

# پیاده سازی مدل ماده بر مبنای تغییرات میکروساختاری جهت شبیه سازی فرآیند براده برداری

فرشید جعفریان\* استادیار، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران، f.jafarian@mahallat.ac.ir

## چکیده

عموماً جهت شبیه سازی فرآیند براده برداری از مدل‌های ماده ای استفاده می‌گردد که تغییرات میکروساختاری بوجود آمده حین فرآیند در نظر گرفته نمی‌شود. این امر سبب می‌شود دقت نتایج شبیه سازی در مقایسه با آنچه در واقعیت صورت می‌پذیرد، محدود گردد. در تحقیق حاضر با ارائه چند مرحله زیر برنامه نویسی پیشرفته در مدل اجزاء محدود، تاثیر تغییرات میکروساختاری ماده در حین فرآیند براده برداری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در مدل ماده اعمال گردید. ابتدا تغییرات میکروساختاری بوجود آمده با استفاده از معیار تبلور مجدد دینامیکی و کرنش بحرانی مدل سازی شد. در مرحله بعدی مدل ماده اصلاح شده ای ارائه گردید که اثر تغییرات دانه بندی ماده در هر مرحله از شبیه سازی برای تمامی المان‌های قطعه کار اعمال گردید. در انتها نیز میزان اثر بخشی مدل ماده جدید ارائه شده با نتایج متناظر تجربی در شرایط مختلف ماشینکاری به خوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که اعمال تغییرات میکروساختاری در مدل ماده نقش موثری جهت شبیه سازی واقع گرایانه تر رفتار ماده و بهبود نتایج شبیه سازی ماشینکاری دارد.

**واژه های کلیدی:** فرآیند ماشینکاری، شبیه سازی، تغییرات میکروساختاری، مدل ماده اصلاح شده، سوپر آلیاژ، هندسه ابزار.

## Implementation of material model based on the microstructure changes for simulation of machining process

F. Jafarian

Department of Mechanical Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran

### Abstract

Generally, microstructural changes have been neglected for the material models used for simulation of chip formation process. This event leads to limitation in precision of numerical results compared to what happens in reality. For this purpose, in the present study the effect of microstructure changes in machining process of Inconel 718 super alloy was taken into account by development of multi-step user-subroutine in Finite Element Model (FEM). Firstly, microstructure change was modeled using the Dynamic Recrystallization (DRX) and critical strain criterion. After that, a modified material model was presented and grain size variation was incorporated into the material model for each step and each element during the simulation. At the end, effectiveness and performance of the new material model was successfully evaluated by comparison with corresponding experiments at the different machining conditions. The results indicate that, implementation of microstructure changes in material model plays effective role for simulation of more realistic behavior of material and consequently improvement of numerical results machining.

**Keywords:** Machining process, Simulation, Microstructural changes, modified material model, Super alloy, Tool geometry.

این مسئله خصوصاً در ماشینکاری مواد سخت از جمله سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ اهمیت بیشتری دارد [۴].

با توجه به آزمایشات و مطالعات صورت گرفته توسط محققین، روابط مختلفی برای مدل ماده پیشنهاد شده است. معروفترین و پرکاربردترین مدل جهت شبیه سازی فرآیند براده برداری، معادله جانسون-کوک می‌باشد [۵]. این مدل بیانگر تغییر شکل پلاستیک ماده تحت شرایط دمایی، کرنشی و نرخ کرنشی مختلف می‌باشد. تاکنون ثوابت مختلفی برای مدل جانسون-کوک آلیاژ اینکونل ۷۱۸ (با سختی ۴۵HRC) توسط محققین ارائه شده است. لازم به ذکر است که در تمامی مدل‌های مذکور صرفاً اثر سختی اولیه قطعه در مدل ماده لحاظ شده است. فرآیند براده برداری سنتی توام با تماس مکانیکی ابزار و براده و بوجود آمدن بارهای مکانیکی و حرارتی شدید خصوصاً در ناحیه تغییر شکل اولیه می‌باشد. این بارهای شدید باعث بوجود آمدن تبلور مجدد دینامیکی، تغییرات دانه بندی و متعاقباً تغییر سختی در لایه‌های سطحی و زیر سطحی قطعه پس از ماشینکاری می‌گردد [۶]. این امر سبب تغییر رفتار ماده شده که از آن تحت عنوان اتفاقات دینامیکی ماده حین فرآیند نام برده می‌شود [۷]. تغییرات

## ۱- مقدمه

باتوجه به آنکه انجام آزمایشات تجربی فرآیند ماشینکاری با محدودیت‌های زیادی همراه است، از محاسن شبیه سازی اجزاء محدود فرآیند براده برداری جهت درک بهتر فرآیند و کاهش هزینه‌ها استفاده می‌گردد [۱]. دقت و قابلیت اطمینان نتایج شبیه سازی فرآیند ماشینکاری مهم ترین چالش محققین در این زمینه می‌باشد. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در نتایج شبیه سازی براده برداری می‌توان به مدل ترکیبی ماده (تنش سیلان ماده)، شرایط مرزی شامل شرایط اصطکاکی و دمایی در محل تماس ابزار و براده و معیار شکست ماده (ایجاد شکست و دندانه اره ای شدن براده) اشاره نمود [۲]. با توجه به اهمیت مسئله، تاکنون مطالعات مختلفی جهت بررسی و شناسایی اثر پارامترهای مذکور در ماشینکاری مواد مختلف صورت پذیرفته است. تغییر شکل‌های پلاستیک شدید و پیچیدگی‌های رفتار ماده در این فرآیند باعث می‌شود که مدل ماده تاثیر بسزایی در نتایج شبیه سازی اجزای محدود فرآیند براده برداری ایفا نماید. بگونه‌ای که مهمترین و تاثیرگذارترین فاکتور در دقت نتایج شبیه سازی به شمار می‌آید [۳].

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f.jafarian@mahallat.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۰

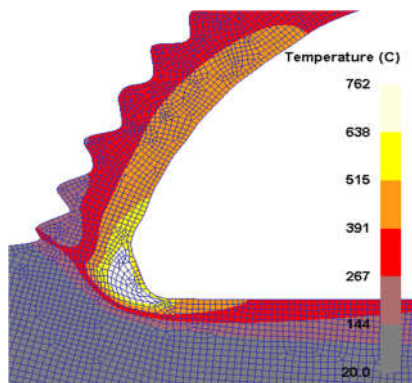
$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_W}{T_m - T_W} \right)^m \right) \quad (1)$$

در این رابطه  $\sigma$  مقدار تنش سیلان قطعه کار است،  $\varepsilon$  نرخ کرنش موثر،  $(\dot{\varepsilon}_0)$  نرخ کرنش مرجع و  $\varepsilon$  معرف کرنش قطعه کار می‌باشد. همچنین  $T$  معرف دمای فعلی قطعه کار و  $T_W$  دمای محیط می‌باشد. همچنین  $T_m$  معرف دمای ذوب قطعه کار است. علاوه بر این پارامترهای  $A, B, C, m, n$  ثابتی هستند که از آزمایش بدست می‌آیند و در این تحقیق برای سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به ترتیب مقادیر ۰/۵۲۶، ۱/۵۵، ۰/۰۱۶، ۸۹۵ و ۱۲۹۰ استفاده شد [۱۲].

### ۳- شبیه سازی اجزاء محدود ماشینکاری متعامد

به منظور انجام شبیه‌سازی فرآیند براده برداری از نرم افزار تجاری DEFORM\_2D\_V10 و از مدل تنش صفحه‌ای استفاده شد. در این نرم افزار روش لاگرانژی ارتقاء یافته با قابلیت مش‌زنی مجدد جهت شبیه سازی براده برداری استفاده می‌شود. همچنین از المان‌های چهار گوش مربعی جهت مش بندی ابزار و قطعه کار استفاده شد. ابزار به عنوان جسم صلب در نظر گرفته شد و با تعداد ۸۰۰۰ المان مش بندی گردید. برای مش بندی قطعه کار نیز از تعداد بالای ۱۵۰۰۰ المان استفاده شد. شرایط اصطکاکی ترکیبی چسبنده-لغزنده در سطح تماس ابزار و براده در نظر گرفته شد و همچنین از معیار شکست ککرفت و لاتامز<sup>۲</sup> جهت شبیه سازی براده دندانه اره‌ای استفاده شد [۲،۵]. ثوابت مورد نیاز در شرایط تماسی ابزار، براده و قطعه کار (شامل شرایط اصطکاکی و حرارتی) و مقدار آسیب قطعه از مقادیر کالیبره شده در تحقیق قبلی با شرایط ماشینکاری و جنس ماده یکسان مورد استفاده قرار گرفت [۱۲].

در شکل ۱ نمونه ای از شبیه سازی صورت پذیرفته مبنی بر توزیع حرارت و شکل‌گیری براده‌ی دندانه اره‌ای (باند برش آدیاباتیک) در شرایط پایدار نشان داده شده است.



شکل ۱- شبیه سازی براده‌ی دندانه اره‌ای و باند آدیاباتیک در حالت پایدار

میکروساختاری پس از ماشینکاری یکی از شاخص‌های اصلی سلامت و یکپارچگی سطح به شمار می‌آید و نقش مهمی در کیفیت عملکرد قطعه تولید شده ایفا می‌نماید [۸]. متأسفانه در اکثر مدل‌های ماده‌ای که تاکنون جهت شبیه سازی فرآیند براده برداری استفاده شده است، تغییرات دینامیکی ماده در حین فرآیند در نظر گرفته نشده است. این امر می‌تواند به دلیل مشکلات پیاده سازی و سفارشی سازی مدل اجزاء محدود باشد. از این رو چشم پوشی از تغییرات میکروساختاری شدیدی که در فرآیند براده برداری رخ می‌دهد، می‌تواند سبب ایجاد محدودیت‌هایی در دقت و کارایی مدل ماده خصوصاً در شبیه سازی ماشینکاری مواد سخت گردد. در ادامه به معرفی اندک مطالعات صورت پذیرفته در این خصوص پرداخته می‌شود.

در تحقیقی که توسط آمبرلو صورت پذیرفت، مدل ماده‌ای بر مبنای تغییرات سختی قطعه کار ارائه شد و اثر تغییرات سختی قطعه کار در حین فرآیند در بهبود نتایج شبیه سازی تنش پسماند بخوبی مورد بررسی قرار گرفت [۹]. با توجه به آنکه مدل مذکور صرفاً برای فولادها قابل استفاده می‌باشد، محققین از معیار تبلور مجدد دینامیکی و کرنش بحرانی برای شبیه سازی تغییرات میکروساختاری در فرآیند ماشینکاری سوپرآلیاژها استفاده کردند. بر این اساس در ابتدا روتلا و همکاران از این روش جهت شبیه سازی سه بعدی آلیاژ آلومینیوم استفاده کردند [۱۰]. در ادامه پو و همکاران نیز تغییرات دانه بندی در ماشینکاری برودتی آلیاژ منیزیم را مدلسازی کردند [۱۱]. همچنین جعفریان و همکاران به شبیه سازی تغییرات میکروسختی و دانه بندی سطح روی قطعه ماشینکاری شده و عمق لایه تغییر ساختار یافته در فرآیند ماشینکاری متعامد آلیاژ اینکونل پرداختند [۱۲]. لازم به ذکر است در تمامی تحقیقات مذکور، صرفاً تغییرات میکروساختاری قطعه کار مدلسازی شد بدون آنکه مدل ماده اصلاح گردد و اثر تغییرات میکروساختاری در رفتار دینامیکی ماده نیز اعمال گردد.

از این رو در تحقیق حاضر، برای اولین بار مدل ماده اصلاح یافته‌ای بر اساس اعمال تغییرات میکروساختاری در رفتار دینامیکی ماده حین فرآیند ماشینکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ ارائه گردید. برای این منظور از دو مرحله زیربرنامه نویسی فورترن در نرم افزار اجزاء محدود استفاده شد که مرحله اول تغییرات میکروساختاری را مدلسازی و مرحله دوم اثر تغییر دانه بندی را در مدل ماده اصلاح شده لحاظ نماید. سپس در ادامه تاثیر مدل ماده جدید در مقایسه با مدل ماده جانسون-کوک استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، نتایج شبیه سازی تغییرات سطحی و زیر سطحی میکروسختی و دانه بندی قطعه کار، نیروها و حداکثر دمای ماشینکاری در شرایط مختلف ماشینکاری با نتایج متناظر تجربی بخوبی مورد مقایسه و اعتبار سنجی قرار گرفت.

### ۲- مدل ماده جانسون کوک

یکی از معروفترین و پرکاربردترین روابط برای ارائه رفتار ماده، معادله‌ی جانسون کوک می‌باشد که تغییر شکل پلاستیک ماده را تحت شرایط دمایی، کرنشی و نرخ کرنشی مختلف بیان می‌کند. [۵]. این معادله از سه بخش مجزا تشکیل شده است که به ترتیب از چپ به راست تاثیرات سخت شدگی کرنشی، سخت شدگی نرخ کرنشی و نرم شدگی دمایی را لحاظ می‌کند. در رابطه‌ی (۱) معادله‌ی جانسون کوک نمایش داده شده است.

<sup>1</sup> Plane stress

<sup>2</sup>Cockroft and Latham

### ۳-۱- اعتبارسنجی تجربی

برای این منظور از آزمایشات تجربی که در مطالعات قبلی کار گرفته شد، استفاده گردید [۱۲]. در این آزمایشات فرآیند ماشینکاری متعامد سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ بر روی دستگاه تراش کنترل عددی و در شرایط بدون خنک کار صورت پذیرفت (حالت دیسک تراشی به ضخامت ۲ میلیمتر). جهت انجام آزمایشات از ابزار براده شکن سندویک DNMG150616 و به ترتیب با زوایای آزاد و براده‌ی ۶ و ۴ درجه استفاده شد. در این آزمایشات نیروهای ماشینکاری (در دو مولفه) اندازه گیری شد. حداکثر دمای ماشینکاری در محل تماس ابزار و براده با استفاده از روش معکوس عددی و ترموکوپل نوع k (که در محل تماس ابزار و ابزارگیر نصب شده بود) بدست آمد. در جدول ۱ نیز شرایط پارامترهای ماشینکاری (تعداد سه آزمایش) و نتایج تجربی را نشان می دهد.

جدول ۱- پارامترهای ماشینکاری و نتایج تجربی مورد استفاده [۱۲]

دما (سلسیوس)	نیروها (نیوتن)		نرخ پیشروی (میلیمتر بر دور)	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	شرایط ماشینکاری
	اصلی	پیشروی			
۶۵۷	۴۸۳/۵	۴۵۳	۰/۰۵	۷۰	آزمایش ۱
۷۴۸	۴۹۶/۸	۵۱۰/۴	۰/۰۷۵	۷۰	آزمایش ۲
۷۰۵	۴۸۸	۶۵۳/۱	۰/۱	۷۰	آزمایش ۳

### ۴- بحث و نتایج

#### ۴-۱- پیاده سازی تغییرات میکروساختاری

در این بخش از تحقیق با استفاده از مکانیزم تبلور مجدد مکانیکی به شبیه سازی تغییرات میکروساختاریدر فرآیند ماشینکاری متعامد سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شد. این امر با استفاده از زیر برنامه نویسی در نرم افزار DEFORM\_2D محقق گردید. در این راستا از معادله‌ی زنر-هالمن جهت وقوع تبلور مجدد مکانیکی در سطح پس از ماشینکاری و متعاقباً شبیه سازی تغییرات دانه بندی قطعه کار استفاده شد. همچنین بعد از شبیه سازی اندازه‌ی دانه از رابطه‌ی هال-پیچ<sup>۲</sup> جهت شبیه سازی تغییرات میکروساختاریدر فرآیند ماشینکاری استفاده شد [۱۳]. در روابط (۲، ۳ و ۴) معادله‌ی زنر-هالمن و اندازه‌ی دانه‌ی تبلور یافته معرفی شده است.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$$d = ad_0 Z^m \quad (3)$$

$$d = bZ^m \quad (4)$$

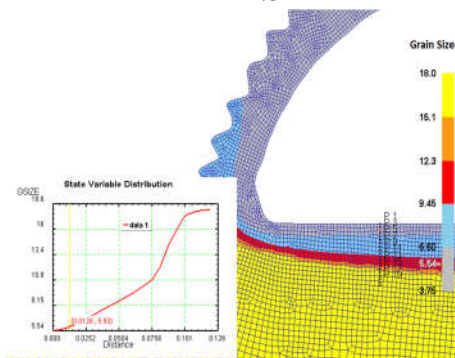
در این روابط Z پارامتر زنر-هالمن،  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش، R ثابت جهانی گاز (۸/۳۱۴۵ J/Kmol)، T دمای قطعه کار و Q انرژی آزاد سازی (۳۶۸/۵ KJ/mol) می‌باشد. همچنین  $d_0$  اندازه اولیه‌ی دانه، a و m ثوابت ماده و b برابر با ad<sub>0</sub> می‌باشد. تغییرات میکروساختاری نیز که به

اندازه دانه بندی جدید وابسته می‌باشد، با استفاده از معادله هال-پیچ مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$HV = C_0 + C_1 d^{-0.5} \quad (5)$$

در این رابطه C<sub>0</sub> و C<sub>1</sub> ثوابت ماده، و d اندازه‌ی دانه می‌باشد. به منظور آغاز تبلور مجدد مکانیکی، کرنش بوجود آمده در قطعه کار به یک حد بحرانی می‌رسد که اصطلاحاً کرنش بحرانی ( $\epsilon_{cr}$ ) نامیده می‌شود. این کرنش تابع جنس ماده و فرآیند مورد بررسی متفاوت می‌باشد و به عنوان یک پارامتر مهم در شبیه سازی تغییرات میکروساختاری در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. در واقع کرنش بحرانی باید به اندازه‌ی کافی کوچک باشد تا اجزای شروع تبلور مجدد را بدهد و باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد که آنرا متوقف نماید. در این تحقیق از معادله‌ی کرنش بحرانی که توسط سویی و همکارانش در شبیه سازی فرآیند فورج آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بکار گرفته شد، استفاده گردید [۱۴]. در این معادله کرنش بحرانی تابعی از دما و نرخ کرنش قطعه کار معرفی شده است و با رابطه ۶ نشان داده شده است. البته در این رابطه از مقدار ثابت C به منظور کالیبره کردن و همخوانی با فرآیند ماشینکاری استفاده شد. ثوابت مورد نیاز در این قسمت با استفاده از کالیبره کردن با نتایج شبیه سازی بدست آمد [۱۲]. در شکل ۲ نیز نمونه ای نتایج شبیه سازی تغییرات دانه بندی نشان داده شده است.

$$\epsilon_{cr} = (0.00234)(\dot{\epsilon}^{0.1299}) \left( \exp\left(\frac{5759.863}{T+273}\right) \right) / C \quad (6)$$



شکل ۲- نمونه ای از شبیه سازی تغییرات اندازه دانه بندی نسبت به فاصله از سطح ماشینکاری شده

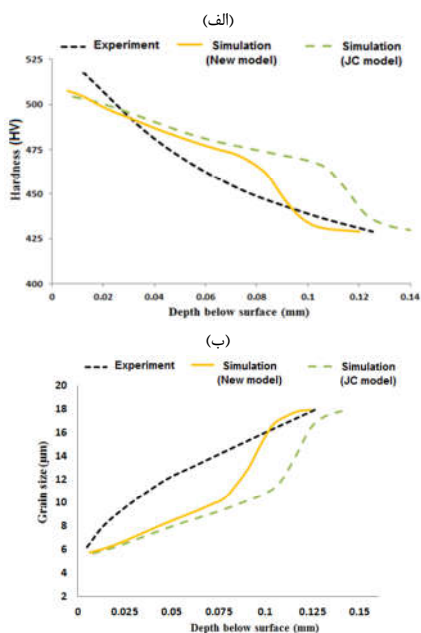
#### ۴-۲- ارائه مدل جانسون کوک ارتقاء یافته

همانطور که ذکر شد مدل ماده به عنوان مهم ترین عامل تاثیرگذار در نتایج شبیه سازی فرآیند براده برداری می باشد. عموماً برای این منظور از مدل ماده جانسون-کوک استفاده می شود که اثر تغییرات کرنشی، دمایی و نرخ کرنشی ماده در حین فرآیند در این مدل لحاظ می گردد. این مدل اولین بار توسط روتلا و آمبرلو برای شبیه سازی ماشینکاری آلیاژ تیتانیوم ارائه گردید [۱۵]. در رابطه (۷) این مدل ماده نشان داده شده است.

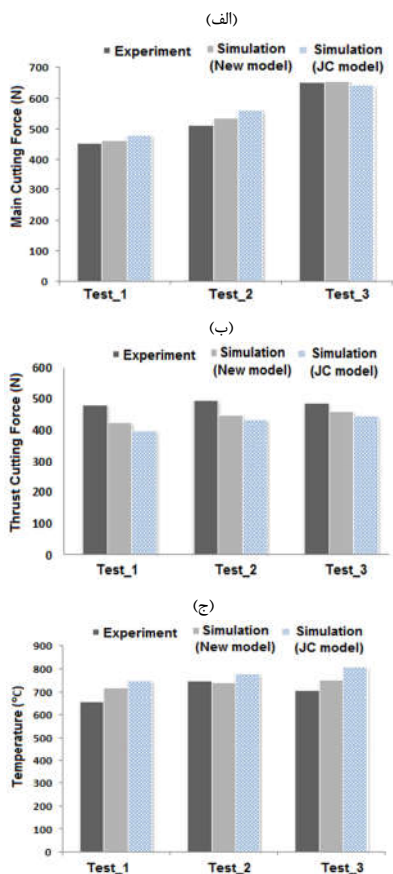
$$\sigma = \left( a + \frac{K}{\sqrt{d}} + B\dot{\epsilon}^n \right) \left( 1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right) \quad (7)$$

<sup>1</sup>Zener-Hollomon

<sup>2</sup>Hall\_Petch

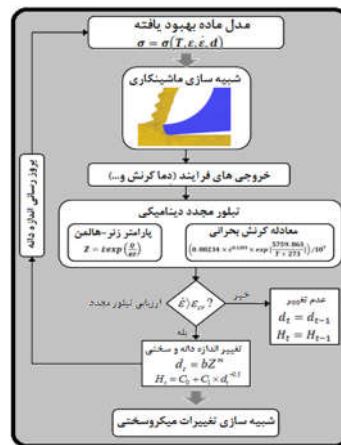


شکل ۴- نتایج تجربی و شبیه سازی با دو مدل ماده بر روی (الف) تغییرات میکروسختی و (ب) تغییرات دانه بندی



شکل ۵- نتایج تجربی و شبیه سازی در شرایط آزمایش مختلف بر روی (الف) نیروی اصلی ماشینکاری، (ب) نیروی پیشروی، (ج) حداکثر دما

در این روابط پارامترهای  $B, n, c, m$  ثوابت معادله جانسون-کوک آلیاژ اینکونل ۷۱۸ می باشند که در مطالعه قبلی مناسب ترین این ضرایب جهت شبیه سازی فرآیند براده برداری بدست آمد [۱۳]. ثابت  $A$  در معادله جانسون-کوک استاندارد که بیانگر سختی قطعه کار است، با استفاده از رابطه هال-پیچ تابعی از اندازه دانه قطعه کار در مدل ماده جدید معرفی می گردد. در این خصوص  $K, a$  ثوابت ماده و  $d$  اندازه دانه ماده می باشد. به این ترتیب تغییرات میکروساختاری ماده به عنوان پارامتر تاثیرگذار در مدل ماده معرفی می شود. برای این منظور از دو مرحله زیر برنامه نویسی فورترن در نرم افزار DEFORM-2D استفاده شد. در مرحله نخست تغییرات میکروساختاری با استفاده از معیار تبلور مجدد دینامیکی شبیه سازی و تغییرات سختی و دانه بندی قطعه بصورت خروجی جدید نرم افزار تعریف گردید. در مرحله بعدی نیز زیر برنامه نویسی برای مدل ماده ارائه شد و در هر مرحله از شبیه سازی (برای تمامی المانها) اندازه دانه قطعه کار نیز همانند دما، کرنش و نرخ کرنش به عنوان پارامتر چهارم مدل ماده جانسون-کوک ارتقاء یافته به روز رسانی گردید. در شکل ۳ نحوه پیاده سازی مدل ماده بر مبنای تغییرات میکروساختاری نشان داده شده است.



شکل ۳- نحوه اعمال تغییرات میکروساختاری در مدل ماده

### ۳-۴- مقایسه ی نتایج

در ادامه، نتایج شبیه سازی اجزاء محدود فرآیند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ با مدل ماده جانسون-کوک و مدل ماده بهبود یافته با نتایج متناظر تجربی در شرایط مختلف (مطابق جدول ۱) مورد مقایسه قرار گرفت. در ابتدا نتایج تغییرات میکروساختاری شامل منحنی تغییرات میکروسختی و اندازه دانه قطعه کار در سطح پس از ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از نتایج تجربی بدست آمده شرایط ماشینکاری، هندسه ابزار و سختی قطعه کار مشابه تحقیق حاضر استفاده شد. در شکل ۴ مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی تغییرات میکروساختاری نشان داده شده است. همچنین نتایج میانگین نیروی ماشینکاری (نیروی پیشروی و اصلی) و حداکثر دما در شرایط مختلف با نتایج متناظر تجربی [۱۶] مورد مقایسه قرار گرفت و در شکل ۵ گزارش گردید.

- [7] Caruso S., Imbrogno S., Rinaldi S., and Umbrello D., Finite element modeling of microstructural changes in Waspaloy dry machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, No. 1, pp. 227-240, 2017.
- [8] Umbrello D., Influence of material microstructure changes on surface integrity in hard machining of AISI 52100 steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 9, pp. 887-898, 2011.
- [9] Umbrello D., Outeiro J.C., M'Saoubi R., Jayal A.D., and Jawahir I.S., A numerical model incorporating the microstructure alteration for predicting residual stresses in hard machining of AISI 52100 steel, *CIRP Annals*, Vol. 59, No. 1, pp. 113-116, 2010.
- [10] Rotella G., Dillon O.W., Umbrello D., Settineri L., and Jawahir I.S., Finite element modeling of microstructural changes in turning of AA7075-T651 Alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 1, pp. 87-95, 2013.
- [11] Pu Z., Umbrello D., Puleo D.A., Dillon O.W., Lu T., and Jawahir I.S., Finite Element Modeling of Microstructural Changes in Dry and Cryogenic Machining of AZ31B Magnesium Alloy for Enhanced Corrosion Resistance, *Journal of Manufacturing processes*, Vol. 16, No. 2, pp. 335-343, 2013.
- [12] Jafarian F., Imaz Ciaran M., Umbrello D., Arrazola P.J., Filice L., and Amirabadi H., Finite element simulation of machining Inconel 718 alloy including microstructure changes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 88, No. 1, pp. 110-121, 2014.
- [13] Hughes G.D., Smith S.D., Pande C.S., Johnson H.R., and Armstrong R.W., Hall-petch strengthening for the microhardness of twelve nanometer grain diameter electrodeposited nickel, *Scripta Metallurgica*, Vol. 20, No. 1, pp. 93-97, 1986.
- [14] Sui F.L., Zuo Y., Liu X.h., and Chen L.q., Microstructure analysis on IN 718 alloy round rod by FEM in the hot continuous rolling process, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 20, pp. 8776-8784, 2013.
- [15] Rotella G., and Umbrello D., Finite element modeling of microstructural changes in dry and cryogenic cutting of Ti6Al4V alloy, *CIRP Annals*, Vol. 63, No. 1, pp. 69-72, 2014.
- [16] Umbrello D., Investigation of surface integrity in dry machining of Inconel 718, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 9, pp. 2183-2190, 2013.

نتایج حاکی از آن است که در اکثر شرایط ماشینکاری و خروجی های مورد بررسی، اختلاف نتایج شبیه سازی با نتایج متناظر تجربی در صورت استفاده از مدل ماده اصلاح یافته کمتر از حالتی است که مدل ماده جانسون-کوک معمولی مورد استفاده قرار گرفته است. این امر نشان می دهد تغییرات دینامیکی که در حین فرآیند براده برداری رخ می دهد از جمله بوجود آمدن کارسختی در اثر تماس مکانیکی ابزار و براده نقش مهمی در رفتار ماده ایفا می کند و صرف نظر کردن از این عامل می تواند به عنوان یکی از عوامل خطا در شبیه سازی اجزاء محدود فرآیند براده برداری به شمار آید.

## ۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر مدل ماده جدیدی بر مبنای اعمال تغییرات میکروساختاری ماده در هر مرحله از شبیه سازی ارائه گردید. میزان اثر بخشی مدل ماده جدید ارائه شده با نتایج متناظر تجربی و نتایج شبیه سازی با مدل ماده استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر گزارش گردید:

- نتایج حاکی از آن است که روش پیاده سازی شده بخوبی جهت بهبود پیش بینی عمق لایه تغییر ساختار یافته و تغییرات میکروساختاری در سطح قطعه مناسب می باشد.
- با استفاده از مدل ماده جدید میانگین خطای شبیه سازی نیروی اصلی ماشینکاری از  $\frac{5}{2}\%$  به  $\frac{1}{5}\%$  کاهش یافت.
- میانگین خطای شبیه سازی نیروی پیشروی از  $\frac{14}{6}\%$  به  $\frac{10}{1}\%$  بهبود یافت.
- میانگین خطای شیه سازی حداکثر دمای ماشینکاری از  $\frac{10}{8}\%$  به  $\frac{5}{1}\%$  کاهش یافت.

## ۶- مراجع

- [1] Jafarian F., Amirabadi H., and Sadri J., Integration of finite element simulation and intelligent methods for evaluation of thermo-mechanical loads during hard turning process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, No. 2, pp. 235-248, 2013.
- [2] Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., and Jawahir I.S., Recent advances in modelling of metal machining processes, *CIRP Annals*, Vol. 62, No. 2, pp. 695-718, 2013.
- [3] Umbrello D., Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, No. 1, pp. 79-87, 2008.
- [4] Jafarian F., Masoudi S., Soleimani H., and Umbrello D., Experimental and numerical investigation of thermal loads in Inconel 718 machining, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, No. 9, pp. 1020-1029, 2018.
- [5] Umbrello D., M'Saoubi R., and Outeiro J.C., The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 3, pp. 462-470, 2007.
- [6] Caruso S., Imbrogno S., Rotella G., Ciaran M.I., Arrazola P.J., Filice L., and Umbrello D., Numerical Simulation of Surface Modification During Machining of Nickel-based Superalloy, *Procedia CIRP*, Vol. 31, No. 1, pp. 130-135, 2015.