

تعیین ثوابت معادله جانسون کوک جهت شبیه سازی فرآیند ماشینکاری با استفاده از الگوریتم بهینه سازی

فرشید جعفریان^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴	مدل ماده جانسون-کوک با در نظر گرفتن اثر سخت شدگی کرنشی و نرخ کرنشی ماده و اثر نرم شدگی ماده، به عنوان پرکاربردترین مدل ماده جهت تعیین رفتار پلاستیک ماده حین شبیه سازی فرآیند ماشینکاری مورد استفاده محققین قرار می‌گیرد. تعیین تجربی ثوابت این معادله امری هزینه بر و زمان بر می‌باشد. در این راستا در تحقیق حاضر روش جدیدی ارائه شد که بدون نیاز به صرف زمان و استفاده از تجهیزات گران قیمت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تکاملی و استفاده از تعدادی نتایج تجربی تنش سیلان، ثوابت معادله جانسون-کوک جهت شبیه سازی فرآیند براده برداری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بدست آمد. نتایج بدست آمده بوسیله این روش با نتایج مدل های ماده سایر محققین که با آزمایشات تجربی و تحلیلی بدست آمده بود، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس با پیاده سازی زیر برنامه نویسی در نرم افزار اجزاء محدود، به ازای هر مدل ماده شبیه سازی فرآیند ماشینکاری متعامد سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در شرایط مختلف ماشینکاری صورت پذیرفت و نتایج شبیه سازی نیروهای ماشینکاری (دو مولفه)، هندسه براده (سه مولفه) و حداکثر دما با مقادیر تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت میانگین کل خطای شبیه سازی ۱۳/۷٪ گزارش گردید که در مقایسه با سایر مدل های ماده از دقت مناسب و مطلوبی برخوردار می‌باشد و می‌توان ابراز امیدواری نمود که روش ارائه شده بخوبی در سایر تحقیقات نیز مورد استفاده قرار گیرد.
واژگان کلیدی: مدل ماده، شبیه سازی اجزاء محدود، ماشینکاری متعامد، جانسون-کوک.	

مقدمه

تغییر شکل های پلاستیک شدید و پیچیدگی های رفتار ماده در این فرآیند سبب گردیده است که مدل ماده تاثیر بسزایی در نتایج شبیه سازی اجزای محدود فرآیند براده برداری ایفا نماید بگونه ای که مهم ترین و تاثیرگذارترین فاکتور در دقت نتایج شبیه سازی بشمار می آید [۴]. عموماً و در اکثر مطالعات صورت پذیرفته از مدل ماده جانسون کوک جهت شبیه سازی فرآیند براده برداری استفاده می شود [۵-۶]. این مدل بیانگر رفتار پلاستیک ماده تحت شرایط کرنشی، دمایی و نرخ کرنشی متفاوت می باشد. مدل ماده جانسون

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به عنوان یکی از مواد سخت و پرکاربرد در صنایع مختلف بکار گرفته می شود. ماشینکاری تجربی این آلیاژ با مشکلات زیادی همراه می باشد [۱]. به همین منظور جهت درک بهتر فرآیند براده برداری مواد سختی همچون این آلیاژ و کاهش هزینه ها از شبیه سازی اجزای محدود استفاده می شود [۲]. به دلیل سختی بالای سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی رفتار ماده تحت شرایط دمایی و کرنشی بالا بسیار حائز اهمیت می باشد [۳]. در واقع

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Fjafarian@mahallat.ac.ir
۱. استادیار، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران

برخی اصلاحات در نهایت ثوابتی به معادله‌ی جانسون-کوک لرنرتزون جهت استفاده برای قطعه کار با سختی اولیه مختلف اضافه گردید. بطور کلی از روش‌های تجربی به عنوان مرجع و معیاری مناسب جهت تعیین ثوابت معادله جانسون کوک استفاده می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که تعیین تجربی این ثوابت با استفاده از روش‌هایی همچون تست فشار هاپکینسون نه تنها امری هزینه بر است و نیازمند تجهیزات خاصی می‌باشد، بلکه دارای محدودیت اجرا و پیاده‌سازی در محدوده‌های کرنشی و دمایی بالا می‌باشند. لذا کاربرد آنها در فرآیندهای ماشینکاری مواد سخت که دما و نرخ کرنش‌های بالایی اعمال می‌گردد، با محدودیت مواجهه می‌شود [۱۹].

از این رو در تحقیق حاضر که با هدف شبیه‌سازی ماشینکاری مواد سخت صورت پذیرفته، با ارائه‌ی روشی کارآمد ثوابت معادله جانسون کوک جدید شناسایی و متناسب با ماشینکاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ ارائه شد. در این تحقیق با حذف نیازمندی به انجام آزمایش‌های تجربی هزینه‌بر، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و استفاده از اطلاعات تنش سیلان ماده، مدل ماده‌ای ارائه شد که مناسب ماشینکاری مواد سخت باشد. در ادامه به منظور اطمینان از صحت مدل ماده پیشنهاد شده از نتایج تجربی نیروهای ماشینکاری، حداکثر دما و هندسه براده در شرایط ماشینکاری مختلف جهت اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی استفاده گردید. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد روش ارائه شده در مقایسه با سایر روش‌های متداول جهت تعیین مدل ماده، نتایج بدست آمده در این قسمت در شرایط یکسان با نتایج شبیه‌سازی بدست آمده با مدل‌های ماده موجود در تحقیقات گذشته مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

۲- الگوریتم ژنتیک

بطور کلی الگوریتم ژنتیک بر اساس تئوری تکاملی داروین می‌باشند و جواب مسأله‌ای که از طریق الگوریتم ژنتیک حل می‌شود مرتباً بهبود می‌یابد. الگوریتم ژنتیک با یک مجموعه از جوابها که از طریق کروموزوم‌ها نشان داده می‌شوند، شروع می‌شود که مجموعه جوابها جمعیت اولیه نام دارند. هر کروموزوم از تعدادی ژن برابر با متغیرهای

کوک دارای ثوابتی می‌باشد که تعیین دقیق آنها و متناسب با فرآیند مورد بررسی نقش مهمی در رفتار ماده دارد [۷]. تاکنون با استفاده از روش‌های مختلف ثوابت معادله جانسون کوک برای سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تعیین شده است. در ادامه به معرفی این تحقیقات پرداخته می‌شود.

در تحقیقی که توسط دیمنگ و همکارانش صورت پذیرفت با استفاده از آزمایش تجربی آزمایش فشار میله هاپکینسون SHPB^۱ ثوابت معادله‌ی جانسون-کوک را برای اینکونل ۷۱۸ آتیل شده و سخت کاری شده بدست آوردند [۸]. وانگ و همکارانش با استفاده از آزمایشات تجربی مدل اصلاح شده ایی معرفی نمودند که در آن یکی از پارامترهای معادله‌ی جانسون-کوک ثابت نبوده و به نرخ کرنش و دما وابسته می‌باشد [۹]. کلک و همکارانش جهت ارائه‌ی مدل ماده‌ی جدید از روش معکوس^۲ به همراه بکارگیری روش اجزای محدود ماشینکاری استفاده نمودند [۱۰]. ایشان در ابتدا ثوابت A, B, n در معادله‌ی جانسون-کوک را از تحقیق ایسلر و همکارانش اتخاذ نمودند [۱۱]. سپس با استفاده از شبیه‌سازی نیروهای ماشینکاری و هندسه‌ی براده و مقایسه با نتایج تجربی سایر ثوابت را (شامل C, m) تعیین کردند. در مدل ماده ارائه شده توسط میتروفانو^۳ و همکارانش [۱۲] با استفاده از آزمایشات تجربی ثوابت A, B تعیین گردید و سپس ثوابت n, c از تحقیق پیرا^۴ و همکارانش استفاده شد [۱۳]. متأسفانه در این مدل ماده از اثر نرم شدگی حرارتی^۵ در مدل جانسون-کوک صرفه نظر شد. در همین راستا لرنرتزون و همکارانش [۱۴] در تحقیق خود به منظور برطرف نمودن مشکل مذکور ثابت m بکار گرفته شده در تحقیق سویرت [۱۵] را این مدل ماده اضافه نمودند. در تحقیقی که توسط اوزل و همکارانش صورت پذیرفت، مدل ماده‌ی جانسون-کوک ارائه گردید که رفتار نرم شدگی ماده در اثر تغییرات دمایی را اصلاح کردند [۱۶]. ملکی زاده و همکارانش از یک روش معکوس مبتنی بر شبیه سازی اجزای محدود فرآیند براده برداری و روش پاسخ سطح^۶ جهت تعیین ثوابت معادله‌ی جانسون-کوک استفاده کردند [۱۷]. همچنین در تحقیقی که توسط پرتو و همکارانش صورت پذیرفت، مدل ماده مبتنی بر سختی^۷ برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ معرفی گردید [۱۸]. در این مدل ماده با اعمال

⁵ Thermal softening effect

⁶ Surface Response Methodology (RSM)

⁷ Hardness-based flow stress

¹ Split-Hopkinson Pressure Bar

² Inverse methodology

³ Mitrofanov

⁴ Pereira

m, n ثوابت معادله جانسون-کوک هستند که عموماً از آزمایشات تجربی بدست می‌آیند [۵]. مقدار این ثوابت نقش مهمی در تعیین رفتار ماده ایفا می‌کند و تعیین دقیق آنها بگونه‌ای که در محدوده دمایی و کرنشی متناسب با فرآیند مورد نظر باشد، بسیار حائز اهمیت است. از جمله آزمایش‌های انجام شده در این راستا می‌توان به آزمون فشار هاپکینسون اشاره کرد که رفتار ماده را در دما و کرنش‌های بالا بررسی می‌کند [۸].

۳-۲- تعیین ثوابت مدل ماده جدید با استفاده از بهینه سازی

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی و نتایج تجربی مربوط به منحنی تنش سیلان ماده روش جدیدی جهت شناسایی ثوابت معادله جانسون و کوک ارائه شد. نتایج تجربی مورد نیاز از آزمایش فشار هاپکینسون که در دمای بالا برای سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ توسط وانگ و همکاران بدست آمد، استفاده گردید [۹]. بر این اساس اطلاعات تجربی تنش سیلان ماده به ازای نرخ کرنش 0.001 ، در دماهای 20 و 500 درجه و کرنش‌های بکار گرفته شد.

به منظور بدست آوردن ضرایب معادله جانسون-کوک از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شد. روش کار به این صورت است که ثوابت A, B, C, n, m در رابطه ۱ به عنوان متغیرهای ورودی بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند و با جایگذاری در رابطه جانسون-کوک مقدار تنش سیلان محاسباتی بدست آمد. در ادامه تعدادی نقطه از منحنی‌های تجربی تنش سیلان در شرایط مشخص دما، کرنش و نرخ کرنش در نظر گرفته شد. سپس مقادیر تنش سیلان محاسباتی متناظر به ازای همان شرایط دمایی، کرنشی و نرخ کرنشی با استفاده از معادله جانسون-کوک که ضرایب آن توسط الگوریتم ژنتیک جایگذاری شده است، محاسبه شد. سپس قدرمطلق اختلاف بین مقادیر تجربی و محاسباتی تنش سیلان به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی معرفی گردید. در واقع با هربار تکرار الگوریتم بهینه‌سازی، مقادیر جدیدی از ثوابت مدل ماده و متعاقباً تنش سیلان جدیدی به روز رسانی شد و با مقادیر متناظر تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. این روند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم تا زمانی ادامه یافت که بهینه‌ترین مقادیر ورودی

بهینه‌سازی تشکیل شده است که مقدار هر ژن، برازندگی کروموزوم را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲۰]. در این الگوریتم جوابهای حاصل از یک جمعیت برای تولید جمعیت بعدی استفاده می‌شوند. انتخاب بعضی از جوابها از میان کل جوابها (والدین) به منظور ایجاد جوابهای جدید یا همان فرزندان بر اساس میزان مطلوبیت آنها می‌باشد. طبیعی است که جوابهای مناسب تر شانس بیشتری برای تولید مجدد داشته باشند. انتخاب جمعیت نسل بعد از طریق عملگرهایی همچون جهش، تقاطع و نخبه‌گزینی بگونه‌ای صورت می‌پذیرد که برازندگی جمعیت جدید بهتر از برازندگی نسل قبل باشد. این فرآیند تا برقراری شرطی که از پیش تعیین شده است (مانند تعداد جمعیتها یا میزان بهبود جواب) ادامه می‌یابد. به منظور اطلاعات بیشتر در این خصوص به مراجع مراجعه شود [۲۱].

۳-۲- تعیین مدل ماده جدید

۳-۱- معرفی مدل ماده جانسون-کوک

یکی از معروفترین و پرکاربردترین روابط برای ارائه رفتار ماده، معادله‌ی جانسون کوک^۱ می‌باشد. حین فرایند براده برداری دمای ناحیه‌ی برش در مدت زمان اندک به شدت افزایش می‌یابد و تغییر شکل‌های پلاستیک شدید و سریعی در حین بوجود آمدن براده رخ می‌دهد. از آنجا که مدل جانسون-کوک تغییر شکل‌های پلاستیک ماده را تحت شرایط کرنشی، دمایی و نرخ کرنشی مختلف به خوبی بیان می‌کند، بطور گسترده‌ای جهت شبیه‌سازی فرآیند براده برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. این معادله از سه بخش پرانتزی مجزا تشکیل شده است که به ترتیب از چپ به راست تاثیرات سخت‌شدگی کرنشی^۲، سخت‌شدگی نرخ کرنشی^۳ و نرم‌شدگی دمایی^۴ را لحاظ می‌کند. در رابطه‌ی زیر معادله‌ی جانسون کوک نمایش داده شده است.

(۱)

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

در این رابطه σ مقدار تنش سیلان قطعه کار می‌باشد، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش موثر، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع و ε معرف کرنش قطعه کار می‌باشد. همچنین T معرف دمای فعلی قطعه کار و T_w دمای محیط می‌باشد. پارامتر T_m نیز معرف دمای ذوب قطعه کار است. علاوه بر این پارامترهای A, B, C

³ Strain rate hardening

⁴ Thermal softening

¹ Johnson Cook

² Strain hardening

بهینه سازی جهت شناسایی ضرایب معادله جانسون و کوک مشخص شده است.

$$900 < A < 1562 \quad (2)$$

$$300 < B < 1054 \quad (3)$$

$$0.013 < C < 0.017 \quad (4)$$

$$0.25 < n < 0.77 \quad (5)$$

$$1.3 < m < 2.1 \quad (6)$$

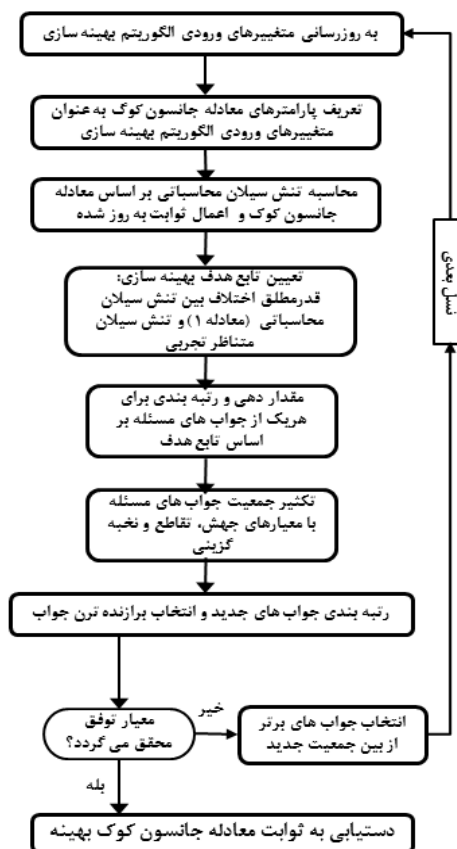
$$\sigma_{Cal} = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + \ln \frac{0.001}{1}\right) \left(1 - \left(\frac{T-20}{1300-20}\right)^m\right) \quad (7)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^K \left(\frac{|\sigma_{(Cal)i} - \sigma_{(Exp)i}|}{\sigma_{(Exp)i}} \right)}{K} \quad (8)$$

در این روابط A, B, C, m, n متغیرهای ورودی بهینه سازی (ثوابت معادله جانسون و کوک) می باشند. همچنین T و ε به ترتیب معرف دما و کرنش به ازای تنش سیلان تجربی (σ_{Exp}) مشخص می باشد. F و K نیز به ترتیب تنش سیلان محاسباتی، تعداد نقاط انتخابی و تابع هدف بهینه سازی می باشند.

لازم به ذکر است به منظور بدست آوردن جوابهای معقول، هریک از متغیرهای بهینه سازی در محدوده مشخصی مورد بررسی قرار گرفتند. برای این امر ثوابتی که تاکنون برای سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با سختی HRC۴۵ بدست آمده، شناسایی شد و هریک از پارامترها در محدوده کمترین تا بیشترین مقادیر گزارش شده در مقالات دیگران تعیین گردید. در جدول (۱) ثوابت مدل ماده جدید بدست آمده در این تحقیق به همراه ثوابت مدل های ماده جانسون-کوک موجود در سایر تحقیقات گزارش شده است. در شکل (۲) نیز نمونه ای از منحنی تنش سیلان مدل های ماده مختلف اینکونل ۷۱۸ نشان داده شده است.

(ثوابت معادله ی جانسون و کوک) بگونه ای بدست آید که اختلاف بین تنش سیلان تجربی و محاسباتی کمینه شود. در شکل (۱) نحوه پیاده سازی روش مذکور ارائه شده است. جهت اطلاعات بیشتر در خصوص تنظیمات مربوط به الگوریتم ژنتیک به مطالعات قبلی مراجعه شود.



شکل ۱: استراتژی بکار گرفته شده جهت شناسایی مدل ماده جانسون و کوک جدید

در روابط زیر قیود مسئله به همراه نحوه تعیین تابع هدف

جدول ۱- ثوابت مدل های مواد مختلف برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ (جعفریان و همکاران ۲۰۱۴)

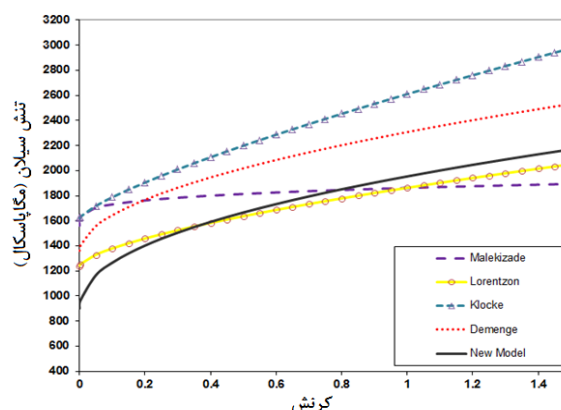
مدل ماده	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	ε_0	مرجع	مدل ماده
مدل ۱_ ماده جدید	۹۰۰	۱۰۵۴	۰/۰۱۷	۰/۴۶	۲/۱	۱	جدید	مدل ۱_
مدل ۲_ دیمنگ و همکاران	۱۲۹۰	۸۹۵	۰/۰۱۶	۰/۵۲۶	۱/۵۵	۰/۰۳	[۸]	مدل ۲_
مدل ۳_ کلک و همکاران	۱۴۸۵	۹۰۴	۰/۰۱۳۴	۰/۷۷۷	۱/۵۸۹	۰/۰۰۱	[۱۰]	مدل ۳_
مدل ۴_ سوپرت و همکاران	۱۲۴۱	۶۲۲	۰/۰۱۳۴	۰/۶۵۲۲	۱/۳	۱	[۱۵]	مدل ۴_
مدل ۵_ ملکی زاده و همکاران	۱۵۶۲	۳۰۰	۰/۰۱۶۴	۰/۲۵	۱/۷	۱	[۱۷]	مدل ۵_

از المان‌های چهار گوش مربعی جهت مش‌بندی ابزار و قطعه کار استفاده شد. شرایط مرزی بگونه‌ای در نظر گرفته شد که حرکت بلوک قطعه کار در راستای محور X و Y و ابزار برشی در محور Y ثابت در نظر گرفته شد. از طرفی به منظور شکل‌گیری براده، ابزار برشی در راستای محور X به سمت قطعه کار و به اندازه سرعت برشی حرکت داده شد. همچنین بین سطح بیرونی قطعه کار و سطوح ابزار (شامل لبه ابزار، صفحه آزاد و صفحه براده) شرایط تماسی و انتقال حرارت در نظر گرفته شد. ابزار به عنوان جسم صلب در نظر گرفته شد و با تعداد ۸۰۰۰ المان مش‌بندی گردید. برای مش‌بندی قطعه کار نیز از تعداد بالای ۱۵۰۰۰ المان استفاده شد. جهت شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر و همچنین دست یافتن به بهتر هندسه‌ی براده پایدار و دقیق نیاز است که اندازه المان‌ها بسیار ریز باشد. به همین منظور اندازه‌ی المان‌ها در نزدیکی محل برش و همچنین فضای جلوی ابزار که براده قرار دارد براده در حدود یک میکرومتر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که پنجره‌های تعریف شده جهت تعیین اندازه‌ی مش بگونه‌ای تنظیم شدند که همراه با حرکت ابزار نیز حرکت نمایند. اینرو همواره وضعیت فعلی مش در شبیه‌سازی حفظ می‌شود.

با توجه به تاثیر هندسه ابزار بر نتایج شبیه‌سازی، هندسه‌ی دقیق لبه برنده ابزار (همراه با براده شکن)، توسط مهندسی معکوس مشخص شد. رفتار ماده نیز با استفاده از مدل ماده جانسون-کوک در نظر گرفته شد و ثوابت معرفی شده در جدول ۱ برای هر یک از شبیه‌سازی‌ها اعمال گردید. در این راستا از زیربرنامه‌نویسی فورت‌ترن جهت پیاده‌سازی انواع مدل ماده در نرم‌افزار استفاده شد. سایر پارامترهای شبیه‌سازی شامل ضریب انتقال حرارت، ضرایب اصطکاکی و معیار شکست براده برای هر یک از شرایط شرایط ماشینکاری مطابق مقادیر کالیبره شده در مطالعات قبلی استفاده شد [۱۸ و ۲۲].

در این قسمت شبیه‌سازی اجزاء محدود فرایند ماشینکاری متعامد سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در شرایط مختلف ماشینکاری (مطابق جدول ۲) صورت پذیرفت. با ثابت نگه داشتن پارامترهای شبیه‌سازی شامل معیار شکست قطعه کار، شرایط اصطکاکی و حرارتی، تاثیر انواع مدل ماده جانسون-کوک شامل مدل ماده پیشنهاد شده با استفاده از روش بهینه‌سازی و مدل‌های ماده موجود در تحقیقات دیگران بر دقت نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت.

در ادامه شبیه‌سازی اجزاء محدود فرایند براده‌برداری در شرایط مختلفی صورت پذیرفت و تاثیر مدل‌های ماده جانسون کوک ذکر شده در جدول (۱) بر نتایج شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۲: منحنی تنش سیلان سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با

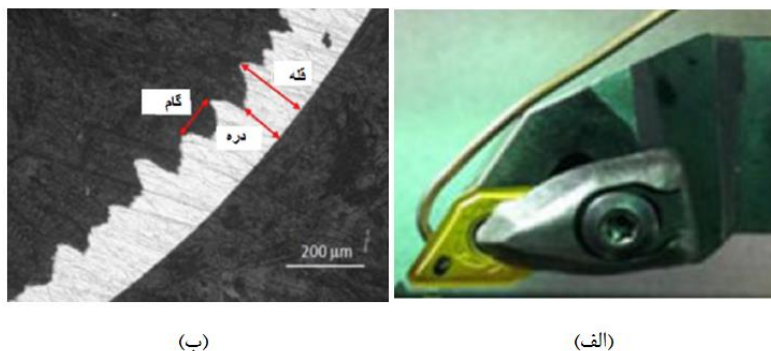
استفاده از مدل‌های مختلف ماده

۴- آزمایشات تجربی جهت اعتبار سنجی

برای این منظور آزمایشات تجربی پرته و همکاران صورت پذیرفت [۱۸]. در این آزمایشات فرایند ماشینکاری متعامد سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با سختی HRC ۴۵ 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 که زوایای آزاد و براده‌ی ۶- و ۴ درجه را فراهم می‌آورد استفاده شد. در این آزمایش‌ها نیروهای ماشینکاری (شامل نیروی اصلی برش و نیروی پیشروی)، حداکثر دمای ماشینکاری و هندسه‌ی براده (شامل سه مشخصه‌ی گام، قله و دره) بصورت تجربی در سه وضعیت مختلف اندازه‌گیری شد. در شکل (۳) نمایی از ابزار مورد استفاده و هندسه براده نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز شرایط ماشینکاری و نتایج تجربی مربوط به هر آزمایش مشخص شده است.

۵- شبیه‌سازی اجزاء محدود فرایند براده‌برداری

به منظور انجام شبیه‌سازی فرایند براده‌برداری از نرم‌افزار تجاری DEFORM_2D_V10 استفاده شد. در این نرم‌افزار روش لاگرانژی ارتقاء یافته با قابلیت مش‌زنی مجدد جهت شبیه‌سازی براده‌برداری استفاده می‌شود. همچنین



شکل ۳- ماشینکاری متعامد آلیاژ اینکونل ۷۱۸ (الف) ترموکوپل جهت اندازه گیری دما (ب) هندسه براده [۱۸]

جدول ۲- پارامترهای ماشینکاری و نتایج تجربی نیروها، دما و هندسه براده [۱۸]

شرایط ماشینکاری	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	نرخ پیشروی (میلیمتر بر دور)	نیروها (نیوتن)		هندسه ی براده			دما (°)
			F _c	F _f	گام	دره	کله	
N ₁	۶۰	۰/۰۵	۴۷۲/۶	۴۲۲/۱	۸۷/۸۰	۶۴/۹	۵۰	۸۷۶
N ₂	۶۰	۰/۰۷۵	۶۵۷/۲	۵۶۰/۵	۱۴۱/۹	۹۸/۱	۸۷/۴	۹۹۰
N ₃	۶۰	۰/۱	۷۹۵/۶	۵۴۱/۵	۱۷۰/۹	۱۱۳/۵	۶۷/۸	۹۶۹

۶-۱- براده دنداناره ای

در فرآیند براده برداری بوجود آمدن تنش های کششی در صفحه ی برش (ناحیه ی تغییر شکل اولیه) منجر به لغزش صفحات کریستالی ماده و جدا شدن براده از قطعه کار می گردد. در ماشینکاری مواد سخت این تنش های کششی تا سطح آزاد قطعه ادامه می یابند و سبب شکست موضعی قطعه و در نهایت بوجود آمدن براده دنداناره ای می شود [۲۲]. این شکستگی منجر می شود که دنداناره ی براده با تغییر شکل پلاستیک کم بوجود آید، این در حالی است که در ناحیه برشی تغییر شکل پلاستیک شدیدی همراه با تغییر اندازه ی دانه اعمال می گردد و اصطلاحاً این ناحیه باند آدیاباتیک برشی^۱ نامیده می شود. جهت شبیه سازی براده ی دنداناره ای در فرآیند ماشینکاری از معیارهای مختلفی استفاده شده است که از جمله پرکاربردترین آنها معیار شکست ککرفت و لاتامز^۲ می باشد که با معادله (۹) معرفی می گردد [۲۲].

$$D = \int_0^{\epsilon_f} \sigma_1 d\epsilon \quad (9)$$

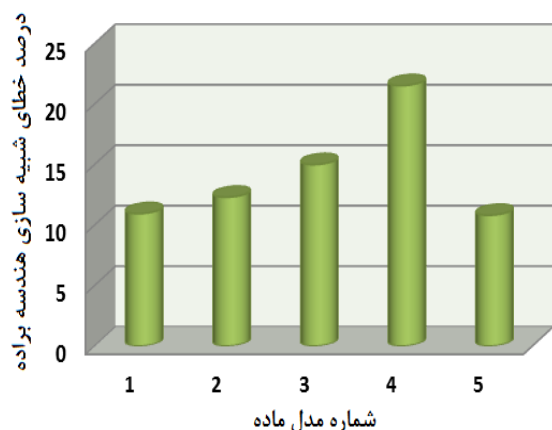
در این رابطه σ تنش اصلی، ϵ_f کرنش موثر و D ثابت ماده

۶-۲ بحث و نتایج

در این قسمت شبیه سازی اجزاء محدود فرآیند ماشینکاری متعامد سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در شرایط مختلف ماشینکاری (مطابق جدول ۲) صورت پذیرفت. با ثابت نگه داشتن پارامترهای شبیه سازی شامل معیار شکست قطعه کار، شرایط اصطکاکی و حرارتی، تاثیر انواع مدل ماده جانسون-کوک شامل مدل ماده پیشنهاد شده با استفاده از روش بهینه سازی و مدل های ماده موجود در تحقیقات دیگران بر دقت نتایج شبیه سازی مورد مقایسه قرار گرفت. در این راستا نیروهای ماشینکاری، هندسه براده و حداکثر دمای ماشینکاری به عنوان خروجی های شبیه سازی در نظر گرفته شدند که مقادیر آنها متأثر از مدل ماده انتخاب شده می باشند. نتایج شبیه سازی بطور گسترده با نتایج متناظر تجربی مورد مقایسه قرار گرفتند و میانگین خطای شبیه سازی به ازای هر مدل ماده برای هر سه شرایط ماشینکاری بدست آمد و همچنین میانگین خطای کل شبیه سازی ها برای هر مدل ماده گزارش گردید. در نهایت میزان عملکرد و بازدهی روش پیشنهاد شده جهت تعیین ثوابت مدل ماده جانسون-کوک برای شبیه سازی فرآیند براده برداری مورد ارزیابی قرار گرفت.

² Cockroft and Latham's

¹ Shear Adiabatic Band



شکل ۵- میانگین خطای هندسه براده

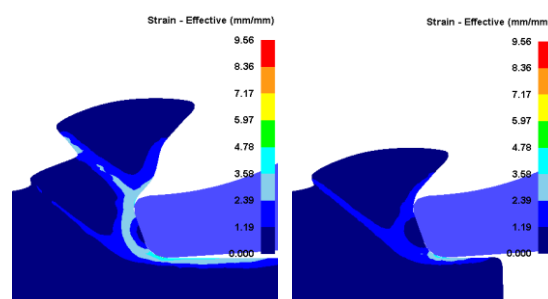
۶-۲- نیروهای ماشینکاری

علاوه بر مدل ماده که بیشترین تاثیر بر میزان نیروهای ماشینکاری را دارد، شرایط اصطکاکی بین ابزار و براده هم موثر می‌باشد. در فرآیند براده برداری در محل نوک ابزار فشار و حرارت بین قطعه کار و ابزار بالاست و اصطکاک از نوع چسبنده می‌باشد، درحالی که کمی بالاتر از لبه برنده که از میزان فشار کاسته می‌شود، لغزش نسبی بین براده و ابزار سبب کشیده شدن براده به سطح براده ابزار می‌شود که در این شرایط اصطکاک لغزنده حاکم می‌باشد [۲۴]. بنابراین مطالب مذکور در این تحقیق ضریب اصطکاک چسبنده که با فاکتور اصطکاک برشی و اصطکاک لغزنده که با ضریب کلمب معرفی می‌شوند، به ترتیب مقادیر ۱ و ۰/۳ مطابق با مقادیر کالیبره شده در تحقیق قبلی در نظر گرفته شد [۲۲]. لازم به ذکر است در نرم افزار دی فرم دو بعدی ضخامت المانها که معرف عمق براده برداری می‌باشد، بصورت ثابت و یک میلیمتر در نظر گرفته می‌شود و از این رو ارتباط خطی بین نیروی ماشینکاری و عمق برش برقرار می‌باشد. همچنین در فرآیند ماشینکاری با هندسه‌ی براده‌ی دندان‌ه‌ای نیروهای ماشینکاری ثابت نمی‌باشد و با توجه به بوجود آمدن باند برشی آدیباتیک، نیروی برشی نیز بصورت نوسانی تغییر می‌کند [۲۳ و ۶]. این مسئله با در نظر گرفتن معیار شکست قطعه کار در شبیه سازی لحاظ می‌گردد. در این شرایط میانگین نیروی ماشینکاری به عنوان خروجی گزارش می‌گردد. در شکل (۶) نمونه‌ای از منحنی تغییرات نیروی ماشینکاری در شرایط ایجاد براده دندان‌ه‌ای نشان داده شده است.

است که تحت عنوان مقدار آسیب^۱ معرفی می‌گردد. بر اساس این معیار هنگامی که انتگرال تنش اصلی در مسیر کرنش پلاستیک (صفحه‌ی برش) از مقدار آسیب (D) بیشتر گردد، شکست رخ می‌دهد و براده دندان‌ه‌ای شکل می‌گیرد. در این تحقیق معیار شکست براده براساس معیار ککرفت لاتلهامز و تابعی از پارامترهای ماشینکاری مطابق مقادیر کالیبره شده در تحقیق قبلی مورد استفاده قرار گرفت [۲۲]. در شکل (۴) نیز نحوه ایجاد براده‌ی دندان‌ه‌ای و باند برش آدیباتیک نشان داده شده است.

(۱۰)

$$D = -2178 + 3761 \times (a_f) + 7359 \times (V_c) - 26410 \times (a_f^2) + 22.01 \times (a_f) \times (V_c) + 0.6249 \times (V_c^2)$$

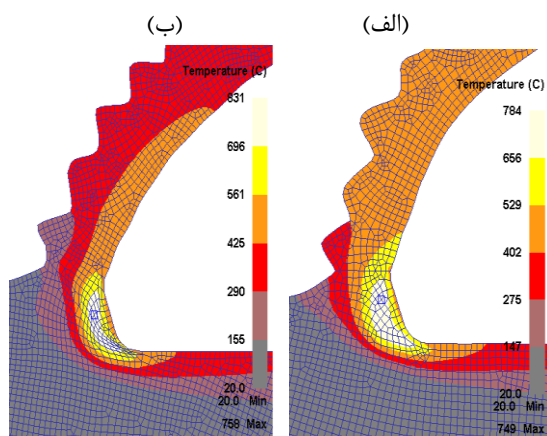


شکل ۴- شبیه سازی براده‌ی دندان‌ه‌ای و باند برش آدیباتیک از لحظه‌ی شروع تا رسیدن به حالت پایدار

با توجه به آنکه علاوه بر معیار شکست قطعه کار، مدل ماده نیز تاثیر بسزایی مقدار و نحوه دندان‌ه‌ای شده براده دارد، در این قسمت تاثیر انواع مدل ماده بر بوجود آمدن براده دندان‌ه‌ای در شرایط ماشینکاری مختلف مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. شبیه‌سازی فرآیند مطابق پارامترهای ماشینکاری تجربی ذکر شده در جدول (۲) صورت پذیرفت و برای هر آزمایش میانگین خطای سه پارامتر هندسه براده محاسبه شد. در نهایت برای هر مدل ماده میانگین خطای هندسه براده در شرایط ماشینکاری مختلف (آزمایش ۱ تا ۳) مشخص شد و در شکل (۵) گزارش گردید. نتایج نشان می‌دهد بجز مدل ماده شماره ۴ که میانگین خطای شبیه‌سازی هندسه براده، بالاتر از ۲۰٪ می‌باشد، خطای نتایج شبیه‌سازی سایر مدل‌ها زیر ۱۵٪ می‌باشد. در این بین خطای شبیه‌سازی هندسه براده با استفاده از مدل ماده پیشنهادی کمتر از ۱۱٪ می‌باشد که میزان آن مطلوب می‌باشد.

¹ Damage Value

محققین صورت پذیرفته است، اصطلاحاً از نیرنگ شبیه سازی استفاده می شود [۲۵]. در این روش ضریب انتقال حرارت بین ابزار و براده مقادیر بسیار بالایی در نظر گرفته می شود که در مدت زمان کوتاه شبیه سازی فرآیند براده برداری، تبادل حرارتی و حالت پایدار دمایی بین ابزار، براده و قطعه کار بوجود آید [۲۶]. بر اساس مطالب مذکور، در این تحقیق ضریب انتقال حرارت بین ابزار و براده به ازای تمامی شرایط مقدار بالایی در نظر گرفته شد و تاثیر انواع ضرایب مدل ماده جانسون-کوک بر حداکثر دمای ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۸) نمونه ای از شبیه سازی دمای ماشینکاری در شرایط مختلف ماشینکاری نشان داده شده است.

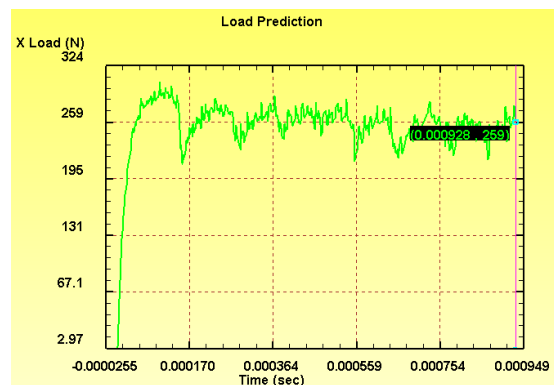


شکل ۸- شبیه سازی دمای ماشینکاری تحت شرایط (الف) آزمایش ۱، (ب) آزمایش ۲

در این قسمت تاثیر مدل ماده بر خطای شبیه سازی حداکثر دمای ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفت. در این خصوص میانگین خطای شبیه سازی در شرایط آزمایش مختلف برای هر مدل ماده در شکل (۹) گزارش شد. همانطور که مشاهده می شود، بطور کلی میانگین خطای شبیه سازی دمای ماشینکاری از خطای شبیه سازی نیروهای ماشینکاری و هندسه براده بیشتر می باشد. این امر نشان از ضعف اکثر مدل های ماده جهت شبیه سازی حداکثر دما در فرآیند ماشینکاری مواد سخت می باشد. نتایج بدست آمده با استفاده از مدل ماده ارائه شده در این تحقیق با $17/6\%$ خطا نسبت به سایر مدل های ماده جهت شبیه سازی دمای ماشینکاری مناسب تر می باشد.

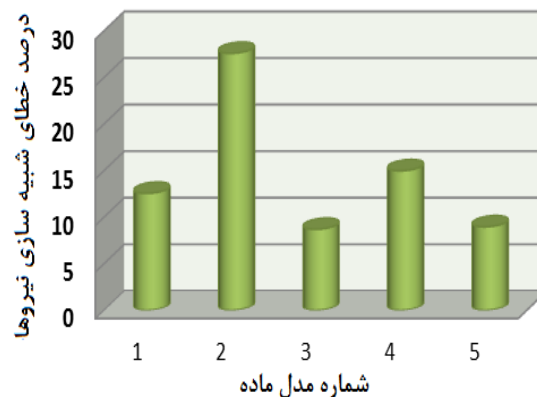
۴-۶- مقایسه نتایج

در این بخش به منظور بررسی و جمع بندی عملکرد مدل ماده جانسون - کوک پیشنهاد شده برای ماشینکاری



شکل ۶- نمونه ای از شبیه سازی نیروی ماشینکاری تحت شرایط براده دنداناره ای

در این قسمت به ازای هر مدل ماده، میانگین خطای شبیه سازی نیروی اصلی و پیشروی ماشینکاری برای هر سه شرایط آزمایش محاسبه شد و در شکل (۷) گزارش گردید. نتایج حاکی از آن است که مدل ماده شماره ۲ با میانگین خطای $27/6\%$ دارای بیشترین خطای شبیه سازی و مدل ماده شماره ۳ با خطای $8/7\%$ مناسب ترین مدل ماده جهت مدلسازی نیروهای ماشینکاری می باشد. مدل ماده ارائه شده در این تحقیق نیز با خطای شبیه سازی $12/5\%$ دارای دقت مناسبی در مقایسه با سایر مدل ها می باشد.



۶-۳- حداکثر دمای ماشینکاری

به منظور شبیه سازی حداکثر دمای ناشی از فرآیند ماشینکاری، علاوه بر مدل ماده انتخاب شده ضریب انتقال حرارت بین ابزار و براده نیز موثر می باشد. با توجه به آنکه شبیه سازی ماشینکاری صرفاً کسری از زمان براده برداری مدلسازی می شود، عملاً فرصت کافی جهت رسیدن به حالت پایدار دمایی فراهم نمی شود. این امر می تواند سبب بروز خطا جهت پیش بینی حداکثر دمای ماشینکاری گردد. لذا منظور مرتفع نمودن این مسئله، در تحقیقاتی که توسط

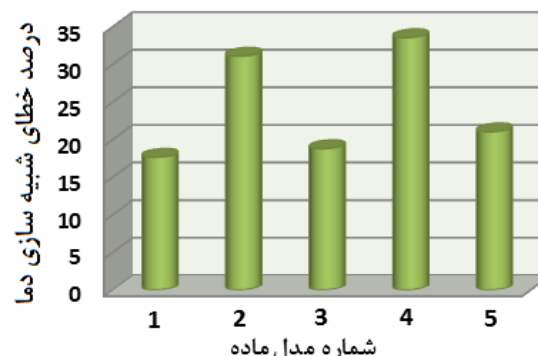
بهینه‌سازی تکاملی و بدون نیاز به انجام آزمایشات تجربی صورت پذیرفته و از دقت و عملکرد مطلوبی برخوردار می‌باشد. از این‌رو استراتژی ارائه شده در این تحقیق می‌تواند بخوبی برای بدست آوردن مدل‌های ماده مختلف جهت شبیه‌سازی سایر فرآیندهای تولیدی مورد استفاده قرار گیرد.

۷- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند براده‌برداری به عنوان ابزاری کارآمد جهت درک بهتر فرآیند و کاهش هزینه‌ها و زمان مورد استفاده محققین و صنعتگران قرار می‌گیرد. با توجه به آنکه فرآیند براده‌برداری منجر به جداسازی براده از قطعه می‌گردد، تغییر شکل‌های پلاستیک شدید و افزایش دما و نرخ کرنش شدید در قطعه کار بوجود می‌آید. از این‌رو شبیه‌سازی این فرآیند با چالش‌هایی روبرو می‌باشد و در نظر گرفتن مدل ماده مناسب از جمله مهم‌ترین عامل در دقت نتایج شبیه‌سازی فرآیند براده‌برداری می‌باشد. در این راستا در تحقیق حاضر روش جدیدی ارائه شد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مدل معادله جانسون-کوک جهت شبیه‌سازی فرآیند براده‌برداری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ تعیین شد. نتایج بدست آمده بوسیله این روش با نتایج مدل‌های ماده سایر محققین که با آزمایشات تجربی و تحلیلی بدست آمده بود، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت و در نهایت نتایج زیر گزارش گردید:

- به ازای هر مدل ماده شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری در شرایط مختلف صورت پذیرفت و نتایج شبیه‌سازی نیروهای ماشینکاری (دو مولفه) و هندسه براده (سه مولفه) با نتایج تجربی متناظر مورد مقایسه قرار گرفت. در این بین میانگین خطای شبیه‌سازی هندسه براده و نیروهای ماشینکاری با استفاده از مدل ماده پیشنهادی به ترتیب به میزان مطلوب ۱۱٪ و ۱۲٪ گزارش گردید.
- نتایج نشان داد که خطای شبیه‌سازی دمای ماشینکاری نسبت به سایر خروجی‌ها بیشتر می‌باشد. این امر نشان از ضعف اکثر مدل‌های ماده جهت شبیه‌سازی حداکثر دما در فرآیند ماشینکاری مواد سخت می‌باشد. در این بین، خطای دما با استفاده از مدل ماده ارائه شده در این تحقیق ۱۷/۶٪ بدست آمد که نسبت به سایر

سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در این تحقیق و مقایسه با نتایج سایر مدل‌های ماده موجود، مقایسه کلی به عمل آمد. از این‌رو برای هر مدل ماده، میانگین خطای بدست آمده در قسمت‌های قبل شامل خطای هندسه براده (قله، گام، دره)، نیروهای ماشینکاری (اصلی و پیشروی) و حداکثر دمای ماشینکاری برای هر آزمایش بدست آمد و سپس میانگین خطای کل برای هر سه شرایط آزمایش محاسبه شد و در جدول (۳) گزارش گردید.



شکل ۹- مقایسه میانگین خطای شبیه‌سازی حداکثر دمای ماشینکاری

جدول ۳- پارامترهای ماشینکاری و نتایج متناظر

درصد خطا (%)	مدل ۱_ (جدید)	مدل ۲_	مدل ۳_	مدل ۴_	مدل ۵_
آزمایش ۱_	۷/۷	۲۰/۹	۱۳	۱۹/۳۳	۹/۹۵
آزمایش ۲_	۱۵/۲۱	۲۴/۰۳	۱۶/۶	۲۵/۴۶	۱۶/۳۹
آزمایش ۳_	۱۸/۲	۲۶/۱	۱۳	۲۵/۳۳	۱۴/۴۷
خطای کل	۱۳/۷	۲۳/۶۶	۱۴/۲	۲۳/۳۶	۱۳/۶

همانطور که مشاهده می‌شود، مدل‌های ماده شماره ۲ و ۴ دارای خطای بیشتری هستند (بیش از ۲۳٪ خطا)، در حالی که مدل ماده پیشنهادی و مدل‌های ماده شماره ۳ و ۵ به ترتیب با خطای ۱۳/۷٪، ۱۴/۲٪ و ۱۳/۶٪ از دقت مطلوب‌تری برخوردار می‌باشند. در این بین همانطور که قبلاً اشاره گردید، ثوابت معادله جانسون-کوک در مدل‌های ماده شماره ۳ و ۵ به ترتیب با استفاده از آزمایشات تجربی میله فشار هاپکینسون و آزمایشات ماشینکاری بدست آمدند که امری زمان‌بر و هزینه‌بر می‌باشد. این مسئله در حالی است که روش ارائه شده در این تحقیق با استفاده از الگوریتم

آمدند که امری زمان بر و هزینه بر می‌باشد.

- در نهایت نتایج بدست آمده نشان داد که، روش ارائه شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان روشی جایگزین جهت تعیین ثوابت مدل ماده جانسون-کوک برای شبیه سازی فرآیندهای تولیدی با دقت مطلوب مورد استفاد قرار گیرد. این امر از صرف زمان و هزینه زیاد جهت تعیین تجربی این ثوابت جلوگیری به عمل می‌آورد. از این رو می‌توان ابراز امیدواری نمود که استراتژی پیاده-سازی شده در تحقیق حاضر به خوبی توسط سایر محققین نیز مورد استفاده قرار گیرد.

مدل‌های ماده کمترین خطای شبیه‌سازی دمای ماشینکاری می‌باشد.

- بطور کلی مدل‌های ماده شماره ۲ و ۴ دارای بیشترین خطا می‌باشند (بیش از ۲۳٪ خطا)، درحالی که مدل ماده پیشنهادی و مدل‌های ماده شماره ۳ و ۵ به ترتیب با خطای ۱۳/۷٪، ۱۴/۲٪ و ۱۳/۶٪ از دقت مطلوب‌تری برخوردار هستند. لازم به ذکر است که ثوابت معادله جانسون-کوک در مدل‌های ماده شماره ۳ و ۵ به ترتیب با استفاده از آزمایشات تجربی میله فشار هاپکینسون و آزمایشات ماشینکاری بدست

مراجع

- [1]. F. Jafarian, D. Umbrello, S. Golpayegani, and Z. Darake, "Experimental Investigation to Optimize Tool Life and Surface Roughness in Inconel 718 Machining", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, No. 13, 2016, pp. 1683-1691.
- [2]. F. Jafarian, S. Masoudi, H. Soleimani, and D. Umbrello, "Experimental and numerical investigation of thermal loads in Inconel 718 machining", *Journal of Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, No. 9, 2018, pp. 1020-1029.
- [3] F.-l. Sui, Y. Zuo, X.-h. Liu, and L.-q. Chen, "Microstructure analysis on IN 718 alloy round rod by FEM in the hot continuous rolling process", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 20, 2013, pp. 8776-8784.
- (۴) محمدرضا وزیری سرشک، محمود سلیمی و محمد مشایخی "فرم ریاضی مدل ساختاری ماده قابل کاربرد در تحلیل رفتار پلاستیک فلزات در مدل سازی ماشین کاری"، *مجله مدلسازی در مهندسی*، دوره ۱۰، شماره ۳۱، زمستان ۱۳۹۱، صفحه ۴۸-۳۷.
- [5]. F. Jafarian, H. Amirabadi, and J. Sadri, "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, 2013, pp. 235-248.
- [6] P.J. Arrazola, T. Ozel, D. Umbrello, M. Davies, and I.S. Jawahir, "Recent advances in modelling of metal machining processes", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 2, 2013, pp. 695–718.
- [7]. M. Sima, and T. Ozel, "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 & Manufacture*, Vol. 50, No. 11, 2010, pp. 943–960.
- [8] J.J. Demange, V. Prakash, and J.M. Pereira, "Effects of material microstructure on blunt projectile penetration of a nickel-based super alloy", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 8, 2009, pp. 1027–1043.
- [9] X. Wang, C. Huang, B. Zou, H. Liu, H. Zhu, and J. Wang, "Dynamic behavior and a modified Johnson-Cook constitutive model of Inconel718 at high strain rate and elevated temperature", *Journal of Materials Science Engineering*, Vol. 580, No. 15, 2013, pp. 385–390.
- [10] F. Klocke, D. Lung, and 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, Procedia CIRP*, Vol. 8, 2013, pp. 212–217.

- [11] S. Issler, "Development of a Concept for Life Prediction of Blade-Disc-Connections of Gas turbines (originally in German) PhD Thesis", University of Stuttgart, Germany. 2002.
- [12] A. V. Mitrofanov, V. I. Babitsky, and V. V. Silberschmidt, "Thermo mechanical finite element simulations of ultrasonically assisted turning", *Journal of Computational Materials Science*, Vol. 32, No. 3, 2005, pp. 463–471.
- [13] J. M. Pereira, and B. A. Lerch, "Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of Inconel 718 for jet engine fan containment applications", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, No. 8, 2001, pp. 715–733.
- [14] J. Lorentzon, N. Jarvstrat, and B. L. Josefson, "Modelling chip formation of alloy 718", *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 209, No. 10, 2009, pp. 4645–4653.
- [15] R. Sievert, A. H. Hamann, D. Noack, P. Lowe, K. N. Singh, and G. Kunecke, "Simulation of thermal softening, damage and chip segmentation in a nickel super-alloy", In: Tonshoff, H.K., Hollmann, F. (Eds.), *Hochgeschwindigkeitsspannen*. Vol. 8, 2005, pp. 446–469.
- [16] T. Ozel, L. Llanos, J. Soriano, and P. J. Arrazola, "3D finite element modelling of chip formation process for machining Inconel718: Comparison of FE software predictions", *Journal of Machining Science and Technology*, Vol. 15, No. 1, 2011, pp. 21–46.
- [17] A. Malakizadi, S. Cedergren, K. B. Surreddi, and L. Nyborg, "A methodology to evaluate the machinability of Alloy 718 by means of FE simulation, International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies", Vol. 9, 2013, pp. 95-106.
- [18] A.d. Prete, L. Filice, and D. Umbrello, "Numerical simulation of machining nickel-based alloys", *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, Vol. 8, 2013, pp. 539-544.
- [19] Ozel T, "Modeling of hard part machining: effect of insert edge preparation in CBN cutting tools", *Journal of Materials processing technology*, Vol. 141, No. 2, 2003, pp. 284–293.
- (۲۰) زینب سادات میرزایی و اکبر فرزاتگان، "بهینه‌سازی تک‌هدفه مدار آسیای گلوله‌ای مجتمع فسفات اسفوردی بر پایه الگوریتم ژنتیک"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۱، شماره ۳۳، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۲۵-۱۵.
- (۲۱) حسین امیر آبادی، جواد عاشوری و فرشید جعفریان، "بهینه‌سازی برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده با استفاده از روش شبکه عصبی - الگوریتم ژنتیک"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۸، شماره ۲۳، زمستان ۱۳۸۹، صفحه ۳۵-۲۵.
- [22] F. Jafarian, M. Imaz Ciaran, D. Umbrello, P.J. Arrazola, L. Filice, and H. Amirabadi, "Finite element simulation of machining Inconel 718 alloy including microstructure changes", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 88, 2014, pp. 110-121.
- [23] D. Umbrello, "Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, No. 1, 2008, pp. 79-87.
- [24] L. Filice, F. Micari, S. Rizzuti, and D. Umbrello, "A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 3, 2007, pp. 709-714.
- [25] E. Ceretti, L. Filice, D. Umbrello, F. Micari, "ALE simulation of orthogonal cutting: a new approach to model heat transfer phenomena at the tool-chip interface", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, 2007, pp. 69-72.
- [26] G. Rotella, and D. Umbrello, "Finite element modeling of microstructural changes in dry and cryogenic cutting of Ti6Al4V alloy", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 63, No. 1, 2014, pp. 69-72.