

بررسی نیروهای ماشینکاری و شار حرارتی در فصل مشترک ابزار قطعه کار در فرآیند تراشکاری به روش اجزای محدود

رمضانعلی مهدوی نژاد^۱ و محمد خواجه افزلی^۲ محمد رضا رازفر^۳

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۹/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۸)

چکیده

فرایندهای براده برداری، امروزه جزء مهمترین روش‌های تولید قطعات صنعتی است که علت آن، کاربرد بالای این فرایندها از جمله تراشکاری می‌باشد. در این تحقیق، فرآیند روتراشی به کمک نرم‌افزار ABAQUS 6.9 شبیه‌سازی شده به طوری که با تغییر در پارامترهای ماشینکاری، نیروهای ماشینکاری، تنش‌ها و شار حرارتی در محل تماس ابزار و قطعه کار تعیین شده است. سپس با انجام آزمایش‌های تجربی، نیروهای ماشینکاری در دو جهت اندازه‌گیری و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نیروهای به دست آمده از شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد. همچنین پس از کسب نتایج شبیه‌سازی حرارتی، شبیه‌سازی دمای متوسط ابزار و براده با حداکثر ۵۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف با نتایج تجربی تعیین شده و در انتها، پارامترهای مناسب برای ماشینکاری، با توجه به منحنی‌های به دست آمده مشخص شده است.

واژه‌های کلیدی: تراشکاری، شبیه‌سازی، شار حرارتی، نیروهای ماشینکاری، دینامومتر

Investigation of Machining Forces and Heat Flux on Tool/Workpiece Surface Area via Finite Element Method in Turning Process

R. Mahdavi-Nezhad and M. Khaje-Afzali

Mech. Eng. Dep't.
Univ. of Tehran

M.R. Razfar

Mech. Eng. Dep't.
Amir Kabir Univ. of Tech.

(Receipt date: 26 August, 2009; Accept date: 2 February, 2013)

ABSTRACT

Nowadays, material removal is one of the most important processes in industries. In this research, some important parameters in turning process such as; machining forces, stresses and heat flux on tool/workpiece contact area against variations of machining parameters are simulated via ABAQUS 6.9. Then, machining forces in two directions are measured by experimental techniques. Experimental values are compared with simulated results. This comparison shows a very good agreement.

Keywords: Turning, Simulation, Heat Flux, Machining Forces, Dynamometer

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): mahdavin@ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: khajeafzali@alumni.ut.ac.ir

۳- دانشیار: mrazfar@aut.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیندهای ماشینکاری، جزء فرآیندهای سنتی و از قدیمی‌ترین روش‌ها در تولید و شکل‌دهی قطعات محسوب می‌شود. تراشکاری یکی از این فرآیندها است که امروزه به علت پیچیدگی این فرایند و پدیده‌های آن و کاربرد وسیع آن در صنعت، می‌توان تحقیقات بیشتری را در این زمینه ارائه کرد. در سال ۲۰۰۲ تحلیلی از فرایند برش فلزات به کمک المان محدود توسط زیامین دانگه^۱ ارائه شد [۱]. در این پژوهش، عملیات برش متعامد فلزات تحت شرایط کرنش صفحه‌ای به کمک المان محدود تحلیل شده است. همچنین شبیه‌سازی اصطکاک در طول سطح براده و ابزار با قانون تصحیح شده کولمب مدل شده و تنش بحرانی به عنوان معیار جدایش براده انجام شده است. در نهایت، نتایج المان محدود از جمله دما، تنش، کرنش و میدان‌های نرخ کرنش برای یک محدوده تغییرات زاویه براده و مقادیر ضرایب اصطکاک به دست آمده است. این نتایج نشان داده که چگونه اثرات اصطکاک بین ابزار و براده روی میدان‌های توزیع، اثر می‌گذارد. این اثرات، پدیده‌ای نو در زمینه ماشینکاری بود و بر دانش پایه موجود در این زمینه افزوده است. لازم به ذکر است که عملکرد و تکنیک‌های مدل‌سازی مخصوص برای شبیه‌سازی فرآیند برش متعامد را نیز با استفاده از یک کد رایانه‌ای المان محدود می‌توان ارائه و گزارش داد. یافته‌های حاصل از این مقاله، مطالب سودمندی برای درک و گسترش فرآیند برش متعامد فلزات ارائه داده است [۱].

از جمله تحقیقات دیگری که در زمینه ماشینکاری پیشرفته انجام شده مربوط به سال ۲۰۰۴ است که در آن ابزار برشی در سه حالت نوک تیز، نوک‌گرد و پخ‌دار در عملیات روتراشی بررسی شده است [۲]. تحلیل‌های ارائه شده در مقاله حاضر، با استفاده از ابزار غیرپوششی کاربرد سمانته و همچنین نرم افزار DEFORM-2D انجام شده است. همچنین فرآیند شبیه‌سازی به صورت حرارتی-ویسکوپلاستیک کامل با کرنش سختی ایزوتروپیک انجام شده است. در این شبیه‌سازی، نیروها برای هر سه حالت ابزار، اندازه‌گیری و با نتایج تجربی مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر، با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار DEFORM-2D که اساس آن به روز کردن فرمول‌های لاگرانژ برای تغییر شکل‌های پلاستیکی بزرگ است، انجام شده است.

در سال ۲۰۰۵ مقاله‌ای با عنوان توزیع دما در منطقه برشی به کمک روش المان محدود منتشر شد [۳]. در این مقاله، از

یک ابزار برشی با عنوان P20-ISO که دارای سه پوشش می‌باشد، استفاده شده است. پوشش اول دارای لایه از Tic، پوشش دوم لایه‌ای از Al_2O_3 و سومین پوشش، لایه‌ای از Tin بوده است. نرم‌افزار مورد استفاده در این کار DEFORM-2D بوده که به صورت کدنویسی در این نرم‌افزار انجام شده است. همچنین در این روش، قطعه به صورت الاستیک-پلاستیک مدل شده است. شبیه‌سازی فرآیندهای ماشینکاری از سال ۲۰۰۰ به بعد، سرعت بالایی گرفت به طوری که در هر مقاله جزئیات فرآیندها مورد بررسی قرار می‌گرفت. از دیگر مقاله‌هایی که در این زمینه وجود دارد مربوط به سال ۲۰۰۵ است که در آن، ابزار الماسه تک لبه در فرآیند تراشکاری به کمک نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است [۴]. در این مقاله به کمک روش کدنویسی و با استفاده از مش منطبقی^۲ برای جنس AL60601/sicp، فرآیند شبیه‌سازی انجام شده است. مش منطبقی، تکنیک تغییر شکل خالصی است که در مدل کردن براده بدون هیچ ملاک جدایی براده به کار گرفته می‌شود. در سال ۲۰۰۵ ارازولا^۳ یک مدل دوبعدی ارائه کرد که در این فرایند، روتراشی برای جنس AISI ۴۰۴۱ با ابزار P1۰ در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit شبیه‌سازی شده بود [۵]. در این مقاله، فرآیند فرم‌دهی براده به همراه فرمول‌بندی ALE با نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است. همچنین بعد از مقایسه نتایج تئوری با نتایج آزمایشگاهی، مقادیر نزدیک به هم و قابل توجهی به دست آمده است. بدین ترتیب فرآیند شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای اجزای محدود می‌تواند در آینده‌ای نزدیک، برای ماشینکاری امید بخش و قابل اطمینان باشد. در همین سال، بیل^۴ به همراه همکارانش سه نوع از نرم‌افزارهایی که در زمینه ماشینکاری مورد استفاده قرار می‌گرفت را مورد بررسی قرار داده و از بین آنها بهترین نرم‌افزار را برای شبیه‌سازی دوبعدی فرایند ماشینکاری انتخاب کردند [۶]. آنها بین نرم‌افزارهای MSC.MARC- DEFORM2D- AdvantEdge مقایسه‌ای انجام داده و همچنین فرآیند روتراشی را نیز با این سه نرم‌افزار انجام دادند و به این نتیجه کلی رسیدند که با نرم افزار AdvantEdge هم نتیجه ضخامت براده و هم زاویه صفحه برشی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت می‌کند (البته اگر ضریب اصطکاک $m=0/5$ باشد). در سال ۲۰۰۶ هندسه ابزار برشی در فرایند تراشکاری بر اساس تنش‌های باقیمانده ایجاد شده در نزدیکی سطح، بهینه‌سازی شد [۷]. در مقاله حاضر،

2- Adaptive

3- Arrazola

4- Bil

1- Ziaming Dange

به لحاظ حرارت و تماس بین ابزار و قطعه کار مورد بررسی قرار داد [۱۱].

در تحقیق حاضر، فرایند تراشکاری به صورت دوبعدی در نرم افزار ABAQUS شبیه سازی شده و بحث دما و شار حرارتی در فصل مشترک ابزار و قطعه کار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور انجام یک شبیه سازی دقیق، از تئوری شبیه سازی ALE (ترکیب روش اولر - لاگرانژ) استفاده شده است. مزایای این روش این است که در آن مش بندی به صورت آزادانه در تمام مواد حرکت می کند یعنی المان ها نه به ماده متصل هستند و نه در فضا ثابت می مانند. این روش ابزاری قوی برای بهبود مش در مسائل با تغییر شکل بزرگ است. همچنین می توان از روش های اولر یا لاگرانژ به تنهایی استفاده کرد اما به دلیل اینکه از این روش در بیشتر مقالات استفاده شده، در مقاله حاضر نیز از این روش استفاده شده است [۹]. سپس آزمایش های تجربی انجام گرفته و نیروهای ماشینکاری در جهات مختلف تعیین و با نیروهای شبیه سازی مقایسه شده است.

۲- منابع تولید گرما در ماشینکاری

شکل ۱ نواحی تولید گرما در فرایند ماشینکاری را نشان می دهد. گرما ابتدا در ناحیه اول تغییر شکل و به دلیل کار پلاستیک انجام شده بر روی قطعه کار تولید می شود. به علت موضعی بودن این گرما، دما به شدت در این ناحیه بالا رفته و باعث نرمی حاصل از گرما در قطعه کار می شود. در نتیجه این نرمی، در قطعه کار تغییر شکل های بیشتری اتفاق می افتد. همچنین در ناحیه دوم تغییر شکل، به دلیل کار انجام شده برای تغییر شکل براده و غلبه بر اصطکاک لغزشی در فصل مشترک ابزار- براده گرما تولید می شود. و در نهایت، گرمای تولید شده در ناحیه سوم، در فصل مشترک ابزار و قطعه کار به دلیل غلبه بر اصطکاک بین سطح آزاد و سطح ماشینکاری شده است. گرمای تولید شده در ناحیه اول و دوم به شدت تحت تأثیر شرایط ماشینکاری می باشند. گرمای تولید شده در ناحیه سوم، به میزان درگیری سطح آزاد ابزار و سایش این سطح وابسته است.

قطعه کار از جنس مس OFHC است که به کمک مدل Johnson-cook در نرم افزار MARC 2001 مدل شده، همچنین ابزار آن از الماس است و تنش های پسماند به کمک روش X-RAY اندازه گیری شده است. در این مقاله، تنش های پسماند در محدوده های از زاویه براده، شعاع لبه قلم و سرعت برشی اندازه گیری و به کمک نرم افزار MATLAB6.5 بهینه سازی شده است. دومینکو^۱ در سال ۲۰۰۸، آلیاژ Ti6AL4V را به روش high speed machining و همچنین به روش سنتی شبیه سازی و مقایسه کرد [۸].

در مقاله حاضر، آلیاژ به کمک مدل Johnson-Cook برای نرم افزار DEFORM-2D تعریف شده و همچنین فرایند شبیه سازی با استفاده از روش کدنویسی و به کمک روش لاگرانژ انجام شده است. در این مقاله از سه مدل ضرایب برای روش کوک-جانسون استفاده شده و در انتها، نتایج عددی با نتایج تئوری مقایسه و بهترین ضرایب کوک-جانسون از بین این سه مدل انتخاب شده است. لازم به ذکر است که هندسه ابزار برشی دارای زاویه براده ۱۵ درجه، زاویه آزاد ۶ درجه، زاویه لبه برش ۹۰ درجه و زاویه تمایل صفر درجه با شعاع لبه ابزار ۰/۰۳ میلی متر فرض شده است. در انتها، نیروهای ماشینکاری و فرم براده به طور کامل بررسی شده است. در سال ۲۰۰۹ پدرو^۲ به همراه همکارانش، در فرایند روتراشی به روش اجزای محدود، اصطکاک را شبیه سازی کردند [۹]. آنها با استفاده از روش ALE خالص (استفاده از روش لاگرانژی) و روش ALE^۳ ترکیب شده با روش های اولر و لاگرانژ، اصطکاک در فصل مشترک ابزار و قطعه کار را مورد بررسی قرار دادند. آنها با اعمال تنش های برشی مختلف در محل تماس ابزار و قطعه کار، نیروهای برشی و دماها را در ابزار و قطعه کار پیدا کرده و سپس نتایج به دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. در سال ۲۰۱۱ براندو^۴ و مکارانش، شار حرارتی و ضریب جابه جایی حرارت را در سوراخ کاری، به کمک روش انتقال حرارت هدایتی مورد بررسی قرار دادند. لازم به ذکر است که قطعه کار مورد استفاده در این تحقیق AISI H13 بود. همچنین آنها دما و شار حرارتی را نیز در فصل مشترک ابزار و قطعه کار اندازه گیری کردند [۱۰]. لی^۵ در سال ۲۰۱۲، فرایند تراشکاری را به روش اجزای محدود شبیه سازی و به کمک روش Markov Models (HMMs) سایش در ابزار را تخمین زد. وی همچنین سایش را

1- Domenico

2- Pedro

3- Arbitrary Lagrangian Eulerian

4- Brandao

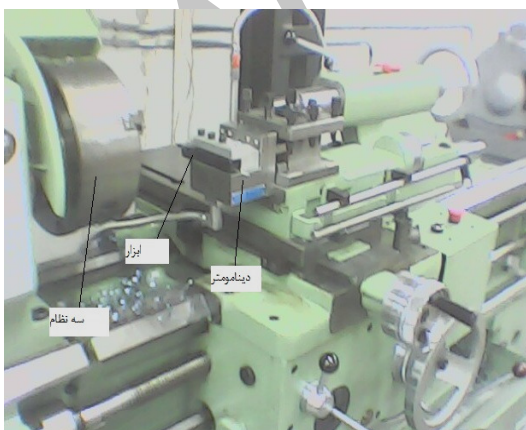
5- Li

مدل اجزای محدود، قطعه کار باید پاسخگوی حالت الاستیک-پلاستیک، و رفتار ترمو-مکانیکی را در طول فرآیند داشته باشد، بنابراین با استفاده از مدل کوک-جانسون^۱، جنس قطعه کار برای نرم‌افزار تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که این مدل پاسخگوی پدیده‌هایی با تغییر شکل زیاد و کرنش‌های بالا است. همچنین این مدل خواص فیزیکی مواد قطعه کار را که به صورت زیر تعریف می‌شود، در طول ماشینکاری نشان می‌دهد:

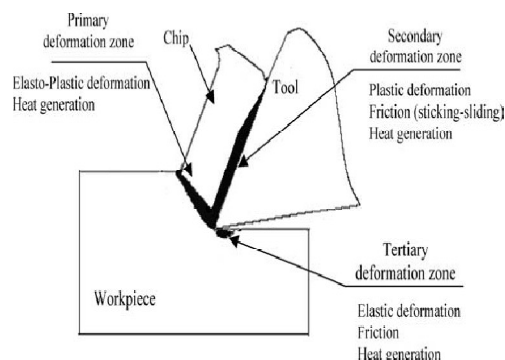
$$\bar{\sigma} = (a + b\bar{\epsilon}^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0}\right) (1 - \bar{T}^m), \quad (1)$$

$$\bar{T} = (T - T_{\text{room}}) / (T_m - T_{\text{room}}), \quad (2)$$

که در آن، $\bar{\epsilon}$ ، $\dot{\bar{\epsilon}}$ ، $\dot{\epsilon}_0$ ، \bar{T} ، T ، T_{melt} ، T_{room} به ترتیب کرنش پلاستیک، نرخ کرنش، نرخ کرنش اولیه، دمای محیط، دمای نقطه ذوب و دما را نشان می‌دهد. همچنین a ، b ، c ، n ، m ثابت‌های ماده هستند که به ترتیب معرف ضریب نرمی حرارتی، ضریب سختی، حساسیت نرخ کرنش، مدول سختی و تنش تسلیم می‌باشند. این ثابت‌ها را نمی‌توان از آزمایش‌های معمولی به دست آورد. اندازه المان در قطعه کار 10×20 میکرومتر است، هرچه اندازه المان بزرگ‌تر شود زمان محاسبات کمتر می‌شود اما دقت حل مسئله کاهش می‌یابد. همچنین اندازه المان‌های ابزار و قطعه کار نمی‌تواند از یک حد معینی کوچک‌تر شود زیرا باعث افزایش شدید در زمان حل می‌شود. در نهایت با انجام سعی و خطا، بهترین اندازه المان برای قطعه کار 10×20 میکرومتر انتخاب شد. بازه تولرانسی این اندازه برای لبه برش که از المان‌های ریزتری برخوردار است بین ± 5 میکرومتر است. نوک ابزار نسبت به بقیه نواحی ابزار، از مش ریزتری برخوردار بوده و همچنین منطقه برش در قطعه کار، مش ریزتری نسبت به مناطق دیگر دارد.



شکل (۲): نحوه اتصال دینامومتر به ابزارگیر دستگاه تراش.



شکل (۱): منابع توزیع دما در برشکاری متعامد [۳].

۳- شرح آزمایش

برای انجام یک آزمایش دقیق، لازم است که تجهیزات مورد استفاده به طور کامل استاندارد و کالیبره باشند. بدین منظور قبل از انجام تست، نمونه‌ای از پیش تعیین شده مورد بررسی قرار گرفته و نیروهای آن اندازه‌گیری و صحت کالیبره بودن دستگاه مورد تأیید قرار گرفته است. همچنین لازم به ذکر است که تمام شرایط لازم برای آزمایش از قبیل دما، نور، رطوبت آزمایشگاه و... می‌بایست مطابق با حالت استاندارد باشد. برای اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری، نیاز به تجهیزاتی است که این تجهیزات به همراه مشخصات آن در زیر آورده شده است:

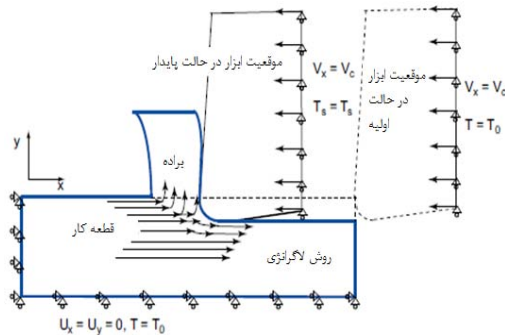
- دستگاه تراش تبریز- ایران، مدل BR50 TN- طول ۲ متر،
- دینامومتر مدل ۹۱۲۱ Kistler، برای اندازه‌گیری نیروهای در سه جهت x,y,z با دقت ۱ نیوتن،
- ابزارگیر k16-2020 Marox-CTPGR برای نگهداری اینسرت و
- اینسرت TPAN1603 PP ساخت شرکت WIDIA برای برشکاری.

به منظور بررسی و مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی، فولاد AISI ۱۰۴۵ توسط دستگاه تراش ماشینکاری شده است. جهت اخذ اطلاعات نیرویی از دینامومتر، پس از نصب آن به دستگاه تراش مطابق شکل ۲، می‌توان اطلاعات نیرویی را از طریق رایانه خواند.

۳-۱- مدل اجزای محدود (FEM)

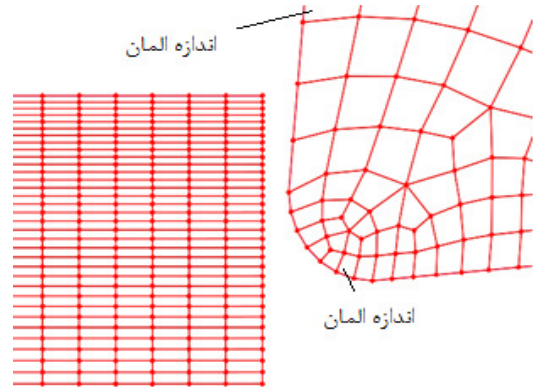
در این تحقیق، برشکاری متعامد برای فولاد AISI ۱۰۴۵، با ابزار برشی استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که پارامترهای برشی شامل سرعت‌های برشی (۸۰-۱۰۰-۱۲۰ m/min) و زاویه براده منفی ۵، ۰ و ۵ درجه و سرعت پیشروی (۰/۰۷-۰/۱-۰/۱۵ mm/rev) می‌باشد. در

کسب مزایای هر دو روش است. از این فرمول‌بندی می‌توان در فرایند برش متعامد استفاده کرد. یکی از روش‌های موجود در مدل ALE، استفاده از این مدل به کمک لاگرانژ خالص است. در این روش، دور تا دور قطعه کار توسط روش لاگرانژی مش‌بندی می‌شود. با استفاده از این مدل، فرایند برش متعامد شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۴ روش ALE به کمک روش لاگرانژ خالص را نشان می‌دهد.



شکل (۴): مدل فرمول‌بندی ALE و نحوه اعمال شرایط مرزی آن.

شکل ۳، اندازه المان‌ها را در محل برش نشان می‌دهد. همچنین مشخصات ابزار-قطعه کار و وضعیت برشکاری در جدول ۱ نشان داده شده است. در جدول ۲ ثابت‌های جانسون-کوک برای فولاد ۱۰۴۵ آورده شده است.



شکل (۳): اندازه المان‌های در فصل مشترک ابزار-قطعه کار برای برش متعامد.

۳-۲- مدل شبیه‌سازی اولر-لاگرانژ

از مزایای روش ALE، ترکیب روش‌های اولر و لاگرانژ به منظور

جدول (۱): جدول مشخصات فیزیکی ابزار و قطعه کار.

ضریب انتقال حرارت	گسترش دمایی	گرمای ویژه	رسانایی گرمایی	مدول الاستیک	ضریب پواسون	چگالی	ابعاد	جنس	ماده
-	$(1/^\circ\text{C})4/7$	$(\text{j/kg/c})203$	$(\text{w/m.c})46$	۸۰۰ Gpa	۰/۲	1500 kg/m^3	-	Wc-co	ابزار
$600 \text{ W/m}^2\text{C}$	$(1/^\circ\text{C})11$	$(\text{j/kg/c})432/6$	$(\text{w/m.c})47/7$	۲۰۰ Gpa	۰/۳	7800 kg/m^3	$3 \times 2 \text{ mm}$	AISI ۱۰۴۵	قطعه کار

جدول ۲: ثوابت جانسون - کوک برای فولاد AISI 10

T_m	n	m	C	B	A
۱۴۶۰	۰/۲۳۴	۱	۰/۰۱۳۴	۶۰۰ Mpa	۵۵۳ Mpa

شبیه‌سازی بر مبنای روش ALE است که مش‌بندی را دقیق‌تر و شبیه‌سازی را به واقعیت نزدیک می‌کند. پس از تعریف مسئله در نرم‌افزار و حل آن، شکل‌ها و نتایج لازم به دست آمده است. در شکل ۵، توزیع شار حرارتی^۱ را نشان می‌دهد. این توزیع، برای سرعت برشی 80 m/min ، سرعت پیشروی 0.1 mm/min ، عمق بار 1 میلی‌متر و زاویه براده 5° درجه انجام شده است. ملاحظه می‌شود که بیشترین شار

۴- بحث و نتایج

شار لبه برش و شعاع نوک ابزار به ترتیب 0.2 و 0.8 میلی‌متر است که برای تمام آزمایشات ثابت است. جدول ۳، مربوط به تعداد آزمایشاتی است که انجام گرفته شده است. در این جدول، نتایج نیرویی حاصل از تجربی و شبیه‌سازی آورده شده است.

پس از انجام آزمایشات، شبیه‌سازی دو بعدی توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. اساس تئوری این

1- Heat Flux

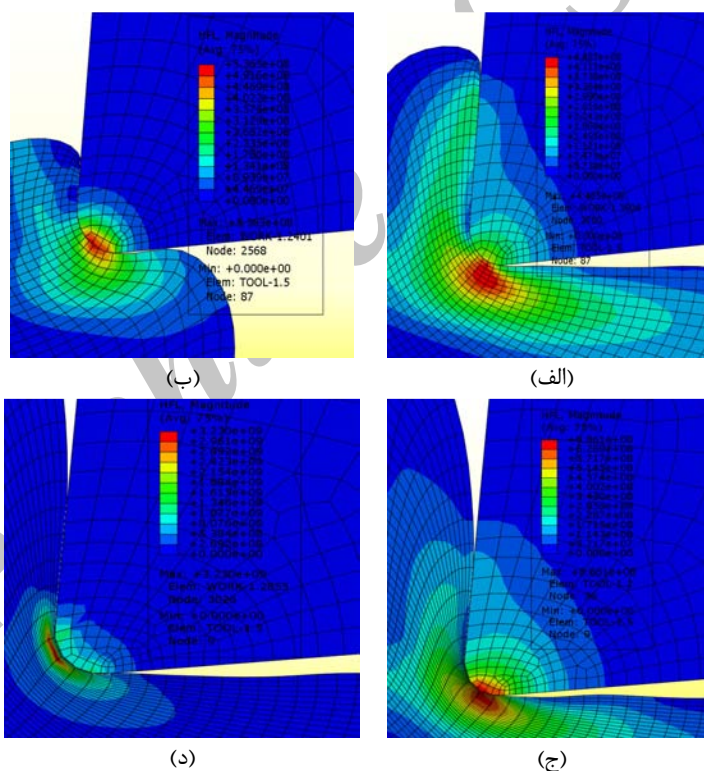
همان گونه که در جدول ۴ مشاهده می شود، بین نتایج به دست آمده از روش المان محدود و نتایج تجربی برای پیش بینی دمای براده در فصل مشترک، فاصله ای وجود دارد که با افزایش سرعت برشی و دما، این فاصله نیز افزایش می یابد.

دلایل زیر را می توان برای توضیح فاصله به وجود آمده بین نتایج عددی و تجربی برشمرد:

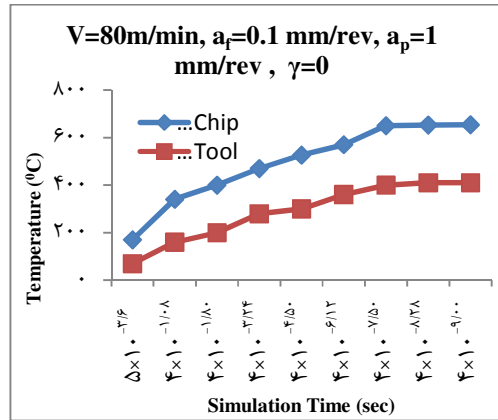
- ثابت های رفتار ماده جانسون-کوک که برای تعیین تنش سیلان ماده به کار رفته است، برای شرایط ماده در ناحیه اول برش تعیین شده است. بنابراین آزمایش های انجام شده روی ماده در دمای ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد انجام شده که این دماها، بسیار پایین تر از دمای براده در ناحیه دوم برش است و - گرادیان کرنش پلاستیک در فصل مشترک بسیار بالاست و برای شبیه سازی بهتر، این شرایط نیاز به ریزتر شدن المان ها در این ناحیه وجود دارد که امکان این امر در شبیه سازی حاضر وجود نداشته و المان ها تا حد امکان ریز شده اند.

گرمایی در محل برخورد نوک ابزار با قطعه کار و در نزدیکی ناحیه دوم برش می باشد که با گذشت زمان و پایدار بودن فرایند، این منطقه گرمایی در محل فصل مشترک ابزار-قطعه کار، ثابت باقی می ماند.

برای بررسی انتقال حرارت، باید ضرایب دمایی مربوط به فرایند مطابق با جدول ۱ به نرم افزار داده شود. شکل ۶، روند افزایش دما در طول شبیه سازی را نشان می دهد. پس از ۰/۸ میلی ثانیه دما در ناحیه اول برش، به حالت پایدار رسیده و در محدوده ۶۲۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرد. ملاحظه می شود که دمای ایجاد شده در ابزار، کمتر از دمای فصل مشترک بین ابزار و قطعه کار است که علت آن، تشکیل ناحیه دوم برش در فصل مشترک ابزار و قطعه کار است که این ناحیه دمای بیشتری نسبت به نواحی دیگر دارد. جدول ۴، مربوط به نتایج به دست آمده از شبیه سازی و مقایسه آن با نتایج تجربی سایر مقالات است [۱۲].



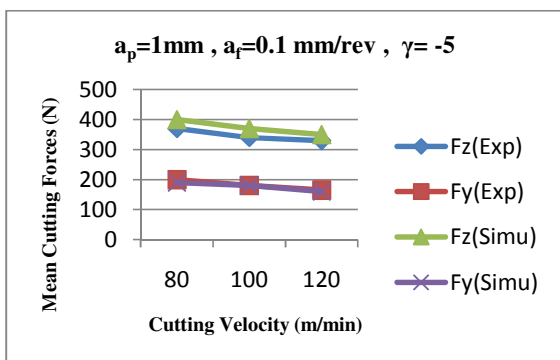
شکل (۵): توزیع شار حرارتی در فصل مشترک ابزار - قطعه کار، (الف) توزیع شار گرمایی در ۰/۴ میلی ثانیه، (ب) توزیع شار گرمایی در ۰/۱۲ میلی ثانیه، (ج) توزیع شار گرمایی در ۰/۹ میلی ثانیه و (د) توزیع شار گرمایی در ۰/۷۲ میلی ثانیه.



شکل (۶): توزیع دما در فصل مشترک ابزار- قطعه کار برای حالت شبیه‌سازی.

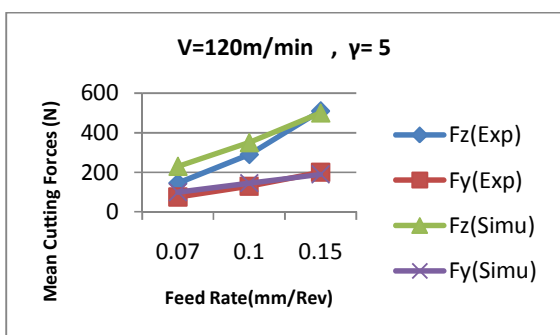
جدول (۳): پارامترهای ماشینکاری و نیروهای به دست آمده بر حسب نیوتن.

Fy (simu)	Fy (Exp)	Fz (simu)	Fz (Exp)	زاویه براده (درجه) γ	عمق بار a_p (mm)	سرعت پیشروی a_f (mm/rev)	سرعت برشی V (m/min)	آزمایش
۶۷	۷۷	۱۳۰	۱۵۰	۰	۰/۷	۰/۰۷	۸۰	۱
۶۷	۵۶	۱۳۵	۱۲۵	۵	۰/۷	۰/۰۷	۸۰	۲
۷۷	۸۰	۱۷۰	۱۵۳	-۵	۰/۷	۰/۰۷	۸۰	۳
۱۲۷	۱۳۳	۳۰۵	۳۰۰	۰	۱	۰/۱	۸۰	۴
۱۴۰	۱۵۰	۲۸۷	۲۹۰	۵	۱	۰/۱	۸۰	۵
۱۸۵	۲۰۰	۳۹۰	۳۵۰	-۵	۱	۰/۱	۸۰	۶
۲۶۰	۲۸۵	۵۰۰	۵۳۵	۰	۱/۵	۰/۱۵	۸۰	۷
۲۰۱	۲۱۰	۴۷۱	۴۹۰	۵	۱/۵	۰/۱۵	۸۰	۸
۲۷۹	۲۶۰	۵۳۰	۵۰۳	-۵	۱/۵	۰/۱۵	۸۰	۹
۷۰	۷۶	۱۵۰	۱۵۵	۰	۰/۷	۰/۰۷	۱۰۰	۱۰
۵۱	۵۵	۱۲۱	۱۳۰	۵	۰/۷	۰/۰۷	۱۰۰	۱۱
۸۸	۷۸	۱۵۰	۱۵۷	-۵	۰/۷	۰/۰۷	۱۰۰	۱۲
۱۴۰	۱۳۵	۳۴۰	۲۹۰	۰	۱	۰/۱	۱۰۰	۱۳
۱۵۵	۱۵۰	۲۷۹	۳۰۰	۵	۱	۰/۱	۱۰۰	۱۴
۱۹۰	۱۸۵	۳۵۵	۳۴۰	-۵	۱	۰/۱	۱۰۰	۱۵
۲۷۰	۲۸۶	۴۹۰	۴۹۵	۰	۱/۵	۰/۱۵	۱۰۰	۱۶
۲۶۶	۲۸۰	۴۷۰	۴۸۰	۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۰۰	۱۷
۲۲۷	۲۲۵	۵۰۰	۴۹۵	-۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۰۰	۱۸
۶۱	۷۰	۱۴۰	۱۵۰	۰	۰/۷	۰/۰۷	۱۲۰	۱۹
۱۰۰	۹۰	۱۹۰	۲۲۰	۵	۰/۷	۰/۰۷	۱۲۰	۲۰
۷۱	۸۰	۱۷۰	۱۸۰	-۵	۰/۷	۰/۰۷	۱۲۰	۲۱
۱۳۵	۱۲۹	۳۱۵	۲۹۵	۰	۱	۰/۱	۱۲۰	۲۲
۱۲۵	۱۲۰	۳۳۰	۳۱۰	۵	۱	۰/۱	۱۲۰	۲۳
۱۷۵	۱۸۱	۳۵۴	۳۳۷	-۵	۱	۰/۱	۱۲۰	۲۴
۲۱۰	۲۳۰	۴۹۰	۵۰۰	۰	۱/۵	۰/۱۵	۱۲۰	۲۵
۱۹۸	۲۰۰	۴۹۹	۴۹۲	۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۲۰	۲۶
۱۸۹	۲۲۰	۴۹۹	۵۰۸	-۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۲۰	۲۷



شکل (۸): منحنی تغییرات نیروی ماشینکاری بر حسب سرعت برشی در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی.

در شکل ۹، مقایسه‌ای بین سرعت‌های پیشروی مختلف، برای دو حالت شبیه‌سازی و تجربی انجام شده است. با توجه به شکل ۹، با افزایش سرعت پیشروی، متوسط نیروهای ماشینکاری برای هر دو حالت شبیه‌سازی و تجربی افزایش یافته، زیرا با افزایش پیشروی در زمان کوتاه‌تر، مواد بیشتری از قطعه کار جدا شده که باعث افزایش نیروهای ماشینکاری می‌شود.



شکل (۹): تأثیر سرعت پیشروی بر نیروهای ماشینکاری برای حالات شبیه‌سازی و تجربی.

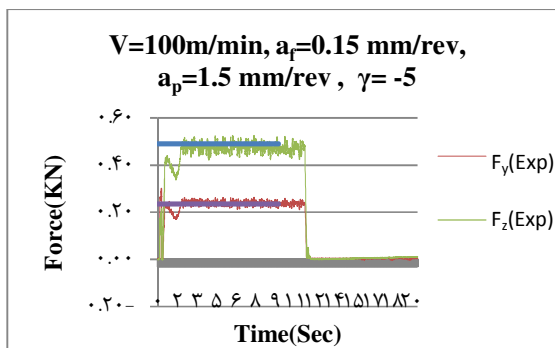
۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرایند برش متعامد با استفاده از مدل دوبعدی، در حالت کرنش صفحه‌ای در نرم‌افزار ABAQUS 6.9 با استفاده از روش مش‌بندی ALE شبیه‌سازی و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین نیروهای ماشینکاری در جهات مختلف، برای پارامترهای مختلف ماشینکاری برای دو حالت شبیه‌سازی و تجربی به دست آمده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

جدول (۴): جدول دمای براده در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی برای زاویه براده (-۵) درجه.

دمای تجربی (°C)	دمای شبیه‌سازی شده (°C)	سرعت برشی M/min
۶۲۵	۶۴۷	۵۰
۶۵۵	۶۷۵	۸۰
۶۸۰	۷۰۲	۱۰۰
۶۹۰	۷۲۱	۱۲۰

همان‌طور که در متن مقاله اشاره شد، برای اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری در جهات مختلف، نیاز به دینامومتر است تا بتوان نیروها را با دقت ۱ نیوتن اندازه‌گیری کرد. بدین منظور، نیروهای ماشینکاری برای ۲۷ آزمایش اندازه‌گیری شده است. در شکل ۷، برای سرعت برشی ۱۰۰ m/min و عمق بار ۱/۵ به همراه زاویه براده منفی ۵ درجه بررسی شده است. مقدار نیروی Fz برای شبیه‌سازی در حدود ۴۹۵ نیون و برای آزمایش تجربی، در محدوده ۴۸۰ نیوتن است. همچنین مقادیر نیروی Fy تقریباً بر هم منطبق بوده و مقدار آن به ۲۴۰ نیوتن می‌رسد.



شکل (۷): مقایسه نیروهای ماشینکاری برای دو حالت شبیه‌سازی و تجربی.

همچنین در شکل ۸ می‌توان گفت که با افزایش سرعت برشی، متوسط نیروهای ماشینکاری در هر دو جهت Z و Y کاهش پیدا می‌کنند. همچنین می‌توان نزدیکی این نیروها را برای حالت شبیه‌سازی و تجربی مشاهده کرد. علت کاهش نیرو در اثر افزایش سرعت برشی، سهولت در جدایی مواد از قطعه کار است. اما اگر سرعت برشی از حدی مشخص (۱۵۰ متر بر دقیقه) بیشتر شود، نیروهای ماشینکاری زیاد شده و باعث کاهش عمر ابزار می‌شوند.

- Materials Proc. Tech., Vol's. 164-165, 15 May 2005, pp. 1204-1211, 2005.
4. Wu, H.Y., Lee, W.B., Cheung, C.F., To, S., and Chen, Y.P. "Computer Simulation of Single-Point Diamond Turning Using Finite Element Method", J. Materials Proc. Tech., Vol. 167, No. 3, pp. 549-554, 2005.
 5. Arrazola, P.J., Ugarte, D., Montoya, J., Villar, A., and Marya, S. "Finite Element Modeling of Chip Formation Process with Abaqus/Explicitm 6.3", VIII Int. Conf. on Computational Plasticity COMPLAS VIII .E. Onate and D. R. J. Owen (Eds) CIMNE, Barcelona, 2005.
 6. Bil, H., Tekkaya, A.E., and Engin Kılıç, S. "2D FE Modelling of Machining: A Comparison Of Different Approaches with Experiments", VIII Int. Conf. on Computational Plasticity COMPLAS VIII .E. Oñate and D. R. J. Owen (Eds) CIMNE, Barcelona, Vol. 25, No. 4, pp. 221-228, 2005.
 7. Zong, W.J., Sun, T., Li, D., Cheng, K., and Liang, Y.C. "FEM Optimization of Tool Geometry Based on the Machined Near Surface's Residual Stresses Generated in Diamond Turning", Center for Precision Eng. P.O. Box 413, Harbin Institute of Tech. Harbin 150001, PR China., J. Materials Proc. Tech., Vol. 180, No. 4, pp. 271-278, 2006.
 8. Umbrello, D. "Finite Element Simulation of Conventional and High Speed Machining of Ti6Al4V Alloy", J. Materials Proc. Tech., Vol. 196, No. 6, pp. 79-87, 2008.
 9. Arrazola, P.J. and Ozel, T.R. "Investigations on the Effects of Friction Modeling in Finite Element Simulation of Machining", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 2, No. 8, pp. 77-82, 2006.
 10. Brandao, L.C., Coelho, R.T., and Lauro, C.H. "Contribution To Dynamic Characteristics of the Cutting Temperature in the Drilling Process Considering One Dimension Heat Flow", Applied Thermal Eng., Vol. 31, No's. 17-18, pp. 3806-3813, 2011.
 11. Li, B. "A Review of Tool Wear Estimation Using Theoretical Analysis and Numerical Simulation Technologies" Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 35, No.6 pp. 143-151, 2012.
 12. Grzesik, W. "Determination of Temperature Distribution in the Cutting Zone Using Hybrid Analytical-FEM Technique" Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 5 No. 46, pp.651-658, 2006.
 13. M.J. Nategh, "A Machining Force Model Developed for Ultrasonic Vibration-Assisted Turning, through Statistical Analysis of Influential Parameters", Mech. & Aerospace Eng. J., Vol. 4, No. 4, pp. 83-91, 2009 (In Persian).

- با افزایش سرعت پیشروی، نیروهای ماشینکاری در جهات مختلف افزایش یافته، به طوری که روند این افزایش صعودی بوده و در سرعت‌های پیشروی بالا، علاوه بر کاهش کیفیت سطح، فرسایش شدید در ابزار به وجود خواهد آمد. همچنین این پیشروی زیاد، باعث کاهش سریع‌تر عمر ابزار می‌شود. این فرسایش به علت ساییش در سطوح آزاد و براده ابزار است [۱۳].

- بررسی توزیع دما و کرنش پلاستیک در ناحیه دوم برش در سرعت‌های مختلف برشی، نشان داد که با افزایش سرعت برشی، تنش برشی اصطکاکی در فصل مشترک ابزار و براده موضعی‌تر شده که این امر، به همراه نرمی حاصل از افزایش دما در ماده قطعه کار، نیروهای برشی را ابتدا کاهش داده و سپس افزایش می‌دهد. البته این افزایش سرعت پس از حد مشخصی باعث کاهش عمر ابزار می‌شود،

- شبیه‌سازی دمای متوسط ابزار و براده، با حداکثر ۵۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف با نتایج تجربی انجام شده است. با توجه به پیچیدگی شرایط دما در ناحیه دوم برش و رابطه تنگاتنگ آن با میزان تغییر شکل پلاستیک، نتایج به دست آمده با اندازه‌گیری تجربی مطابقت خوبی دارد،

- با توجه به اینکه ثابت‌های مدل جانسون- کوک، برای شرایط ماده قطعه کار در ناحیه اول برش تعیین شده است اختلاف دمای محاسبه شده در فصل مشترک با نتایج تجربی طبیعی به نظر می‌رسد.

- همچنین دمای ایجاد شده در ابزار و قطعه کار، مطابقت خوبی با مقادیر موجود در مراجع دارد. تغییرات در پارامترهای ماشینکاری، می‌تواند تغییرات زیادی را در نیروهای ماشینکاری و توان ماشین ایجاد کند. در نتیجه با انتخاب صحیح پارامترهای ماشینکاری، می‌توان بیشترین عمر را از ابزار برشی و سیستم انتظار داشت.

۶- مراجع

1. Shi., G., Deng, X., and Shet, C. "A Nite Element Study of the Effect of Friction in Orthogonal Metal Cutting", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 38, No. 9, pp. 863-883, 2002.
2. Yen, Y.C., Jain, A., and Altan, T. "A Finite Element Analysis of Orthogonal Machining Using Different Tool Edge Geometries", J. Materials Proc. Tech., Vol. 146, No. 11, pp. 72-81, 2004.
3. Grzesik, W., Bartoszuk, M., and Nieslony, P. "Finite Element Modelling of Temperature Distribution in the Cutting Zone in Turning Processes with Differently Coated Tools", J.