



## شبیه‌سازی سه بعدی اجزای محدود فرایند میکروفرز کاری آلیاژ تیتانیوم

حامد رضایی<sup>1</sup>، محمد حسین صادقی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 143-14115-14115@modares.ac.ir, sadeghim@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 12 شهریور 1395  
پذیرش: 17 آبان 1395  
ارائه در سایت: 05 دی 1395

کلید واژگان:

شبیه‌سازی  
میکروفرز کاری  
نیروی برش  
دما  
سایش ابزار

### چکیده

امروزه با ظهور سیستم‌های کامپیوتری پیشرفته‌تر، امکان شبیه‌سازی و مدل‌کردن مسایل بسیار پیچیده با دقت‌های بالاتر میسر گردیده و از این رو استفاده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری بعنوان روشی جایگزین بجای آزمایش‌های فیزیکی در تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد فرایندها با رویکرد کاهش هزینه و زمان مصرفی، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. بکارگیری این روش‌ها در مورد میکروفرایندها بدلیل افزایش مشکلات اندازه‌گیری‌های تجربی ناشی از کاهش مقیاس از ماکرو به میکرو، از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این تحقیق از یک مدل سه بعدی برای شبیه‌سازی فرایند میکروفرز کاری در نرم افزار دیفرم استفاده شده است. اثر پارامترهای برشی بر مشخصه‌هایی از فرایند نظیر نیروی برش، دما و سایش ابزار مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل جانسون-کوک برای تعریف خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه مورد استفاده در شبیه‌سازی بکار گرفته شد. برای واقعی‌تر بودن شرایط اصطکاکی نیز دو نوع قید تماسی چسبنده و لغزنده بین ابزار و قطعه‌کار در طول تماس تعریف شده است. از مدل سایش یوسویی بر اساس خوردگی لغزشی برای پیش‌بینی نرخ سایش ابزار در شبیه‌سازی استفاده شده است. اعتبارسنجی مدل سه‌بعدی ساخته شده با مقایسه‌ی نیرویی بین مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده به روش تجربی انجام گرفته است. مطابقت بسیار زیاد نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی نشان از قابلیت بالای مدل سه‌بعدی تهیه شده در پیش‌بینی رفتار فرایند داشته است.

## 3D Finite element simulation of micro-milling process of titanium alloy

Hamed Rezaei, Mohamad Hosein Sadeghi\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O. B. 14115-143, Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 02 September 2016  
Accepted 07 November 2016  
Available Online 25 December 2016

Keywords:  
Simulation  
Micromilling  
Cutting force  
Temperature  
Tool wear

### ABSTRACT

Nowadays, emergence of more advanced computer systems made it possible to simulate and model complex problems with even higher accuracy. Regarding lower time and cost, the use of simulations instead of physical experiments is increasingly considered as an alternative method in the analysis and optimization of process performance. The importance of such methods becomes more significant when talking about micro-processes, since there are lots of difficulties in experimental measurements as a result of scaling problems by scaling down from macro to micro. In this study, a 3D model is developed using Deform-3D software for prediction of micromilling process behavior. Effects of cutting parameters on such characteristics as cutting forces, temperature distribution and tool wear are investigated. Johnson-Cook model is used to define physical and mechanical properties of the material in simulation. Two types of sticking and sliding friction contacts were assigned along the tool-workpiece contact length to have more realistic cutting condition. The two types of sticking and sliding friction contacts were employed to have more realistic contact model. Usui wear model is used to predict tool wear rate in the simulation. To check the validity of the model, force results of simulation are compared with the measured ones. A high level of correlation exists between the obtained simulation and measured results, which shows that the 3D developed model has good capability to predict process behavior.

### 1- مقدمه

مسایل بسیار پیچیده با دقت‌های بالاتر نیز میسر گردیده و از این رو نگاه به شبیه‌سازی بعنوان روشی جایگزین بجای آزمایش‌های فیزیکی در تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد فرایندها با رویکرد کاهش هزینه‌ها و زمان مصرفی، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در فرایندهای میکروماشینکاری بدلیل پدیده‌ی اثر اندازه<sup>1</sup> که ناشی از کاهش مقیاس از ماکرو به میکرو می‌باشد، مشکلات اندازه‌گیری در روش‌های تجربی بیشتر بوده و بسیاری از محققان،

استفاده از شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود در دهه‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در مطالعه‌ی فرایندهای ماشینکاری پیدا کرده است. بخصوص در پیش‌بینی شکل‌گیری براده، محاسبه توزیع تنش و کرنش، دمای برش و شار حرارتی که اندازه‌گیری آنها با روش‌های تجربی دشوار است، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کمک زیادی در شناخت بهتر این متغیرها فراهم کرده است. با ظهور سیستم‌های کامپیوتری پیشرفته‌تر، امکان شبیه‌سازی و مدل‌کردن

<sup>1</sup> Size effect

### Please cite this article using:

H. Rezaei, M. H. Sadeghi, 3D Finite element simulation of micro-milling process of titanium alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 555-561, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گسیختگی و شرایط اصطکاکی بین ابزار و براده، تکنیک‌های پیشرفته مش-بندی که منجر به بالاترین دقت و بیشترین راندمان محاسباتی شوند، بخصوص در ارتباط با شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی و در زمینه مدل‌سازی میکروفرايندها از اهمیت بسزایی برخوردار است.

با توجه به اهمیت مطالعات بیشتر در جهت شناخت متغیرهای فرایند میکروفرزکاری و توسعه مدل‌های اجزای محدود این فرایندها، در این تحقیق از مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار دیفرم<sup>4</sup> برای شبیه‌سازی فرایند میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V استفاده شده است. اثر پارامترهای اصلی برش بر توزیع دمایی، نیروهای برشی و نرخ سایش ابزار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## 2- میکرو فرزکاری

میکروفرزکاری از جمله فرایندهای ماشینکاری است که در آن از ابزارهای معمولاً با قطر کمتر از 1 میلی‌متر برای عملیات براده برداری استفاده می‌شود. علم و دانش موجود در میکروفرزکاری در حال حاضر تا حدود زیادی برگرفته از تئوری‌های برش در مقیاس ماکرو می‌باشد. با این حال ماشینکاری در مقیاس میکرو بدلیل استفاده از ابزارهای خیلی کوچکتر تفاوت‌هایی اساسی با حالت ماکرو دارد. در برش با مقیاس میکرو ضخامت براده نتراشیده نسبتاً برابر با شعاع لبه برنده یا ریزساختار قطعه است و بنابراین دیگر نمی‌توان ابزار را تیز فرض کرد و گردی لبه برنده را نادیده گرفت (شکل 1). در این شرایط بدلیل نزدیکی شعاع لبه برنده به ضخامت براده نتراشیده براده برداری با مکانیزم‌های مختلف شخم‌زنی و برش انجام می‌گیرد و علاوه بر پارامترهای معمول در فرایندهای ماشینکاری، پدیده‌ی " اثر اندازه " نیز بر خروجی‌های مختلف فرایند تاثیرگذار خواهد شد. بسیاری از فاکتورها نظیر ارتعاشات و دفلکشن ابزار، شعاع لبه برنده، زاویه براده موثر منفی، برگشت الاستیک، مینیمم ضخامت براده و ریزساختار قطعه که در مقیاس ماکرو می‌توان آنها را نادیده گرفت، در مقیاس میکرو بسیار حائز اهمیت بوده و در اکثر مواقع باعث بروز عیوب در سطح قطعات ماشینکاری شده می‌شوند.

کوچک بودن ناحیه برش و سرعت‌های بالای براده برداری در مقیاس میکرو، استفاده از روش‌های تجربی در اندازه‌گیری‌ها و تحلیل مشخصه‌های مختلف فرایند را با مشکلات بسیاری همراه می‌سازد. از این رو استفاده از روش‌های تحلیلی و یا اجزای محدود می‌تواند کمک زیادی در جهت شناخت هرچه بهتر فرایند و اثرگذاری مشخصه‌های آن در جهت بهینه‌سازی فرایند

جایگزینی شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود را به جای روش‌های تجربی بعنوان یکی از مهمترین راهکارهای غلبه بر این مشکل‌ها بر می‌گزینند.

با توجه به اهمیت روش‌های اجزای محدود در شناخت متغیرهای ماشینکاری، مطالعات مختلفی در سال‌های اخیر در این زمینه انجام گرفته است. اوزیل و دانورکر [1]، اولین مطالعات در زمینه مدل‌سازی دوبعدی و شبیه‌سازی میکروفرزکاری آلیاژهای آلومینیوم و فولاد را انجام دادند و توانستند با استفاده از شبیه‌سازی، نیروهای برشی و همچنین توزیع دمایی در ابزار و قطعه‌کار را با دقت‌های قابل قبولی پیش‌بینی کنند. در ادامه، وانگ و همکاران [2] با استفاده از مدلی دو بعدی به پیش‌بینی سرعت براده، نرخ کرنش و نیروی برش در میکروفرزکاری آلیاژ آلومینیوم پرداختند. جین و آلتینتاش [3]، نیز از شبیه‌سازی دو بعدی اجزاء محدود برای تخمین ضرایب نیروی برش و سپس پیش‌بینی نیروهای برش در میکروماشینکاری برنج استفاده و نتایج قابل قبولی گزارش کردند. دینگ و همکاران [4]، از شبیه‌سازی برای مطالعه‌ی مکانیک برش و شکل‌گیری براده در میکروفرزکاری فولادهای ابزار گرم‌کار بهره بردند و نشان دادند که در تحلیل‌های نرم‌افزاری امکان پیش‌بینی تشکیل لبه انباشته در فرایندهای میکروماشینکاری تا حد قابل قبولی وجود دارد. مطالعاتی نیز در زمینه بهینه‌سازی طرح ابزار و نوع پوشش آنها در فرایندهای فرزکاری انجام گرفته است که در این ارتباط اوزیل و همکاران [5,6]، با استفاده از مدلی دو بعدی اثرات پوشش ابزار را بر روی نیروهای برشی، دمای برش و سایش ابزار بررسی و گزارش کردند که ابزارهای کاربایدی پوشش‌دار در مقایسه با نوع بدون پوشش عملکرد بهتری از خود بجای می‌گذارند. در جایی دیگر، باتیستا و همکاران [7] توزیع تنش در ابزار حین فرزکاری آلیاژهای تیتانیوم را مورد بررسی قرار دادند که از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی سایش ابزار برای یافتن طرح بهینه ابزار در فرزکاری این آلیاژها استفاده کردند. براندو و همکاران [8]، نیز از شبیه‌سازی سه بعدی در نرم افزار اباکوس<sup>1</sup> برای مطالعه توزیع دمایی و تخمین شار حرارتی در میکروفرزکاری فولاد ابزار گرم‌کار به روش معکوس حرارتی<sup>2</sup> استفاده کردند و اشاره داشتند که شار حرارت ورودی به قطعه حدوداً 10 درصد از کل حرارت تولیدی حین میکروفرزکاری این آلیاژها را شامل می‌شود.

بررسی پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه شبیه‌سازی فرایندهای ماشینکاری بخصوص میکروفرزکاری، ضمن محدود بودن اکثرأ معطوف به مدل‌های دوبعدی متعامد بوده و این درحالی است که در واقعیت فرایند میکروفرزکاری شکل پیچیده‌ای از فرایندهای برش مایل<sup>3</sup> می‌باشد. گرچه در مقایسه با مدل‌های سه‌بعدی، شبیه‌سازی مدل‌های دو بعدی متعامد ساده‌تر بوده و برای شناخت مفاهیم پایه‌ای مکانیک برش کافی و قابل استفاده است [9]، ولی با این حال توسعه مدل‌های سه‌بعدی، پنجره‌های جدیدی را باز خواهد کرد که در مدل‌های دو بعدی قادر به پیش‌بینی آنها نخواهیم بود. از آن جمله می‌توان به تخمین دقیق‌تر نیروها و دمای برش، پیش‌بینی شکل-گیری براده و پلیسه، پیش‌بینی زبری سطح و همچنین استفاده‌ی در طراحی و بهینه‌سازی هندسه‌ی ابزارهای برشی اشاره داشت. در عین حال باید توجه داشت که شبیه‌سازی اجزای محدود یک روش عددی است و در نتیجه نتایج آن کاملاً وابسته به پارامترهای ورودی، دقت و صحت مدل‌ها و روش‌های عددی بکاررفته در آن می‌باشد. از این رو تشخیص مدل مناسب برای پیش‌بینی

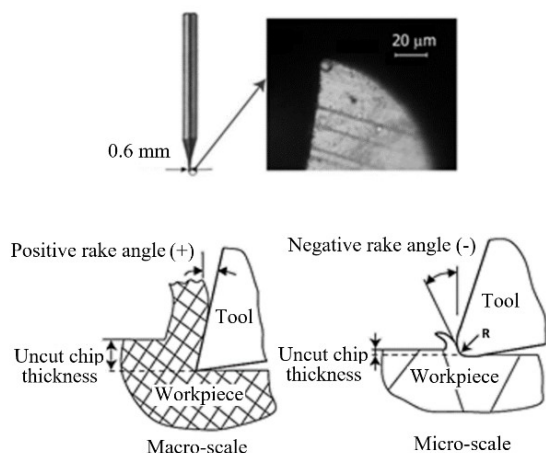


Fig. 1 differences of cutting mechanism in micro- and macro scale [10]

شکل 1 تفاوت مکانیزم برش در مقیاس‌های میکرو و ماکرو [10]

<sup>4</sup> Deform-3D

<sup>1</sup> Abaqus

<sup>2</sup> Inverse Heat Conduction Problems

<sup>3</sup> Oblique

نماید.

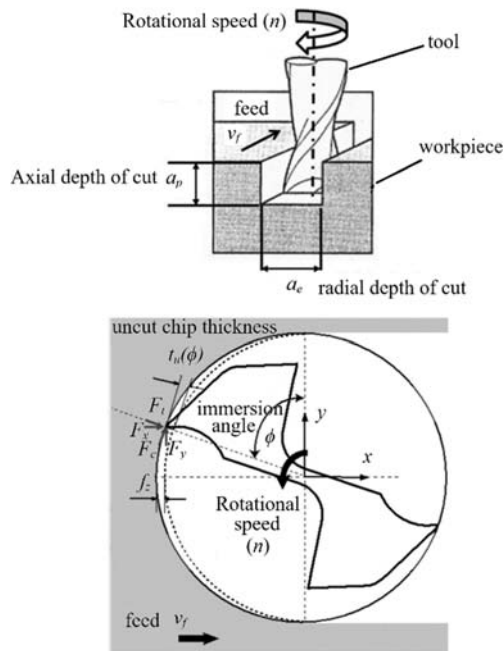


Fig. 3 Micromilling process parameters

شکل 3 پارامترهای فرایند میکروفرزکاری

جدول 1 پارامترهای فرایندی بکار رفته در شبیه‌سازی

Table 1 Process parameters used in simulation

مشخصات و مقادیر	پارامترهای فرایند
Ti6Al4V آلیاژ تیتانیوم	قطعه کار
WC دو لبه از جنس	ابزار برش
0.6 mm	قطر ابزار (D)
30 درجه	زاویه هلیکس ( $\beta$ )
10 درجه	زاویه براده ( $\alpha$ )
7 درجه	زاویه آزاد ( $\gamma$ )
3 $\mu\text{m}$	شعاع لبه برنده ( $r_e$ )
35000 و 25000, 15000 rpm	سرعت دورانی (n)
7 و 5, 3 $\mu\text{m}$	پیشروی به ازای دندانه ( $f_z$ )
100 $\mu\text{m}$	عمق برش محوری ( $a_p$ )
600 $\mu\text{m}$	عمق برش شعاعی ( $a_e$ )

کاهش زمان و در عین حال حفظ دقت حل، از چگالی مش برای ایجاد مش-های ریزتر در ناحیه برش مطابق شکل 2 استفاده شد که به همراه ابزار برش حرکت خواهد کرد.

مش‌بندی ابزار حساسیت چندانی در مقایسه با قطعه‌کار نداشته و تنها به منظور برقراری تماس و محاسبات دمایی و یا سایش ابزار مورد توجه قرار می‌گیرد. برای مش‌بندی ابزار نیز از 43156 المان با مینی‌م سایز مش 1  $\mu\text{m}$  استفاده شده است که مطابق شکل 4 برای حفظ کیفیت بالای لبه‌های برنده ابزار از مش‌های بسیار ظریف با چگالی مش بالاتر در آن نواحی استفاده شد. تخصیص مقدار مناسب گام زمانی<sup>2</sup> نیز برای حل دقیق ضروری است. چگونگی انتخاب مقدار صحیح آن همواره بسته به نوع عملیاتی خواهد بود که قرار است شبیه‌سازی شود. در فرایندهای فرزکاری مطلوب است هر گام زمانی حداقل معادل یک درجه چرخش ابزار باشد که این مقدار در سرعت‌های دورانی مختلف با استفاده از رابطه (1) قابل محاسبه خواهد بود:

### 3- شبیه‌سازی اجزاء محدود

از نرم افزار شبیه‌سازی دیفرم برای مدل‌سازی سه‌بعدی فرایند میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V مطابق شکل 2 استفاده شده است. شبیه‌سازی فرایند در حالت کلی شامل مراحل پیش پردازش، پردازش و پس‌پردازش می‌باشد. در مرحله اول، اطلاعات مربوط به مدل‌های ابزار و قطعه‌کار به همراه شرایط مرزی، پارامترهای ماشینکاری و تعریف تنظیمات حل انجام پذیرفت. مدل‌های سه‌بعدی ابزار و قطعه‌کار در فرمت STP از پیش تهیه و وارد نرم افزار شده‌اند. پس از اتمام مرحله‌ی پیش‌پردازش، نوبت به اجرای تحلیل و شبیه‌سازی بر اساس تنظیمات انجام گرفته می‌رسد. این مرحله کند و زمان‌بر بوده و در نهایت منجر به ثبت اطلاعات خروجی می‌شود. در آخرین مرحله، نوبت به استخراج و تفسیر نتایج حاصل از شبیه‌سازی در قالب نمودارها و گراف‌ها است.

شبیه‌سازی فرایند شیارزنی کامل در میکروفرزکاری انجام گرفته است که در شکل 3 پارامترهای مهم موجود در این فرایند نمایش داده شده است. در طول فرایند شبیه‌سازی، قطعه‌کار ثابت و ابزار دارای حرکت دورانی و پیشروی به ترتیب با سرعت‌های  $\omega$  و  $v_f$  می‌باشد. برای تهیه‌ی مدل سه‌بعدی ابزار و قطعه‌کار از نرم افزار کتیا<sup>1</sup> استفاده شد. میکرو ابزار بکار رفته در این تحقیق، فرز انگشتی سر تخت دو پره از جنس تنگستن کارباید بوده است. اطلاعات هندسی ابزار به همراه سایر پارامترهای بکار رفته در این تحقیق در جدول 1 گنجانده شده است. سرعت‌های دورانی و پیشروی هر یک در سه سطح و عمق برشی محوری ثابت در نظر گرفته شدند.

از المان‌های تتراهدرال خطی بدلیل سهولت در حل برای مش‌بندی قطعه‌کار و میکرو ابزار استفاده شده است که از آنها معمولاً برای مسائل شامل تغییرشکل‌های پلاستیک بکار گرفته می‌شود. انتخاب سایز مش یکی از مهمترین مراحل شبیه‌سازی است که می‌تواند بر سرعت و دقت حل تاثیر بسیار زیادی بگذارد. برای فرایندهای فرزکاری، پیشروی تعیین کننده‌ی مینی‌م اندازه‌ی مش است. معمولاً سایز مش می‌بایست حداکثر برابر با نصف مینی‌م ضخامت براده نتراشیده ( $f_z$ ) باشد. از این رو برای مش‌بندی قطعه‌کار از  $2 \times 10^5$  المان با مینی‌م سایز مش برابر با 0.5  $\mu\text{m}$  استفاده شد. به منظور

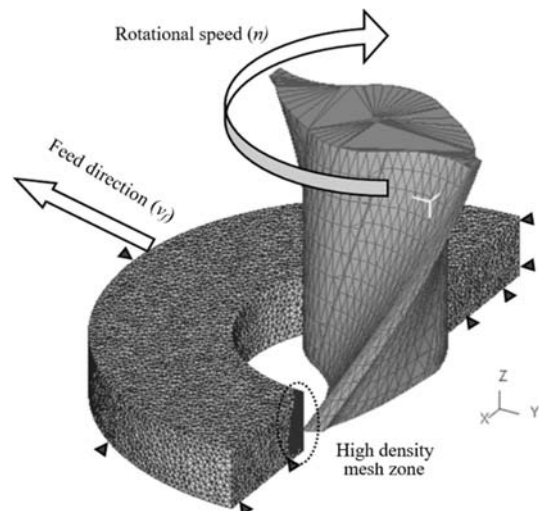


Fig. 2 3D model of slot cutting in micromilling

شکل 2 مدل سه بعدی شیارزنی در فرایند میکروفرزکاری

<sup>2</sup> Time step

که در آن  $\sigma$  تنش سیلان ماکزیمم،  $\epsilon_f$  کرنش شکست و  $C_i$  ثابت ماده هستند. مقدار  $C_i$  می‌بایست از طریق آزمایش تعیین شود. نتایج نشان داده است که در انتخاب مقدار 90 برای شرط گسیختگی، پیش‌بینی رفتار تشکیل براده به نتایج تجربی نزدیک‌تر بوده است. در نرم افزار دیفرم امکان استفاده از مدل‌های آسیب مختلفی فراهم می‌باشد که برای فرایند براده‌برداری، مدل شکست کارکرافت و لاتام استفاده شده است [14,15].

### 3-3- مدل اصطکاک

نقش اصطکاک در فرایندهای ماشینکاری بسیار با اهمیت بوده و نمی‌توان آنرا نادیده گرفت. در حالت واقعی سه ناحیه اصطکاک کاملاً چسبنده، چسبنده-لغزنده، و کاملاً لغزنده در فرایندهای ماشینکاری تعریف می‌شود که با توجه به شرایط مختلف برش امکان وقوع هر یک وجود خواهد داشت. از این رو برای واقعی‌تر بودن شرایط اصطکاک در این تحلیل از دو نوع قید تماسی چسبنده<sup>5</sup> و لغزنده<sup>6</sup> بین ابزار و قطعه کار در طول تماس استفاده شده است:

$$\begin{aligned} 1- \text{تماس چسبنده} & \tau_f = mk \\ 2- \text{تماس لغزنده} & \tau_f = \mu p \end{aligned}$$

برای تعریف تماس چسبنده از  $\tau_f = mk$  استفاده شده که  $k$  تنش تسلیم برشی قطعه کار،  $m$  فاکتور اصطکاک برش و  $\tau_f$  نیز تنش اصطکاک است. برای تعریف تماس لغزشی نیز از  $\tau_f = \mu p$  استفاده شده که  $\mu$  ضریب اصطکاک کولمب و  $p$  تنش نرمال است. برای حالتی که  $\mu p < mk$  تماس از نوع لغزشی و حالتی که  $\mu p \geq mk$  باشد، تماس چسبنده اعمال شده است.

بعلت متفاوت بودن شرایط اصطکاک در فرایند میکرو در مقایسه با مقیاس ماکرو، تعیین دقیق ضرایب اصطکاک بسیار دشوار خواهد بود. در فرایندهای میکروماشینکاری بعلت تغییر شکل پلاستیک براده، سختی براده بسیار بالاتر از سختی قطعه کار می‌باشد و این تغییرات سختی ممکن است منجر به تغییر ضریب اصطکاک شود. بر مبنای آزمایشات تجربی و کارهای صورت گرفته در این زمینه [16,17]، در تحلیل حاضر مقادیر ثابت  $\mu$  و  $m$  به ترتیب برابر با 0.7 و 0.9 لحاظ شده‌اند. در صورتی بروز برخورد بین براده و قطعه کار نیز تماس نوع لغزشی با ضریب اصطکاک 0.2 تعریف شده است. در بخش 4 این مقاله، نیروهای برش حاصل از نتایج شبیه‌سازی مطابق نتایج حاصل از آزمایشات تجربی بوده که نشان‌دهنده‌ی قابل قبول بودن مقادیر انتخابی برای ضرایب برش یاد شده می‌باشد.

### 3-4- تحلیل انتقال حرارت

برای پیش‌بینی توزیع دمایی در نرم‌افزار، از مدل سه‌بعدی انتقال حرارت بصورت رابطه (4) برای حل ترمومکانیکی فرایندهای براده‌برداری استفاده می‌شود:

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

که در آن  $T$  دمای محاسبه شده،  $Q$  نرخ شار حرارتی،  $\rho$  چگالی،  $c$  ظرفیت حرارتی،  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $t$  زمان است.

شار حرارتی  $q_p$  ناشی از تبدیل کار پلاستیک و تغییر شکل برشی خواهد بود که بصورت رابطه (5) تعریف می‌شود:

$$q_p = \frac{M f_p W_p}{\rho} \quad (5)$$

که در آن  $M$  حرارت معادل مکانیکی،  $f_p$  درصد تبدیل کار مکانیکی به

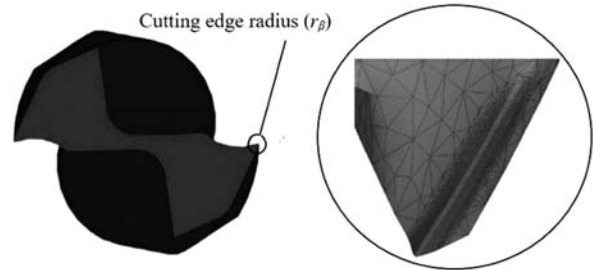


Fig. 4 A 3D image of micro-tool model used in simulation

شکل 4 تصویر مدل سه بعدی میکرو ابزار مورد استفاده در شبیه‌سازی

$$\text{گام زمانی} = \frac{\left(\frac{1}{\pi}\right)}{360} \quad (1)$$

### 3-1- خواص فیزیکی و مدل ماده<sup>1</sup>

یکی از مهمترین مشکلات شبیه‌سازی فرایندها، بکارگیری مدل ماده مناسب است. مدل ماده بعنوان یک ورودی الزامی در تحلیل‌های اجزا محدود بیانگر تغییرات تنش تسلیم با کرنش، نرخ کرنش و دما در جریان پلاستیک ماده است. با توجه به اهمیت نرخ کرنش‌سختی در فرایندهای ماشینکاری بعلت وجود نرخ کرنش‌های بالا (حدود  $10^6 \text{ s}^{-1}$ ) و تجربه‌ی دماهای بالای برش حین ماشینکاری بخصوص در مورد آلیاژهای تیتانیوم، از مدل جانسون-کوک برای تحلیل فرایند استفاده شده است. در این مدل، ترکیبی از اثرات مستقل کرنش‌سختی بصورت توانی، نرخ کرنش‌سختی بصورت لگاریتمی و نرم-شوندگی حرارتی بصورت توانی به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود [11]:

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

که در آن  $\bar{\sigma}$  تنش معادل،  $\bar{\epsilon}$  کرنش پلاستیک معادل،  $\dot{\bar{\epsilon}}$  نرخ کرنش معادل و  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  نرخ کرنش مرجع می‌باشد.  $T$ ،  $T_m$  و  $T_r$  نیز به ترتیب دمای ناحیه برش، دمای ذوب ماده و دمای محیط می‌باشند.  $A$  تنش تسلیم اولیه،  $B$  مدول سخت‌شوندگی<sup>2</sup>،  $n$  ضریب کرنش‌سختی،  $C$  ضریب وابستگی نرخ کرنش و  $m$  ضریب نرم‌شوندگی حرارتی هستند. ثابت‌های مدل  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ،  $n$  و  $m$  از طریق آزمایش دما بالای فشار میله هاپکینسون<sup>3</sup> بدست می‌آید. در شرایط کرنش 0.28، نرخ کرنش  $1400 \text{ s}^{-1}$  و دمای  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  ثابت ماده بصورت جدول 2 خلاصه می‌شوند [12]:

### 3-2- مدل گسیختگی ماده

شکست ماده و تشکیل براده مستقیماً بر روی تنش سیلان اثرگذارند. تنش سیلان بعلت پدیده نرم‌شوندگی ناشی از تبلور مجدد دینامیکی، از یک مقدار کرنش بحرانی خاصی به بعد کاهش می‌یابد. از معیار شکست کوکرافت و لاتام<sup>4</sup> بصورت رابطه (3) برای تعریف شکست استفاده شده است [13]:

$$C_i = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

جدول 2 ضرایب مدل جانسون-کوک برای متریال Ti6Al4V

Table 2 Johnson-cook coefficient of Ti6Al4V					
$n$	$M$	$C$	$B$ (MPa)	$A$ (MPa)	ضرایب مدل
0.47	1	0.035	638.1	724.7	مقادیر

<sup>1</sup> material constitutive law

<sup>2</sup> hardening modulus

<sup>3</sup> SHPB

<sup>4</sup> Cockroft and Latham

<sup>5</sup> sticking contact

<sup>6</sup> sliding contact



Fig. 5 The experimental setup

شکل 5 چیدمان آزمایش تجربی

میکرو ابزار دو پره از جنس تنگستن کارباید به قطر 0.6 mm ساخت شرکت ژاپنی ان اس تول<sup>2</sup> (مدل NSE320) که مشخصات هندسی آن در شکل 6 و جدول 1 آورده شده برای انجام آزمایش‌های میکروفرزکاری بکار رفته است. از میکروسکوپ پرتابل داینولایت<sup>3</sup> مدل AM7915 و پروفایلر سه بعدی نانوفاکوس<sup>4</sup> مدل اپتیکس 780<sup>5</sup> نیز برای تعیین مشخصات هندسی ابزار استفاده شده است.

گراف نیرویی اندازه‌گیری شده در میکروفرزکاری با ابزار قطر 0.6 میلی‌متر تحت شرایط برشی 15000 rpm، 7 μm/tooth و 100 μm برای یک دور چرخش ابزار در شکل 7 آورده شده است که نشان از انطباق بسیار بالای نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده دارند.

### 5- نتایج و بحث

شبیه‌سازی فرایند میکروفرزکاری با ابزار قطر 0.6 میلی‌متر در نرم افزار دیفرم

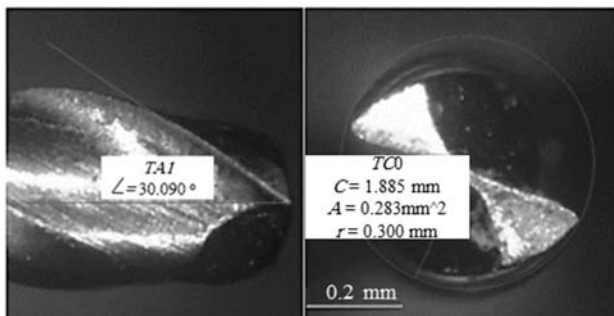
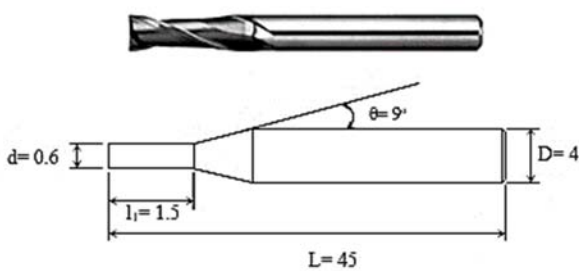


Fig. 6 Geometry of micro tool used in the experimental test

شکل 6 هندسه ابزار مورد استفاده در آزمایش تجربی (ابعاد به mm)

<sup>2</sup> NS Tool

<sup>3</sup> Dino-Lite

<sup>4</sup> nanofocus

<sup>5</sup> Optiplex 780

حرارت (تقریباً 0.9) و  $W_p$  کار پلاستیک است. شار حرارتی  $q_c$  که بصورت جابجایی از ابزار و سطوح قطعه به محیط منتقل می‌شود بصورت رابطه (6) خواهد بود:

$$q_c = h_c(T_t - T_r) \quad (6)$$

که  $h_c$  ضریب جابجایی انتقال حرارت،  $T_t$  دمای گذرای قطعه و  $T_r$  دمای محیط است.

انتقال حرارت از ابزار و قطعه‌کار با محیط از طریق جابجایی با ضریب جابجایی  $0.02 \text{ Ns}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ C}^{-1}$  لحاظ شده است. همچنین برای انتقال حرارت بین ابزار و قطعه‌کار از رسانش حرارتی با مقدار  $10^7 \text{ Ns}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ C}^{-1}$  استفاده شده است. دمای محیط برابر 20 درجه انتخاب گردید. خواص فیزیکی و مکانیکی ابزار و قطعه‌کار مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول 3 آورده شده است.

### 3-5- مدل سایش

سایش ابزار یکی از فاکتورهای اصلی موثر بر عملکرد میکروفرزکاری است که بررسی آن به روش تجربی بسیار دشوار می‌باشد. از این رو در این تحقیق اثر سایش ابزار در میکروفرزکاری با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی فرایند در نرم افزار دیفرم مورد ارزیابی قرار گرفت.

برای مدل‌کردن نرخ سایش ابزار از مدل یوسویی<sup>1</sup> بر اساس خوردگی لغزشی استفاده شده است [18]. از آنجایی‌که افزایش دما در فرایند میکروفرزکاری به ندرت به مرحله اکسیداسیون خواهد رسید، از خوردگی شیمیایی به راحتی می‌توان چشم‌پوشی کرد. در این مدل، نرخ سایش ابزار، نرخ کاهش حجم ابزار در واحد سطح در واحد زمان محاسبه شده و از ورودی‌هایی نظیر دمای سطح تماس ( $T$ )، تنش نرمال ( $\sigma_n$ ) و سرعت لغزشی ( $v_s$ ) در سطوح ابزار برای محاسبه توزیع نرخ سایش ابزار ( $dw/dt$ ) مطابق رابطه (7) استفاده می‌شود:

$$\frac{dw}{dt} = c_1 \sigma_n v_s e^{-c_2/T} \quad (7)$$

ثوابت  $c_1$  و  $c_2$  وابسته به جنس ماده بوده و برای آلیاژ تیتانیوم

Ti6Al4V به ترتیب برابر با  $7.8 \times 10^{-9}$  و  $2.5 \times 10^3$  در نظر گرفته شده‌اند [19].

### 4- اعتبارسنجی مدل با نتایج تجربی

برای اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی، نتایج نیرویی حاصل از تحلیل با مقادیر واقعی بدست آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شد. شکل 5، چیدمان آزمایش بکار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. آزمایش‌های تجربی روی ماشین میکروفرز Kern با ماکزیمم دور 52000 rpm انجام گرفت. از مینی-دینامومتر کیستلر مدل 9256C برای اندازه‌گیری نیرو استفاده شد. قطعه‌کار بکار رفته در آزمایش، آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V بوده است.

جدول 3 خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه‌کار و ابزار بکار رفته در شبیه‌سازی [5]

Table 3 Physical and mechanical properties of the tool and workpiece materials used in simulation [5]

خواص	Ti6Al4V	WC
ضریب رسانش، $k$ ( $\text{N/s C}^{-1}$ )	$7.039e^{0.0011T}$	55
ظرفیت حرارتی، $C_p$ ( $\text{N/mm}^2 \text{ C}^{-1}$ )	$2.24 e^{0.007T}$	$0.005 \times T + 2.07$
ضریب انبساط حرارتی، $\alpha$ ( $\text{C}^{-1}$ )	$3.10 \cdot 9 \times T + 7.10^{-6}$	$4.7 \times 10^{-6}$
مدول یانگ، $E$	$0.7412 \times T + 113375$	-
ضریب پواسون، $\nu$	0.31	-

<sup>1</sup> Usui

حرارتی و مقدار دما خواهد شد. شکل 10 توزیع دمای ابزار در نمونه‌ی 7 را حین یک دور چرخش ابزار نشان می‌دهد.

در شکل 11، نرخ سایش میکرو ابزار برشی حین براده‌برداری در شرایط برشی  $n=35000$  rpm و  $f_z=3$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$  و  $a_p=100$   $\mu\text{m}$  نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است مقادیر آورده شده مربوط به سایش ایجاد شده برای یک دور چرخش ابزار می‌باشند که به نوعی نمایانگر نرخ سایش ابزار است.

شکل 12، برهم کنش سرعت‌های دورانی و نرخ پیشروی بر نرخ سایش ابزار را نشان می‌دهد. با افزایش هر یک از مقادیر نرخ پیشروی و یا سرعت دورانی، نرخ سایش ابزار افزایش یافته است که در این بین سرعت دورانی پارامتر موثرتر معرفی می‌گردد.

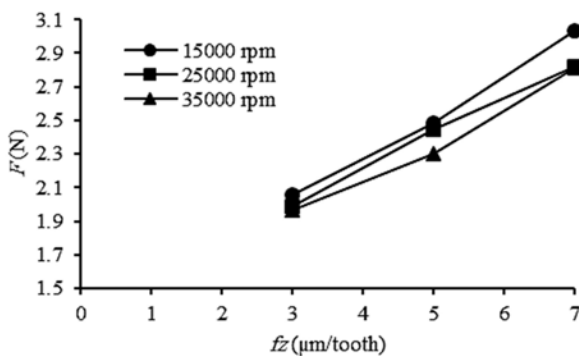


Fig. 8 Effect of rotational speed and feed rate on cutting force

شکل 8 تاثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر نیروی برش

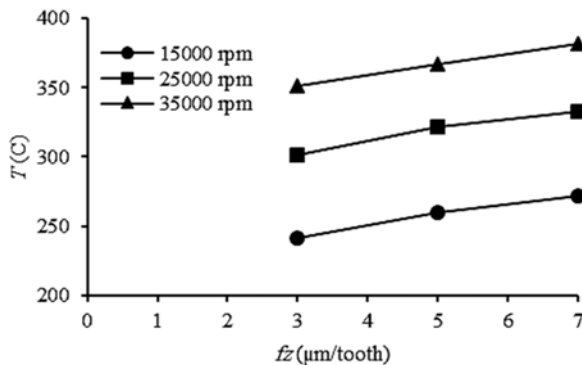


Fig. 9 Effect of rotational speed and feed rate on cutting temperature

شکل 9 تاثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر دمای برش

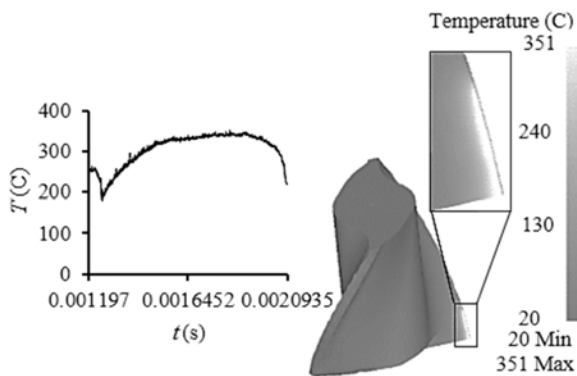


Fig. 10 Temperature distribution of cutting tool at  $n=35000$  rpm,  $f_z=3$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$ , and  $a_p=100$   $\mu\text{m}$

شکل 10 توزیع دمایی ابزار در میکروفرزکاری تحت شرایط برشی  $n=35000$  rpm  $a_p=100$   $\mu\text{m}$  و  $f_z=3$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$

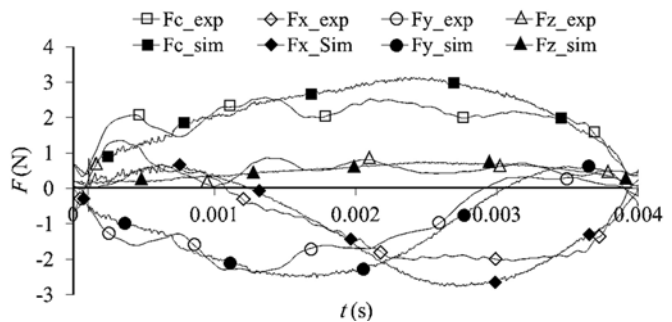


Fig. 7 Comparison of measured and simulated cutting forces results at  $n=15000$  rpm,  $f_z=7$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$ , and  $a_p=100$   $\mu\text{m}$

شکل 7 مقایسه نیروهای برشی حاصل از شبیه سازی با مقادیر تجربی در شرایط

برشی  $a_p=100$   $\mu\text{m}$  و  $f_z=7$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$ ،  $n=15000$  rpm

انجام گرفت. تاثیر پارامترهای مختلف برشی بر نیروهای برشی، توزیع دمایی و سایش ابزار مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی به همراه شرایط مختلف آزمایش در جدول 4 خلاصه شده است.

بعلت وجود زاویه هلیکس، نیروی برش در راستای محور ابزار ( $F_z$ ) مولفه‌ای خواهد داشت که البته در مقایسه با دو مولفه نیرویی دیگر از مقادیر  $F_x$  بسیار کمی برخوردار خواهد بود و با کاهش ضخامت براده کاهش می‌یابد. مولفه نیروی برشی عمود بر جهت پیشروی است که در این بین بالاترین مقدار را داراست و با کاهش ضخامت براده از مقدار آن نیز کاسته می‌شود.  $F_y$  مولفه نیروی برش در راستای پیشروی است که برخلاف دو مولفه‌ی دیگر با کاهش ضخامت براده بر مقدار آن افزوده می‌شود که علت آن کاهش زاویه بین نیروی کل و جهت پیشروی است که منجر به افزایش مولفه در راستای پیشروی می‌گردد.

شکل 8، برهم کنش سرعت‌های دورانی و نرخ پیشروی را بر نیروی برش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، افزایش سرعت دورانی و کاهش نرخ پیشروی موجب کاهش نیروی برشی می‌گردند و در این بین نیروی برشی بیشترین تاثیر را از نرخ پیشروی می‌گیرد. افزایش نیروی برشی در نرخ پیشروی‌های بالاتر بعلت افزایش ضخامت براده نتراشیده حین باربرداری است که در فرایندهای ماشینکاری همواره انتظار آن می‌رود. کاهش نیروی برشی در سرعت‌های دورانی بالاتر نیز همانطور که از شکل 8 نتیجه گرفته می‌شود، می‌تواند بعلت افزایش دمای برش و کاهش استحکام برشی ماده در دماهای بالاتر باشد.

شکل 9، برهم کنش سرعت‌های دورانی و نرخ پیشروی بر ماکزیمم دمای برش را نشان می‌دهد. با افزایش هر دو پارامتر سرعت دورانی و نرخ پیشروی، دمای برش افزایش می‌یابد که در این بین سرعت‌های دورانی فاکتور موثرتری به چشم می‌خورد. افزایش دمای برش در سرعت‌های دورانی بالاتر بعلت افزایش سرعت برشی و توان ورودی است که در نهایت منجر به افزایش شار

جدول 4 شرایط آزمایش و نتایج خروجی‌های شبیه‌سازی

Table 4 Process conditions and the obtained results of simulation						
Tool wear (mm)	$T_{max}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$F_{Cmax}$ (N)	$a_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$f_z$ ( $\mu\text{m}/\text{tooth}$ )	$n$ (rpm)	نمونه
0.000000078	242	2.042	100	3	15000	1
0.000000090	259	2.425	100	5	15000	2
0.000000098	274	2.913	100	7	15000	3
0.000000138	304	1.966	100	3	25000	4
0.000000137	322	2.386	100	5	25000	5
0.000000161	333	2.699	100	7	25000	6
0.000000185	351	1.941	100	3	35000	7
0.000000203	367	2.224	100	5	35000	8
0.000000213	383	2.699	100	7	35000	9

7- مراجع

[1] A. Dhanorker, T. Ozel, Meso/micro scale milling for micro-manufacturing, *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 23-42, 2008.

[2] J. Wang, Y. Gong, G. Abba, JF. Antoine, J. Shi, Chip formation analysis in micromilling operation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 45, No. 5-6, pp. 430-47, 2009.

[3] X. Jin, Y. Altintas, Prediction of micro-milling forces with finite element method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 3, pp. 542-52, 2012.

[4] H. Ding, N. Shen, YC. Shin, Experimental evaluation and modeling analysis of micromilling of hardened H13 tool steels, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 04100, 2011.

[5] T. Özel, T. Thepsonthi, D. Ulutan, B. Kaftanoğlu, Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti-6Al-4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 85-8, 2011.

[6] T. Thepsonthi, T. Özel, Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effects of cBN coating on tool wear, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 4, pp. 532-42, 2013.

[7] M. Batista, A. Morales, A. Gómez-Parra, J. Salguero, FJ. Puerta, M. Marcos, 3D-FEM based methodology for analysing contour milling processes of Ti Alloys, *Procedia Engineering*, Vol. 132, pp. 1136-43, 2015.

[8] SL. Ribeiro Filho, MO. Gomes, CH. Lauro, LC. Brandão, Definition of the temperature and heat flux in micromilling of hardened steel using the finite element method, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39, No. 10, pp. 7229-39, 2014.

[9] PJ. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, IS. Jawahir, Recent advances in modelling of metal machining processes, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 2, pp. 695-718, 2013.

[10] RR. Donaldson, CK. Syn, JS. Taylor, N. Ikawa, S. Shimada, Minimum thickness of cut in diamond turning of electroplated copper, *UCRL-97606*, Vol. 1, pp. 987, 1987.

[11] M. Calamaz, D. Coupard, F. Girot, A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 3, pp. 275-88, 2008.

[12] WS. Lee, CF. 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, No. 1, pp. 48-59, 1998.

[13] AH. Kheireddine, AH. Ammouri, T. Lu, Jr. OW. Dillon, RF. Hamade, IS. Jawahir, An experimental and numerical study of the effect of cryogenic cooling on the surface integrity of drilled holes in AZ31B Mg alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, No. 1-4, pp. 269-79, 2015.

[14] MG. Cockcroft, DJ. Latham, Ductility and the workability of metals, *Journal Institute of Metals*, Vol. 96, No. 1, pp. 33-9, 1968.

[15] S. Joshi, A. Tewari, SS. Joshi, Microstructural characterization of chip segmentation under different machining environments in orthogonal machining of Ti6Al4V, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 137, No. 1, pp. 011005, 2015.

[16] KW. Kim, WY. Lee, HC. Sin, A finite element analysis for the characteristics of temperature and stress in micro-machining considering the size effect, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 9, pp. 1507-24, 1999.

[17] JC. Aurich, H. Bil, 3D finite element modelling of segmented chip formation, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 47-50, 2006.

[18] E. Usui, T. Shirakashi, T. Kitagawa, Analytical prediction of three dimensional cutting process—Part 3: Cutting temperature and crater wear of carbide tool, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 100, No. 2, pp. 236-43, 1978.

[19] M. Sima, T. Özel, Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 11, pp. 943-60, 2010.

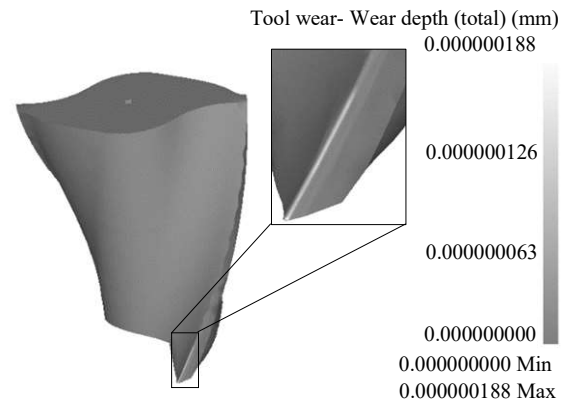


Fig. 11 Tool wear of one revolution at  $n=35000$  rpm,  $f_z=3$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$ , and  $a_p=100$   $\mu\text{m}$

شکل 11 سایز ابزار در یک دور چرخش تحت شرایط برشی  $n=35000$  rpm و  $f_z=3$   $\mu\text{m}/\text{tooth}$  و  $a_p=100$   $\mu\text{m}$

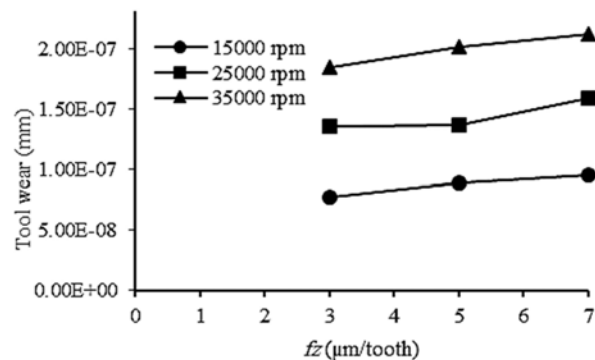


Fig. 12 Effect of rotational speed and feed rate on tool wear

شکل 12 تاثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر سایز ابزار

6- نتیجه گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی سه‌بعدی فرایند میکروفرازشکاری آلیاژ تیتانیومی Ti6Al4V در نرم‌افزار دیفرم انجام گرفت. مدل سه‌بعدی مورد استفاده مطابقت بسیار بالایی با نتایج تجربی داشته است. تاثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی بعنوان مهمترین پارامترهای برشی فرایند بر نیروهای برشی، توزیع دمایی و سایز ابزار مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج نشان از قابلیت بالای مدل تهیه شده در پیش بینی رفتار فرایند داشته است. نیروی برشی با افزایش سرعت دورانی و کاهش نرخ پیشروی، کاهش می‌یابد که نقش نرخ پیشروی بسیار بیشتر بوده است. از طرفی دیگر، افزایش مقادیر نرخ پیشروی و سرعت دورانی منجر به افزایش دمای برشی و سایز ابزار می‌شوند که در این بین سرعت دورانی پارامتر موثرتر بوده است.