشین‌کاری متعامد

برای انجام تست‌های ماشین‌کاری متعامد روی بلوک استوانه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیوم 5083، تعدادی شیار با عمق متوسط 9 میلی‌متر ایجاد شد تا در هنگام تست، با انجام ماشین‌کاری 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 ماشین‌تراش، 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 ماشین‌کاری و بوجود آوردن حالت کرنش

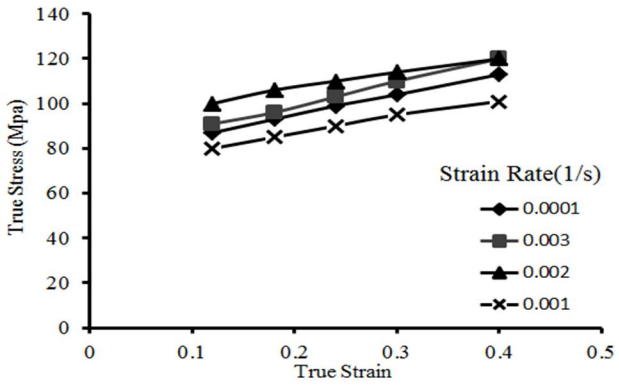

Fig. 1 True stress- True strain curves obtained from pressure tests

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

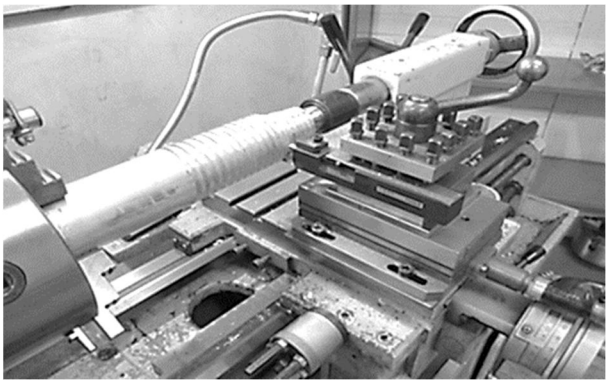

Fig. 2 Dynamometer, workpiece and tool setting in orthogonal machining

شکل 2 چیدمان دینامومتر، قطعه و ابزار در ماشین‌کاری متعامد

1- Kistler 9257B
2- DynoWare

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.23.0]

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 ماشین‌کاری 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 σ تنش جریان، $\bar{\varepsilon}$ کرنش پلاستیک، $\dot{\bar{\varepsilon}}$ نرخ کرنش پلاستیک، $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ نرخ کرنش پلاستیک مبنا، 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 کروشه 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 کرده اند که تست کشش شبه استاتیک ماده برای تعیین تنش تسلیم آن، تحت این نرخ کرنش صورت گرفته باشد و از این جهت این پارامتر برابر 2×10^{-3} S^{-1} انتخاب شده است [17].

برای محاسبه ضریب نرخ کرنش یا پارامتر C، از ترکیب اطلاعات تنش سیلان تست‌های فشردن و ماشین‌کاری استفاده شده است. بدین ترتیب که در کرنشی مشخص از نتایج تست‌های ماشین‌کاری (ε_M)، تنش سیلان در ماشین‌کاری (σ_M) و فشار (σ_C) محاسبه می‌شوند. بدیهی است که تنش سیلان در کرنش‌های بالا در فرآیند ماشین‌کاری 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،

$$\sigma_c = [A + B\bar{\varepsilon}_M^n][1 - T_{h_c}^m] \quad (3)$$

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

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

$$C = \frac{[\sigma_M(1 - T_{h_c}^m)/\sigma_c(1 - T_{h_M}^m)] - 1}{\ln(\dot{\bar{\varepsilon}}_M/\dot{\bar{\varepsilon}}_0)} \quad (5)$$

با توجه به این‌که متغیرهای مستقل تست‌های ماشین‌کاری، 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[1] ترسیم شده است را نشان می دهد.

با توجه به شکل 3، برای تعیین متغیر C به صورت تابعی از t_0 و V، 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.

$$C = -0.2824 + 0.01579V + 1.017\,t_0 - 0.000189\,V^2 - 0.004794\,Vt_0 - 1.813t_0^2 \quad (6)$$

بنابراین معادله‌ی جانسون-کوک مربوط به تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم

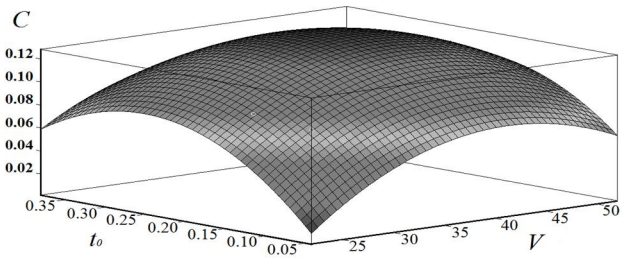

Fig. 3 Change of C parameter relative to the independent variable cutting speed and uncut chip thickness

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

جدول 2 نتایج تست‌های ماشین‌کاری

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

1- Matlab

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.23.0]

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

$$\sigma = [136 + 121.2\bar{\varepsilon}^{0.202}][1 + C\ln(\dot{\bar{\varepsilon}}/2\times10^{-3})][1 - T_h] \quad (7)$$

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

$$C = -0.2824 + 0.01579V + 1.017\,t_0 - 0.000189\,V^2 - 0.004794\,Vt_0 - 1.813t_0^2 \quad (9)$$

4- شبیه‌سازی اجزاء محدود

در دهه‌های اخیر تکنیک‌های عددی مختلفی برای درک تئوری تغییرشکل‌های پلاستیک حجیم و همچنین حل مسائل غیرخطی توسعه یافته‌اند که آنالیز اجزاء محدود، یکی از روش‌های قابل اعتماد برای حل چنین مسائلی با کاهش هزینه آزمایش‌های تجربی و افزایش یکنواختی شرایط آزمایش می‌باشد. میزان دقت شبیه‌سازی وابسته به میزان دقت پارامترهای ورودی موثر از جمله خواص فیزیکی، مکانیکی و تنش سیلان مواد است. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی فرآیند تراش‌کاری متعامد و بدست آوردن نیروهای ماشین‌کاری از کد تجاری آباکوس استفاده شده است. جدول 3 خصوصیات و ویژگی‌های ابزار و قطعه‌کار را نشان می‌دهد.

مطابق آزمایش‌های تجربی صورت گرفته، برش به صورت متعامد دوبعدی می‌باشد. بنابراین مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی، با مشخص کردن مختصات گوشه‌های یک مستطیل به صورت دو بعدی ایجاد شده است. با توجه به اندازه ضخامت براده جدا نشده در آزمایش‌های تجربی، ارتفاع مستطیل 2 میلی‌متر و طول آن 8 میلی‌متر در نظر گرفته شد (شکل4). با محاسبه زاویه براده و آزاد ابزار، مدل هندسی آن ایجاد شد. شرایط مرزی برای قطعه‌کار 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 قطعه‌کار در راستای براده برداری، آزادی حرکت برای نقطه مرجع که بر روی ابزار صلب تعریف شده است، قرار داده شد.

از آن‌جا که اندازه المان‌های اولیه باید از ضخامت براده جدا نشده کوچکتر باشد تا با شروع برخورد ابزار و قطعه‌کار، جدایش المان‌ها و ایجاد براده رخ دهد و با توجه به ابعاد انتخابی قطعه‌کار، 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 می‌دهند.

در شبیه‌سازی انجام شده از وزن ابزار و ابزارگیر صرف‌نظر شده است. ابزار به‌کار رفته نو، کاملا تیز و بدون شعاع نوک در نظر گرفته شده است. ارتعاشات بوجود آمده در حین براده برداری در نظر گرفته نشده است. این فرضیات برای کاهش زمان تحلیل در نظر گرفته شده اند. شکل 5 شبیه‌سازی فرآیند براده‌برداری و نحوه جداسازی براده را نشان می‌دهد.

جدول 3 خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد قطعه‌کار و ابزار

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

ویژگی	ابزار	قطعه‌کار (آلومینیوم 5083)
چگالی ($tone/mm^3$)	1.5×10^{-8}	2.66×10^{-9}
مدول یانگ (GPa)	800	70-72
ضریب پواسون	0.2	0.33
گرمای ویژه	203	850
انبساط حرارتی	4.7×10^{-7}	22.5×10^{-7}
ضریب اصطکاک	0.2	0.2
دمای اتاق (T_{Room} (K))	293	293
هدایت حرارتی(W/m K)	46	118-130

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 شبیه‌سازی با نتایج تست‌های تجربی تراش‌کاری متعامد مقایسه شده‌اند. 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 شده‌اند.

نمودارهای فوق نشان می‌دهند که نیروهای بدست آمده از شبیه‌سازی با

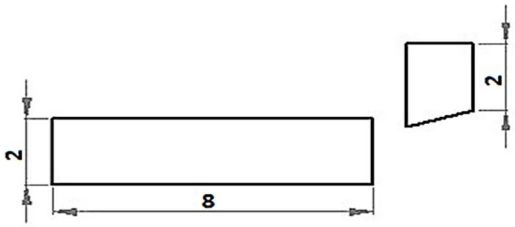

Fig. 4 Finite element model of 2-D machining process

شکل 4 مدل دو بعدی اجزاء محدود فرآیند ماشین‌کاری

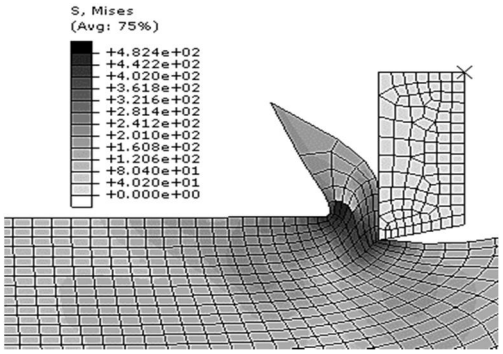

Fig. 5 Finite element model of orthogonal turning of AA5083

شکل 5 شبیه‌سازی اجزاء محدود تراش‌کاری متعامد آلیاژ آلومینیوم 5083

جدول 4 مقایسه نتایج تست‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود

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

ردیف	ضخامت براده جدانشده (mm)	سرعت برش (m/min)	نیروی برش (N)			نیروی پیشروی (N)		
			تجربی	شبیه سازی	خطا	تجربی	شبیه سازی	خطا
1	0.044	25	60	39	35٪	26	18	31٪
2	0.044	50	66	48	27٪	30	19	37٪
3	0.094	26	90	75	17٪	42	32	24٪
4	0.094	52	92	80	13٪	40	35	12.5٪
5	0.141	24	117	110	6٪	52	48	8٪
6	0.141	48	131	115	12٪	60	55	8٪
7	0.188	24	147	150	2٪	67	63	6٪
8	0.188	47	153	140	8.5٪	69	65	6٪
9	0.282	25	189	200	6٪	87	75	14٪
10	0.282	49	185	195	5٪	81	85	5٪
11	0.380	22	158	175	11٪	75	90	20٪
12	0.380	45	188	220	17٪	83	95	14٪
میانگین خطا		13.29٪				میانگین خطا		15.46٪

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.23.0]

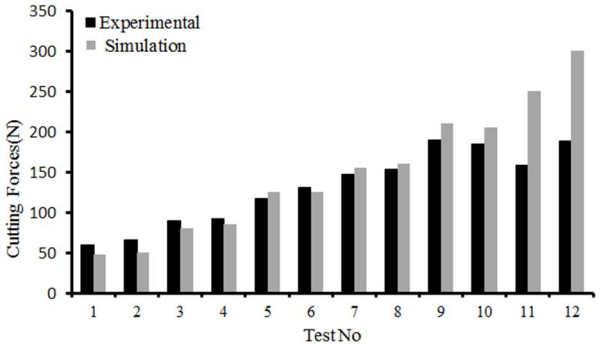

Fig. 6 Comparison between experimental and simulated cutting forces obtained from calculated equation

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

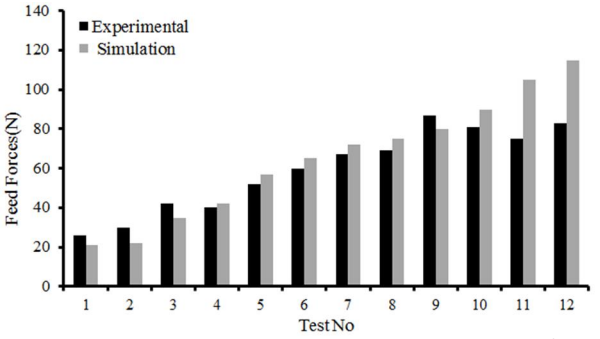

Fig. 7 Comparison between experimental and simulated feed forces obtained from calculated equation

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

ضرایب تعیین شده در مقایسه با تست‌های تجربی انجام گرفته، اختلاف اندکی دارد و می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی انجام شده قابلیت پیش بینی نیروها در شرایط متفاوت ماشین‌کاری را دارا می‌باشد. علل مختلفی برای خطاهای موجود قابل بیان است. از جمله این‌که علی‌رغم پیش‌بینی‌های لازم برای کاهش تاثیر پدیده اصطکاک در انجام تست‌های فشردن، باید توجه کرد که تاثیر اصطکاک را نمی‌توان به صفر کاهش داد. از طرف دیگر نوع تغییر شکل در ماشین‌کاری از نوع برشی می‌باشد در حالی‌که در تست‌های فشردن، از نوع فشاری می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری به روش المان محدود، طبق تئوری ماشین‌کاری متعامد بوده و در آزمایش‌های تجربی نیز سعی شده است که فرآیند بطور متعامد انجام شود. اما با انتخاب دیسک تراشی برای رسیدن به این هدف، ماشین‌کاری متعامد به صورت کامل محقق نمی‌شود. یکی دیگر از عوامل ایجاد خطا دستگاه تراش مورد استفاده برای اجرای تست‌های تجربی می‌باشد که از نوع سبک تراش بوده و در هنگام براده برداری مخصوصا در پیشروی‌های زیاد، دچار ارتعاش می‌شود. این موضوع نیز می‌تواند توجیه کننده اختلاف مقادیر بدست آمده از تست‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی در پیشروی‌های بالا باشد.

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

6- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی و تعیین رفتار دینامیکی یا به عبارت دیگر تعیین تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم 5083 تحت شرایط حاکم بر ماشین‌کاری بوده است. معادله تنش سیلان یکی از مهمترین ورودی‌های لازم برای شبیه‌سازی عددی فرآیندهای ماشین‌کاری و شکل‌دهی می‌باشد. به عبارت دیگر موفقیت و قابل اعتماد بودن نتایج شبیه‌سازی عددی وابستگی شدیدی به اطلاعات تنش سیلان ماده به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما دارد. از میان معادلات بنیادی و تئوری‌های ارائه شده در زمینه مدل‌سازی ریاضی تنش سیلان، معادله بنیادی پر کاربرد جانسون- کوک برای این آلیاژ به‌کار گرفته شده است. برای استخراج ضرایب معادله تنش سیلان این آلیاژ از ترکیب آزمایش‌هایی با نرخ کرنش پایین (آزمایش فشار) و آزمایش‌هایی با نرخ کرنش بالا (ماشین‌کاری) استفاده شده است. آزمایش‌های فشار در دمای اتاق و در نرخ کرنش‌های مختلف انجام گرفت. آزمایش‌های ماشین‌کاری نیز برای داشتن حالت برش متعامد به‌صورت دیسک‌تراشی با سرعت‌ها و پیشروی‌های مختلف انجام گرفت. سپس پارامترهای تغییر شکل (کرنش، نرخ کرنش، دما و تنش سیلان) در هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شده و با استفاده از برازش منحنی و همچنین ترکیب اطلاعات بدست آمده از تست‌های صورت گرفته، ثابت‌های معادله برای این آلیاژ محاسبه شدند. برای برآورد میانگین پارامترهای تغییر شکل در ناحیه اول تغییر شکل در ماشین‌کاری، از تئوری تحلیلی اکسلی که مبتنی بر حالت کرنش صفحه‌ای در ماشین‌کاری متعامد با براده‌ی پیوسته بدون لبه‌ی انباشته می‌باشد، استفاده شده است. برای محاسبه پارامترهای تغییر شکل در حین ماشین‌کاری از شبیه‌سازی المان محدود برای تعیین ثابت نرخ کرنش در روابط تحلیلی اکسلی بهره گرفته شده است.

شبیه‌سازی اجزاء محدود ماشین‌کاری متعامد با حالت کرنش صفحه‌ای با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام و از معادله تعیین ضرایب شده (7) برای مدل‌سازی ریاضی تنش سیلان آلیاژ آلومینیوم 5083 استفاده شد.

همان‌طور که عنوان شد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با ضرایب محاسبه شده و نتایج تست‌های تجربی با یکدیگر مقایسه و مقدار خطای متوسط در برآورد نیروهای برشی 13.29٪ و نیروهای پیشروی 15.46٪ می‌باشد. این مقدار خطا با توجه به عوامل موثر در ایجاد خطا، قابل قبول می‌باشد. در نتیجه با توجه به عدم دسترسی به دستگاه تست دو میله‌ای هاپکینسون به منظور تعیین ضرایب معادلات بنیادی، می‌توان از روش ارائه شده در این مقاله با دقت قابل قبول استفاده کرد.

7- مراجع

[1] E. M. Trent, P. K. Wrigth, *Metal Cutting*, 4th 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*, 1st Edition, pp. 28-32, Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
[4] T. H. C. Childs, Material Property Needs in Modelling Metal Machining, *Proccidings of CIRP Internation 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 فارسی)
[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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.23.0]

[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 10th 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, *14th 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.
[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, *Measurment*, 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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.23.0]