

فرم ریاضی مدل ساختاری ماده قابل کاربرد در تحلیل رفتار پلاستیک فلزات در مدل سازی ماشین کاری

محمدرضا وزیری سرشک^{۱*}، محمود سلیمی^۲ و محمد مشایخی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: ماشین کاری فلزات، مدل ساختاری ماده، نرم‌شوندگی حرارتی، نرخ- کرنش سختی، کرنش سختی.</p>	<p>یکی از بحث‌هایی که پس از سالیان متمادی همچنان در بین محققین زمینه ماشین کاری رایج است، میزان تأثیر پدیده‌های کرنش سختی، نرخ-کرنش سختی و نرم‌شوندگی حرارتی در مقاومت ماده به سیلان در ناحیه برش است. برخی بر این اعتقادند که نرم‌شوندگی ناشی از بالا رفتن دما سختی ایجاد شده در اثر نرخ کرنش را خنثی کرده، بنابراین دما و نرخ کرنش در سیلان ماده بی‌تأثیر بوده و مشابه فرآیندهای شکل‌دهی، برای رابطه ریاضی مدل ساختاری ماده (مدل ماده) کافی است که تنش سیلان را فقط برحسب کرنش بیان کنند. مدل‌های ماده با این فرم به سادگی و به‌کمک آزمایش استاندارد کشش قابل دستیابی خواهند بود. این درحالی است که مرتبه بزرگی نرخ کرنش و دماهای متداول در ماشین کاری چندین برابر مقدار این متغیرها در فرآیندهای شکل‌دهی است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر چند کرنش سختی نقش اصلی را در تغییرات تنش سیلان در ماشین کاری خواهد داشت، اما میزان تأثیر نرخ کرنش سختی و نرم‌شوندگی حرارتی هم قابل توجه خواهد بود. اما دما و نرخ کرنش اثر یکدیگر را خنثی نمی‌کنند و باید در فرم ریاضی رابطه مدل ماده حضور داشته باشند؛ تا به ترتیب اثر اصطکاک به‌عنوان منبع حرارتی خارجی و اثر سرعت انجام فرآیند را به‌عنوان دو پارامتر مستقل اعمال کنند.</p>

۱- مقدمه

نرخ کرنش‌های بالا (در محدوده 10^3 تا $10^5 S^{-1}$) و یا حتی بیشتر) و در دماهای بسیار زیاد (به بزرگی $1200^\circ C$) که متداول ماشین کاری است، اگر با دانش و تجهیزات امروزی غیر ممکن نباشد، بسیار مشکل و پرهزینه خواهد بود. بنابراین منطقی است که امکان به‌کارگیری منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست آمده از آزمایش‌های ساده و استاندارد کشش برای توصیف رفتار ماده در ماشین کاری ارزیابی شود. این درحالی است که چنین آزمایش‌هایی معمولاً در دمای اتاق و در محدوده نرخ کرنش‌های 10^{-3} تا $10^{-1} S^{-1}$ انجام می‌شوند. ایده این به‌کارگیری برای اولین

بسیاری از جنبه‌های ماشین کاری نظیر شکل‌گیری براده، نیروهای برشی، توزیع دمای ناحیه برش و یکپارچگی سطح محصولات براده‌برداری شده به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متأثر از خواص مکانیکی و حرارتی ماده می‌باشند [۱]. اندازه‌گیری تنش سیلان ماده تحت شرایط کنترل شده در

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.vaziri@ut.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه

تهران

۲. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

در ماشین کاری باشند زیرا این متغیرها تقریباً در تمام ناحیه برش (به غیر از باریکه مجاور سطح تماس ابزار و براده) متأثر از کار پلاستیک بوده و به هم وابسته‌اند. اگر چه وزیری و همکاران [۱۰] خصوصیت لازم برای فرم ریاضی مدل ماده جهت احتساب تاریخچه و مسیر کرنش را در حین تغییر شکل ماده در ماشین کاری بررسی کرده‌اند اما در تحقیق حاضر تحلیل کوپله ترمومکانیکی ماشین کاری به کمک نرم افزار ABAQUS به کار گرفته شده تا سایر خصوصیات لازم برای مدل ماده در توصیف رفتار پلاستیک فلزات در چنین فرآیندهایی تعیین شود. بعلاوه بزرگی اثر پدیده‌های تغییردهنده تنش سیلان ماده ارزیابی می‌شود و در کاربردی عملی در شبیه سازی ماشین کاری میزان خطاهای ایجاد شده در اثر به کارگیری داده‌های آزمایش ساده و استاندارد کشش به جای مدل‌های پیچیده توصیف کننده تنش سیلان برحسب همه متغیرهای حالت تعیین خواهد شود. به این ترتیب تخمینی از خطاهای ایجاد شده در اثر این ساده سازی در اختیار کاربری قرار می‌گیرد که قصد دارد رفتار ماده‌ای جدید را با نمودار تنش-کرنش آن تقریب بزند تا از پروسه پرهزینه تعیین ثوابت مادی آن پرهیز کند. بعلاوه سهم پارامترهای مختلف در تغییر رفتار پلاستیک ماده تخمین زده می‌شود و در انتها خصوصیات لازم برای فرم ریاضی مدل ماده قابل کاربرد در مدل سازی ماشین کاری، مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲- نرخ حرارت دهی و نرخ کرنش دهی بالا در ماشین کاری

پروسه نرم شوندگی حرارتی که شامل جوانه زنی و تغییر دانه بندی در ساختار فلزی است اثر سختی ناشی از کرنش و نرخ کرنش (کار مکانیکی) را از بین می‌برد [۱۱]. اما قطعه باید برای حداقل مدت زمان معینی در دمای انتقال ساختار باقی بماند تا این تغییر ساختار کامل شود. به طور

بار توسط مرچنت [۲] مطرح شد. او در محاسبات خود فرض کرد که تنش سیلان برشی در صفحه برش با آنچه در آزمایش کشش اندازه گیری می‌شود برابر است. این ایده به گونه‌ای دیگر توسط اسپانز [۳] مجدداً مطرح گردید؛ با این استدلال که دما اثر نرخ کرنش را خنثی کرده در نتیجه تنش سیلان تابع واحدی از فقط کرنش بوده که با آزمایش استاندارد کشش قابل تعیین است. برخی دیگر از محققین نظیر زورو [۴] و ون تورکوویچ [۵] تلاش کردند که محدوده‌ای از شرایط برش در ماشین کاری را تعیین کنند که دماها و نرخ کرنش‌های تولیدی تأثیری نسبتاً ناچیزی بر تنش سیلان داشته باشند. هر چند که مطالعات ایشان تأثیر دماها و نرخ کرنش‌های بالا مربوط به ماشین کاری را بر رفتار ترمومکانیکی ماده چندان مهم ندانست. تحقیقات بعدی توسط شاو [۶] مشخص کرد که تنش سیلان در فرآیند ماشین کاری مطابق آنچه در آزمایش‌های معمول تعیین خواص ماده به دست می‌آید تغییر نمی‌کند. در همین راستا محققین دیگری نیز تلاش کرده‌اند که بزرگی نقش کرنش سختی، نرخ-کرنش سختی و نرم شوندگی حرارتی را در تغییرات تنش سیلان ماده ارزیابی کرده و پدیده غالب را تعیین نمایند [۱، ۳ و ۷]. در این بین جانسون و کوک [۸] با فرض اثرات مستقل برای کرنش، نرخ کرنش و دما و اعمال اثر هریک با تابعی مجزا، مدلی را پیشنهاد کرده‌اند که با کالیبره شدن برای مواد مختلف به عنوان پرکاربردترین مدل برای تعریف سیلان ماده در مدل سازی ماشین کاری به کار رفته است. بسیاری از محققین نظیر کالماز و همکاران [۹] بدون نیاز به ارائه مدل کاملاً جدید اصلاحاتی را در فرم ریاضی مدل جانسون-کوک کافی دانسته‌اند اما همچنان شناخت ملزومات رابطه ریاضی مدل ماده مطلوب به عنوان نیاز باقی مانده است. فانگ [۱] با انجام تحلیل حساسیت سنجی و به کمک مدل ماده جانسون-کوک [۸] تلاش کرده پدیده غالب بر رفتار پلاستیک ماده را در محدوده‌هایی دلخواه از متغیرهای حالت (کرنش، نرخ کرنش و دما) تعیین نماید. اما این محدوده‌های دلخواه نمی‌توانند بیانگر وضعیت ماده

مشاهدات آزمایشگاهی خود، ساختار فلز را در این ناحیه به‌طور آشکار نتیجه بازیابی و دانه‌بندی مجدد دانسته‌اند. چنین مشاهداتی که متناقض هم به‌نظر می‌رسند نشان می‌دهد که نرم‌شوندگی حرارتی تا حدی و نه به‌طور کامل سختی ناشی از کرنش و نرخ کرنش را خنثی می‌کند. در این تحقیق تلاش شده تا به‌صورت کمی تخمینی از این اثرات ارائه شود.

۳- شبیه‌سازی اجزاء محدود ماشین‌کاری

برای به‌دست آوردن تغییرات متغیرهای حالت مناسب برای ارزیابی رفتار پلاستیک ماده در ماشین‌کاری و همچنین ارائه تخمینی برای خطای ناشی از صرف‌نظر از اثر نرخ کرنش و دما از شبیه‌سازی بروز شده لاگرانژی (Updated Lagrangian (UL) approach) استفاده می‌شود. عملکرد این روش شبیه‌سازی در مقایسه با سایر روش‌های متداول توسط وزیری و همکاران [۱۴] ارزیابی شده‌است و توانایی این مدل در پیش‌بینی صحیح و منطقی متغیرهای حالت نشان داده شده‌است. به‌طور خلاصه، قابلیت تحلیل ترمومکانیکی نرم‌افزار ABAQUS/Explicit به‌کار گرفته شده تا برش متعام فولاد AISI 1045 شبیه‌سازی شود. شکل ۱ مدل ساخته شده به این روش را نشان می‌دهد.

ابزار از جنس کرباید کنامتال K68 است. خواص حرارتی و مکانیکی قطعه و ابزار در جدول ۱ آورده شده‌است [۱۵].

باتوجه به تغییرات زیاد دما در حین پروسه براده‌برداری، خواص حرارتی به‌صورت تابعی از دما بیان شده‌اند.

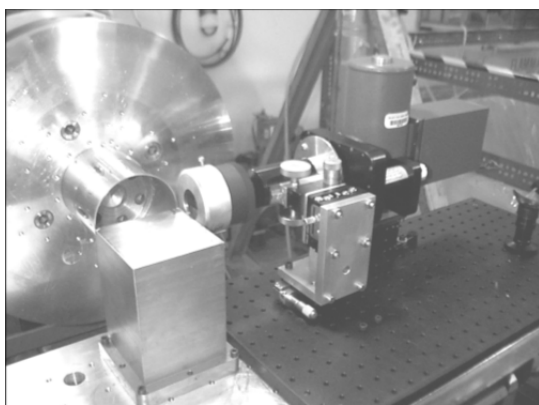
جدول ۱- خواص حرارتی و مکانیکی قطعه و ابزار [۱۵]

ابزار	قطعه	خاصیت ماده
۸۰	۴۸/۳-۰/۰۲۳T	هدایت حرارتی ($k, W/m^{\circ}C$)
۲۰۳	۴۲۰+۰/۵۰۴T	گرمای ویژه ($c_p, W/m^{\circ}C$)
$4/5 \times 10^{-6}$	$1/1 \times 10^{-5}$	ضریب انبساط حرارتی ($\alpha, 1/^{\circ}C$)
۸۰۰	۲۱۰	مدول یانگ (E, GPa)
۰/۲	۰/۳	ضریب پواسون (ν)
۱۵۰۰۰	۷۸۶۲	چگالی ($\rho, kg/m^3$)

مثال نمونه فولادی باید تا ۹۰ ثانیه در دمای بالاتر از C° ۶۸۰ نگه داشته شود تا آنیلینگ حرارتی یا پیرسختی تغییر تنش سیلان ماده در اثر کرنش و نرخ کرنش را اصلاح کند [۱۲]. این درحالی است که زمان گذر ماده از ناحیه برش در ماشین‌کاری از مرتبه 10^{-5} ثانیه است که چنین زمانی را در اختیار حرارت برای اعمال اثر نرم‌کنندگی خود قرار نمی‌دهد. از طرفی دمای انتقال ساختار در فلزات به شدت با نرخ حرارت‌دهی افزایش می‌یابد [۱۱]. این درحالی است که باتوجه به زمان عبور بسیار کوتاه ماده، نرخ حرارت‌دهی در پروسه‌های ماشین‌کاری صدها هزار و حتی میلیون‌ها درجه در ثانیه است که باعث افزایش شدید دمای انتقال ساختار خواهد شد. بنابراین به‌نظر می‌رسد که اثر دما چندان خنثی‌کننده اثرات کرنش و نرخ کرنش نمی‌تواند باشد. این مطلب در مورد هر دو روش تولید حرارت در ناحیه برش صادق است. در ناحیه برش اولیه گرما در اثر کار پلاستیک به‌طور همزمان و مرتبط با کرنش تولید می‌شود. ولی در ناحیه برش ثانویه منبع اصلی تولید گرما حرارت ناشی از اصطکاک است که مستقل از کار پلاستیک است. باید خاطر نشان کرد که مشاهدات ضد و نقیضی در مورد تقابل اثر حرارت با اثرات کرنش و نرخ کرنش در ماشین‌کاری وجود دارد. مشاهدات گزارش‌شده توسط چایلدر و همکاران [۱۲] از ریزساختار براده نشان می‌دهد در ناحیه بسیار گرم برش ثانویه، آثار کار سرد شدید دیده می‌شود و چندان آثاری از بازیابی و دانه‌بندی مجدد وجود ندارد. ایشان ادعا می‌کنند که در مورد فولاد، به‌ندرت شواهدی از آستنیت و یا کوئینچ شدن دیده می‌شود درحالی‌که دما در این ناحیه به حد کافی بالا است تا در مدت زمان بیشتر این تغییرات ساختار روی دهد. اما در تحقیقی دیگر ترنت و رایت [۱۳] ناحیه مجاور سطح تماس براده و ابزار را در ماشین‌کاری با سرعت بالا بر روی فولاد بررسی کرده‌اند. ایشان گزارش کرده‌اند که کرنش در این ناحیه بسیار شدیدتر از صفحه برش است بنابراین ساختار طبیعی فلز یا آلیاژ تا حد زیادی تغییر کرده و یا کاملاً انتقال یافته است. حتی ایشان بر مبنای

۴- داده‌های آزمایشگاهی

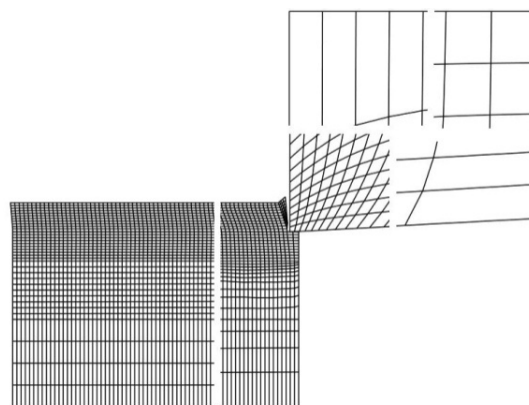
هدف اصلی این مقاله مطالعه رفتار پلاستیک فلزات در ماشین کاری است بنابراین متغیرهای حالت باید به درستی توسط شبیه‌سازی UL پیش‌بینی شوند. از طرفی تنها متغیر حالت قابل اندازه‌گیری در حین آزمایش براده برداری دما است. بنابراین نتایج شبیه‌سازی به کمک گستره توزیع دما به دست آمده از آزمایش قابل ارزیابی است. به عنوان بخشی از طرح دستیابی به مدل ماشین کاری (Assessment of machining model (AMM)) ایوستر و همکاران [۲۰] به کمک تجهیز تهیه تصاویر حرارتی (MIPY) گستره توزیع دما در برش متعام فولاد AISI 1045 را به دست آورده‌اند. شکل ۲ نحوه استقرار سیستم آزمایشگاهی مربوطه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نحوه استقرار سیستم آزمایشگاهی [۲۰]

شکل ۳ گستره توزیع دمای به دست آمده در برش متعام فولاد پر کاربرد AISI 1045 در شرایط برش مطابق جدول ۳ را نشان می‌دهد [۲۰]. خطوط سفید رنگ در شکل ۳ نشان‌دهنده سطوح ابزار و قطعه می‌باشند. حاشیه اطمینان $\pm 2s$ ناشی از همه منابع خطا در اندازه‌گیری کمتر از $\pm 30^\circ\text{C}$ است [۲۰]. این تصویر به عنوان مرجع آزمایشگاهی در ارزیابی دقت شبیه‌سازی به کار گرفته می‌شود.

برای توصیف رفتار پلاستیک قطعه از مدل ماده و آسیب جانسون- کوک [۱۶] استفاده شد. جسیر ثوابت مدل ماده [۱۷] و وزیری و همکاران [۱۸] ثوابت مدل آسیب را برای فولاد AISI 1045 تعیین کرده‌اند که این مقادیر در جدول ۲ آورده شده‌است.



شکل ۱- مدل اجزاء محدود برش متعام

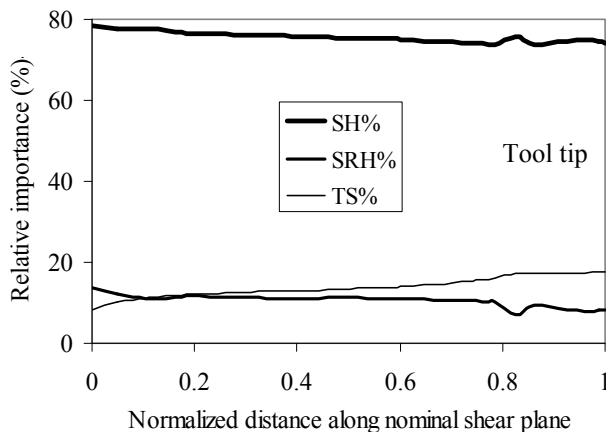
جدول ۲- ثوابت سیلان فولاد AISI 1045

مرجع	ثوابت مادی	مدل جانسون- کوک
[۱۷]	$A = 553.1 \text{ MPa}; m = 1.0;$ $B = 600.8 \text{ MPa}; C = 0.0134;$ $T_m = 1460 \text{ }^\circ\text{C}; n = 0.234$	مدل ماده
[۱۸]	$D_1 = 0.05; D_2 = 4.22;$ $D_3 = -2.73; D_4 = 0.0018;$ $D_5 = 0.55$	مدل آسیب

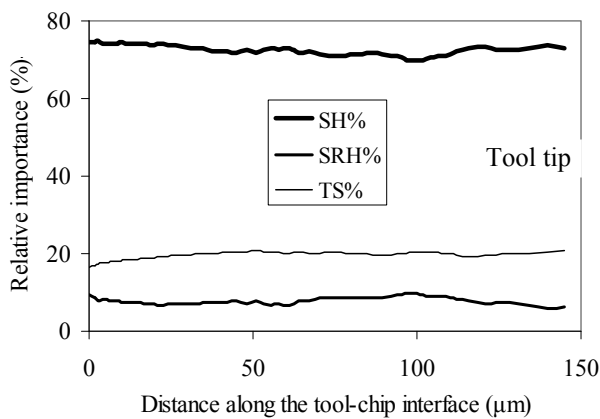
لایه باریک از المان‌های آسیب‌بیننده حدفاصل براده و قطعه را تشکیل می‌دهند که با رسیدن آسیب انباشته در المان‌های این لایه به مقدار بحرانی یک، المان از مدل حذف شده و براده از قطعه جدا می‌شود. توضیحات بیشتر در مورد این روش شبیه‌سازی در مرجع [۱۴] ارائه شده‌است. مدل توسعه یافته کولمبی که تماس ابزار و براده را شامل دو ناحیه اصطکاک چسبان ($\tau = 1.0 \text{ GPa}$) و اصطکاک لغزشی ($\mu = 0.8$) می‌داند به کار گرفته شد [۱۹]. همچنین شار حرارتی از هر دو منبع کار پلاستیک و اصطکاک در تحلیل در نظر گرفته می‌شود.

$$SH\% = \frac{\frac{B}{A} \varepsilon^n}{\frac{B}{A} \varepsilon^n + C \ln \dot{\varepsilon}^* + T^* m} \quad (2)$$

به همین ترتیب درصد سهم نرخ- کرنش سختی (SRH%) و نرم‌شوندگی حرارتی (TS%) به ترتیب در افزایش و کاهش تنش سیلان با روابطی مشابه قابل تعیین است. شکل ۴ و ۵ تغییرات سه پارامتر اهمیت نسبی را در نواحی برش اولیه و ثانویه نشان می‌دهد.

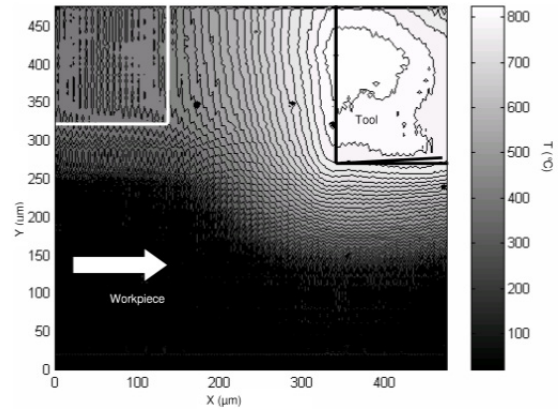


شکل ۴- حساسیت‌سنجی تنش سیلان در ناحیه برش اولیه



شکل ۵- حساسیت‌سنجی تنش سیلان در ناحیه برش ثانویه

مطابق آنچه در شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود میزان اهمیت نسبی پارامترها در نواحی برش اولیه و ثانویه تغییر چندانی نمی‌کند به گونه‌ای که سهم اثر نرخ کرنش و دما به ترتیب در افزایش و کاهش تنش سیلان همواره بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ تغییر می‌کند ولی اهمیت نسبی کرنش-سختی همواره بیش از ۷۰٪ است. بنابراین مهمترین عامل در تغییر تنش سیلان کرنش‌سختی خواهد بود.



شکل ۳- گستره توزیع دما حاصل از آزمایش [۲۰]

جدول ۳- شرایط برش متعام مورد آزمایش [۲۰]

سرعت برش (m/sec)	پیشروی (μm/rev)	زاویه براده (درجه)
۳/۷	۵۰	صفر

۵- تحلیل حساسیت‌سنجی تنش سیلان

تحلیل حساسیت‌سنجی به معنی بررسی بزرگی اثر تغییر پارامترها در تغییرات ایجاد شده در پارامتر خروجی است. به این ترتیب مؤثرترین پارامتر تعیین می‌شود.

۵-۱- اهمیت نسبی

به کمک متغیرهای حالت به دست آمده از شبیه‌سازی UL نقش کرنش‌سختی، نرخ-کرنش‌سختی و نرم‌شوندگی حرارتی در تغییر تنش سیلان قابل بررسی است. مطابق رابطه (۱) سهم اثر هر یک از این پدیده‌ها در رابطه ریاضی مدل ماده جانسون-کوک [۸] به صورت عبارتی جداگانه در نظر گرفته شده است.

$$\sigma_y = A \left[1 + \frac{B}{A} (\bar{\varepsilon}^P)^n \right] \cdot [1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*] \cdot [1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

که در آن σ_y تنش سیلان، $\bar{\varepsilon}^P$ کرنش پلاستیک، $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ و $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0$ است. دمای بی‌بعد به صورت

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$$

ریاضی این مدل به طور مثال سهم کرنش‌سختی (SH%) در افزایش تنش سیلان به صورت رابطه (۲) قابل بازنویسی است.

۵-۲- تقابل اثرات

برخی از محققین نظیر اسپانز [۸] با این فرض که نرم-شوندگی حرارتی اثر سختی ناشی از نرخ کرنش را از بین می برد تنش سیلان را فقط تابع تغییرات کرنش فرض کرده اند و از منحنی تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش ساده کشش در تعریف رفتار ماده در ماشین کاری استفاده کرده اند. در این بخش تلاش می شود تا امکان خنثی شدن این اثرات بررسی شود.

باتوجه به این که سهم اثر نرخ کرنش و دما در تغییرات تنش سیلان به صورت عبارات جداگانه در فرم ریاضی مدل ماده جانسون-کوک (رابطه (۱)) لحاظ شده حاصل ضرب این دو عبارت مطابق رابطه (۳) ترکیب اثرات این دو متغیر را با پارامتر MC (Mutual compensation) نشان می دهد.

$$MC = [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] [1 - (T^*)^m] \quad (3)$$

در صورتی که تقابل اثرات به خنثی شدن منتهی شود $MC=1$ خواهد بود و $MC < 1$ غلبه اثر دما و $MC > 1$ نشانه غلبه اثر نرخ کرنش است. برای بررسی مقدار MC در نقاط مختلف ناحیه برش، چهار نقطه مادی متفاوت که در امتداد سطح ماشین شده، حد فاصل براده و ابزار، میان براده، و سطح آزاد براده حرکت خواهند کرد، در نظر گرفته می شوند. شکل ۶ تغییرات پارامتر MC را که هر یک از این نقاط مادی در گذر از ناحیه برش تجربه می کنند نشان می دهد. متغیرهای لازم از نتایج شبیه سازی UL استخراج شده اند.

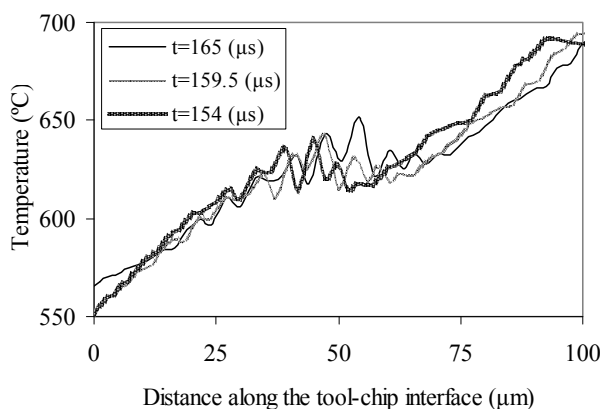
همان طور که در شکل ۶ دیده می شود مقادیر MC بین ۰/۴ تا ۱/۱ تغییر می کنند. در مورد هر چهار نقطه مادی دیده می شود که قبل از گذر از صفحه برش غلبه اثر نرخ کرنش باعث ایجاد مقادیر MC بزرگتر از یک می شود حال این که کار پلاستیک شدید مربوط به ناحیه برش اولیه دما را به حدی افزایش می دهد که نقاط مادی در موقعیت های مختلف ناحیه برش مقادیر MC کوچکتر از یک را پس از عبور از این ناحیه تجربه خواهند کرد.

۶- پیش بینی رفتار ماده در ماشین کاری

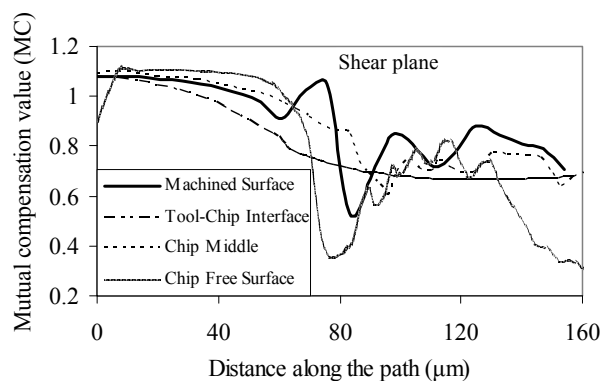
تعیین رابطه ای بر مبنای هر سه متغیر حالت به عنوان مدل ماده نیازمند تجهیزاتی آزمایشگاهی خاص و پرهزینه می باشد بنابراین مطلوب به نظر می رسد در مورد مواد جدید با قبول تقریب، از منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش ساده کشش به عنوان توصیف کننده رفتار ماده در شبیه سازی ماشین کاری استفاده شود. اما میزان این تقریب چقدر خواهد بود؟ برای ارائه تخمینی از خطاهای ناشی از این ساده سازی، شبیه سازی UL برای برش متعامد توصیف شده در جدول ۳، این بار به کمک فرم کاهش یافته مدل ماده جانسون-کوک مطابق رابطه (۴) صورت گرفت.

$$\sigma_y = A + B \dot{\epsilon}^n \quad (4)$$

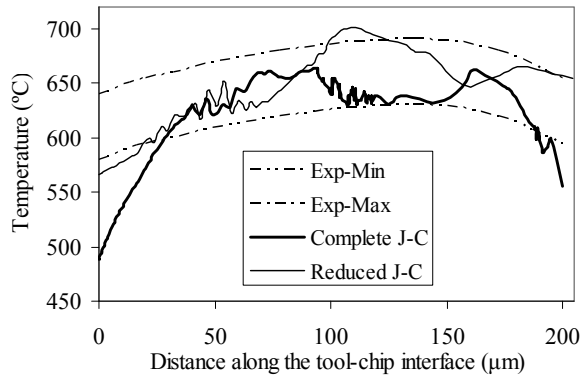
ارائه توزیع دما از نتایج تحلیل مطابق شکل ۷ نشان می دهد که چگونه تغییرات دما در امتداد تماس ابزار و براده به همگرایی می رسد و شرایط پایدار برای تحلیل به کمک شبیه سازی حاصل می شود.



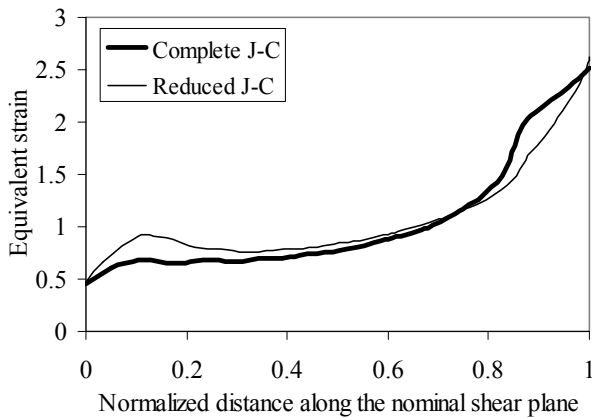
شکل ۷- همگرایی دما و شرایط پایدار در شبیه سازی UL



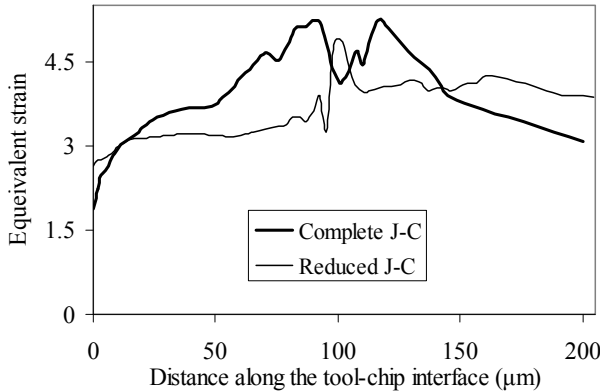
شکل ۶- تغییرات پارامتر تقابل اثرات در مسیرهای مختلف



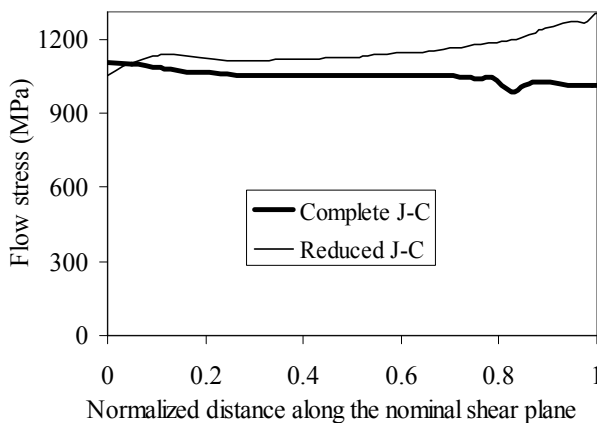
شکل ۹- تغییرات دما در امتداد ناحیه برش ثانویه



شکل ۱۰- کرنش معادل در امتداد ناحیه برش اولیه



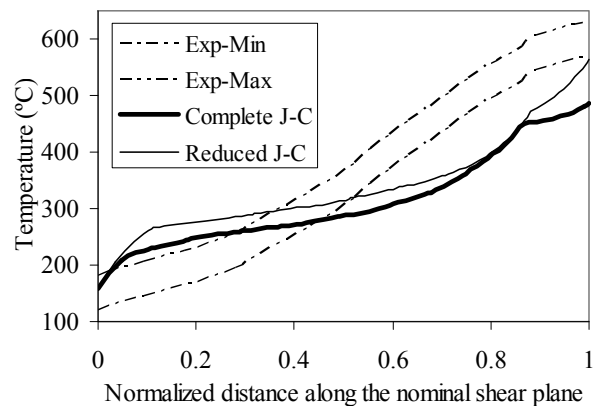
شکل ۱۱- کرنش معادل در امتداد ناحیه برش ثانویه



شکل ۱۲- تنش سیلان در امتداد ناحیه برش اولیه

باتوجه به این که موضوع اصلی این مقاله بررسی متغیرهای داخلی است لازم است که این مقادیر با دقت کافی تعیین شده باشند. از بین این متغیرها دما را می توان به کمک تجهیزاتی که در بخش ۴ معرفی شد در حین پروسه براده برداری تعیین کرد. این نحوه ارزیابی مدل قبلاً توسط وزیری و همکاران [۱۱] آزموده شده است. شکل های ۸ و ۹ تغییرات دما در نواحی برش اولیه و ثانویه را نشان می دهند که به کمک شبیه سازی UL با فرم های کامل و کاهش یافته مدل ماده جانسون-کوک به دست آمده اند. این مقادیر با محدوده دمای به دست آمده از آزمایش (استخراج شده از شکل ۳) مقایسه شده است. باتوجه به تفاوت طول های صفحه برش به دست آمده از دو مدل، از طول نرماله شده (موقعیت نسبی در طول) استفاده شد. لازم به ذکر است که خط چین ها نمایشگر حداقل و حداکثر دمایی هستند که می تواند از اندازه گیری به دست آمده باشد. این محدوده باتوجه به منابع خطای ذکر شده توسط ایوستر و همکاران [۲۰] تعیین شده است.

همان طور که در شکل های ۸ و ۹ دیده می شود دمای پیش بینی شده با هر دو مدل، با تقریب مناسب در محدوده مجاز اندازه گرفته شده [۲۰] قرار می گیرد که به طور ضمنی دلیلی بر صحت شبیه سازی UL خواهد بود. بعلاوه به نظر می رسد که به کارگیری مدل ماده کاهش یافته هم خطای زیادی را وارد مسئله نمی کند. اما برای دستیابی به نتیجه قطعی سایر متغیرهای حالت پیش بینی شده با دو مدل هم مقایسه می شوند. شکل ۱۰ تا ۱۳ تغییرات کرنش معادل و تنش سیلان را در امتداد نواحی برش اولیه و ثانویه که توسط شبیه سازی های UL با مدل های ماده کامل و کاهش یافته جانسون-کوک به دست آمده اند نشان می دهند.

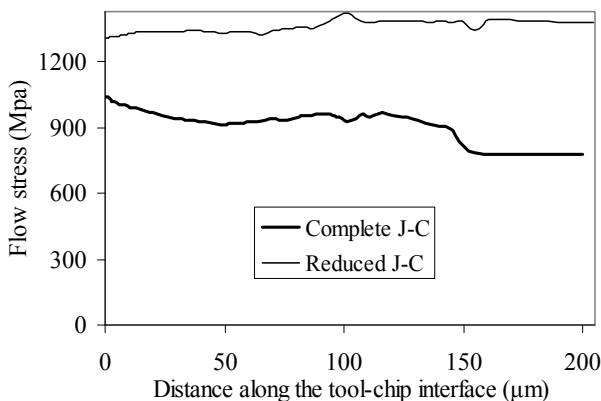


شکل ۸- تغییرات دما در امتداد ناحیه برش اولیه

قابل قبول نبوده و در نتیجه صرف نظر از اثر دما و نرخ کرنش در رابطه ریاضی مدل ماده مجاز نمی باشد.

۷- لزوم حضور پارامترهای دما و نرخ کرنش در رابطه ریاضی مدل ماده

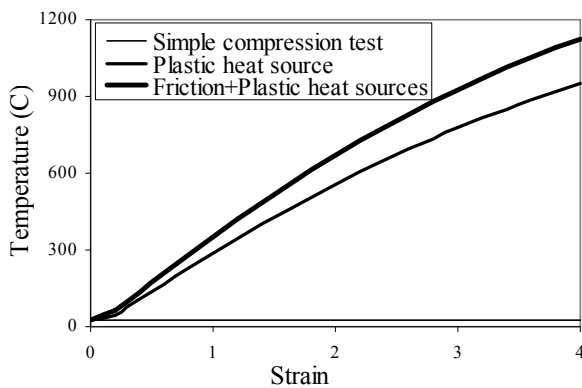
به طور کلی در تحلیل ماشین کاری، دو منبع حرارتی یکی کار ناشی از تغییر شکل پلاستیک و دیگری اصطکاک در محل تماس ابزار و قطعه وجود دارند. اما ناحیه اثر اصطکاک به نوار باریکی در مجاورت لبه ابزار منتهی می شود [۱۱]. اگر تغییر شکل پلاستیک مشابه آنچه در بارگذاری های شبه استاتیکی رخ می دهد به آرامی اتفاق بیفتد بیشتر حرارت تولیدی از طریق مکانیزم های انتقال حرارت جابه جایی و همرفت به آرامی از ناحیه تغییر شکل انتشار می یابند و فرض شرایط همدمای (Isothermal) منطقی خواهد بود اما در ماشین کاری که تغییر شکل بسیار سریع اتفاق می افتد زمان کافی برای پخش حرارت تولید شده وجود نخواهد داشت و پروسه تقریباً بی دررو (Adiabatic) است [۱۱]. بنابراین دما در هر نقطه از ناحیه برش متأثر از حرارت تولیدی از کار پلاستیک در آن نقطه بوده و به این ترتیب با در نظر گرفتن رابطه کار پلاستیک با کرنش و تنش سیلان، همه متغیرهای حالت به نوعی به هم وابسته می باشند و مقادیر دلخواه مستقلی را نمی توانند اختیار کنند. بنابراین به نظر می رسد با توجه به وضعیت ویژه تغییر شکل های فوق العاده سریع در ماشین کاری، با تعیین رابطه متغیرهای حالت با کرنش می توان تنش سیلان را به صورت تابعی از فقط کرنش باز نویسی کرد. این معادل طرح مجدد امکان به کارگیری روابط تنش-کرنش معمولی در توصیف رفتار ماده در ماشین کاری است. برای روشن شدن مطلب، نمونه ای از جنس فولاد AISI 1045 را تحت آزمایش فشار سریع در نظر می گیریم. این آزمایش می تواند کرنش هایی به بزرگی کرنش های متداول ماشین کاری ایجاد کند. فرض



شکل ۱۳- تنش سیلان در امتداد ناحیه برش ثانویه

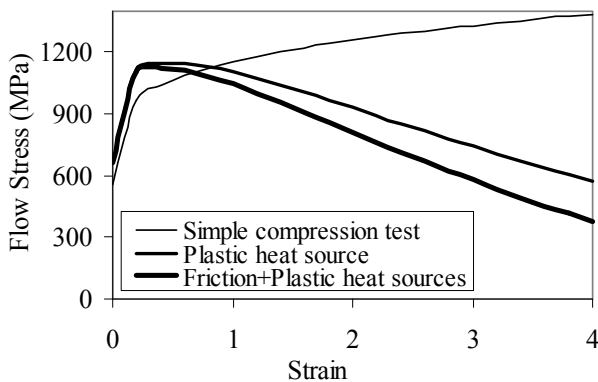
همان طور که در شکل های ۱۰ تا ۱۳ دیده می شود تفاوت مقادیر پیش بینی شده برای ناحیه برش ثانویه به طور قابل ملاحظه ای زیاد است اما در مورد ناحیه برش اولیه این مقادیر مطابقت خوبی را نشان می دهند. در مجموع می توان گفت که با توجه به غلبه اثر دما (شکل ۵) در ناحیه برش ثانویه، صرف نظر از اثر دما و نرخ کرنش معادل صرف نظر از اثر غالب نرم شوندگی متأثر از دما در مقابل سخت شوندگی متأثر از نرخ کرنش است که معادل توصیف رفتاری سخت تر برای ماده است. در نتیجه کرنش های کمتر (شکل ۱۱) و تنش های سیلان بیشتر (شکل ۱۳) در شرایط دمایی تقریباً مشابه (شکل ۹) حاصل خواهد شد. این سؤال ممکن است به ذهن بیاید که چرا به کارگیری فرم کاهش یافته مدل ماده باعث انحراف زیاد دمای پیش بینی شده در شکل ۹ نشده است. دلیل این پدیده می تواند پیش بینی کرنش های کمتر (شکل ۱۱) و تنش های سیلان بیشتر (شکل ۱۳) نسبت به حالت به کارگیری فرم کامل مدل ماده است که سبب تولید کار پلاستیک و اتلاف حرارتی تقریباً یکسان می شود. از طرفی با توجه به استفاده از شرایط اصطکاک مشابه در دو مدل، کار و حرارت ناشی از اصطکاک هم تقریباً یکی بوده و در نتیجه مجموع حرارت تولیدی در دو مدل و در نتیجه دماهای حاصل چندان متفاوت نخواهند بود. با توجه به این که عملکرد مناسب مدل ماده کامل جانسون-کوک قبلاً توسط وزیری و همکاران [۱۴] نشان داده شده است انحراف ۷۵ درصد در پیش بینی تنش سیلان به کمک مدل ماده کاهش یافته

اعمال روش عددی تکرار نوشته شد. شکل ۱۴ تغییرات دمای محاسبه شده برای سه حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- دمای محاسبه شده برای سه حالت

تنش سیلان به کمک رابطه (۴) برای حالت اول و مطابق رابطه (۱) برای دو حالت دیگر محاسبه شد. شکل ۱۵ این مقادیر محاسبه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- تنش سیلان محاسبه شده برای سه حالت

همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود تنش سیلان به دست آمده از نتایج آزمایش ساده استاندارد فشار (حالت اول) به شدت متفاوت از شرایط احتساب منابع حرارتی دیگر است. بنابراین باتوجه به حضور این منابع حرارتی در ماشین‌کاری، به کارگیری منحنی‌های تنش- کرنش که از چنین آزمایشات ساده‌ای به دست آمده و در هندبوک‌های مهندسی در دسترس می‌باشند مناسب نمی‌باشد. اما در حالت دوم باتوجه به سرعت پروسه و بی‌دررو بودن آن، متغیرهای حالت به یکدیگر وابسته بوده و به نظر می‌رسد تنش سیلان را می‌توان به صورت تابعی از فقط کرنش که

می‌شود که نمونه در حضور منبع حرارتی خارجی در مدت ۱۰ میکروثانیه تا کرنش ۴ تغییر شکل داده شود. هدف بررسی اثر منابع مختلف تولید حرارت است. اولین منبع حرارتی کار پلاستیک است که نرخ شار ویژه حجمی آن مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۲۱].

$$\dot{q}_{pl} = \frac{\zeta \cdot k \dot{W}^P}{\rho} \quad (5)$$

که \dot{W}^P نرخ کار پلاستیک است. k سهمی از کار پلاستیک است که به گرما تبدیل می‌شود و ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود. ζ معادل مکانیکی گرما است و برابر ۱/۰ خواهد بود و ρ چگالی قطعه کار است.

منبع حرارتی دیگر منبعی خارجی است که اگر معادل‌سازی با ماشین‌کاری مدنظر باشد این منبع حرارتی، اصطکاک خواهد بود و شار ویژه آن با رابطه (۶) مشخص می‌شود [۲۱].

$$\dot{q}_{fr} = F_{fr} \cdot v_r \cdot \zeta \quad (6)$$

که F_{fr} نیروی اصطکاک، v_r سرعت نسبی لغزش ابزار و براده و ζ معادل مکانیکی حرارت ($\zeta = 1.0$) است. اگر چه اصطکاک نقش مهمی را در تغییر شکل آزمایش فشار ایفا نمی‌کند ولی در تولید حرارت در تماس ابزار و براده در ماشین‌کاری بسیار مؤثر است. بنابراین مقدار معقولی (کار ویژه اصطکاک برابر 1 GJ/m^3) به عنوان نرخ حرارت اصطکاک در نظر گرفته شد. در این تحقیق تغییرات دما و تنش سیلان در سه حالت مختلف بررسی شد. اولین حالت مشابه آزمایش ساده و استاندارد فشار آهسته (رابطه (۴)) است که معادل فرض صرف‌نظر از حرارت تولیدی است. باتوجه به سرعت کم پروسه حرارت تولیدی انتقال یافته و در نتیجه دما نمونه تغییر چندانی پیدا نمی‌کند پس فرض پروسه هم‌دما منطقی خواهد بود. دومین حالت پروسه بی‌دررویی است که در آزمایش فشار سریع اتفاق می‌افتد و فقط کار اتلافی پلاستیک منبع تولید حرارت است و در نهایت سومین حالت انجام همان آزمایش فشار سریع ولی این بار در حضور منبع حرارتی مستقل خارجی است. برای حل دستگاه معادلات مربوطه، برنامه کامپیوتری برای

مرتبه بزرگی هر اثر را ارائه می‌دهد و ثابت می‌کند که این اثرات متقابل نمی‌توانند به‌طور کامل خنثی‌کننده همدیگر باشند. بنابراین بر خلاف فرآیندهای شکل‌دهی، منحنی-های ساده تنش-کرنش به‌دست آمده از آزمایش استاندارد کشش نمی‌توانند بیانگر رفتار ماده در تحلیل ماشین کاری باشند و باید اثر نرخ کرنش و دما در رابطه ریاضی مدل ماده لحاظ شود. در این تحقیق ضمن به‌کارگیری مدل‌های ماده با و بدون احتساب اثر این متغیرهای حالت در شبیه‌سازی ماشین کاری نشان داده شد که انحراف جواب‌ها بسیار قابل توجه می‌باشند. بعلاوه نشان داده شد که حضور مستقیم پارامتر نرخ کرنش در رابطه ریاضی مدل ماده می‌تواند بیانگر تأثیر سرعت پروسه ماشین کاری باشد و حضور پارامتر دما نیز در رابطه ریاضی مدل ماده ضروری است تا بتوان اثر منبع حرارتی مستقل خارجی مثل اصطکاک را در تغییر رفتار سیلان ماده در ماشین کاری لحاظ کرد. به این ترتیب در فرم ریاضی مدل ماده مناسب برای توصیف رفتار پلاستیک ماده در ماشین کاری تنش سیلان باید تابعی از هر سه متغیر کرنش، نرخ کرنش و دما باشد. لازم است خاطر نشان گردد مدل جانسون-کوک که خصوصیات فوق را دارا می‌باشد و به نحو گسترده‌ای در توصیف رفتار پلاستیک فلزات در مدل سازی ماشین کاری به کار رفته است نمی‌تواند مدل دقیقی باشد چون اثر سه پارامتر کرنش، نرخ کرنش و دما را به‌صورت مستقل بر تنش سیلان به‌کمک توابعی مجزا مدل کرده و بعد به‌کمک آزمایش ضرائب مورد نظر را برای مواد مختلف تعیین کرده‌است. درحالی‌که مطابق مباحث مطرح شده در این مقاله در فرآیندهای بسیار سریعی نظیر ماشین کاری، سهم قابل توجهی از حرارت می‌تواند در اثر تغییر شکل پلاستیک (کرنش) بوجود آید و این در شرایطی است که حتی ممکن است اصلاً منبع حرارتی خارجی هم وجود نداشته باشد. در چنین وضعیتی اثر دما و کرنش و نرخ کرنش کوپله خواهند بود. بنابراین فرم ریاضی مدل جانسون-کوک فرم نهایی نیست و نیاز به تحقیق در این رابطه همچنان وجود خواهد داشت.

توصیف‌کننده منحنی مربوطه در شکل ۱۴ است نشان داد. اما این منحنی واحدی نبوده و ضرائب رابطه ریاضی آن با سرعت انجام پروسه تغییر خواهند کرد. در نتیجه لازم است که متغیر حالت متناظر که نرخ کرنش است در مدل ماده کاربردی در ماشین کاری ظاهر شود تا اثر سرعت پروسه ماشین کاری را لحاظ کند. اما همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ دیده می‌شود اثر منبع حرارتی خارجی می‌تواند بسیار قابل توجه باشد. با توجه به مستقل بودن اثر این منبع حرارت خارجی که برای پروسه ماشین کاری می‌تواند همان اصطکاک باشد متغیر حالت متناظر آن که دما است باید در فرم ریاضی مدل ماده کاربردی در تحلیل این پروسه ظاهر شود تا این اثر مستقل را اعمال کند. حال می‌توان تفاوت انحراف مشاهده شده در منحنی‌های مربوط به نتایج شبیه‌سازی ماشین کاری با به‌کارگیری مدل‌های ماده کامل و کاهش-یافته در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ را توجیه کرد. همان‌طور که دیده می‌شود وجود منبع حرارتی خارجی اصطکاک در ناحیه برش ثانویه و عدم حضور پارامتر دما در مدل ماده کاهش یافته سبب شده که انحراف نتایج در این ناحیه شدیدتر باشد و به‌کارگیری فرم کاهش یافته مدل ماده خطای بیشتری را وارد مسئله کند.

۸- نتیجه‌گیری

اگر چه بزرگی کرنش، نرخ کرنش و دماهای ماشین کاری چندین مرتبه بیشتر از آن است که در فرآیندهای شکل-دهی دیده می‌شود اما نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مشابه این فرآیندها، کرنش سختی بیشترین اثر را در تغییر تنش سیلان فلز دارد. اما در پروسه ماشین کاری با تغییر شکل‌های بزرگ و فوق‌العاده سریع، نرخ حرارت‌دهی و نرخ کرنش‌دهی به حدی بالا است که اثرات سخت-شوندگی ناشی از نرخ کرنش و نرم‌شوندگی حرارتی به‌طور نسبی قابل توجه خواهند بود. نتایج این تحقیق تخمینی از

مراجع

- [1] Fang, N. (2005). "A new quantitative sensitivity analysis of the flow stress of 18 engineering materials in machining". *Journal of Engineering Materials- T ASME*, Vol. 127, pp. 192-196.
- [2] Merchant, M.E. (1945). "Mechanics of the machining process, *Journal of Applied Physics*". Vol. 16, pp. 267.
- [3] Spaans, C. (1972). "Treatise on the streamlines and the stress, strain, and strain rate distribution, and on stability in the primary shear zone in metal cutting". *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 94, pp. 690-696.
- [4] Zorev, N.N. (1966). "Machining Mechanics". Pergamon Press, Oxford.
- [5] Von Turkovich, B.F. (1970). "Shear stress in machining". *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 92, pp. 151.
- [6] Shaw, M.C. (1948). "Metal cutting principles". Clarendon Press, Oxford.
- [7] Murarka, P.D., Hinduja, S., Barrow, G. (1981). "Influence of strain, strain-rate and temperature on the flow stress in the primary deformation zone in metal cutting". *International Journal of Machine Tools Design and Research*, Vol. 21, pp. 207-216.
- [8] Johnson, G.R., Cook, W.H. (1983). "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain-rates and high temperatures". *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, Hague, The Netherlands, pp. 541-547.
- [9] Calamaz, M., Coupard, D., Girot, F. (2008). "A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 275-288.
- [10] Vaziri Sereshk, M.R., Mashayekhi, M., Salimi, M. (2012). "The contribution of history in plastic behavior of metals in machining". *Journal of Engineering Materials-T. ASME*, Vol. 134, pp. 021007-1 to -7.
- [11] Astakhov, V.P. (1999). "Machining mechanics". CRC Press., Florida.
- [12] Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y. (2000). "Metal machining; Theory and application". John Wiley & Sons Inc., New York.
- [13] Trent, E.M., Wright, P.K. (2000). "Metal cutting". Fourth ed., Butterworth Heinemann, Oxford.
- [14] Vaziri, M.R., Salimi, M., Mashayekhi, M. (2011). "Evaluation of chip formation simulation models for material separation in the presence of damage models". *Simulation Modeling Practices and Theory*, Vol. 19, pp. 718-733.
- [15] Adibi-Sedeh, A.H., Vaziri, M., Pednekar, V., Madhavan, V., Ivester, R. (2005). "Investigation of the Effect of Using Different Material Models on Finite Element Simulations of Machining". *Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*, Chemnitz, Germany, pp. 215-224.
- [16] Johnson, G.R., Cook, W.H. (1985). "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains strain rates temperatures and pressures". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, Issue 1, pp. 31-48.
- [17] Jaspers, S.P.F.C. (1999). "Metal cutting mechanics and material behaviour". Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- [18] Vaziri, M.R., Salimi, M., Mashayekhi, M. (2010). "A new calibration method for ductile fracture models as chip separation criteria in machining". *Simulation Modeling Practices and Theory*, Vol. 18, pp. 1286-1296.
- [19] Zorev, N.N. (1963). "Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting". *International Research in Production Engineering*, pp. 42-49.
- [20] Ivester, R.W., Kennedy, M., Davies, M., Stevenson, R., Thiele, J., Furness, R., Athavale, S. (2000). "Assessment of machining models: progress report". *Journal of Machining Sciences and Technology*, Vol. 4, Issue 3, pp. 511-538.

- [21] Bil, H., Kilic, S.E., Tekkaya, A.E. (2004). "A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 933–944.