



## بررسی تأثیر بارهای مکانیکی و حرارتی بر اعوجاج ایجاد شده توسط فرآیند ماشین‌کاری قطعات جداره نازک به کمک روش المان محدود

علی اسکینی<sup>۱</sup>، احسان زمانی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

\* شهرکرد، صندوق پستی ۱۱۵، zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

### چکیده

یکپارچگی سطح قطعه‌ی ماشین‌کاری ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم جداره نازک به‌عنوان یکی از فرایندهای کلیدی در صنایعی همچون هوافضا مورد توجه است. در ماشین‌کاری نهایی قطعه‌کار، نیروهای برش‌کاری و درجه حرارت در طول فرآیند باعث تولید انحراف و اعوجاج می‌شوند. هدف از این مقاله بررسی اثر رفتار حرارتی و مکانیکی ایجاد شده توسط فرآیند ماشین‌کاری بر روی اعوجاج قطعه ساخته‌شده از آلیاژ آلومینیوم (Al 7075-T0) با استفاده از ابزارهای کاربید سماتنه و الماس چند بلوری است. این مطالعه با استفاده از یک مدل سه‌بعدی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس در شرایط برش متعامد انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم نیرو و درجه حرارت بر روی اعوجاج قطعات مورد آزمایش دارد، به‌خصوص نیروی ماشین‌کاری اثر بیشتری در اعوجاج قطعه‌کار جدار نازک در مقایسه با درجه حرارت دارد. همچنین در ابزار الماس چند بلوری نیروهای ماشین‌کاری و درجه حرارت در منطبقه برش به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر از ابزار کاربیدی است و استفاده از این ابزار در ماشین‌کاری آلیاژهای آلومینیوم به‌عنوان یک جایگزین مناسب پیشنهاد می‌شود. برای صحت سنجی مدل شبیه‌سازی شده، نتایج با اندازه‌گیری‌های تجربی موجود مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: اعوجاج، قطعات جداره نازک، آلیاژ AL7075-T6، نیروهای برش‌کاری و درجه حرارت، شبیه‌سازی اجزای محدود ماشین‌کاری

## Effect of mechanical and thermal loads on the distortion of machining thin-walled parts using the FEM model

Ali Eskini, Ehsan Zamani\*

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

\* P.O.B. 115, Shahrekord, Iran, zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

### ABSTRACT

Machining of thin-walled monolithic parts made of aluminum alloys is a key process in industries such as aerospace. In the final machining process, the cutting forces and machining temperature produce deflection for workpiece which results in the dimensional inaccuracies and distortion on the finished component. The purpose of this paper is to study the thermal and mechanical behavior in machining of aluminum alloys (Al 7075-T0) using PCD (polycrystalline diamond) and K10 (cemented carbide) tools to investigate the correlation between both parameter on distortion. The study was made using a three-dimensional finite element method model in Abaqus software under orthogonal cutting conditions. The results represented the direct effect of the force and temperature on level of distortion in thin-walled workpieces. However, the mechanical loads have more influence on work piece distortion in comparison to the thermal loads. It was concluded that the polycrystalline tool has a superior performance in terms of cutting forces and temperature when compared to the cemented carbide tool. To validate the FEM model, the results were compared with experiments of the other papers. Results showed a good agreement with experiments.

**Keywords:** AL7075 Alloy, Cutting Forces and Temperatures, Distortion, FEM Analysis Machining, Thin-walled Parts.

### ۱- مقدمه

می‌شود. انحراف و اعوجاج هنگامی رخ می‌دهد که لایه‌های نزدیک به سطح قطعه‌کار به دلیل تغییر شکل‌های پلاستیک غیریکنواخت، تنش پسماندی در سرتاسر قطعه گسترش می‌دهند [۱]. مطالعه و کنترل تنش‌های پسماند و اعوجاج قطعات ماشین‌کاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم یک موضوع مهم در صنایع هوافضا و خودروسازی است. به‌عنوان مثال شکل ۱ ورق ماشین‌کاری شده برای قطعات هواپیما را نشان می‌دهد که در حدود ۳۵ میلی‌متر به ازای ۱۰۰۰ میلی‌متر طول اولیه انحراف پیدا کرده است [۲].

به علت کاهش حجم بالای ۹۵٪ قطعه خام اولیه آلومینیومی در ماشین‌کاری، قطعات با ضخامت‌های بسیار کم (دیواره نازک) ایجاد می‌شوند که در فرآیند تولید آن‌ها نیروی برش‌کاری و تغییر شکل‌های حرارتی بسیار بزرگی ایجاد می‌شود. این تغییرات می‌تواند روی دقت ابعادی و مونتاژ سازه‌های نهایی تأثیر منفی بگذارد. فرآیندهای ماشین‌کاری باعث افزایش کیفیت سطح، عملکرد بهتر قطعه ولی درعین حال امکان به وجود آمدن انحراف<sup>۱</sup> در محصول تولیدی

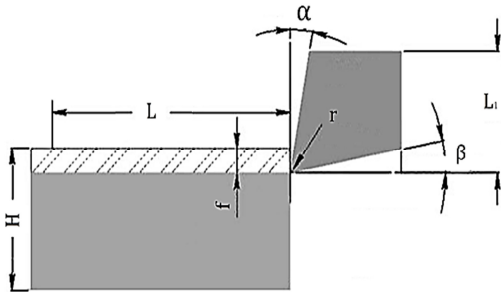
2. distortion

Please cite this article using:

A. Eskini, E. Zamani, Effect of mechanical and thermal loads on the distortion of machining thin-walled parts using the FEM model, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 5-11, 2015 (in Persian فارسی)

1. deviation

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۲ مدل سازی هندسی و پارامترهای ابعادی مؤثر در طراحی

به شکل کوپل دما- تغییر مکان به صورت صریح<sup>۱</sup> با توجه به دینامیکی بودن و داشتن شرایط انتقال حرارت، انتخاب شده است.

در 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 جانسون- کوک، جنس قطعه تعریف می شود. لازم به ذکر است که این مدل پدیده هایی با تغییر شکل زیاد و کرنش های بالا است. همچنین این مدل خواص فیزیکی مواد قطعه کار را که به صورت رابطه (۱) تعریف می شود، در طول ماشین کاری نشان می دهد [۹].

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[ 1 - C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $A, B, C, m$  و  $n$  پارامترهای مادی هستند که برای آلیاژ Al 7075-T6 مقادیر آن ها در جدول ۱ موجود است [۹].

جانسون و کوک مدلی را تعریف کردند که کرنش شکست ( $\bar{\epsilon}_f$ ) مطابق رابطه (۲) تابعی از متغیرهای مختلف بود. این رابطه کاربرد معیارهای ترک نرم به عنوان شرط جدایی براده بررسی می کند. این معیار، گسیختگی را ناشی از انباشتگی آسیب با توجه به تاریخچه تنش ها، کرنش ها، نرخ کرنش ها و دماهای تجربه شده می داند [۱۰].

$$\bar{\epsilon}_f = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{P}{\sigma} \right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[ 1 + d_5 \left( \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $d_1$  تا  $d_5$  ثابت های مادی آسیب هستند که مقادیر آن ها برای آلیاژ مورد نظر تحقیق در جدول ۲ مشاهده می شود [۱۰].

المان مکعبی از نوع C3D8T برای مش بندی مدل هندسی استفاده شده است. این نوع المان دارای ۸ گره با انتگرال گیری کاهش یافته است. در انتگرال گیری کاهش یافته با توجه به این که از یک نقطه انتگرال گیری گوس استفاده می شود زمان انجام محاسبات کاهش می یابد. همچنین به منظور انجام یک شبیه سازی دقیق، از مش بندی تطبیقی<sup>۲</sup> استفاده شده است. این روش ابزاری قوی برای بهبود مش در مسائل با تغییر شکل بزرگ است [۱۱].

ضریب اصطکاک در مدل سازی باید به گونه ای انتخاب گردد که نیروی برشی

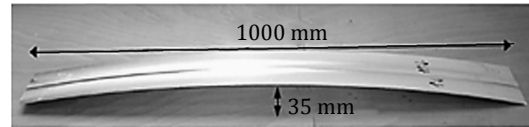
جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده مدل جانسون-کوک در رابطه (۱)

$m$	$c$	$n$	$B$ (مگا پاسکال)	$A$ (مگا پاسکال)
۱/۵۶	۰/۰۲۴	۰/۰۷۱	۶۷۸	۵۴۶

جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده در معیار آسیب جانسون-کوک

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
۰/۰۶۸	۰/۵۴۱	-۰/۰۹۵۲	۰/۰۳۶	۰/۶۹۷

1. Explicit  
2. ALE



شکل ۱ انحراف نسبت به طول اولیه در صفحه ماشین کاری شده [۲]

یافته های مدل سازی های المان محدود می تواند کمک شایانی در نتایج مختلف مانند انحراف، تغییر شکل، کاهش گرمای تولید شده، بهینه سازی نیروهای ماشین کاری، پیش بینی خطا و کنترل آن ها داشته باشد. تحقیقات منتشر شده مرتبط با این موضوع ها می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

جینتندر و همکاران [۳]، اعوجاج سطوح یکپارچه ی آلیاژی ماشین کاری شده برای ساخت هواپیما را به کمک شبیه سازی المان محدود و نرم افزار مارک، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش آن ها منجر به بهینه سازی پارامترهای برش، نحوه بجا گیردار کردن قطعه کار شد. یانگ و گروه تحقیقاتش [۴] تحقیق مشابهی در مورد اعوجاج آلیاژهای مورد استفاده در صنایع هوافضا با نرم افزار مارک انجام داده اند.

لیو [۵] با طراحی یک مدل المان محدود به کمک یک سیستم نرم افزاری برای قسمت های مختلف قطعات چند مقطعی ساخته شده از آلیاژ آلومینیوم، پیش بینی اعوجاج ماشین کاری برای اجزاء، یکپارچه چند فریم را تشریح کرد راتچف و همکاران [۶] با شبیه سازی یک مدل المان محدود، انحراف قطعات جداره نازک با صلبیت کم و نیروهای ماشین کاری مؤثر در برش این فلزات را محاسبه کردند. در روشی مشابه، راتچف و لئو [۷] تغییر شکل صفحه های آلیاژهای دیواره نازک را تحت نیروهای فرز را مورد مطالعه قرار دادند.

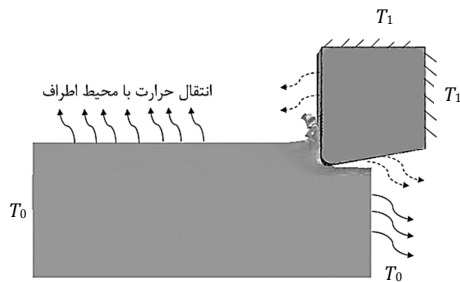
بی و گروه تحقیقاتش [۸] توسط روش المان محدود اعوجاج قطعات یکپارچه ماشین کاری شده مورد استفاده در صنایع هوافضا را مورد مطالعه قرار دادند. در این کار با شبیه سازی مسیرهای مختلف ماشین کاری، تغییر شکل های قطعه کار ماشین کاری مورد بررسی قرار گرفت.

با وجود تمام تلاش های انجام گرفته، مکانیسم اعوجاج و بی ثباتی ابعادی قطعه کار به خصوص در قطعه جداره نازک آلومینیومی به طور کامل شناسایی نشده است. تاکنون تنها شناسایی و پیش بینی اعوجاج آن هم در یک سطح کیفی امکان پذیر است، در حالی که بسیاری از ابهامات در مورد دلایل و مکانیسم اعوجاج باقی مانده است. با توجه به روش های ایجاد تنش پسماند در ماشین کاری، با ارائه بهترین و یا مؤثرترین شرایط تراش کاری جهت کمینه سازی گرمای تولید شده و نیروهای برش در طی فرایند، می توان به طور چشمگیری سطوح تنش پسماند و اعوجاج تولیدی در قطعات را کاهش داد. با این وجود، قابلیت یک مدل اجزای محدود ارزش فراوانی دارد، زیرا هزینه فرآیند و تکرار کار را کاهش می دهد. در این پژوهش به کمک یک آنالیز اجزای محدود، ارتباط بین اعوجاج قطعه جداره نازک آلومینیومی از جنس Al 7075-T6 و نیروهای ماشین کاری، درجه حرارت منطقه برش و توزیع تنش های پسماند ماشین کاری بررسی شده است.

## ۲- مدل سازی اجزای محدود

در تحقیق حاضر، فرایند تراش کاری به صورت سه بعدی متعامد شبیه سازی است. در شکل ۲ پارامترهای ابعادی ورودی به نرم افزار و هندسه مسئله به تصویر کشیده شده است.

نوع تحلیل استفاده شده در این شبیه سازی آنالیز حرارتی- مکانیکی هم زمان



شکل ۳ شرایط مرزی حرارتی و پارامترهای مرتبط

قابلیت شبیه‌سازی خروجی‌های حائز اهمیت هم‌چون نیروی برش‌کاری، درجه حرارت و تنش‌های پسماند سطح هست. بدین منظور با شبیه‌سازی مدل تجربی ارائه شده توسط مسعودی و همکاران [۱۴] به صحت سنجی دقت روش پیشنهادی پرداخته شده است. مسعودی و همکاران با طراحی ۲۴ آزمایش گوناگون با شرایط ماشین‌کاری متفاوت بر روی آلیاژ Al7075-T6، درجه حرارت منطقه برش، اعوجاج و نیروهای ماشین‌کاری در تمام آزمایش‌ها را محاسبه کردند. این آزمایش‌ها به کمک دو ابزار کاربردهای سماتنه بانام اختصاری K10 و الماس چند بلوری با نام اختصاری PCD، چهار سرعت برش و سه نرخ پیشروی انجام شده است. عمق برش و ضخامت قطعه کار در تمام آزمایش‌ها یک میلی‌متر است.

در شبیه‌سازی حاضر مطابق مدل ارائه شده در شکل ۲، قطعه کار به صورت مستطیلی به طول ۱۰ و عرض ۶ میلی‌متر مدل می‌شود. زاویه براده ابزار ۱ درجه، زاویه آزاد ابزار ۱۱ درجه و شعاع برش لبه‌ی ابزار ۰/۰۲ میلی‌متر فرض می‌شود. مقدار پیشروی و سرعت برش در جدول ۴ ارائه شده‌اند. دمای محیط و نقطه ذوب قطعه کار به ترتیب ۲۰ و ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. سایر خواص و ثوابت مکانیکی قطعه کار و ابزارها در جدول ۵ به نمایش درآمده است [۱۰].

با توجه به این‌که فرآیند ماشین‌کاری به صورت متعامد است، برای استخراج ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی المان محدود می‌بایست نیروهای ماشین‌کاری اندازه‌گیری شوند. برای محاسبه ضریب اصطکاک از رابطه‌ی (۳) استفاده می‌شود که در آن مقدار زاویه براده ابزار یک درجه، نیروی محوری، نیروی مماسی وارد بر سطح براده ابزار به ترتیب ۵۵۰ و ۸۵۰ نیوتن است این نیروها از آزمایش‌های عملی انجام‌شده بر قطعه کار به‌دست آمده‌اند [۱۱]، بنابراین ضریب اصطکاک برای شبیه‌سازی با ابزار PCD در حدود ۰/۲۷ و برای K10،

جدول ۴ سطوح مختلف هر پارامتر در آزمایش‌ها تجربی

مرحله	پارامترهای برشکاری			
	۱	۲	۳	۴
V(m/min)	۲۳۰	۳۵۰	۴۷۰	۵۹۰
f(mm/min)	۶۰	۱۲۰	۱۸۰	-

جدول ۵ خواص مکانیکی قطعه کار و ابزارهای برش

خواص	A7075-T6	PCD	K10
ضریب الاستیسیته (Gpa)	۷۱/۷	۸۹۰	۶۳۰
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۰۷	۰/۲۶
ضریب انبساط $(\frac{10^{-6}}{0C})$	۲۳/۶	۲/۵	۵/۶
ضریب هدایت گرمایی $(W.m^{-1}k^{-1})$	۱۸۰	۱۷۳	۳۰
چگالی $(Kg.m^{-3})$	۲۸۱۰	۳۵۱۰	۱۱۹۰۰

پیش‌بینی شده نزدیک‌ترین مقدار ممکن را به مقدار متناظر از آزمایش داشته باشد. شرایط برش انتخابی باید اثر تغییر در سرعت برش، عمق برش و زاویه برش را لحاظ کند. برای این منظور از مدل اصطکاک چسبنده - لغزنده برای تعریف اصطکاک در فصل مشترک ابزار- براده استفاده شده است که در آن ضریب اصطکاک از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\mu = \frac{F_y + F_x \tan(\alpha)}{F_y - F_x \tan(\alpha)} \quad (3)$$

به کمک نیروهای ماشین‌کاری در آزمون‌های عملی، نرخ پیشروی و سرعت دورانی می‌توان ضریب اصطکاک فرآیند را به‌روش میانگین‌گیری محاسبه نمود.

میزان حرارت ایجاد شده در ناحیه تغییر شکل ثانویه وابسته به کسری از انرژی اصطکاک تبدیل شده به حرارت است که در اکثر آنالیزهای انجام شده به کمک نرم‌افزار، این عدد  $\eta = 90\%$  در نظر گرفته می‌شود. این انرژی که به سبب جاری شدن براده بر روی ابزار به وجود می‌آید، دمای بین سطوح اصطکاک بر خوردی را افزایش می‌دهد. میزان شارش گرما در اثر اصطکاک لغزشی روی سطح ابزار و براده وابسته به سطوح تماس دوگانه بوده و از معادله (۴) و (۵) حاصل می‌شود [۱۳].

$$q_c = f_w \cdot \eta \cdot p_{fr} \quad (4)$$

$$q_t = (1 - f_w) \cdot \eta \cdot p_{fr} \quad (5)$$

در این رابطه  $f_w$  فاکتور وزن برای توزیع گرما مابین سطوح برخورد بوده،  $q_c$  و  $q_t$  شار گرمایی وارد شده به سطوح براده و ابزار است که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود.  $P_{fr}$  انرژی حاصل از اصطکاک لغزشی است که آن نیز با وارد کردن ضریب اصطکاک توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. کسر انرژی گرمایی هدایت شده به براده نیز از رابطه (۶) حاصل می‌شود. همچنین  $E_t$  و  $E_c$  به ترتیب انرژی گرمایی هدایت شده به براده و ابزار است که از روابط (۷) و (۸) حاصل می‌شوند [۱۳].

$$F_w = \frac{E_c}{E_c + E_t} \quad (6)$$

$$E_t = \sqrt{k_t \cdot \rho_t \cdot C_{pt}} \quad (7)$$

$$E_c = \sqrt{k_c \cdot \rho_c \cdot C_{pc}} \quad (8)$$

تمام سطوح قطعه کار به‌جز سطح در تماس با ابزار به‌صورت آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. در فصل مشترک ابزار با براده تماس حرارتی با اعمال ضریب هدایت حرارتی تماس شبیه‌سازی شده است. برای سطوح آزاد قطعه کار که با هوا در تماس هستند، شرایط همرفتی با ضریب همرفتی مشخص با دمای محیط ( $T_0$ ) در نظر گرفته شده است. برای سطوح آزاد ابزار نیز شرایط مشابهی در نظر گرفته شده است. سطوح در تماس ابزار با محیط اطراف به‌صورت دما ثابت و با دمای ( $T_1$ ) انتخاب شده است. این انتخاب برای نزدیک‌تر شدن شرایط توزیع دما در نوک ابزار و فصل مشترک به شرایط واقعی انجام گرفته است. شرایط مرزی و پارامترهای مرتبط حرارتی در شکل ۳ به نمایش درآمده‌اند و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است [۱۳].

### ۳- صحت‌سنجی نتایج

مهم‌ترین مسئله در مدل‌سازی تحقیق، دقت نتایج مدل اجزای محدود و

جدول ۳ مقادیر پارامترهای حرارتی در شکل ۳

$T_0$	$T_1$	$h_0$	$h_1$
(°C)	(°C)	(W.m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	(W.m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
۲۰	۰/۱۲۵	۲۰	۱۳۰

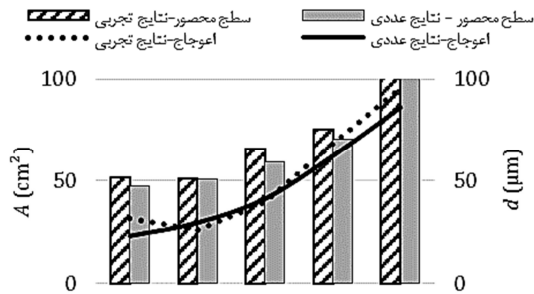
نتایج آزمایش‌های عملی و نرم‌افزار مقایسه شده است. مشاهده می‌شود هم در آزمایش‌های تجربی و هم مدل حاضر با وجود نزدیکی منطقه محصور سه قطعه کار، مدل شبیه‌سازی شده مسئله روند تغییرات اعوجاج با کاهش در ضخامت را هم‌جهت با داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است. همچنین از نظر کمی نیز داده‌ها در نزدیکی نسبتاً مناسبی با داده‌های حاصل از نتایج عملی هستند و پیش‌بینی مناسبی از توزیع تنش پسماند و مقدار اعوجاج ارائه می‌دهند. در ادامه تحقیق به بررسی دقیق‌تر نتایج تجربی و شبیه‌سازی و مطالعه پارامترهای موردنظر تحقیق پرداخته می‌شود.

#### ۴- نتایج و مباحث

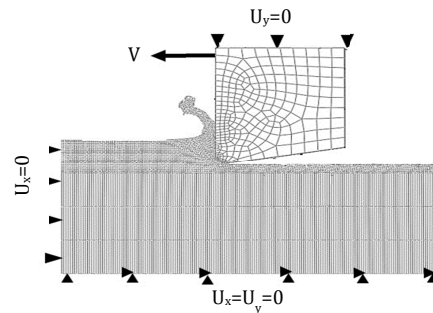
۴-۱- بررسی اثرات پارامترهای برش بر نیروی ماشین‌کاری و درجه حرارت اثرات سرعت برش و میزان پیشروی بر نیروی برش برای هر دو ابزار PCD و K10 در آزمایش‌های عملی و شبیه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است. ستون‌های هاشور خورده بیانگر نتایج به‌دست آمده در آزمایش‌های تجربی هستند و ستون‌های توپر کنار آن بیانگر نتایج نرم‌افزار است. یافته‌های تحقیق و آزمایش‌های عملی بیانگر این موضوع هستند که در مقایسه با ابزار کاربیدی، نیروی برش‌کاری با استفاده از ابزار PCD به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر است. در هر دو ابزار، با افزایش سرعت برش از ۲۳۰ تا ۵۹۰ متر/دقیقه، نیروهای اضافی بر ابزارها در هر سه نرخ پیشروی (به ترتیب رنگ‌های تیره‌تر به روشن برای هر سرعت برش در شکل ۶) کاهش یافته است. داده‌های شبیه‌سازی نیز به‌خوبی مسیر کیفی افزایش نیروی برش‌کاری در طول مسیر برش را نشان داده‌اند. همچنین از نظر کمی داده‌ها در نزدیکی نسبتاً مناسبی با داده‌های حاصل از نتایج عملی هستند. به‌عنوان مثال در

۰/۴۲ محاسبه می‌شود. تنش برشی حداکثر در ناحیه چسبیده قطعه کار ۲۹۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. پس از بررسی همگرایی ابعادی المان‌ها، در نهایت از تعداد ۲۳۰۹۰ المان مکعبی برای مش‌بندی مدل هندسی استفاده شده است. سایر شرایط مرزی جابجایی و مش‌بندی نهایی در شکل ۴ به نمایش درآمده است [۱۲].

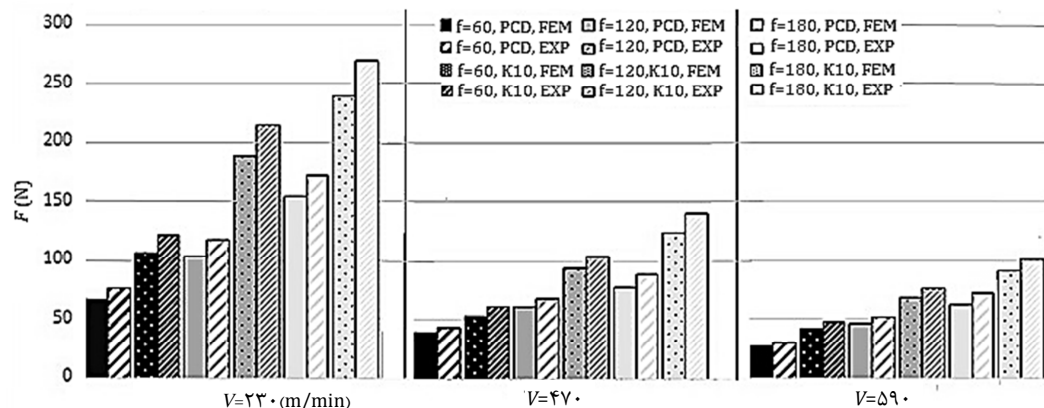
پارامترهای مورد محاسبه تحلیل عبارت‌اند از نیروی ماشین‌کاری بر روی محور طولی، دمای محل برخورد ابزار و قطعه کار و مقدار اعوجاج. بدین منظور در شبیه‌سازی نرم‌افزار برای به دست آوردن نیروی ماشین‌کاری با تعریف یک مسیر در محل برش‌کاری قطعه کار، این نیرو محاسبه خواهد شد. برای به دست آوردن اعوجاج قطعه کار بیش‌ترین جابجایی عمودی محل برش مدنظر قرار خواهد گرفت. در آزمایش‌های عملی نیروهای ماشین‌کار به‌وسیله دینامومتر سه جهتی (مدل B9257 ساخته شده توسط شرکت کیستلر)، درجه حرارت با دوربین مادون‌قرمز حرارتی (مدل DL700 ساخته شده توسط شرکت های‌تک)، محاسبه شده است. همچنین برای محاسبه اعوجاج در قطعه کار، در سه ناحیه در محل ماشین‌کاری شده تلورانس ابعادی اندازه گرفته می‌شود و مجموع این اختلافات ابعادی به‌عنوان اعوجاج گزارش شده است. به‌منظور صحت‌سنجی مدل، سه آزمایش بر روی قطعه کار با ضخامت‌های مختلف به طول‌های ۲/۵، ۲ و ۱/۵ میلی‌متر با سرعت برش ۴۷۰ متر/دقیقه، میزان پیشروی ۶۰ میلی‌متر/دقیقه با ابزار PCD انجام گرفت. اعوجاج مربوط نیز در طول برش برای هر سه ضخامت محاسبه شده است. همچنین به‌منظور استفاده از یک شاخص کمی برای توزیع تنش پسماند و بررسی رابطه آن با اعوجاج، منطقه محصور در میان نمودار تنش پسماند با محور افقی محاسبه شده است. منطقه محصور بر روی هر دو محور افقی و عمودی با استفاده از یک مقیاس یکسان (سانتی‌متر) اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۵



شکل ۵ مقایسه نتایج مطالعه حاضر و نتایج تجربی



شکل ۴ شرایط مرزی جابجایی و مش‌بندی نهایی

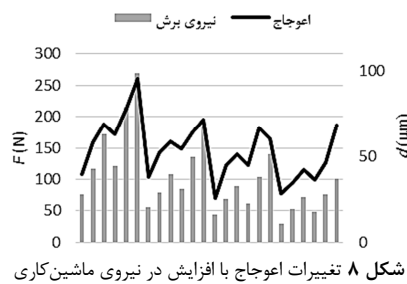


شکل ۶ توزیع نیروی برش با تغییر سرعت برش و پیشروی برای PCD و K10 در نتایج عملی و شبیه‌سازی

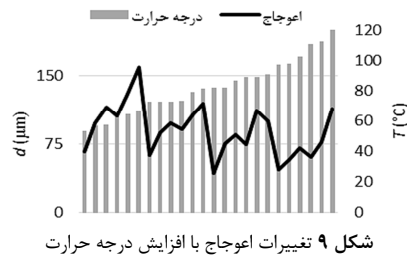
در حالی است که نتایج اعلام شده شرکت های تک، ۲۰۳ و ۸۹ بوده است. به‌طور کلی، در سطح ابزار PCD ضریب اصطکاک خیلی کمتر از ابزار کاربرد است. در نتیجه در این ابزار، درجه حرارت القا شده توسط اصطکاک بر روی سطح تماس با ابزار در طول ماشین‌کاری کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به کم‌تر بودن ضریب اصطکاک ابزار PCD و پارامترهای مناسب‌تر ماشین‌کاری، نیروهای و درجه حرارت در برش به‌صورت قابل توجهی کاهش پیدا کرده‌اند، به‌طوری‌که درجه حرارت و نیروی ماشین‌کاری اندازه‌گیری شده در ابزار PCD در مجموع ۷۱ و ۶۲ درصد کمتر از ابزار کاربرد بوده‌اند. در نتیجه، استفاده از ابزار PCD در ماشین‌کاری با آلیاژهای آلومینیوم ممکن است به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای ابزار کاربردی در نظر گرفته شود.

#### ۴-۲- اثر نیروی برش‌کاری و درجه حرارت بر اعوجاج

به‌منظور مطالعه ارتباط بین ماشین‌کاری و درجه حرارت با اعوجاج، نمودار نیروی- اعوجاج و نمودار دمای- اعوجاج در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. مقدار نیروهای ماشین‌کاری و دماهای به‌دست آمده در ۲۴ آزمایش انجام شده به ترتیب صعودی به کمک یک نمودار ستونی به تصویر کشیده شده‌اند. همچنین به‌منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر دما و نیروهای ماشین‌کاری در چند



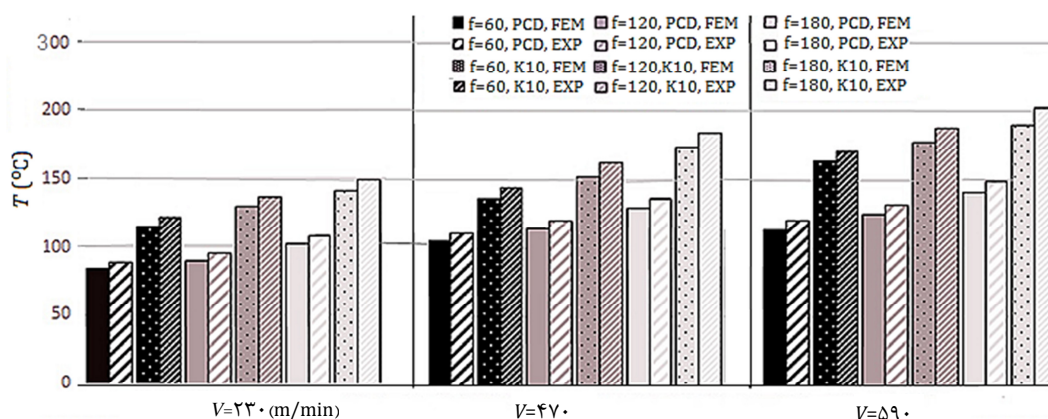
شکل ۸ تغییرات اعوجاج با افزایش در نیروی ماشین‌کاری



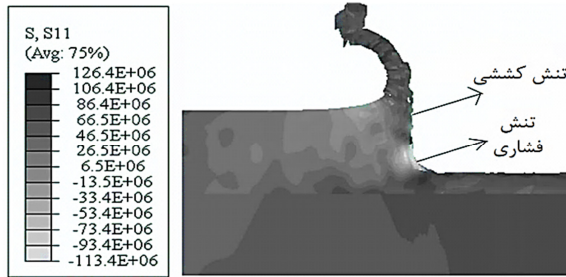
شکل ۹ تغییرات اعوجاج با افزایش درجه حرارت

آزمایش سوم در سرعت برشی ۲۳۰ متر بر دقیقه و نرخ پیش‌روی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه، اختلاف نتایج عملی و شبیه‌سازی در حدود ۱۱ درصد است. با این‌وجود، شیب کاهش نیروی برش‌کاری در سرعت پایین، بالاتر است. همچنین با توجه به شکل، نیروی برش با افزایش نرخ پیش‌روی در تمام سرعت‌های برش‌کاری افزایش داشته است. این روند برای هر دو ابزار PCD و K10 یکسان است. با این‌حال، اعمال نیروها بر روی ابزار PCD در هر دو آزمایش تجربی و المان محدوداً ۶۰٪ پایین‌تر از ابزار K10 است. در شبیه‌سازی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار، حداکثر نیروی برش ۲۳۹ نیوتن در سرعت برش ۲۳۰ متر/دقیقه و نرخ پیش‌روی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه با ابزار کاربردی اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌های عملی نیز صحت نتایج عددی را با همین سرعت برش و نرخ پیش‌روی تأیید می‌کند و اختلاف مقدار گزارش شده در حدود ۱۳٪، ۲۶۹ نیوتن است. حداقل نیروی برش‌کاری برابر ۲۶ نیوتن در سرعت ۵۹۰ متر/دقیقه و نرخ پیش‌روی ۶۰ میلی‌متر / دقیقه با استفاده از ابزار PCD اندازه‌گیری شده است. دینامومتر این عدد را در آزمایش‌های تجربی ۳۰ نیوتن نشان داده. نتایج مدل المان محدود نیز همین سرعت برش و نرخ پیش‌روی تأیید می‌کند و اختلاف مقادیر در حدود ۱۴٪ محاسبه شده است.

به‌طور مشابه، در شکل ۷ دمای اندازه‌گیری شده در منطقه برش در سرعت‌های برش‌های و نرخ پیش‌روی مختلف برای هر دو ابزار نشان داده شده است با توجه به نتایج به‌دست آمده، در هر دو ابزار، درجه حرارت با سرعت برش و افزایش نرخ پیش‌روی افزایش یافته است و گرادیان درجه حرارت با سرعت برش بالاتر افزایش بیشتری داشته است. دمای تراشه ایجاد شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای در ابزار PCD از ابزار کاربرد پایین‌تر است. برای مثال، در سرعت برش ۵۹۰ متر / دقیقه و با نرخ پیش‌روی ۱۸۰ میلی‌متر/دقیقه، درجه حرارت اندازه‌گیری در شبیه‌سازی اجزای محدود ۱۴۱ درجه سانتی‌گراد برای ابزار PCD است (در آزمایش‌های تجربی ۱۴۹ درجه سانتی‌گراد)، درحالی‌که تحت شرایط مشابه، این درجه حرارت اندازه‌گیری شده با ابزار کاربرد ۱۹۱ درجه سانتی‌گراد است (در آزمایش‌های عملی این عدد ۲۰۳ گزارش شده است). نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بین درجه حرارت در ناحیه دوم برش‌کاری با تغییر سرعت و پیش‌روی شبیه‌سازی شده و همچنین سرعت واقعی و پیش‌روی در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. علت این امر استفاده از شرایط مرزی حرارتی و دمایی دقیق در شبیه‌سازی‌های انجام شده و خنک‌کاری مناسب ابزار است. حداکثر و حداقل درجه حرارت اندازه‌گیری در نرم‌افزار ۱۹۱ و ۸۵ درجه سانتی‌گراد بوده، این



شکل ۷ توزیع درجه حرارت با تغییر سرعت برش و پیش‌روی برای K10 و PCD در نتایج عملی و شبیه‌سازی المان محدود



شکل ۱۲ کانتور تنش‌های پسماند در قطعه شماره یک در جدول ۶

مماسی (در امتداد محور سرعت برش) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با افزایش درجه حرارت، قسمتی دمای تولید شده به سطح قطعه کار منتقل می‌شود که منجر به تغییر در ساختار فلزی، انبساط محلی و اعمال تنش پسماند کششی می‌شود. این پدیده را می‌توان با استفاده از تصاویر گرفته شده توسط دوربین مادون قرمز مشاهده کرد. در قسمت الف، شکل ۱۱ تصاویری از قطعه‌کار و منطقه برش در طول آزمایش‌های تجربی در شکل نشان داده شده است. این تصاویر مربوط به یک آزمایش با سرعت برش ۵۹۰ مترادقیقه و نرخ پیشروی ۱۸۰ میلی‌متر / دقیقه است که توسط ابزار PCD انجام شده است. درجه حرارت در این آزمایش ۲۰۳ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. در بخش‌هایی که توسط پیکان مشخص شده‌اند، یعنی در سطح داخلی قطعه کار، درجه حرارت در نوار باریک قابل‌توجهی بالاتر از مناطق دیگر است. این نشان می‌دهد که قسمتی از گرما تولید شده به‌صورت گرادیان حرارتی به قطعه‌کار منتقل شده است. همچنین در قسمت ب به‌خوبی شبیه‌سازی المان محدود نفوذ گرما به سطح قطعه کار را نشان داده است.

برای بررسی دقیق‌تر موضوع کانتور تنش پسماند در شکل ۱۲ برای نمونه شماره ۱ در جدول ۶ به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه مشاهده می‌شود بیشترین تنش فشاری در محل تماس ابزار و قطعه کار ایجاد شده است. همچنین در محل ناحیه دوم برش به دلیل انتقال دما و گرادیان حرارتی و کم‌تر بودن میزان نیروی ابزار، این تنش‌ها کششی هستند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عوامل مؤثر بر اعوجاج در ماشین‌کاری قطعه کار دیواره نازک ساخته شده از آلایز ساخته شده تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری مطالعه شده است. ارتباط بین نیروی ماشین‌کاری و درجه حرارت با اعوجاج بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱- با توجه به ضریب اصطکاک پایین در سطح ابزار PCD و در نتیجه بهبود در شرایط برش‌کاری، نیروهای ماشین‌کاری و درجه حرارت در منطقه برش در این ابزار به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای پایین‌تر از ابزار K10 است. در ابزار PCD، گرادیان درجه حرارت و نیروی ماشین‌کاری حدوداً ۷۰٪ و ۶۲٪ پایین‌تر از ابزار K10 بود؛ بنابراین استفاده از ابزار PCD در ماشین‌کاری با آلایزهای آلومینیوم ممکن است به‌عنوان یک جایگزین مناسب باشد.
- ۲- نتایج نشان‌دهنده اثر مستقیم نیروی برش و درجه حرارت بر سطح اعوجاج در قطعات کار دیواره نازک است. افزایش درجه حرارت و درجه حرارت منجر به افزایش در اعوجاج می‌شود. باین‌حال، در مقایسه بارهای حرارتی، بارهای مکانیکی تأثیر بیشتری در اعوجاج قطعه‌کار دارند. همچنین در ماشین‌کاری توسط ابزار PCD با توجه به نیروی و درجه حرارت کم‌تر، اعوجاج کاهش می‌یابد.
- ۳- اعمال نیروی مکانیکی و گرادیان حرارتی در قطعه‌کار در طول

نمونه قطعه‌کار در شرایط ماشین‌کاری مختلف خاص، مقدار اعوجاج شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار در جدول ۶ به نمایش درآمده است. به‌طور کلی از نمودارهای شکل ۸ و ۹ برداشت می‌شود که نوسانات اعوجاج قطعه‌کار که با افزایش دما بیشتر شده‌اند، می‌تواند به علت تغییر در نیروهای اندازه‌گیری شده در هر آزمون مرتبط باشد. به‌عنوان مثال، در قطعات شماره ۳ و ۴ در جدول ۳ (ستون ۶ و ۷ در شکل ۹) درجه حرارت یکسان ۱۰۸ درجه سانتی‌گراد است، یک اختلاف زیاد در اعوجاج دارند. این تفاوت به علت تفاوت بالا در نیروی اندازه‌گیری شده از این دو قطعه است. قطعه کاری که نیروی بیشتری تحمل کرده است (شماره ۳ در جدول ۶) دارای اعوجاج بیشتری است. با توجه به قطعات شماره ۱ و ۲ در جدول ۶ که یک نیروی یکسان (۷۶ نیوتن) را دارند، مقدار اعوجاج اندازه‌گیری شده متفاوت است. هر چه درجه حرارت بالاتر رفته است، اعوجاج نیز بیشتر شده است.

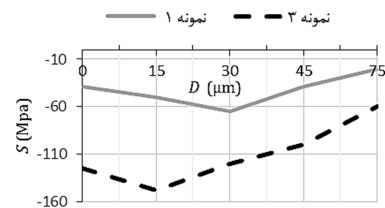
نتایج این قسمت نشان‌دهنده تأثیر مستقیم نیرو و درجه حرارت بر روی اعوجاج قطعات مورد آزمایش دارد، به‌خصوص نیروی ماشین‌کاری اثر بیشتری در اعوجاج قطعه کار جدار نازک در مقایسه با درجه حرارت دارد. تغییر در نیروها در این آزمایش‌ها با درجه حرارت یکسان، باعث مقدار اعوجاج متفاوت شد و منجر به نوسانات شدیدتری در نمودار نیرو- اعوجاج نسبت به دما- اعوجاج شد. حتی می‌توان ادعا کرد که با توجه به این‌که نمودار دما- اعوجاج روند خاصی را دنبال نمی‌کند، این امر به دلیل نبود روند مشخص در تغییر نیروهای ماشین‌کاری بوده است.

## ۴-۳- اثر نیروی برش‌کاری و درجه حرارت بر توزیع و مقدار تنش پسماند

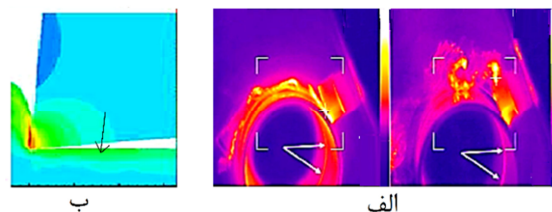
برای نشان دادن تأثیر نیروی ماشین‌کاری بر تنش، برای نمونه‌های ۱ و ۳ در جدول ۶ (کمترین و بیشترین نیرو) مقدار و توزیع تنش پسماند در جهت

جدول ۶ چند نمونه از نرخ اعوجاج قطعه کار تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری

نمونه	$v$	$f$	tool	$F$	$T$	$d$
۱	۵۹۰	۱۲۰	K10	۷۶	۲۰۳	۶۵
۲	۲۳۰	۶۰	PCD	۷۶	۹۵	۵۸
۳	۲۳۰	۱۸۰	PCD	۱۷۲	۱۰۸	۶۹
۴	۳۵۰	۱۲۰	PCD	۱۳۶	۱۰۸	۵۲



شکل ۱۰ توزیع و مقدار تنش پسماند در جهت طول برش‌کاری برای نمونه ۱ و ۳ در جدول ۶



شکل ۱۱ انتقال قسمتی از گرمای تولید شده به منطقه برش‌کاری (الف) آزمایش‌های تجربی (ب) کانتور دما در شبیه‌سازی اجزای محدود

$\epsilon_f$	کرنش شکست	ماشین کاری، توزیع تنش پسماند را تحت تأثیر قرار می دهد. با افزایش
$\mu$	ضریب اصطکاک	تنش های پسماند، اعوجاج و بی ثباتی در قطعه کار افزایش می یابد. افزایش
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )	یا کاهش در نیرو و دما باعث گستردگی توزیع در تنش های پسماند
$\eta$	کسری انرژی اصطکاکی تبدیل شده به حرارت	می شود. نتایج نشان می دهد که افزایش در نیروهای ماشین کاری منجر به
زیرنویس		تنش پسماند فشاری است در حالی که افزایش درجه حرارت منجر به
c	براده	افزایش احتمال تشکیل تنش پسماند کششی را افزایش می دهد.

## ۶- فهرست علائم

$A_1$	تنش سیلان اولیه (MPa)
$A$	سطح محصور ( $\text{cm}^2$ )
$B$	تنش سیلان ثانویه (MPa)
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ابزار ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ )
$D$	عمق برش ( $\mu\text{m}$ )
$f$	سرعت پیشروی ( $\text{mm/min}$ )
$F$	نیروی برش (N)
$H$	ارتفاع قطعه کار (mm)
$h_0$	ضریب همرفتی ابزار با محیط ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$h_1$	ضریب همرفتی قطعه کار با محیط ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
$K$	ضریب هدایتی براده ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$K_{10}$	کاربید سمانته
$L$	طول برش (mm)
$L_1$	طول ابزار (mm)
$m$	ضریب حساسیت نرخ کرنش
$n$	توان کرنش سختی
$PCD$	الماس چندبلوری
$P_{fr}$	انرژی حاصل از اصطکاک لغزشی (j)
$q$	شار گرمایی وارد شده (j)
$r$	شعاع نوک ابزار (mm)
$S$	تنش (MPa)
$T$	دما ( $^\circ\text{C}$ )
$T_0$	دمای محیط ( $^\circ\text{C}$ )
$T_1$	دمای ابزار در تماس با محیط ( $^\circ\text{C}$ )
$U$	جابجایی قطعه کار (mm)
$V$	سرعت برش ( $\text{ms}^{-1}$ )

## علائم یونانی

$\alpha$	زاویه سطح براده
$\beta$	زاویه آزاد
$\epsilon$	کرنش الاستیک
$\epsilon'$	نرخ کرنش پلاستیک
$\epsilon''$	نرخ کرنش پلاستیک مرجع

## ۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از استاد محترم جناب آقای دکتر سعید امینی که در امر معرفی این طرح و اهمیت آن، نقش به سزایی داشتند، صمیمانه سپاس گزار می نمایند.

## ۸- مراجع

- [1] M. Popma, *Computer aided process planning for high-speed milling of thin-walled parts Strategy-based support*, PhD Thesis, Department of Engineering Technology, Twente University, Amsterdam, 2010.
- [2] L. Liu, P. Sun, Study on the machining distortion of aluminum alloy parts induced by forging residual stresses, *Engineering manufacture*, Vol. 28, No. 9, pp. 65-81, 2015.
- [3] K. Jitender, P. Xirouchakis, Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components, *Machine tools and manufacture*, Vol.48, No.6, pp. 629-643, 2008.
- [4] Y. Yang, Y. Wang, C. Li, Study on machining distortion of titanium alloy aircraft monolithic component by finite element method and experiment, *Advanced science letters*, Vol.4, No.8, pp. 3206-3210, 2011.
- [5] H. Lio, D. W. Zuo, G. Q. Tong, Prediction on milling distortion for aero-multi-frame parts, *5th International conference on physical and numerical simulations of material processing*, Zhengzhou, China, 2007.
- [6] S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A. A. Becker, An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling, *Machine Tools and Manufacture*, Vol.46, No.5, pp. 542-551, 2006.
- [7] S. Ratchev, S. Liu, A. A. Becker, Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts, *Materials processing technology*, Vol.162, No.1, pp. 673-681, 2005.
- [8] Y. Bi, Q. Cheng, Y. Ke, Machining distortion prediction of aerospace monolithic components, *Zhejiang university SCIENCE A*, Vol.10, No.5, pp. 661-668, 2009.
- [9] E. Brinksmeier, C. Heinzl, M. Garbrecht, R. Griet, Residual stresses in high speed turning of thin-walled cylindrical work pieces, *Automation Technology*, Vol.5, No.3, pp. 313-319, 2011.
- [10] N. T. Nguyen, O. S. Seo, C. A. Lee, M. G. Lee, J. H. Kim, H. Y. Kim, Mechanical behavior of AZ31B Mg alloy sheets under monotonic and cyclic loadings at room and moderately elevated temperatures, *Materials*, Vol.7, No.2, pp. 1271-1295, 2014.
- [11] M. R. Movahhedy, *ALE simulation of chip formation in orthogonal metal cutting process*, PhD Thesis, Department of Engineering Technology, British Columbia University, Canada, 2010.
- [12] A. Davoudinejad, E. Chiappini, S. Tirelli, M. Annoni, Finite element simulation and validation of chip formation and cutting forces in dry and cryogenic cutting of Ti-6Al-4V, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 97, No. 4, pp. 50-62, 2015.
- [13] B. Gholamzadeh, M. J. Nategh, H. Soleimanimehr, M. Shankayi, An Investigation on the Effect of Vibrational Parameters on Tool Temperature in Ultrasonic Assisted Turning, *Aerospace Mechanics*, Vol.9, No.3, pp. 9-17, 2013. (In Persian)
- [14] S. Masoudi, S. Amini, E. Saeidi, H. Eslami-Chalander, Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts, *Advanced manufacturing technology*, Vol.76, No.1-4, pp. 597-608, 2015.