

## شبیه سازی عددی فرآیندهای ماشین کاری با استفاده از معیار آسیب برشی هویوترا

فرهاد حاجی ابوطالبی<sup>۱\*</sup>، شهریار محققیان<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۱/۲۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷	در فرآیندهای ماشین کاری برداشتن براده از طریق اعمال نیروها انجام می شود. بنابراین پیش بینی نیروها و تخمین انرژی مورد نیاز برای تعیین راندمان این فرآیندها بسیار مهم است. در این تحقیق ابتدا، با استفاده از مدل آسیب برشی هویوترا در کد آباکوس صریح، تعدادی از فرآیندهای متداول ماشین کاری مانند صفحه تراشی، روتراشی، کف تراشی و سوراخ کاری شبیه سازی می گردد. با انجام شبیه سازی ها، تغییرات نیروی وارد بر ابزار، نیروی حداکثر و هم چنین مکانیزم تشکیل براده در هر یک از فرآیندهای فوق پیش بینی می شود. سپس، به منظور ارزیابی مدل آسیب برشی و خواص ماده، نتایج شبیه سازی ها با نتایج روابط تئوری و تجربی مقایسه می گردد. مقایسه نتایج عددی و تجربی آشکار می کند که مدل آسیب برشی هویوترا به خوبی می تواند شروع و رشد آسیب، تشکیل براده و نیروهای وارد بر ابزار را در فرآیندهای ماشین کاری پیش بینی نماید.
<b>واژگان کلیدی:</b> شبیه سازی عددی، فرآیندهای ماشین کاری، مکانیک آسیب، معیار آسیب برشی هویوترا.	

### ۱- مقدمه

فرآیندهای ماشین کاری یکی از روش های متعدد برای ساخت و تولید قطعات مکانیکی به شمار می آیند. در این فرآیندها با برداشتن و جداسازی بخش های غیر ضروری از روی ماده خام، می توان به قطعه ای با شکل هندسی مناسب دست یافت. فرآیندهای ماشین کاری بسته به مکانیزم برداشتن و جدا سازی براده، خود به دو دسته سنتی<sup>۱</sup> (تراش کاری، سوراخ کاری، فرز کاری و سنگ زنی) و غیر سنتی (الکتروشیمیایی<sup>۲</sup>، تخلیه الکتریکی<sup>۳</sup> و آلتراسونیک) تقسیم بندی می شوند.

اگرچه جدا کردن براده از فلز مشکل است اما امروزه اکثر فلزات و مواد به صورت اقتصادی، با راندمان بالایی ماشین کاری شده و قطعات مکانیکی با شکل های هندسی مختلفی تولید می گردند. اهمیت فرآیندهای ماشین کاری آن قدر زیاد است که بدون آن هیچ گونه هواپیما، کشتی، خودرو، تراکتور، ماشین آلات راه سازی، تجهیزات نظامی، لوازم خانگی، تجهیزات پزشکی و رفاهی را نمی توان تولید نمود. ماشین کاری معمولا بعد از فرآیندهای دیگر تولید مانند ریخته گری، آهنگری، نورد، اکستروژن، متالورژی پودر، جوش کاری و غیره بر روی قطعات انجام می شود. سایر

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: f.hajjaboutalebi@eng.ui.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه اصفهان

۲. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه خمینی شهر

<sup>1</sup>. Traditional Machining (TM)

<sup>2</sup>. Electro Chemical Machining (ECM)

<sup>3</sup>. Electro Discharge machining (EDM)

کاری هستند. مدل پلاستیک، تغییرات تنش سیلان ماده را نسبت به کرنش، نرخ کرنش و دما نشان می‌دهد. اما برای کامل شدن مدل پلاستیک، لازم است مدل آسیب هم اضافه شود تا گسیختگی ماده نیز قابل پیش‌بینی باشد. بنابراین در مدل‌های اجزاء محدود، جزیی که دارای آسیب بحرانی است توانایی تحمل بار را از دست داده و به شکل براده از قطعه جدا می‌شود [۲].

در سال ۱۹۷۴ عبدال منعم<sup>۱</sup> و همکارش تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های پسماند زیر سطحی را در فرآیند پرداخت سطوح مورد بررسی قرار دادند [۳]. ایشان در این تحقیق، فرآیند پرداخت قطعاتی از جنس آلومینیوم، روی و برنز، با سرعت‌های مختلف تیغه ابزار و استفاده از روانکار تترا کلرید کربن را مورد بررسی قرار داده و نتایج تحلیلی حاصله را با نتایج تجربی، مقایسه نمودند.

شینکر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۱ مکانیزم‌های آسیب زیر سطحی برای ماشین‌کاری شیشه‌های اپتیکی با تیغه الماسی در سرعت‌های بالا را مطالعه نمود [۴]. روش کار در این تحقیق به صورت تجربی و مشاهده به وسیله میکروسکوپ‌های الکترونی با دقت بسیار بالا بود.

در سال ۲۰۰۲ ایوجن<sup>۳</sup> و همکارش، برش متعامد فولاد ابزار عملیات حرارتی شده AISI H13 و براده برداری تکه تکه، پیوسته را با استفاده از معیار آسیب جانسون- کوک<sup>۴</sup> شبیه سازی نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که توزیع درجه حرارت و تنش بسته به نوع براده ایجاد شده متفاوت است. ایشان نتایج حاصله را با اطلاعات تجربی مقایسه کرده و اعتبارسنجی نمودند [۵].

ازل<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۶ تاثیر مدل‌های اصطکاکی را در شبیه سازی المان محدود فرآیندهای ماشین‌کاری مورد بررسی قرار داد. وی در این تحقیق، با استفاده از روش لاگرانژ به روز شده برای بیان مدل المان محدود تشکیل براده در فرآیند برش متعامد فولادهای خوش تراش، توزیع تنش

فرآیندها تنها شکل کلی قطعه را ایجاد نموده و ماشین‌کاری، قطعه نهایی را با ابعاد دقیق، تلرانس‌های ابعادی و صافی سطح مطلوب تولید می‌کند.

چون اساس فرآیندهای ماشین‌کاری برداشتن براده از طریق اعمال نیروها می‌باشد، بنابراین بسیاری از پارامترها بر روی مقادیر نیروها و در نتیجه راندمان فرآیندهای ماشین‌کاری تاثیر می‌گذارند. لذا تخمین انرژی مصرفی و پیش‌بینی نیروها از مهم‌ترین اهداف مهندسی و محققین می‌باشد. تغییر شکل بسیار زیاد ماده در فرآیند براده‌برداری باعث ایجاد تنش‌ها، کرنش‌ها و نرخ کرنش‌های بزرگ شده که ماشین‌کاری را به فرآیند فیزیکی پیچیده و بسیار غیر خطی برای شبیه‌سازی عددی تبدیل نموده است [۱].

اجزاء محدود از روش‌های پرکاربرد تحلیل عددی است که توسط محققان زیادی برای بررسی این فرآیندها استفاده شده و به کمک ورودی‌های هندسه ابزار، سرعت پیشروی، هندسه قطعه و میزان اصطکاک، نیروهای وارد بر ابزار و تنش‌های پسماند قطعه کار را قابل پیش‌بینی کرده است. تاکنون برای شبیه‌سازی براده برداری در فرآیندهای ماشین‌کاری از مدل‌های مختلفی استفاده شده است. با گسترش تکنیک‌های تجربی و مدل‌های اجزاء محدود، زمینه برای کاربرد مکانیک آسیب پیوسته در شبیه‌سازی فرآیندهای شکل دهی فلزات فراهم شده است. مکانیک آسیب برای تعیین مناطق آسیب دیده، پیش‌بینی نقاط شکست و تخمین نیروهای مورد نیاز در فرآیندها، مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است.

آسیب فلزات، فرآیند فیزیکی پیشرونده‌ای است که در نهایت منجر به شکست آنها می‌شود. مکانیک آسیب، مطالعه‌ای است که کاهش تدریجی یا زوال ناگهانی مقاومت مکانیکی ناشی از بارگذاری، اثرات حرارتی یا شیمیایی را شامل می‌شود.

مدل‌های پلاستیک ماده و آسیب از جمله مهم‌ترین ملزومات شبیه‌سازی اجزاء محدود در فرآیندهای ماشین

<sup>4</sup>.Johnson-Cook

<sup>5</sup>. Ozel

<sup>1</sup>. Abdelmoneim

<sup>2</sup>. Schinker

<sup>3</sup>. Eu-Gen

آسیب برشی هویپوترا توانایی پیش‌بینی رشد آسیب، گسترش آن، ایجاد براده و تخمین نیروهای وارد بر ابزار در فرآیندهای ماشین کاری را دارد.

## ۲- معیار آسیب برشی هویپوترا

معیار شروع آسیب برشی، مدلی برای پیش‌بینی شروع آسیب مربوط به پهنای برش محلی است. این مدل کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب را به صورت تابعی از نسبت تنش برشی و نرخ کرنش در نظر می‌گیرد. این معیار توسط هویپوترا و همکاران در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید [۹]. در این معیار، نسبت تنش برشی  $\theta_s$  و نسبت تنش سه محوره  $\eta$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}\theta_s &= (1 - k_s \eta) \phi \\ \eta &= \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \\ \phi &= \frac{\tau_{max}}{\sigma_{eq}}\end{aligned}\quad (1)$$

تنش  $\sigma_H$ ،  $\sigma_{eq}$  و  $\tau_{max}$  به ترتیب تنش هیدرواستاتیک، تنش معادل فون میز و تنش برشی ماکزیمم می‌باشند. بر طبق این مدل، کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب  $\varepsilon_{eq}^{**}(\eta)$  برابر است با:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{eq}^{**}(\eta) &= [\varepsilon_s^+ \sinh(f(\theta_s - \theta_s^-)) + \\ &\varepsilon_s^- \sinh(f(\theta_s^+ - \theta))]/\sinh(f(\theta_s^+ - \theta_s^-))\end{aligned}\quad (2)$$

$\varepsilon_s^+$  و  $\varepsilon_s^-$ ، کرنش‌های پلاستیک معادل در شروع آسیب نرم برای حالت‌های کشش دو محوری یکسان و فشار دو محوری یکسان هستند. در معیار آسیب برشی هویپوترا، چهار پارامتر  $k_s$ ،  $\varepsilon_s^+$ ،  $\varepsilon_s^-$  و  $f$  وجود دارد که باید به صورت تجربی به دست آیند. این پارامترها تابع جنس ماده، نرخ کرنش و درجه حرارت می‌باشند.

از نمونه‌های کششی دارای شکاف (با مقطع مستطیلی و عمق نصف ضخامت) در جهت ۴۵ درجه نسبت به جهت بارگذاری (با نسبت تنش برشی ۱/۴۶۹)، نمونه‌های کششی

روی سطح زاویه دار تیغه ابزار را تعیین کرده و با نتایج تجربی مطابقت داد [۶].

در سال ۲۰۱۰ وزیری و همکاران توسعه مدل‌های انباشت آسیب با توجه به تاریخچه تنش‌ها، کرنش‌ها، نرخ کرنش‌ها و دماهای تجربه شده را به عنوان معیار جدایی براده، مورد بررسی قرار دادند [۷]. ایشان با توسعه مدل‌های آسیب جانسون-کوک، کاکرافت-لاتم<sup>۱</sup> و ویلکینز<sup>۲</sup> برای براده برداری فولاد ۱۰۴۵، عملکرد مدل‌های فوق را مقایسه کرده و نشان دادند که مدل آسیب جانسون-کوک دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

چن<sup>۳</sup> و همکارش در سال ۲۰۱۰، تشکیل براده در فرآیند سنگ زنی فلزات را با استفاده از روش لاگرانژی-اویلری اختیاری<sup>۴</sup> و تکنیک تطابق شبکه‌بندی مجدد، شبیه‌سازی نمودند [۸]. ایشان با در نظر گرفتن یک ابزار، سنگ زنی را به صورت برش متعامد فرض نموده و شبیه‌سازی‌ها را در حالات دو بعدی و سه بعدی، با دو مدل مختلف برای ماده (جانسون-کوک و سخت‌شدگی همسانگرد) و آسیب جانسون-کوک انجام دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که شکل براده به عمق برش و سرعت پیشروی ابزار بستگی دارد. آنها هم چنین روند تغییرات نیروی وارد بر ابزار بر حسب زمان را به دست آورده و آن را با توجه به رفتار لغزشی و وجود چسبندگی بین ابزار و قطعه کار توجیه نمودند.

در این تحقیق ابتدا، با استفاده از مدل آسیب برشی هویپوترا<sup>۵</sup>، تعدادی از فرآیندهای متداول ماشین‌کاری مانند صفحه‌تراشی، روتراشی، کف‌تراشی و سوراخ‌کاری شبیه‌سازی می‌گردد. با انجام شبیه‌سازی‌ها، روند تغییرات نیروی وارد بر ابزار، نیروی حداکثر و هم چنین چگونگی تشکیل براده در هر یک از فرآیندهای فوق پیش‌بینی می‌شود. به منظور ارزیابی مدل آسیب برشی و خواص ماده، نتایج عددی با نتایج روابط تئوری و تجربی مقایسه می‌گردد. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی آشکار می‌کند که مدل

4. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

5. Hooputra

6. Stress Triaxiality

1. Cockcraft-Latham

2. Wilkins

3. Chen

اطمینان از صحت نتایج عددی و مستقل نمودن آن از اندازه المان و شبکه، همگرایی نتایج بر روی پارامتر آسیب و تنش معادل فون میز انجام می‌گردد.

تحلیل‌ها با اندازه المان ۰/۵ mm شروع شده و با توجه به همگرایی نتایج در اندازه المان ۰/۳۲ mm، کلیه شبیه‌سازی‌ها با اندازه فوق ادامه داده می‌شود. در خلال انجام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود، المان‌هایی که مقدار متغیر آسیب در آن‌ها به یک (شکست کامل) می‌رسد، توانایی تحمل بار را از دست داده و به شکل براده از قطعه کار جدا می‌شوند. با استفاده از تکنیک حذف المان‌های بحرانی، تشکیل براده و برداری به راحتی قابل مشاهده خواهد بود.

### ۳-۱ - شبیه‌سازی فرآیند صفحه تراشی

فرآیند صفحه‌تراشی یک فرآیند ساده تراش است که به وسیله آن سطوح صاف و هم‌چنین انواع سطح مقطع‌ها با شیارها و دندان‌ها، در امتداد قطعه تولید می‌شوند. ماشین‌های صفحه‌تراش در کارگاه‌های ابزارسازی، قالب‌سازی‌ها و کارگاه‌های تعمیراتی کارخانجات مختلف کاربرد فراوانی دارند. برای شبیه‌سازی این فرآیند، یک قطعه کار ثابت و مکعبی شکل به ابعاد ۴۰×۴۰×۸ میلی‌متر و یک تیغه ابزار صلب متحرک در نظر گرفته شد. قطعه کار و ابزار نسبت به هم به گونه‌ای موقعیت‌دهی گردیدند که براده برداری با عمق ۱ و پهنای ۴ میلی‌متر انجام شود. مقادیر زاویه ابزار، ضریب اصطکاک و سرعت ابزار مطابق مرجع [۷] و به ترتیب برابر ۵ درجه، ۰/۵ و ۳/۳ m/s انتخاب گردید. با اعمال خواص مکانیکی، شرایط مرزی و انجام شبیه‌سازی‌های عددی، نتایج تغییر شکل و آسیب در قطعه کار حاصل شد.

شکل ۱ کانتور آسیب برشی و هم‌چنین شکل ۲ نمودار نیروی وارد بر ابزار بر حسب جابجایی آن در خلال انجام فرآیند را نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل ۲ بیان می‌کند، در ابتدای فرآیند نیروی لازم برای براده برداری قطعه

با شکاف موازی جهت بارگذاری (با نسبت تنش برشی ۱/۷۳۲) و آزمایش اریکسن<sup>۱</sup> (با نسبت تنش برشی ۱/۶) می‌توان  $\varepsilon_s^+$ ،  $\varepsilon_s^-$  و  $f$  را به دست آورد.

هویوترا و همکاران پارامترهای فوق را برای دو نوع خاص از آلیاژهای آلومینیوم و فولاد، در دو حالت تغییر شکل شبه استاتیکی و دینامیکی تعیین نمودند [۹-۱۰]. جدول ۱ خواص مکانیکی و پارامترهای آسیب برشی به دست آمده از آزمایش‌های تجربی را برای فولاد AISI ۱۰۴۵ نشان می‌دهد [۱۰]. معیار آسیب برشی هویوترا تا به آنجا ادامه می‌یابد که شرط انتگرالی زیر ارضاء شود.

$$D = \int_0^{\varepsilon_{eq}^{**}} \frac{d\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq}^{**}} = 1 \quad (۳)$$

$D$  متغیر آسیب برشی است که از صفر (ماده بکر) تا یک (شکست کامل) به صورت یکنواخت با تغییر شکل پلاستیک افزایش یافته و در هر مرحله از حل، تغییرات مثبت آن با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Delta D = \frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq}^{**}(\eta)} \quad (۴)$$

جدول ۱ خواص مکانیکی و آسیب برشی فولاد AISI ۱۰۴۵ [۱۰]

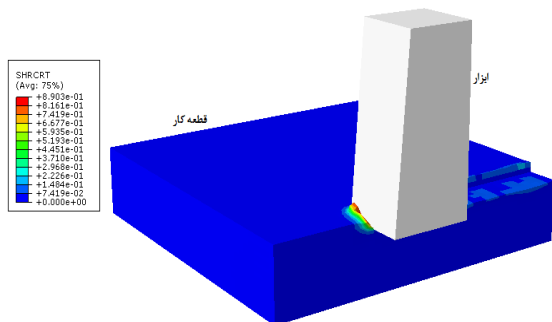
دانسیته	ضریب یانگ	تنش تسلیم	استحکام نهایی
$\rho(kg/m^3)$	$E(GPa)$	$\sigma_{y0}(MPa)$	$\sigma_u(MPa)$
۷۸۰۰	۲۱۰	۷۹۹	۱۲۸۰
$\varepsilon_s^+$	$\varepsilon_s^-$	$f$	$k_s$
۱/۲۲	۰/۸۶	۱/۵۶	۰/۰۳

### ۳-۲ - شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود

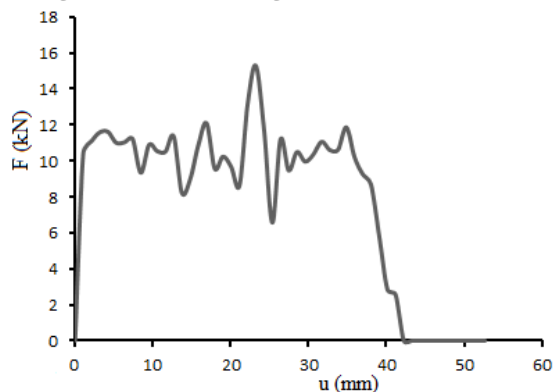
با استفاده از خواص مکانیکی و پارامترهای آسیب برشی ارائه شده در جدول ۱ برای فولاد AISI ۱۰۴۵ و کد آباکوس صریح، تعدادی از فرآیندهای متداول ماشین‌کاری مانند صفحه‌تراشی، روتراشی، کف‌تراشی و سوراخ‌کاری شبیه‌سازی می‌گردد. در انجام شبیه‌سازی‌ها برای قطعه کار از المان‌های سه‌بعدی هشت‌گره‌ای با نقاط انتگرال‌گیری کاهش یافته همراه با کنترل پدیده ساعت‌شنی و از المان صلب مجزا برای ابزار استفاده می‌گردد. هم‌چنین برای

<sup>۱</sup>. Erichsen

نیوتن محاسبه می‌شود. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقدار نیروی ماکزیمم حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی نسبت به مقدار محاسبه شده از روابط تجربی در حدود ۱۰ درصد خطا دارد. خطای فوق با توجه به تقریبی بودن روابط تجربی، قابل قبول است.



شکل ۱ کانتور آسیب برشی در فرآیند صفحه تراشی



شکل ۲ نمودار نیرو-جابجایی ابزار در فرآیند صفحه تراشی

### ۲-۳- شبیه سازی فرآیند روتراشی

فرآیند روتراشی، یک فرآیند ساده تراش است که طی آن سطوح خارجی استوانه‌ای و مخروطی ایجاد می‌شود. در این فرآیند، قطعه کار در مقابل یک ابزار تراش تک لبه که به صورت طولی تغذیه می‌گردد با سرعت مشخصی می‌چرخد. با حرکت طولی ابزار تراش بر روی قطعه کار، عمل براده برداری با عمق و سرعت برشی معین انجام می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی فرآیند روتراشی، قطعه کار به صورت شافتی توپر به قطر ۲۰ میلی متر و متصل به سه نظام در حال دوران و ابزار تراش مطابق تیغه‌های استاندارد تراشکاری شرکت سندویک<sup>۱</sup> سوئد [۱۲] در نظر گرفته شد. میزان باربرداری ۱ میلی‌متر، مقادیر زاویه ورود ابزار، ضریب

سریعاً رشد کرده و در زمان براده برداری به مقدار ماکزیمم خود یعنی ۱۵/۲۹ کیلو نیوتن می‌رسد. با حرکت ابزار و رسیدن آن به انتهای قطعه، از مقدار نیرو کاسته شده و پس از براده برداری کامل قطعه، مقدار آن به صفر می‌رسد. به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی، مقدار نیروی ماکزیمم به دست آمده با مقدار حاصل از فرمول‌های تجربی مقایسه می‌گردد.

بر طبق تئوری‌های براده‌برداری و اصول ماشین کاری فلزات، نیروی لازم برای براده‌برداری در این فرآیند از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۱۱].

$$F = \frac{tbK_s}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (5)$$

که در آن،  $t$  ضخامت براده برش نخورده (عمق براده برداری)،  $b$  پهنای برش،  $K_s$  استحکام برشی ماده،  $\phi$  زاویه برش،  $\beta$  زاویه اصطکاک و  $\alpha$  زاویه ابزار هستند. استحکام برشی ماده تقریباً ۰/۸ استحکام کششی بوده و زوایای  $\beta$  و  $\phi$  از فرمول‌های زیر محاسبه می‌گردند.

$$\begin{aligned} \beta &= \tan^{-1} \mu \\ \phi &= \tan^{-1} \left( \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \right) \\ r &= \frac{t}{t_c} \end{aligned} \quad (6)$$

در روابط فوق،  $t_c$  ضخامت براده برش خورده است که تابع جنس قطعه کار بوده و از اندازه‌گیری مستقیم تعیین می‌گردد. این پارامتر برای فولاد ۱۰۴۵ به روش تجربی، ۱/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

با قراردادن مقدار فوق و هم‌چنین مقادیر عمق براده‌برداری، ضریب اصطکاک و زاویه ابزار در معادله ۶، پارامترهای  $\beta$ ،  $r$  و  $\phi$  به ترتیب برابر با ۲۶/۵۶ درجه، ۰/۸۳ و ۴۲ درجه به دست می‌آیند. هم‌چنین با توجه به مقدار استحکام کششی ماده مطابق جدول ۱، استحکام برشی آن برابر با ۱۰۲۴ مگاپاسکال تعیین می‌گردد. با جایگزینی مقادیر حاصله در معادله ۵ مقدار نیروی لازم برای براده برداری ۱۳/۸۹ کیلو

<sup>۱</sup>. Sandvik

مطابق شکل، مقدار نیروی مماسی در مقاطعی از زمان یعنی زمانی که قطعه کار یک دور کامل چرخیده و در جهت محیطی کاملاً براده برداری شده، به شدت کاهش پیدا کرده و این سیکل مجدداً تکرار می‌گردد. به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی، مقدار نیروی ماکزیمم به دست آمده با مقدار حاصل از فرمول‌های تجربی مقایسه می‌شود. بر طبق تئوری‌های براده‌برداری و اصول ماشین‌کاری فلزات، مولفه مماسی نیروی براده‌برداری مهم‌ترین مولفه نیرو بوده و در اکثر محاسبات به عنوان نیروی براده برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نیرو برابر است با [۱۳]:

$$F = AK$$

$$A = af$$

$$K = \frac{K_c}{h^m} c_1 c_2 \quad (7)$$

$$h = f \sin \kappa$$

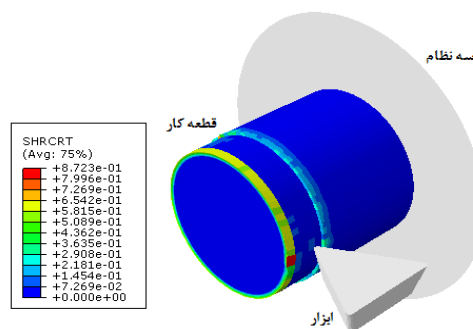
$A$  سطح مقطع براده،  $K$  تنش براده برداری،  $a$  عمق بار،  $f$  میزان پیشروی ابزار بر واحد دور،  $K_c$  نیروی براده برداری ویژه ماده بر واحد سطح،  $h$  ضخامت براده و  $\kappa$  زاویه ورود ابزار می‌باشند. هم‌چنین  $m$ ،  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب تصحیح تجربی بوده که تابع جنس، فرآیند براده‌برداری و سرعت برشی  $V_c$  هستند و از جداول مربوطه تعیین می‌گردند. سرعت برشی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_c = \pi D \omega \quad (8)$$

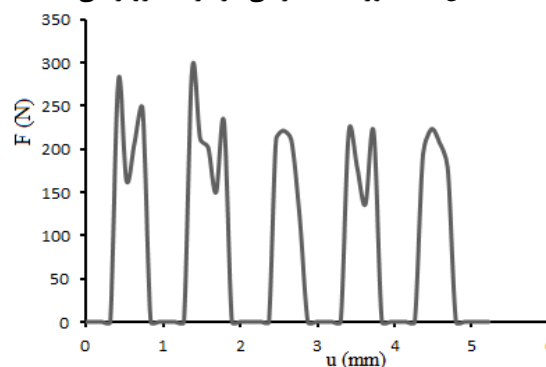
$D$  قطر قطعه و  $\omega$  سرعت دورانی آن می‌باشد. با قرار دادن مقادیر قطر و سرعت دورانی شافت در معادله ۸، سرعت برشی  $18/84 \text{ m/s}$  تعیین می‌گردد. با توجه به مقدار سرعت برشی به دست آمده و مراجعه به جداول مرجع [۱۳]، پارامترهای  $K_c$ ،  $m$ ،  $c_1$  و  $c_2$  برای فولاد مورد نظر به ترتیب برابر با  $1450$  مگاپاسکال،  $0/27$ ،  $0/9$  و  $1$  به دست می‌آیند. هم‌چنین با داشتن مقادیر میزان پیشروی و زاویه ورود ابزار، ضخامت براده نیز برابر با  $0/35 \text{ mm}$  حاصل می‌گردد. با جایگزینی مقادیر حاصله در معادله ۷ مقدار نیروی لازم برای براده برداری  $278/4$  نیوتن محاسبه می‌شود. مقایسه مقدار نیروی ماکزیمم حاصل از فرمول‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، خطای قابل قبول  $5$  درصدی را نشان می‌دهد.

اصطکاک، میزان پیشروی ابزار و سرعت دوران سه نظام به ترتیب برابر  $60$  درجه،  $0/5$ ،  $0/4 \text{ mm/rev}$  و  $300 \text{ rad/s}$  انتخاب گردید. پس از انجام شبیه‌سازی‌های عددی، نتایج کانتور آسیب برشی و نمودار نیروی مماسی وارد بر ابزار مطابق شکل‌های ۳ و ۴ حاصل شد. نیروی مماسی یا برشی، مولفه‌ای از نیرو است که در امتداد سرعت تراش بوده، سبب خمش ابزار می‌گردد. این نیرو مهم‌ترین مولفه نیرو است و در اکثر محاسبات به عنوان نیروی براده برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. مولفه‌های دیگر نیروی براده برداری، مولفه محوری (در امتداد حرکت پیشروی ابزار) و مولفه شعاعی (عمود بر محور قطعه کار) می‌باشند که دارای مقادیر کوچکتری بوده و از اهمیت کمتری برخوردار هستند [۱۳].

مطابق شکل ۴، در ابتدای فرآیند نیروی لازم برای براده برداری قطعه سریعاً رشد کرده و در زمان براده برداری به مقدار ماکزیمم خود یعنی  $292/8$  نیوتن می‌رسد. با حرکت ابزار و رسیدن آن به انتهای قطعه، از مقدار نیرو کاسته شده و پس از براده برداری کامل قطعه، مقدار آن به صفر می‌رسد.

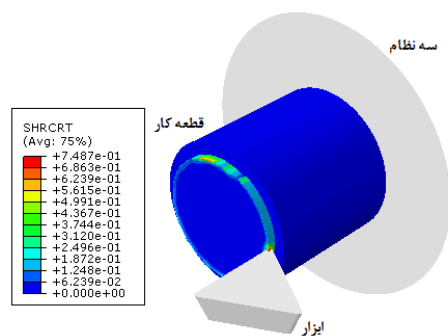


شکل ۳ کانتور آسیب برشی در فرآیند روتراشی

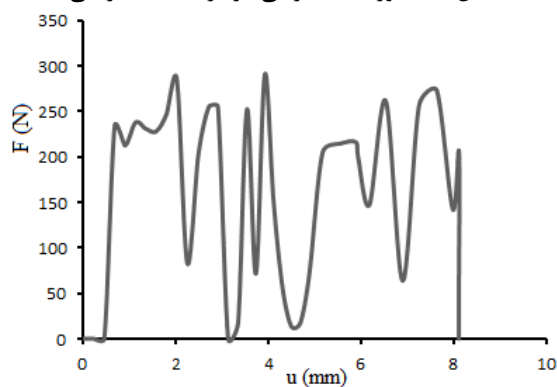


شکل ۴ نمودار نیرو- جابجایی ابزار در فرآیند روتراشی

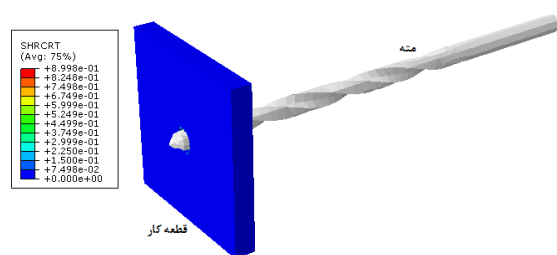
گرفته شد. مقادیر زاویه ورود مته، ضریب اصطکاک، میزان پیشروی و سرعت دوران مته به ترتیب برابر ۹۰ درجه، ۰/۵ mm/rev و ۲۳۰ rad/s انتخاب گردید. پس از انجام شبیه‌سازی‌های عددی، نتایج کانتور آسیب برشی و نمودار نیروی مماسی وارد بر مته مطابق شکل های ۷ و ۸ حاصل شد.



شکل ۵ کانتور آسیب برشی در فرآیند کف تراشی



شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی ابزار در فرآیند کف تراشی



شکل ۷ کانتور آسیب برشی در فرآیند سوراخ کاری

همان‌گونه که شکل ۸ نشان می‌دهد، در ابتدای فرآیند نیروی لازم برای سوراخ کاری قطعه سریعاً رشد کرده و در زمان براده‌برداری به مقدار ماکزیمم خود یعنی ۱۱۴۷ نیوتن می‌رسد. با حرکت ابزار و رسیدن آن به انتهای قطعه، از مقدار نیرو کاسته شده و پس از براده برداری کامل قطعه، مقدار آن به صفر می‌رسد.

### ۳-۳- شبیه‌سازی فرآیند کف تراشی

فرآیند کف تراشی (پیشانی تراشی)، یک فرآیند ساده تراش است که طی آن سطح مقطع قطعه تراشیده می‌شود. در این فرآیند، قطعه کار در مقابل یک ابزار تراش تک لبه که به صورت عرضی تغذیه می‌گردد با سرعت مشخصی می‌چرخد. با حرکت عرضی ابزار تراش بر روی قطعه، عمل براده برداری با عمق و سرعت برش معین انجام می‌شود. در کف تراشی، پیشروی ابزار به سمت مرکز بوده که باعث کاهش طول قطعه کار می‌گردد.

به منظور شبیه‌سازی فرآیند کف تراشی، مساله روتراشی قبلی با همان پارامترها در نظر گرفته شده و تنها جهت حرکت ابزار به صورت عرضی تعریف می‌گردد. در این حالت زاویه ورود ابزار به داخل قطعه کار ۹۰ درجه می‌باشد. پس از انجام شبیه‌سازی‌های عددی، نتایج کانتور آسیب برشی و نمودار نیروی مماسی وارد بر ابزار مطابق شکل های ۵ و ۶ حاصل شد. مطابق شکل ۶، در ابتدای فرآیند نیروی لازم برای براده‌برداری قطعه سریعاً رشد کرده و در زمان براده برداری به مقدار ماکزیمم خود یعنی ۲۸۵/۱ نیوتن می‌رسد. با حرکت ابزار و رسیدن آن به انتهای قطعه، از مقدار نیرو کاسته شده و پس از براده‌برداری کامل، مقدار آن به صفر می‌رسد. برای محاسبه مقدار نیرو در این فرآیند، کافی است در روابط ۷ مقدار زاویه ورود ابزار ۹۰ درجه در نظر گرفته‌شود. بنابراین مقدار پارامتر  $h$ ، ضخامت براده ۴mm خواهد گردید. با ثابت ماندن مقادیر دیگر پارامترها، مقدار نیروی لازم برای براده‌برداری ۲۶۷/۷ نیوتن محاسبه می‌شود. مقایسه مقدار نیروی ماکزیمم حاصل از فرمول‌های تحلیلی و شبیه‌سازی عددی، خطای قابل قبول ۶ درصدی را نشان می‌دهد.

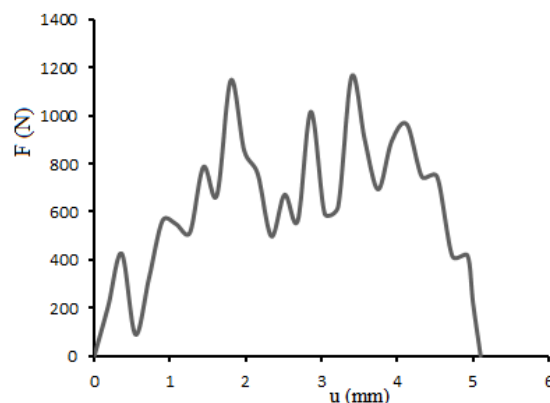
### ۳-۴- شبیه‌سازی فرآیند سوراخ کاری

سوراخ کاری، فرآیندی ساده برای ایجاد سوراخ‌های گرد داخل قطعه می‌باشد. برای شبیه‌سازی این فرآیند، یک قطعه کار ثابت و مکعبی شکل به ابعاد ۴۰×۴۰×۵ میلی‌متر و یک مته ماریپیچ استاندارد به قطر ۵ میلی‌متر در نظر

۷ مقدار نیروی لازم برای سوراخ کاری ۱۰۳۶ نیوتن محاسبه می‌شود. مقایسه نتایج تئوری و عددی نشان می‌دهد که مقدار نیروی ماکزیمم حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی نسبت به مقدار محاسبه شده از روابط تئوری در حدود ۱۰ درصد خطا دارد که با توجه به تقریبی بودن روابط، قابل قبول است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا، با استفاده از مدل آسیب برشی هویوترا در کد آباکوس صریح، تعدادی از فرآیندهای متداول ماشین کاری مانند صفحه تراشی، روتراشی، کف تراشی و سوراخ کاری شبیه سازی شد. با انجام شبیه سازی ها، روند تغییرات نیروی وارد بر ابزار، نیروی حداکثر و هم چنین چگونگی تشکیل براده در هر یک از فرآیندهای فوق پیش بینی گردید. به منظور ارزیابی مدل آسیب برشی و خواص ماده، نتایج حاصل از شبیه سازی ها با نتایج روابط تئوری و تجربی مقایسه شد. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی نشان داد که مدل آسیب برشی هویوترا توانایی پیش بینی رشد آسیب، گسترش آن، ایجاد براده و تخمین نیروهای وارد بر ابزار در فرآیندهای ماشین‌کاری را دارد. بنابراین نتیجه گیری می‌شود که این معیار، معیاری مناسب برای تخمین نیروها و انرژی مصرفی در فرآیندهایی با تغییر شکل‌های برشی می‌باشد.



شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی ابزار در فرآیند سوراخ کاری

نیروی لازم برای سوراخ کاری از معادلات ۷ و ۸ قابل محاسبه است با این تفاوت که در این فرآیند سطح مقطع و ضخامت براده از روابط زیر محاسبه می‌گردند [۱۳].

$$\begin{aligned} A &= 0.5 * d * f \\ h &= 0.43 * f \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن،  $d$  قطر مته و  $f$  میزان پیشروی آن می‌باشد. هم چنین برای محاسبه سرعت برشی کافی است در معادله ۸ قطر و سرعت دورانی مته قرار داده شود. با قرار دادن مقادیر فوق در معادله ۸ سرعت برشی  $3/61 \text{ m/s}$  تعیین می‌گردد. با توجه به مقدار سرعت برشی به دست آمده و مراجعه به جداول مرجع [۱۳]، پارامترهای  $c_1, m, K_c$  و  $c_2$  برای فولاد مورد نظر به ترتیب برابر با  $1450 \text{ مگاپاسکال}$ ،  $0.27$ ،  $1$  و  $1/2$  به دست می‌آیند. با جایگزینی مقادیر حاصله در معادله

#### ۵- مراجع

- [1] Trent, E., M., Wright, P., K., (2000). Metal Cutting, Fourth Edition, Butterworth-Heiemann, Oxford.
- [2] Lemaitre, J., (1992). A Course on Damage Mechanics, Berlin, Springer Verlag.
- [3] Abdelmoneim, M., S., Scrutton, F. (1974). Sub-Surface Damage and Edge Sharpness in Finish Machining. Wear, Vol. 27, pp. 35-46.
- [4] Schinker, M., G., (1991). Sub-Surface Damage Mechanisms at High-Speed Ductile Machining of Optical Glasses. Prec. Eng. Vol. 13, pp. 208-218.
- [5] Eu-Gen, N., G., Aspinwall, D., K., (2002). Modeling of Hard Part Machining. J. Mat. Proc. Tech. Vol. 127, pp. 222-229.
- [6] Ozel, T., (2006). The Influence of Frictional Models on Finite Element Simulation of Machining. Int. J. Mach. Tool. Man. Vol. 46, pp. 518-530.



- [7] Vaziri, M., R., Salimi, M., Mashayekhi, M., (2010). A New Calibration Method for Ductile Fracture Models as Chip Separation Criteria in Machining. *Sim. Mod. Prac. Tech.*, Vol. 18, pp. 1286-1296.
- [8] Chen, X., Opoz., T., (2010). Simulation of Grinding Surface Creation– A Single Grit Approach. *Adv. Mat. Res.*, Vol. 126, pp. 23-28.
- [9] Hooputra, H., Gese, H., Del, H., Werner, H., (2004). A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminum Extrusions. *Int. J. Crash.*, Vol. 9, pp. 449-463.
- [10] ABAQUS HTML Documentation, Abaqus Analysis User's Manual, Progressive Damage and Failure, Damage Initiation for Ductile Metals.

[۱۱] صادقی، م.، ح.، (۱۳۸۹)، اصول ماشین کاری فلزات. انتشارات عابد.

[۱۲] حقی، س.، ج.، (۱۳۸۳)، مرجع کامل راهنمای ابزارهای برشی مدرن (شرکت سندویک)، نشر طراح.

[۱۳] رضا اسفندیاری، ج.، (۱۳۸۹) توانایی ماشین کاری، نشر طراح.