



# Simulation of Microstructural Changes in Cryogenic Machining of Ti6Al4V Titanium Alloy Produced by Additive Manufacturing and Experimental Validation



## ARTICLE INFO

### Authors

Jafarian F <sup>1\*</sup>

Fallah M M <sup>2</sup>

Bahrami yarahmadi M <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran.

<sup>2</sup> Shahid Rajaei Teacher Training University

### \* Correspondence

Address: Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat  
Farshid.jafarian@gmail.com

### How to cite this article

Jafarian F, Fallah MM, Bahrami M. Simulation of microstructural changes in machining of Ti6Al4V titanium alloy produced by additive and experimental validation. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):107-111.

## ABSTRACT

Titanium and its alloys, especially the Ti6Al4V alloy, have many uses in the aerospace and medical industries due to their unique properties. The production of Ti6Al4V alloy by additive method has been very much considered due to the characteristic of this method. But due to the fact that these parts also require final machining. As a result, it is very important to achieve optimal parameters from a faster and more economical method. In this article, simulation of cryogenic machining of EBM Ti6Al4V alloy in order to study microstructural changes. done. It was validated by comparing the experimental results and simulation of the material model. Then, using the validated FE model, the effects of shear speed on forces, thermal loads and microhardness were discussed.

**Keywords** Surface Integrity, Additive Manufacturing, Cryogenic Machining, Ti6Al4V Alloy

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۰۷-۱۱۱



## شبیه سازی تغییرات میکرو ساختاری ماشینکاری برودتی آلیاژ Ti6Al4V تیتانیوم تولید شده به روش ساخت افزایشی و اعتبار سنجی تجربی



## چکیده

### مشخصات مقاله

#### نویسنده‌ها

فرشید جعفریان <sup>۱\*</sup>

محمد مقداد فلاح <sup>۲</sup>

محسن بهرامی یاراحمدی <sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> مرکز آموزش عالی محلات، محلات

<sup>۲</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

\* نویسنده مسئول

آدرس: مرکز آموزش عالی محلات، محلات

farshid.jafarian@gmail.com

تیتانیوم و آلیاژهای آن مخصوصاً آلیاژ Ti6Al4V به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد در صنعت هوا و فضا و پزشکی کاربرد بسیاری دارند. تولید آلیاژ Ti6Al4V به روش افزایشی به دلیل ویژگی این روش بسیار مورد توجه قرار گرفته است. علی‌رغم محاسن قابل توجه روش‌های AM، کیفیت سطح و دقت ابعادی ضعیف قطعات تولید شده از محدودیت‌های روش ساخت افزایشی می‌باشد. بنابراین، معمولاً عملیات ماشینکاری پرداخت برای قطعات تولیدی با روش‌های AM مورد نیاز است تا محدودیت‌های روش ساخت افزایشی بر طرف گردد. در نتیجه دستیابی به پارامترهای بهینه از روش سریعتر و مقرون به صرفه‌تر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله شبیه‌سازی ماشینکاری برودتی آلیاژ Ti6Al4V EBM به منظور مطالعه تغییرات میکرو ساختاری انجام شده است. با مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی مدل ماده اعتبار سنجی گردید. سپس با استفاده از مدل FE اعتبار سنجی شده به تأثیرات سرعت برشی در نیروهای، بارهای حرارتی و میکرو سختی پرداخته شد.

کلیدواژه‌ها: یکپارچگی سطح، ساخت افزایشی، ماشینکاری برودتی، آلیاژ Ti6Al4V

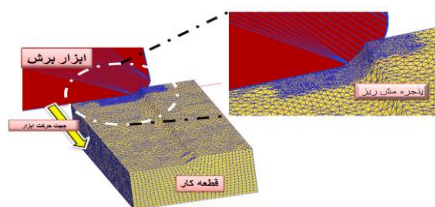
## ۱- مقدمه

قرار می‌گیرد<sup>[8]</sup>. از اینرو، مدل‌های عددی مبتنی بر روش اجزای محدود (FEM) به مهندسی کمک می‌کند تا فرآیند تولید را طراحی و بهینه‌سازی کند و همچنین بهترین پارامترهای بهینه فرآیند را جهت بهبود یکپارچگی سطح بخوبی پیش بینی کند<sup>[9]</sup>. تاکنون تحقیقات محدودی در خصوص ماشین کاری تولید شده با استفاده از روش ساخت افزایشی آلیاژ Ti6Al4V و بررسی پارامترهای موثر در یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری صورت پذیرفته است. این امر می‌تواند به دلیل محدودیت مدل ماده موجود، چالش‌های ارائه زیربرنامه مناسب جهت شبیه‌سازی تغییرات میکروسختی و مطالعات اندک تجربی جهت اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی باشد. لذا در این مقاله به منظور پوشش این خلاء و کمبود مطالعات صورت پذیرفته در این راستا، شبیه‌سازی سه بعدی عملیات ماشینکاری بر روی آلیاژ EBM Ti6Al4V در شرایط خنک کاری برودتی صورت پذیرفت. یک مدل FE مبتنی بر JC مطابق با ریز ساختار و پیش بینی میکرو سختی زیر برنامه نویسی شد. و در کد FE پیاده‌سازی گردید. شرایط شبیه‌سازی در سه سطح سرعت برش در شرایط ماشینکاری برودتی با نتایج متناظر تجربی (شامل: دما نیرو و تغییرات میکروساختاری) اعتبارسنجی شد. سپس تاثیر سرعت برشی روی خروجی فرآیند مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- شبیه‌سازی

## ۲-۱- مش بندی

برای مدل‌سازی عددی ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V از نرم افزار 3D-DEFORM استفاده شد. این نرم افزار از فرمول لاگرانژی به روز شده با استراتژی remeshing استفاده می‌کند که باعث تشکیل براده پیوسته بدون نیاز به تعریف معیار جداسازی تراشه می‌شود. برای قطعه کار مش ریز (۸۵۰۰۰ المان)، در نظر گرفته شد و برای دقت بیشتر در محل تشکیل براده مش ریزتر (با ضریب %۰.۳) لحاظ شد که با حرکت ابزار در طول قطعه کار جابجا شود. شکل 1 مدل‌سازی سه بعدی فرآیند ماشینکاری را با توزیع پنجره مش ریز در نزدیکی منطقه برش نشان می‌دهد. همچنین از شرایط اصطکاکی با مدل ترکیبی چسبنده/لغزنده (sticking-sliding) در محل تماس ابزار و براده استفاده شد. ضریب m برای اصطکاک چسبنده و ضریب  $\mu$  برای اصطکاک لغزنده به ترتیب مقادیر کالیبره شده ۰/۴ و ۰/۳ برای ماشینکاری برودتی در نظر گرفته شدند<sup>[10]</sup>.



شکل ۱: مدل‌سازی سه بعدی فرآیند ماشینکاری

## ۲-۲- مدل ماده:

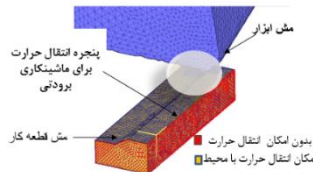
اکثر مدل‌های ماده ارائه شده برای شبیه‌سازی فرآیند براده برداری Ti6Al4V بر اساس معادله J-C است<sup>[۱۱]</sup>. در این راستا مدل ماده J-C اصلاح شده توسط ozei<sup>[13]</sup> ارائه شد. این مدل ماده اصلاح شده قابلیت بهتری در پیش‌بینی هندسه براده و نیروهای ماشینکاری از مدل جانسون-کوک استاندارد همراه با یک معیار آسیب،

در سال‌های اخیر، ساخت افزودنی (AM) قطعات فلزی فرصت‌های جدیدی را برای بسیاری از بخش‌های مهم صنعتی و نیازهای فردی باز می‌کند. اجزای کاربردی و با هندسه پیچیده که تولید آنها با روش‌های مرسوم دشوار یا غیرممکن است را می‌توان به راحتی با استفاده از AM تولید نمود. علاوه بر این، به حداقل رساندن محدودیت‌های طراحی، حداقل استفاده از مواد و حذف هزینه‌های ابزار از دیگر مزایای قابل توجه این فناوری است<sup>[۱]</sup>. از اولین آلیاژهایی که به روش AM تولید شده است، آلیاژ Ti6Al4V می‌باشد. در بین آلیاژهای پایه تیتانیوم، آلیاژ Ti6Al4V یک آلیاژ دو فاز است که چگالی کم، خواص مکانیکی بالا و مقاومت در برابر خوردگی منحصر به فردی را ارائه می‌دهد و بسیار پرمصرف می‌باشد<sup>[۲]</sup>. به دلیل استفاده آلیاژ Ti6Al4V در صنایع حساس و صنایع پزشکی دارا بودن یکپارچگی سطح قطعات تولیدی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در میان شاخص‌های مختلف یکپارچگی سطح، جنبه‌های متالورژیکی از جمله تغییرات ریزساختار و تنش‌های پسماند به طور قابل توجهی بر عملکرد و عمر مفید محصولات موثر است<sup>[3]</sup>. تاکنون مطالعات مختلفی در خصوص یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری این آلیاژ صورت پذیرفته است. از جمله این موارد، جواهری و همکاران در یک مطالعه به بررسی اثرات یکپارچگی سطح در هنگام ماشینکاری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V پرداختند<sup>[۴]</sup>. در مطالعه ای دیگر جینتینگ و همکارش با بررسی عوامل تاثیرگذار بر یکپارچگی سطح آلیاژ Ti6Al4V ماشینکاری شده به این نتیجه رسیدند که سرعت برشی تاثیر قابل توجهی در یکپارچگی سطح حین ماشینکاری این آلیاژ دارد<sup>[5]</sup>. علی‌رغم محاسن قابل توجه روش‌های AM، کیفیت سطح و دقت ابعادی ضعیف قطعات تولید شده از محدودیت‌های روش ساخت افزایشی می‌باشد. بنابراین، معمولاً عملیات ماشینکاری پرداخت برای قطعات تولیدی با روش‌های AM مورد نیاز است تا محدودیت‌های روش ساخت افزایشی بر طرف گردد<sup>[۶]</sup>. یکی از روش‌های ماشینکاری که در افزایش یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V تاثیر بسزایی دارد ماشینکاری برودتی می‌باشد. بر دین و همکاران یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری برودتی آلیاژ Ti6Al4V با پرتو الکترونی (EBM) را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که خنک‌سازی برودتی ابزار تاثیر بسزایی در بهبود یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V خواهد داشت<sup>[۶]</sup>. در تحقیقی دیگر شکرانی و همکارانش با بررسی اثرات خنک کاری برودتی با استفاده از مایع نیتروژن روی یکپارچگی سطح قطعه کار آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در عملیات ماشینکاری پرداختند و نتایج نشان داد که خنک‌سازی برودتی در مقایسه با سایر روش‌های خنک‌سازی تا ۳۹ درصد زبری سطح بهتری را به همراه دارد<sup>[۷]</sup>. انجام مطالعات تجربی بر روی عملیات ماشینکاری برودتی آلیاژ Ti6Al4V تولید شده به روش ساخت افزایشی جهت بررسی یکپارچگی سطح پس از ماشینکاری امری زمان‌بر، پرهزینه و دشوار است. بنابراین شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند ماشینکاری ابزار بسیار مهمی برای کاهش هزینه‌ها و آنالیز بهتر فرآیند مورد استفاده

به منظور شبیه سازی ضخامت لاملاهای فاز آلفا و میکروسختی در سطح پس از ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V از زیر برنامه نویسی پیشرفته در نرم افزار (3D) Deform استفاده شد. بر این اساس، بعد از شبیه سازی فرآیند ماشینکاری و رسیدن به شرایط پایداری حرارتی و مکانیکی، مقادیر دما و نرخ کرنش به عنوان ورودی های زیر برنامه جدید (upd\_file) معرفی گردید. در این زیر برنامه به ازای هر المان مقدار ضخامت لاملاهای فاز آلفا بر اساس رابطه (۴) محاسبه می شود و به عنوان یک خروجی جدید شبیه سازی معرفی می گردید. همین روند برای شبیه سازی تغییرات سختی بر اساس رابطه هال-پیچ رابطه (۵) بکار گرفته شد.

### ۳-۲- شبیه سازی خنک کاری برودتی

ابزار برش و قطعه کار در تبادل حرارت با دمای محیط ۲۰ درجه سانتی گراد می باشند. ضریب انتقال حرارت که یک مقدار استاندارد برای همرفت هوای آزاد در نرم افزار DEFORM است  $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی اثر سرمایش برودتی یک پنجره محیطی برای تبادل حرارت بین سطح ماشینکاری شده و سمت کناری ابزار، در نزدیکی شعاع ابزار با تنظیم دمای محلی ۱۹۶- درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. ضریب همرفت (h\_cryo) با هدف دستیابی به یک وضعیت پایدار حرارتی در رابط تراشه ابزار در یک زمان محاسباتی کوتاه، با فرض یک تماس حرارتی کامل، یک انتقال حرارت جهانی، برابر با ۱۰۰۰۰۰ کیلووات/(m<sup>2</sup>/K) تنظیم شد. شکل ۳ تنظیمات مدل جهت شبیه سازی برودتی را نشان می دهد



شکل ۳: مدل شبیه سازی برودتی  
۳- آزمایشات تجربی:

از نتایج آزمایشات انجام شده در تحقیقات بوردین [8] و امبرلو [13] در خصوص ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V استفاده شده است به این ترتیب که نتایج نیروها و دمای ماشینکاری از [13] استفاده شد و تغییرات میکروسختی از [8] استفاده شد.

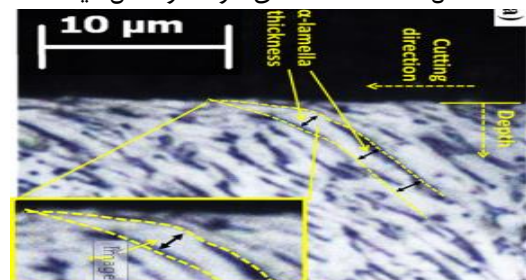
لازم به ذکر است که در دو تحقیق از یک تیم تحقیقاتی بوده که شرایط ماشینکاری، هندسه ابزار و جنس قطعه کار در هر دو تحقیق یکسان می باشد. آزمایشات بر روی یک ماشین تراش CNC مجهز به سیستم تامین نیروژن مایع به طور مستقیم به منطقه برش انجام شد. ابزار برش مورد استفاده، از جنس کاربید بدون پوشش، CNMG 120404-23 H13A نصب شده بر روی یک نگهدارنده ابزار PCLNR/L 2020k12 استفاده. زوایای براده و آزاد ابزار به ترتیب برابر با ۷ درجه و ۸ درجه می باشد و زاویه تنظیم ۹۵ درجه توسط هندسه نگهدارنده ابزار اعمال شد. آزمایش های ماشینکاری برودتی با هدف اعتبارسنجی مدل عددی در شرایط مختلف ماشینکاری انجام شد. در جدول ۱ مشخصات پارامترهای ماشینکاری مشخص می باشد.

پارامترهای ماشینکاری		
عمق برش (mm)	نرخ تغذیه (mm)	سرعت برشی (m/min)
0.2	0.1	50
	0.2	80
		۱۱۰

(مانند مدل های Latham و Cockcroft) نشان داد [8]. در این مدل ماده اکثر نرم شوندگی ماده (thermal softening effect) که سبب ایجاد باند برشی آدیباتیک (adiabatic shear band) در ناحیه تغییر شکل اولیه (primary shear zone) می گردید، بصورت روابط اصلاحی به مدل ماده JC اضافه شد. این مدل ماده به شرح به صورت زیر ارائه شد:

$$\sigma = [(A) + B\epsilon^n] [1 + c \cdot \ln((\epsilon/\epsilon^0))] [1 - ((T - T_r)/(T_m - T_r))^m] \times [D + (1 - D) (\tanh(1/(\epsilon + p)^r))]^q \quad (1)$$

در این معادله ثابت های C, B, n و m در تحقیقات آقای کار لی لین [14] استفاده شد و r و s پارامترهای پیشنهاد شده توسط Ozel و همکاران هستند. [12]. همچنین ثابت D و P از تحقیق [13] استفاده شدند. دمای اتاق (T<sub>r</sub>) نیز برابر ۱۹۶- سانتیگراد برای ماشینکاری برودتی تنظیم شد. در تحقیقی که توسط بوردین و همکاران جهت شبیه سازی فرآیند ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V انجام شد، از مدل ماده اصلاح یافته بالا و ضرایب مذکور استفاده شد. البته ثابت A بعد از اعمال فرآیند کالیبره کردن افزایش پیدا کرد و میزان ۹۴۰ (MPa) در نظر گرفته شد. در این تحقیق با استفاده از پیاده سازی زیر برنامه (subroutine) در نرم افزار اجزاء محدود از این مدل ماده جهت شبیه سازی فرآیند ماشینکاری استفاده شد. با توجه به فقدان مدل های فیزیکی موجود در کارهای گذشته که تغییرات ضخامت لاملا را بر اساس تبلور مجدد دینامیکی معرفی کند، در تحقیقی که توسط امبرلو و همکاران صورت پذیرفت یک مدل تجربی برای مدل سازی تغییرات میکروساختاری فاز ضخامت لاملا آلیاژ EBM Ti6Al4V پیشنهاد دادند [10]. در این مدل ضخامت لاملاهای تجربی نزدیک به سطح ماشینکاری با داده های دما (T) و نرخ کرنش (ε̇) بدست شده توسط شبیه سازی در لایه های سطحی پس از ماشینکاری مرتبط گردید. مدل رگرسیون ضخامت لاملا در روابط (۳) تا (۶) مشخص می باشد [10]. در واقع، رابطه (۵) نشان دهنده ضخامت لاملاهای فاز آلفا (بر حسب میکرومتر) است. شکل ۲ ضخامت لاملاهای فاز آلفا را نشان میدهد.



شکل ۲: ضخامت لاملاهای فاز آلفا [۱۰].

همچنین به منظور شبیه سازی تغییرات نانو سختی که در سطح پس از ماشینکاری از رابطه ها-پیچ (رابطه ۵) استفاده شد. در این رابطه مقدار ضخامت لامیلا با استفاده از ضرایب ثابت C0 و C1 به میزان سختی در سطح پس از ماشینکاری مرتبط می شود. این ضرایب با توجه به نتایج تجربی به تریب مقادیر ۲۳۴ و ۴۵۶ کالیبره شدند.

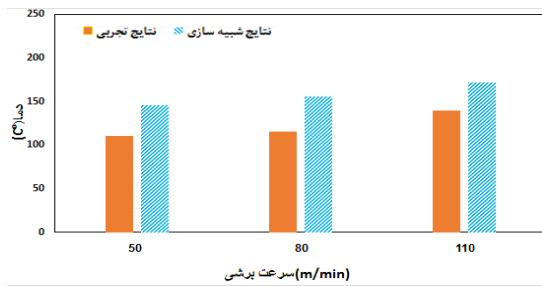
$$T^* = T - 199 \quad (2)$$

$$A = \epsilon \cdot 36530 \quad (3)$$

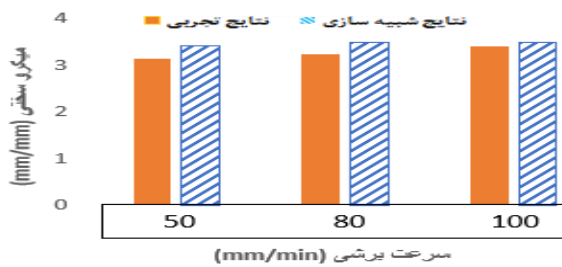
$$t = 0.873 + 1.5 \times 10^{-6} A - 2.3 \times 10^{-4} T^* + 3.7 \times 10^{-10} A^2 + 1.9 \times 10^{-8} AT^* + 5.1 \times 10^{-6} T^{*2} \quad (4)$$

$$NH = C_0 + C_1 / \sqrt{t} \quad (5)$$

سرعت های بالاتر این اختلاف کاهش قابل توجهی داشته است که به دلیل تاثیر خنک کاری برودتی در سرعت های بالا می باشد.



شکل ۵: مقایسه بار حرارتی پیش بینی شده با نتایج تجربی



شکل ۶: مقایسه نتایج میکرو سختی پیش بینی شده با نتایج تجربی

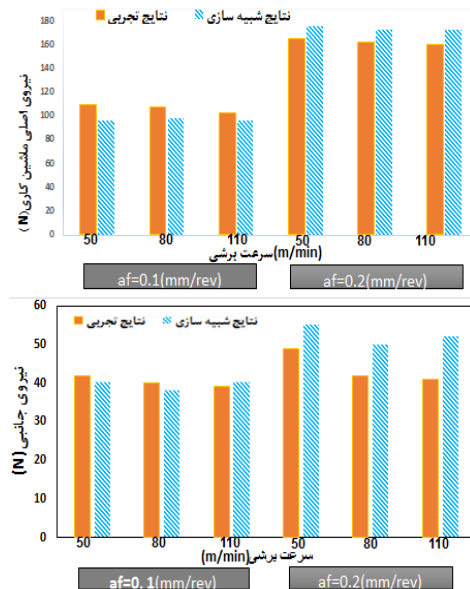
۵- نتایج و بحث:  
مدل ماده کالیبره شده به خوبی می تواند تاثیر سرعت برشی را بر روی نیروهای ماشینکاری، دما، میکرو سختی را پیش بینی کند. لذا از مدل اجزاء محدود کالیبره شده جهت بررسی تاثیر سرعت برشی بر روی خروجی های فرآیند ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V استفاده شد. بدین منظور شبیه سازی ماشینکاری با چهار سرعت برش متفاوت انجام شد. شکل ۵ تاثیر سرعت برشی بر نیروهای ماشینکاری برودتی آلیاژ EBM Ti6Al4V را نمایش می دهد. با بالا رفتن سرعت برشی نیروی اصلی ماشینکاری تا سرعت ۱۰۰ متر بر دقیقه افزایش می یابد و با افزایش سرعت برشی از این مقدار نیروی ماشینکاری به دلیل کاهش تماس ابزار به علت استفاده از سیستم برودتی کاهش می یابد. سیستم برودتی در نیروی جانبی نیز تاثیر گزاشته و با افزایش سرعت برشی نیروی جانبی کاهش می یابد. در مرحله بعد به تاثیر سرعت برشی بر میکرو سختی و بارهای حرارتی بوجود آمده در حین ماشینکاری برودتی آلیاژ EBM Ti6Al4V می پردازیم. شکل ۷ نمونه نمودار میکرو سختی را در سرعت ۵۰ میلی متر بر دقیقه را نشان می دهد. همچنین با افزایش سرعت برشی دمای ماشینکاری افزایش می یابد بطوری که با افزایش سرعت برشی از ۵۰ به ۲۰۰ متر بر دقیقه دمای از ۲۵۰ به ۴۵۰ درجه سانتی گراد افزایش خواهد داشت.

جمع بندی:

این مقاله یک مدل FE از عملیات تراشکاری نیمه تمام انجام شده بر روی EBM Ti6Al4V در شرایط خنک کننده برودتی ارائه می کند. یک مدل جانسون کوک اصلاح شده تایید شده برای EBM Ti6Al4V اجرا شد و با یک مدل اصطکاک چسبنده - لغزشی ترکیبی برای مدل سازی نیروهای اصطکاک بر روی ابزار برش همراه شد. مدل با مقایسه نیروی برش اصلی و جانبی، دما و همچنین نانو سختی پیش بینی شده با نیروی آزمایشی تحت چند شرایط برش با خطایی کمتر از ۹/۲۵- کالیبره و اعتبارسنجی شد.

۴- اعتبارسنجی:

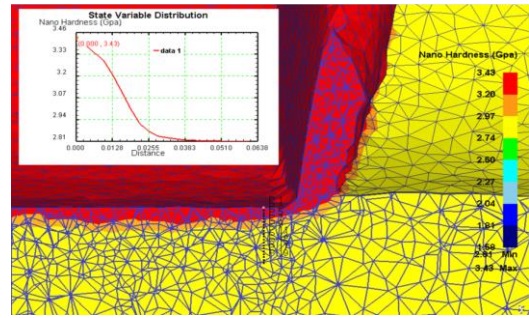
مدل FE با مقایسه نتایج تجربی و داده های عددی مربوطه اعتبارسنجی شد. شبیه سازی های FE برای تمام آزمایش های تراشکاری آزمایش شده اجرا شد، سپس مقادیر میانگین نیروهای برش زمانی که به یک وضعیت پایدار رسید، از نرم افزار DEFORM استخراج گردید. سپس مقدار میانگین داده های ماکزیمم با نتایج تجربی مقایسه گردید. شکل ۴ مقایسه بین نیروهای برش اندازه گیری شده و پیش بینی شده برای ماشینکاری برودتی را نشان می دهد. نیروی برش اصلی و جانبی پیش بینی شده به درستی با داده های تجربی برای همه شرایط برش آزمایش شده در شرایط سرمایش برودتی مطابقت دارد.



شکل ۴ مقایسه نیروهای اصلی و جانبی پیش بینی شده با نتایج تجربی متغیر مهم دیگری که در اعتبارسنجی مدل عددی در نظر گرفته شد، دمای برش بود. دمای برش اندازه گیری شده با استفاده از دوربین IR مقدار متوسط محاسبه شده بر روی صفحه براده ابزار می باشد. این دما در شبیه سازی از روی سطح براده پس از به شرایط پایدار رسیدن دمای براده یعنی کمی بالاتر از ریشه براده به صورت مقدار میانگین دماهای ماکزیمم استخراج می شود. مقایسه دماهای استخراج شده از شبیه سازی و اندازه گیری تجربی در شکل ۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است که اختلافات ممکن است تا حدی ناشی از حساسیت بالای اندازه گیری دما با موقعیت انتخاب شده در مدل FE و تصویر IR باشد. با این وجود، مدل پیشنهادی به درستی روند افزایشی دما را با سرعت برش برای شرایط برودتی پیش بینی می کند. مدل معرفی شده با اختلاف اندکی مقدار میکروسختی را پیش بینی کرده است. به منظور اعتبارسنجی مدل FE، از نظر تغییرات میکرو ساختاری نتایج ضخامت فاز آلفا لامپا و نانو سختی استخراج شده از شبیه سازی ماشینکاری آلیاژ EBM Ti6Al4V با نتایج تجربی موجود در تحقیقاتی که توسط آمبرلو و همکاران صورت پذیرفته است مقایسه می شود [۸،۱۳]. شکل ۶ مقایسه نتایج میکرو سختی سطح قطعه کار را با نتایج تجربی در سه سرعت برشی متفاوت نشان می دهد. مشاهده می شود که در سرعت برشی بیشتر نتایج مطابقت بیشتری با هم دارند. در

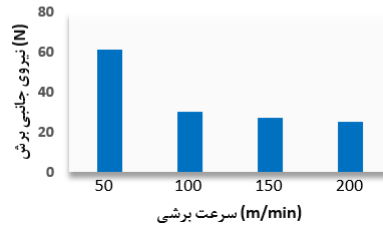
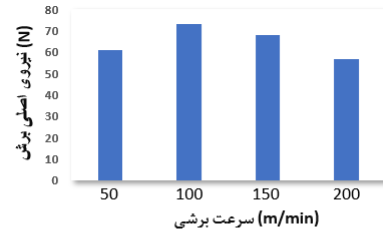
- سرعت برشی با بارهای حرارتی رابطه مستقیم داشته و با افزایش سرعت برشی دما بوجود آمده افزایش می یابد.  
**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان این تحقیق اقرار می نمایند که تمامی نتایج مندرج در این مقاله حاصل تحقیق صورت گرفته توسط ایشان و نتایج بدست آمده از آن می باشد.  
**منابع مالی:** کلیه هزینه های انجام شده جهت انجام این تحقیق از منابع شخصی صورت گرفته است  
 مراجع:

- ۱- Uçak N, Çiçek A, Aslantas K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;80:414-57
- ۲- Kalantari O, Jafarian F, Fallah MM. Comparative investigation of surface integrity in laser assisted and conventional machining of Ti-6Al-4 V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;62:90-8.
- 3- Kalantari O, Jafarian F, Fallah MM. Comparative investigation of surface integrity in laser assisted and conventional machining of Ti-6Al-4 V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;62:90-8.
- ۴- Che-Haron C, Jawaid A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V. *Journal of materials processing technology*. 2005;166(2):188-92.
- ۵- Ginting A, Nouari M. Surface integrity of dry machined titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009;49(3-4):325-32.
- ۶- Imbrogno S, Sartori S, Bordin A, Bruschi S, Umbrello D. Machining simulation of Ti6Al4V under dry and cryogenic conditions. *Procedia CIRP*. 2017;58:475-80.
- ۷- Shokrani A, Dhokia V, Newman ST. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016;21:172-9.
- 8-Iqbal A, Shrestha S, Wang Z, Manogharan G, Bukkapatnam S, Youngstown O, editors. Influence of milling and non-traditional machining on surface properties of Ti6Al4V EBM components. *Proceedings of the 2016 Industrial and Systems Engineering Research Conference*; 2016.
- 9- Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- 10- Umbrello D, Bordin A, Imbrogno S, Bruschi S. 3D finite element modelling of surface modification in dry and cryogenic machining of EBM Ti6Al4V alloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017;18:92-100.
- 11- Rotella G, Umbrello D. Finite element modeling of microstructural changes in dry and cryogenic cutting of Ti6Al4V alloy. *Cirp Annals*. 2014;63(1):69-72.
- ۱۲- Murr L, Esquivel E, Quinones S, Gaytan S, Lopez M, Martinez E, et al. Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V. *Materials characterization*. 2009;60(2):96-105.
- 13- Bordin A, Imbrogno S, Rotella G, Bruschi S, Ghiotti A, Umbrello D. Finite element simulation of semi-finishing turning of electron beam melted Ti6Al4V under dry and cryogenic cooling. *Procedia CIRP*. 2015;31:551-6.
- 14- Özel T, Sima M, Srivastava A, Kaftanoglu B. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations. *CIRP annals*. 2010;59(1):77-82.

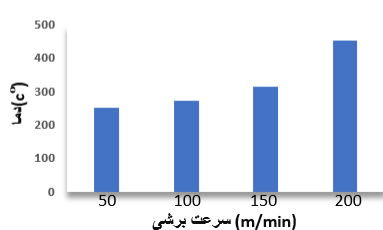
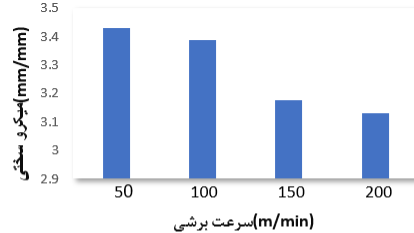


شکل ۷ نمودار میکرو در سرعت (mm/min) ۵۰

شکل ۸ نمودار تاثیر سرعت برشی بر نیروهای ماشینکاری را نشان می دهد.



شکل ۸: تاثیر سرعت برشی بر نیروهای ماشینکاری



شکل ۹: تاثیر سرعت برشی بر میکرو سختی و بارهای حرارتی

سپس با استفاده از مدل ماده اعتبار سنجی شده برای پیش بینی تاثیرات سرعت برشی بر نیروهای ماشینکاری، دما و میکروسختی استفاده شد و نتایج زیر جهت پیش بینی تاثیر سرعت برشی حاصل گردید:  
 - با افزایش سرعت برشی تا ۱۰۰ متر بر دقیقه نیروهای اصلی ماشینکاری افزایش و پس از آن مشاهده کاهش سرعت برشی خواهیم بود.  
 - نیروی جانبی با سرعت برشی را بطه معکوس دارد به طوری که با افزایش سرعت برشی از ۵۰ به ۲۰۰ متر بر دقیقه نیروی جانبی از ۶۱ به ۲۵ نیوتن می رسد  
 - با افزایش سرعت برشی و استفاده از سیستم پرودتی میکروسختی سطح قطعه کار کاهش خواهد داشت.