

بررسی تأثیرات متغیرهای فرایند در شکل دهی تدریجی گرم تیتانیوم Ti-6Al-4V

حسین خزاالی*

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

فرامرز فرشته صنیعی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

روش شکل دهی تدریجی ورق از روش های جذاب شکل دهی ورقی می باشد. استفاده از تحلیل های اجزاء محدود این روش به خصوص در دمای بالا برای آلیاژهایی مثل تیتانیوم Ti-6Al-4V در کاهش هزینه ی پژوهش نقش بسزایی دارد. در مطالعه ی حاضر با استفاده از نتایج آزمایش های عملی، اقدام به شبیه سازی شکل دهی گرم تدریجی تیتانیوم گردید و اعتبار آن توسط سه خروجی نمودارهای حدی، عمق شکل دهی و کمترین ضخامت ارزیابی شد. سپس اثر عوامل فرایند بر روی نیروهای وارد بر ابزار با در نظر گرفتن حرارت تولیدی حین آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که نیروهای عمودی بیشترین مقادیر را در بین این نیروها دارند. به علاوه کاهش دمای اولیه ی ورق و افزایش گام عمودی و قطر ابزار، این نیروها را افزایش داده است. همچنین مشاهده گردید که هندسه ی شکل دهی شده و جنس ماده تأثیر بسزایی در تغییرات نیروها دارند. توزیع کرنش های مؤثر نیز کشیدگی بیش تر ورق را در ناحیه ی میانی آن به نمایش گذاشت. در پایان، تحلیل کماتش و تنش های وارد بر ابزار نشان داد که بیش ترین خطر ناشی از تنش های اعمالی به ابزار، از نوع خمشی کششی و ناشی از نیروهای طولی بود.

واژه های کلیدی: شکل دهی تدریجی گرم، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، تحلیل اجزاء محدود، نیروهای شکل دهی.

An Investigation on the Effects of the Process Variables on the Warm Incremental forming of the Titanium Ti-6Al-4V

H. Khazaali

Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

F. Fereshteh-Saniee

Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract

The incremental forming is an attractive sheet forming operation. Finite element analyses specially at elevated temperatures for important alloys such as titanium Ti-6Al-4V are very affordable. In this study, warm incremental forming of Ti-6Al-4V is simulated and validated using different experimental outputs, namely forming limit diagrams, the drawing depth and the minimum thickness of the sample. Then, the effects of the process parameters on the forming forces are investigated considering heat generation during the process. It is found that the maximum amounts of the forming forces belong to the vertical component. In addition, any decrease in the initial temperature of the sheet as well as increase in the vertical pitch and/or tool diameter could cause certain increases in vertical forces. Furthermore, it is shown that the specimen geometry and the material can significantly influence the forming forces. Effective strain distributions also illustrate that the major sheet stretching occur in the centerline of the groove. Finally, the buckling and stress analyses of the tool imply that the tool instability and damage can mainly be caused by the tensile bending stresses.

Keywords: Warm incremental forming, Titanium Ti-6Al-4V, Finite element analysis, Forming forces.

می رود [۱، ۲-۵]. بگوندچ و همکاران [۶] نیز در تحقیق بر روی شکل دهی تدریجی مواد پلیمری نشان دادند که سرعت چرخش ابزار بر روی حرارت تولیدی و در نتیجه نیروهای شکل دهی تأثیر گذار بوده و این نیروها را کاهش می دهد. بررسی اثر نوع اجزاء محدود، قانون و روش تعیین مشخصات ماده بر روی نیروهای شکل دهی در شبیه سازی شکل دهی تدریجی مخروط ناقص موضوعی است که هنرارد و همکاران [۷] به آن پرداختند. آن ها نشان دادند که برای مخروط با زاویه ی جداره ی کم تر از ۲۰ درجه، استفاده از اجزاء پوسته نتایج بهتری ارائه می دهند. مینوتولو و همکاران [۸] نیز با استفاده از دو مسیرازار متفاوت در شکل دهی تدریجی یک شیار بر روی ورق آلومینیومی نشان دادند که نیروهای عمودی وارد بر ابزار، در مسیرازار حلزونی به دلیل اعمال تدریجی گام عمودی در طول مسیر به ورق، مقادیر کمتری نسبت به مسیرازاری که در ابتدای مسیر گام عمودی را به ورق اعمال

۱- مقدمه

یک روش شکل دهی ورقی که به طور روزافزون در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار گرفته است، روش شکل دهی تدریجی^۱ می باشد. این فرایند شکل دهی عموماً توسط یک دستگاه CNC، یک نگهدارنده ی ورق^۲ و یک ابزار^۳ با کنگی نیمکره صورت می گیرد [۱]. از موارد حائز اهمیت در شکل دهی تدریجی، نیروهای وارد بر ابزار را می توان نام برد که با انتخاب مناسب قطر ابزار، مسیرازار، گام عمودی، سرعت پیشروی و چرخش ابزار و دیگر عوامل مؤثر می توان آن ها را بهبود بخشید. مطالعات پیشین نشان می دهند که با افزایش قطر ابزار، گام عمودی، زاویه ی جداره ی مخروط ناقص و ضخامت ورق در شکل دهی یک مخروط ناقص در دمای اتاق، نیروهای شکل دهی بالا

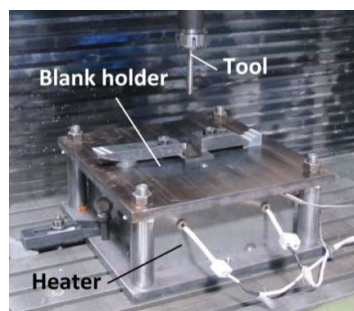
¹ Incremental forming

² Blank holder

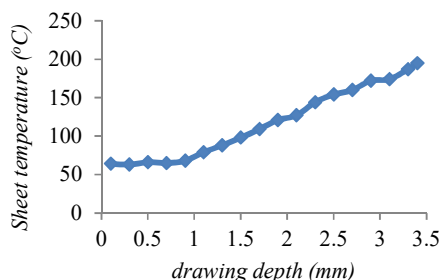
³ Tool

⁴ Groove

ابزارها به ترتیب ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر، گام عمودی برابر ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۷ میلی‌متر و دمای اولیه‌ی ورق نیز به ترتیب ۱۲۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس بود. آزمایش‌ها با تنظیم دمای ورق بر روی دمای مورد نظر شروع شده، با فشار آوردن ابزار بر روی ورق به صورت تدریجی تا لحظه‌ی وقوع ترک در نمونه‌ها ادامه پیدا کرد و دمای ورق به صورت لحظه‌ای تا انتهای فرایند اندازه‌گیری گردید (شکل ۲). پس از اتمام فرایند و وقوع شکست در قطعه‌کار، میزان پایین رفتن ابزار نسبت به سطح اولیه‌ی ورق به عنوان عمق شکل‌دهی در نظر گرفته شد. با استفاده از چاپ شبکه‌ای از دایره‌ها با قطر ۲ میلی‌متر بر روی نمونه‌ها و اندازه‌گیری قطر بزرگ و کوچک آن‌ها که به بیضی تبدیل شده‌اند، پس از شکل‌دهی، نمودارهای حد شکل‌پذیری متشکل از کرنش‌های اصلی و فرعی استخراج گردید. به علاوه، با برش دادن نمونه‌ها و تصویربرداری از مقطع عرضی آن‌ها توسط دستگاه پرتوافکن مقطعی ضخامت محصول در راستای عمود بر شیار اندازه‌گیری شد. جزئیات بیشتر از آزمایش‌ها و بحث در مورد نتایج آن‌ها به تفصیل در مرجع [۱۷] آورده شده است.



شکل ۱- تجهیزات به کار رفته در آزمایش‌های عملی



شکل ۲- دمای لحظه‌ای برای آزمایش ۰/۱-۸-۷۰

۲-۲- آزمایش‌های عملی منتخب

آزمایش‌هایی از بین آزمایش‌های عملی کامل انجام شده به صورت تجربی گزینش گردید تا اثر عوامل مختلف بر روی خروجی‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گیرد. هدف از این مطالعه نیز شبیه‌سازی همان آزمایش‌های منتخب برای بررسی اثر عوامل مختلف بر روی نیروهای شکل‌دهی بوده است. این آزمایش‌ها و نتایج مورد نیاز آن‌ها برای اعتبارسنجی در این مطالعه، در جدول ۱ نمایش داده شده است. برای راحتی کار به هر آزمایش کدی اختصاص داده شد که اعداد آن از چپ به راست به ترتیب بیانگر دمای اولیه‌ی ورق، قطر ابزار و گام عمودی می‌باشند.

می‌کند دارند. به علاوه، فیلیس و همکاران [۹] در مطالعه‌ی خود نشان دادند که با رصد پویای نیروهای شکل‌دهی حین فرایند شکل‌دهی تدریجی، می‌توان لحظه‌ی وقوع ترک را ارزیابی نموده و با تغییر در عوامل تأثیرگذار در فرایند، شکست در قطعه را به تعویق انداخت.

به دلیل گران‌قیمت بودن برخی مواد مانند آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V که از آلیاژهای پرکاربرد در صنایع هوافضا است و نیز به منظور کاهش هزینه‌های انجام آزمایش‌های عملی، محققین از هندسه‌ای ساده تحت عنوان آزمایش شیار در پژوهش‌های خود استفاده کرده‌اند. در این آزمایش، ابزار مسیری رفت و برگشتی را طی نموده و همزمان ورق را به پایین فشار می‌دهد و شیاری در ورق ایجاد می‌نماید. از این آزمایش در مطالعه بر روی نمودارهای حد شکل‌پذیری و حتی یافتن ضریب اصطکاک بین ابزار و ورق نیز استفاده گردیده است [۱۰-۱۳].

امروزه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نیز در کاهش هزینه‌های انجام آزمایش تأثیر شگرفی دارند. در زمینه‌ی شکل‌دهی تدریجی نیز شبیه‌سازی‌هایی صورت گرفته است. برای مثال با شبیه‌سازی شکل‌دهی تدریجی مخروط و هرم ناقص، بیش‌ترین زاویه‌ی جداره‌ی قابل حصول به عنوان معیاری از قابلیت شکل‌دهی ارزیابی شده است [۱۴، ۱۵]. دجاردین و همکاران [۱۶] نیز در مطالعه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی به تحقیق بر روی برگشت فنری و دقت ابعادی مخروط شکل‌دهی شده با روش شکل‌دهی تدریجی پرداختند.

خزاعلی و فرشته-صنّعی [۱۷] در مطالعه‌ای به انجام آزمایش‌های عملی کامل شکل‌دهی گرم تدریجی شیار بر روی فلز تیتانیوم Ti-6Al-4V به منظور بررسی اثر عوامل مختلف بر روی دمای نهایی ورق در لحظه‌ی وقوع شکست، عمق شکل‌دهی، قابلیت شکل‌پذیری، برگشت فنری و کاهش ضخامت پرداختند. اما به دلیل پرهزینه بودن آزمایش‌ها و نبود امکانات کافی برای مطالعه بر روی نیروهای شکل‌دهی وارد بر ابزار، در پژوهش حاضر با به کارگیری شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود، اقدام به بررسی نیروهای وارد بر ابزار و اثر عوامل مختلف بر روی این نیروها شده است. این نیروها تاکنون برای فلز تیتانیوم و به خصوص در دمای بالا مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند. به علاوه با اندازه‌گیری دمای لحظه‌ای فرایند طی آزمایش‌های عملی، امکان لحاظ نمودن حرارت تولیدی ناشی از اصطکاک بین ورق و ابزار در شبیه‌سازی‌های این مطالعه فراهم آمد. همچنین با مقایسه‌ی این نیروها با نتایج دیگر محققین، اثر هندسه و جنس ماده بر روی تغییرات نیروهای وارد بر ابزار مورد تحلیل قرار گرفت. مطالعه بر روی تنش‌های ایجاد شده در ابزار شکل‌دهی در اثر اعمال نیروهای فرایند نیز از دیگر موضوعات بررسی شده در پژوهش حاضر است.

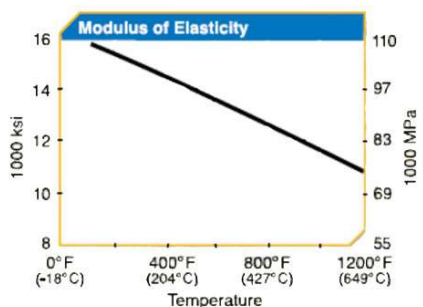
۲- آزمایش‌های عملی

۲-۱- شرایط و نحوه‌ی انجام آزمایش‌های عملی

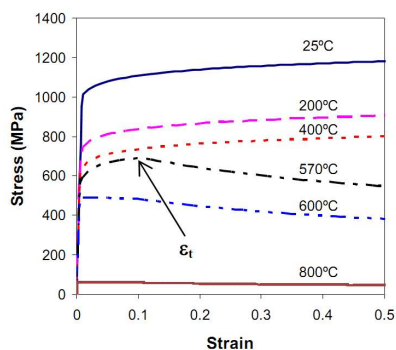
پیش از انجام شبیه‌سازی‌های عددی مورد نیاز، به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، نیاز به نتایج آزمایش‌های عملی بود که توسط نویسندگان مقاله‌ی حاضر صورت گرفته بود [۱۷]. تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این آزمایش‌ها ضخامت ورق ۰/۵، ابعاد ورق مورد نیاز ۹۰×۵۰، طول شیار برابر ۴۰ و پهنای آن ۲۰ میلی‌متر، مسیر ابزار حلزونی، قطر

حاضر [۱۷] استخراج گردیده بود. نمودارهای حد شکل پذیری مورد نیاز در این مطالعه در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.

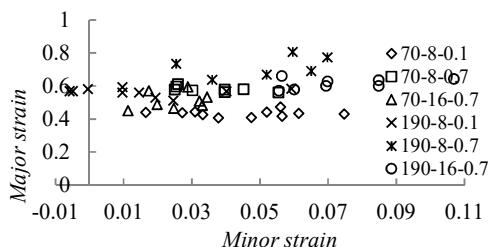
با توجه به هندسه‌ی ورق مدل شده و به‌منظور امکان شبکه‌بندی مناسب، به قسمت‌بندی ورق پرداخته شد. این قسمت‌بندی طوری طراحی گردید که ناحیه‌ای از ورق که در آن تغییرشکل بیش‌تری رخ می‌داد، اجزای محدود کوچک‌تری داشته باشد و در قسمت‌های دیگر ابعاد اجزای محدود بزرگ‌تر باشند. با این کار زمان حل مسئله بسیار کاهش پیدا نمود زیرا تعداد اجزاء به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. نوع اجزاء انتخابی در این تحلیل نیز چهارضلعی و به‌دلیل صریح بودن حل و پوسته‌ای بودن ورق، از نوع S4R انتخاب گردید [۲۱]. در شکل ۶، نمودار همگرایی اجزاء محدود و در شکل ۷ شبکه‌ی ایجاد شده برای ورق و نیز ابزار شکل‌دهی نمایش داده شده است.



شکل ۳- ضریب ارتجاعی تیتانیوم Ti-6Al-4V در دماهای بالا [۱۹]



شکل ۴- منحنی‌های تنش-کرنش واقعی تیتانیوم در دماهای بالا [۲۰]



شکل ۵- نمودارهای حد شکل‌پذیری آزمایش‌های شیار گزینش شده تیتانیوم [۱۷]

جدول ۱- نتایج تجربی آزمایش‌های شیار تیتانیوم گزینش شده [۱۷]

کد آزمایش	دمای نهایی (درجه‌ی سلسیوس)	عمق شکل‌دهی (میلی‌متر)	ضخامت ورق (میلی‌متر)	کمترین
۰۸-۷۰/۱	۱۹۵	۳/۴	۰/۳۴۰	
۰۸-۷۰/۷	۳۰۰	۴/۹	۰/۳۳۵	
۰۱۶-۷۰/۷	۵۰۰	۰/۷	۰/۳۶۲	
۰۸-۱۹۰/۱	۳۳۲	۴/۸	۰/۲۷۵	
۰۸-۱۹۰/۷	۳۸۶	۴/۶	۰/۲۶۰	
۰۱۶-۱۹۰/۷	۵۴۷	۷/۷	۰/۳۵۶	

۳- شبیه‌سازی فرایند با ابزار تغییرشکل‌ناپذیر

از نرم افزار آباکوس^۱ و روش صریح که در حل مسائل دینامیکی سریع‌تر است برای شبیه‌سازی فرایند استفاده شد [۱۶]. ساده‌سازی‌هایی در شبیه‌سازی فرایند به‌منظور کاهش زمان حل صورت گرفت. از آن‌جا که تنها قسمتی از ورق که در ناحیه‌ی شیار تعبیه شده در نگهدارنده قرار داشت دچار تغییرشکل می‌شد، از مدل کردن کل ورق صرف‌نظر گردید. با اعمال شرط مرزی دوخته^۲ به ورق در اطراف آن، شرایط آزمایش عملی شبیه‌سازی شد. ورق به‌صورت سه بعدی و تغییرشکل‌پذیر با اجزایی از نوع پوسته و با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر مدل گردید. ابزار در این تحلیل تغییرشکل نداده و بنابراین به‌صورت سه بعدی، تغییرشکل‌ناپذیر تحلیلی^۳ با شرط مرزی جابجایی/چرخش^۴ و با قطرهای مورد نظر ۸ و ۱۶ میلی‌متر مدل شد. ضریب اصطکاک نیز برابر ۰/۲ انتخاب گردید [۱۸].

از آن‌جا که هدف از این مطالعه در نظر گرفتن گرمای تولید شده حین آزمایش بود، نیاز به مشخصات ماده در دماهای بالا بوده است. به‌دلیل این‌که شبیه‌سازی فرایند با دمای متغیر حین آزمایش زمان بسیار زیادی به‌دلیل گذرا بودن تحلیل می‌برد، از دمای نهایی هر آزمایش برای تعریف مشخصات ماده در نرم‌افزار استفاده گردید. به‌عبارت دیگر رفتار ماده که بسیار تأثیرپذیر از دمای آن بود، در زمان وقوع ترک و با استفاده از دمای نهایی اندازه‌گیری شده‌ی تجربی تعیین شد. البته درستی این فرض پس از حل مسئله و به‌دست آمدن جواب‌های با دقت مناسب تأیید گردید. چگالی تیتانیوم Ti-6Al-4V برابر با ۴۴۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب یانگ این ماده در دماهای مختلف بر اساس شکل ۳ معرفی گردید [۱۹]. منحنی‌های تنش-کرنش واقعی در دماهای بالا نیز مطابق شکل ۴ تعریف شد [۲۰].

از آن‌جا که آزمایش‌های عملی تا زمان وقوع ترک ادامه یافته بود، در شبیه‌سازی‌ها نیز نیاز به تعریف معیار خرابی (شکست) در مشخصات ماده به‌منظور تشخیص وقوع ترک بود. شرایط خرابی ماده به‌صورت نمودارهای حد شکل‌پذیری در نرم‌افزار تعریف گردید که از مجموعه آزمایش‌های کامل انجام شده در مطالعات پیشین نویسندگان مقاله

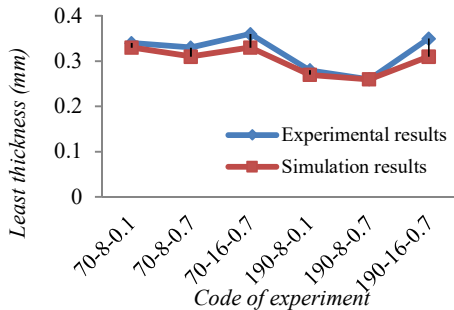
^۱ Abaqus

^۲ Pinned

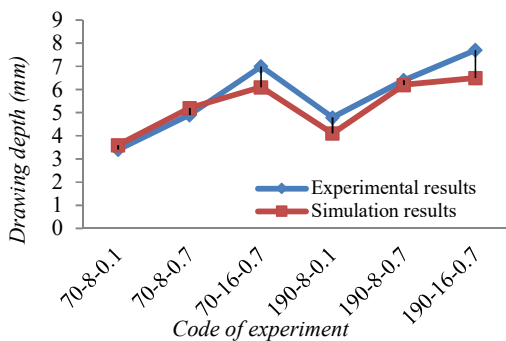
^۳ Analytical Rigid

^۴ Displacement/Rotation

با آزمایش با قطر ابزار ۱۶ میلی‌متر مشاهده گردید. علت آن است که برای ابزار بزرگ‌تر، کرنش به ناحیه‌ی گسترده‌تری از ورق وارد شده و کشیدگی کم‌تری در ورق رخ داده است. با دقت در عمق شکل‌دهی در لحظه‌ی وقوع ترک برای این دو آزمایش نیز این امر تأیید گردید و ملاحظه شد که با استفاده از ابزار بزرگ‌تر، عمق شکل‌دهی بیش‌تری به‌دست آمد.



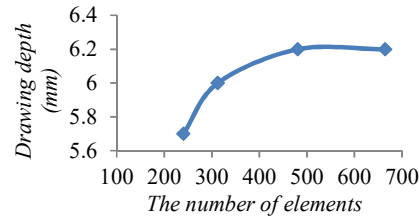
شکل ۸- نتایج عددی و عملی کم‌ترین ضخامت ورق برای آزمایش‌های شیارمنتخب



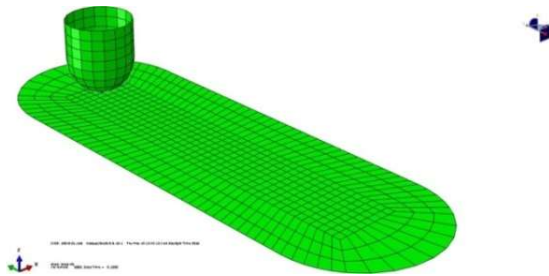
شکل ۹- مقادیر عددی و تجربی عمق شکل‌دهی برای آزمایش‌های شیار گزینش شده

هدف اصلی از شبیه‌سازی آزمایش شیار، بررسی نیروهای وارد بر ابزار و اثر عوامل مختلف بر روی آن‌ها بود. این نیروها شامل نیروهای طولی^۵، عرضی^۶ و عمودی^۷ بودند که به ترتیب در راستای شیار، عمود بر مسیر شیار و در راستای ابزار به آن وارد می‌شدند [۱، ۴]. نتایج نیروهای شکل‌دهی برای آزمایش‌های منتخب در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

با دقت در نمودارهای نیروهای شکل‌دهی، سه رفتار متفاوت از سه نیروی وارد بر ابزار مشاهده می‌گردد. نیروی عرضی که در واقع در راستای عرض شیار بود به‌دلیل وجود تقارن در هندسه‌ی ابزار و قطعه، در تمامی موارد تقریباً صفر می‌باشد. در واقع ابزار با پیشرفت فرایند شکل‌دهی و پایین آمدن، در راستای عرضی تقارن داشته و ورق در دو طرف ابزار با شرایط یکسان کشیده می‌شود. به همین دلیل نیرویی در راستای عرضی شیار به ابزار وارد نمی‌گردد.



شکل ۶- نمودارهای همگرایی اجزاء محدود



شکل ۷- شبکه‌بندی ورق برای شبیه‌سازی‌های به روش اجزاء محدود

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با ابزار تغییر شکل ناپذیر و بحث در مورد آن‌ها

در مطالعه‌ی حاضر با افزایش تعداد اجزاء و نیز مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج عملی برای آزمایش‌های منتخب، هم‌گرایی نتایج و نیز اعتبار شبکه‌بندی و شبیه‌سازی ارزیابی شد. به‌این صورت که با تعریف کردن نمودارهای حدی مستخرج از آزمایش‌های عملی برای نرم‌افزار، زمان وقوع پارگی در قطعه مشخص شد و سپس برای نمونه‌ی پاره شده، عمق شکل‌دهی و کم‌ترین ضخامت در نرم‌افزار اندازه‌گیری گردید. در واقع با استفاده از نتایج نمودارهای حد شکل‌پذیری آزمایش‌های عملی در شبیه‌سازی، کم‌ترین ضخامت و عمق شکل‌دهی در لحظه‌ی وقوع ترک در نمونه از تحلیل اجزاء محدود نرم‌افزار استخراج شده و با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه شد. این نتایج در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد و این حاکی از قابل اعتماد بودن شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده است.

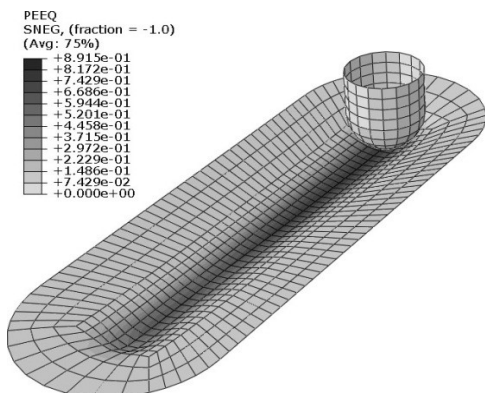
در شکل ۱۰ توزیع کرنش مؤثر در دو عمق شکل‌دهی یکسان برای آزمایش‌های با کد ۷۰-۸-۰.۷ و ۷۰-۱۶-۰.۷ نمایش داده شده است. به‌خوبی قابل مشاهده است که کشیدگی در ورق در ناحیه‌ای از ورق که شبکه‌ی ریزتری از اجزاء محدود قرار گرفته اتفاق افتاده است. این پدیده هم برای قطر ابزار ۱۶ میلی‌متر که ناحیه‌ی وسیع‌تری از ورق دچار تغییر شکل پلاستیک شده است مصداق دارد و هم برای قطر ابزار ۸ میلی‌متر که این ناحیه در آن کوچک‌تر می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که طراحی قسمت‌بندی و ابعاد آن منطقی و قابل قبول بوده و بدون تغییر در نتایج تحلیل، سرعت حل مسئله را افزایش داده است. به‌علاوه، ملاحظه می‌گردد که بیش‌ترین میزان کشیدگی ورق که با رنگ‌های تیره‌تر نمایش داده شده است، مربوط به ناحیه‌ای از ورق است که با راس ابزار درگیر بوده و به تعبیری، نوک ابزار از آن عبور می‌نمود. همچنین با توجه به عمق شکل‌دهی یکسان برای هر دو آزمایش، کرنش‌های مؤثر بیش‌تری در آزمایش با قطر ابزار ۸ میلی‌متر در مقایسه

⁵ Longitudinal

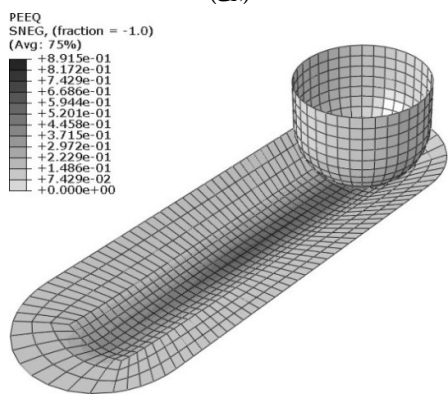
⁶ Transverse

⁷ Vertical

انتهای هر مسیر افقی بود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- توزیع کرنش مؤثر عددی برای آزمایش‌های با کد (الف) ۰۰۷- و (ب) ۰۰۷-۱۶-۷۰

نیروهای اندازه‌گیری شده در مطالعه‌ی مینوتولو و همکاران [۸] نیز روندی مشابه با نتایج عددی مطالعه‌ی حاضر داشت که خود حاکی از صحیح بودن شبیه‌سازی عددی آزمایش شیار می‌باشد (شکل ۱۲). اما محققین فوق‌الذکر به بررسی اثر عوامل مختلف فرایند بر روی این نیروها نپرداخته بودند. تفاوت دیگر پژوهش آن‌ها و تحقیق حاضر در مقادیر نیرو بود که به دلیل انتخاب AI 2024-T3 توسط این محققین، مقادیر نیرو بسیار کم‌تر از نیروهای شکل‌دهی تیتانیم بود. به‌طوری‌که برای مثال نیروی طولی بیشینه برای آزمایش شیار آلومینیم با قطر ابزار ۱۰ و گام عمودی ۰/۵ میلی‌متر، در مقایسه با بیشینه مقدار این نیرو حتی برای قطر ابزار و گام عمودی کم‌تر برای آزمایش شیار تیتانیم، تا ۴/۵ برابر افزایش داشت. این افزایش برای بیش‌ترین مقادیر نیروهای عمودی برای دو فلز نیز تا ۲ برابر مشاهده گردید. این افزایش نیروها همچنین مؤید افزایش چشمگیر دمای ورق به دلیل بالا رفتن اصطکاک بین ابزار و ورق بود که خزانلی و فرشته‌صنعی [۱۷] در مطالعه‌ی خود به تفصیل به آن اشاره نموده‌اند.

برای مقایسه‌ی این نیروها با هم و بررسی اثر عوامل مختلف فرایند بر روی این نیروها، بیش‌ترین مقادیر نیروهای عمودی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته‌اند. دلیل انتخاب نیروهای عمودی این بود که بر

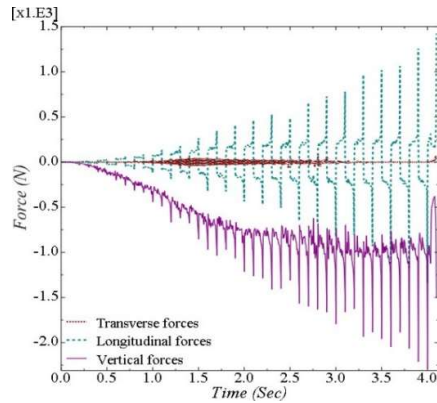
نیروهای عمودی در سطح تماس در واقع با پایین رفتن ابزار مخالفت می‌کنند و به عبارت دیگر در راستای میله‌ی ابزار می‌باشند. این نیروها باعث ایجاد تنش محوری قائم در ابزار و احیاناً کماتش آن می‌شوند و از این رو حائز اهمیت هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نیروها از مقدار صفر شروع شده و با پایین آمدن ابزار طی یک مسیر حلزونی، به تدریج افزایش یافته و در هر مسیر افزایش تدریجی گام در طول مسیر را نمایش می‌دهند. مشابه این روند اما برای موادی دیگر، در نتایج محققین قبلی نیز مشاهده شده است [۲، ۴].

رفته رفته با افزایش عمق شکل‌دهی به دلیل مقاومت ورق نسبت به شکل‌دهی و نیز افزایش حجم ماده‌ای که به‌طور همزمان تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد، نیاز به نیروی عمودی بیش‌تری برای شکل‌دهی می‌باشد. نیروهای عمودی همواره خلاف جهت حرکت و به سمت بالا هستند. به‌علاوه با دقت در نیروهای عمودی در هر مسیر مشاهده می‌گردد که یک جهش نیرو در انتهای هر مسیر رخ داده است. دلیل این اتفاق می‌تواند مرتبط با سطح تماس ابزار و ورق در انتهای هر مسیر باشد. در قسمت‌های قبل ذکر شد که انتهای مسیر در آزمایش شیار، دارای ماهیت سه بعدی بوده و کشش دو محوره اتفاق می‌افتد. در این ناحیه متفاوت با قسمت میانی شیار، دیگر ابزار از دو پهلو خود در حال کشیدن ورق نیست، بلکه از سه طرف با ورق در تماس می‌باشد. این رخداد سبب افزایش ناحیه‌ی تحت تغییر شکل و در نتیجه نیروهای شکل‌دهی شده است. می‌توان مشاهده نمود که این جهش نیرو با افزایش عمق شکل‌دهی بیش‌تر می‌شود که دلیل آن باز هم بالاتر رفتن سطح تماس در عمق بیش‌تر و نیز افزایش کرنش پلاستیک القا شده به ماده بوده است. البته این جهش نیرو در آزمایش شیار رخ می‌دهد زیرا دارای مسیره‌های رفت و برگشتی است. اما در شکل‌دهی مخروط ناقص این جهش نیرو مشاهده نمی‌گردد زیرا ابزار همواره یک مسیر دایروی حلزونی را طی کرده و حالت تنش اعمال شده به آن چندان تغییر نمی‌کند [۲، ۴].

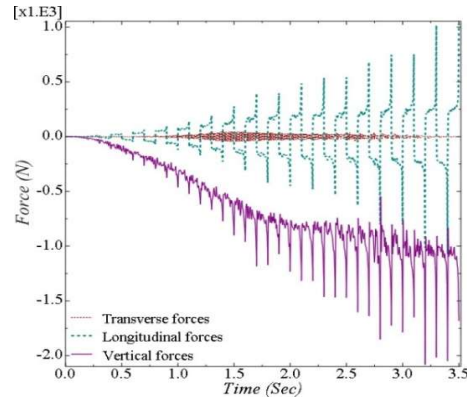
نیروهایی که در راستای طولی شیار به ابزار وارد می‌شوند در واقع صرف غلبه بر اصطکاک بین ابزار و ورق و نیز ایجاد تغییر شکل پلاستیک تدریجی در ماده می‌گردد. روند تغییرات این نیروها شبیه به رفتار نیروهای عمودی بوده است. این نیروها در تمامی موارد رفتاری مشابه با هم نشان دادند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نیروها در هر مسیر از مقدار صفر شروع شده و با پایین آمدن ابزار، افزایش تدریجی گام در طول مسیر را به نمایش می‌گذارند. از طرفی ملاحظه می‌گردد که به دلیل رفت و برگشتی بودن مسیر، جهت نیروی وارد بر ابزار در هر مسیر عوض شده و همواره در جهت مخالفت با حرکت ابزار است. البته در شکل‌دهی مخروط ناقص به دلیل عدم تغییر جهت مسیر دایروی، نیروهای طولی تغییر علامت نداده و همواره در راستای مماس بر مسیر حرکت می‌باشند [۹، ۲۲]. به‌علاوه، همانند آن‌چه در نیروهای عمودی وارد بر ابزار مشاهده شد، با افزایش میزان پایین روی ابزار، مقادیر این نیروها نیز بیش‌تر گردیده است. علت آن است که با پایین رفتن ابزار، از یک طرف سطح تماس بین ابزار و ورق زیاد شده و از طرف دیگر به دلیل افزایش نیروی تماسی قائم و به تبع آن نیروی اصطکاک، نیروهای طولی وارد بر جبهه‌ی ابزار بیش‌تر شده است. باید اضافه نمود که در این‌جا نیز در انتهای هر مسیر یک جهش در مقدار نیرو مشهود است. دلیل آن برخورد ابزار با حجم بیش‌تری از ماده در

سلسیوس در حدود ۲۰ درصد و در دمای ۱۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد کم‌تر از ۱۰ درصد افزایش یافته است. این پدیده به‌لحاظ کیفی در تأیید مطالعات دیگر محققین [۲، ۴، ۹، ۲۳، ۲۴] در همین زمینه می‌باشد

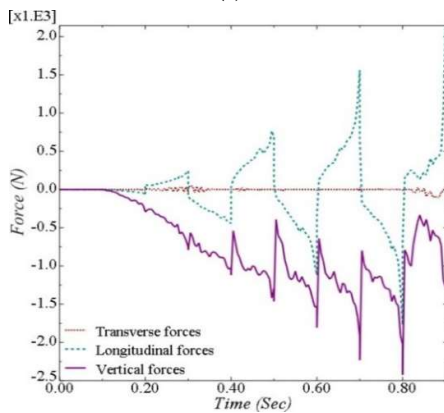
اساس نمودارهای شکل ۱۱ این نیروها بیش‌ترین مقادیر را از بین مؤلفه‌های مختلف نیرو به خود اختصاص داده‌اند و می‌توانند منجر به کمانش و آسیب رساندن به ابزار و یا سطح ورق شوند. مقادیر بیشینه‌ی این نیروهای عمودی برای آزمایش‌های گزینش شده در جدول ۲ آورده شده است.



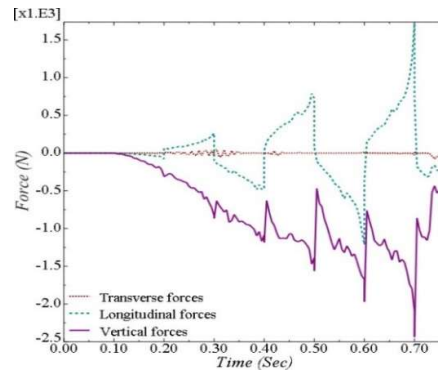
(ا)



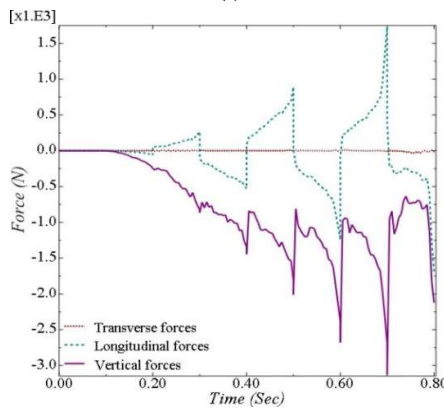
(الف)



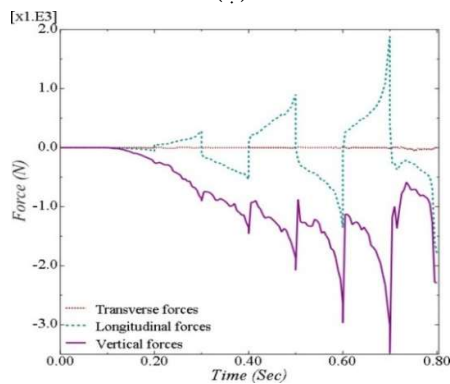
(ب)



(ب)



(و)



(ج)

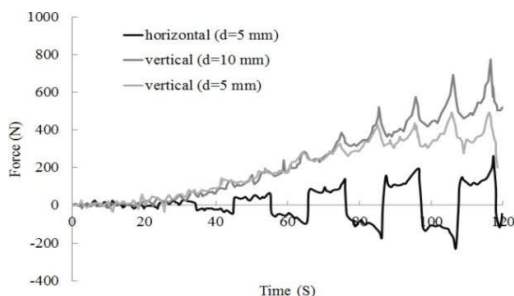
شکل ۱۱- (ادامه) نیروهای عرضی، طولی و عمودی عددی برای آزمایش‌های با کد (د) ۱۹۰-۸-۰۱، (ه) ۱۹۰-۸-۰۷ و (و) ۱۹۰-۱۶-۰۷

شکل ۱۱- نیروهای عرضی، طولی و عمودی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی برای آزمایش‌های با کد (الف) ۷۰-۸-۰۱، (ب) ۷۰-۸-۰۷، (ج) ۷۰-۱۶-۰۷

در واقع با اعمال گام عمودی بزرگ‌تر به ورق به‌دلیل مقاومت بیش‌تر ورق نسبت به تغییرشکل پلاستیک، اصطکاک و در نتیجه دمای ورق بالا رفته و این اتفاق موجب شد که عمق شکل‌دهی بیش‌تری

با مقایسه‌ی دو سطر اول از نتایج جدول ۲ می‌توان ملاحظه نمود که با بیش‌تر شدن مقدار گام عمودی از مقدار ۰/۱ به ۰/۷ میلی‌متر در حالتی که بقیه‌ی عوامل فرایند (شامل قطر ابزار و دمای اولیه‌ی ورق) ثابت هستند، نیروی عمودی وارد بر ابزار در دمای ۷۰ درجه‌ی

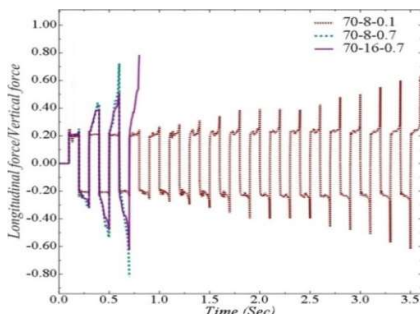
پلاستیک جبهه‌ی مواد موجود در مقابل ابزار شده است. طبق انتظار در دو انتهای شیار به‌علت قرارگیری حجم بیش‌تری از ماده در برابر ابزار، مقادیر نیروهای افقی افزایش یافته و جهشی در نسبت نیروهای طولی به عمودی اتفاق افتاده است. با مقایسه‌ی دو شکل ۱۳ و ۱۴ ملاحظه می‌گردد که دمای فرایند تأثیری چندانی بر روی نسبت این نیروها نداشته و نتایج به‌دست آمده در دو دمای ۷۰ و ۱۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بسیار به هم نزدیک بوده است. این نشان می‌دهد که علی‌رغم متفاوت بودن مقادیر نیروها در این دو دما، نسبت این نیروها تغییر چندانی نکرده است. به عبارت دیگر، میزان افزایش یا کاهش در هر دو نیروی طولی و عمودی تقریباً به یک نسبت بوده است.



شکل ۱۲- نیروهای عمودی و طولی وارد بر ابزار در آزمایش شیار آلومینیم 2024-T3 [۸]

جدول ۲- تأثیر عوامل فرایند بر روی بیشینه نیروهای عمودی برای آزمایش‌های منتخب شیار بر روی ورق‌های تیتانیومی

متغیر فرایند	کد آزمایش	بیشینه نیروی عمودی (N)	کد آزمایش	بیشینه نیروی عمودی (N)
گام عمودی (mm)	۰-۸-۱۹۰٫۱	۲۲۹۱	۰-۸-۷۰٫۱	۲۰۸۳
	۰-۸-۱۹۰٫۷	۲۴۲۴	۰-۸-۷۰٫۷	۲۴۳۸
قطر ابزار (mm)	۰-۸-۱۹۰٫۷	۲۴۲۴	۰-۸-۷۰٫۷	۲۴۳۸
	۰-۱۶-۱۹۰٫۷	۳۱۲۲	۰-۱۶-۷۰٫۷	۳۴۷۰
دمای اولیه‌ی ورق (°C)	۰-۱۶-۱۹۰٫۷	۳۴۷۰	۰-۸-۷۰٫۷	۲۴۳۸
	۰-۱۶-۱۹۰٫۷	۳۱۲۲	۰-۸-۱۹۰٫۷	۲۴۲۴



شکل ۱۳- نسبت نیروهای طولی به عمودی در دمای ۷۰ درجه‌ی سلسیوس برای آزمایش‌های شیار منتخب

حاصل شود. از این رو همان‌طور که قبلاً ذکر شد، نیروهای شکل‌دهی نیز افزایش یافت.

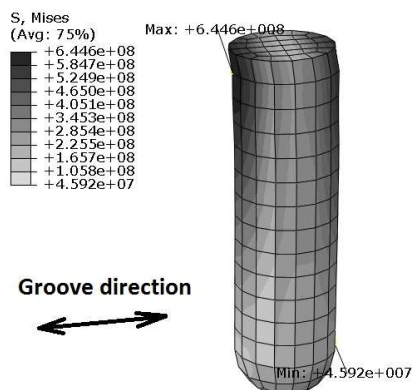
در دو سطر میانی اثر قطر ابزار بر روی نیروهای عمودی نمایش داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش قطر ابزار در دمای ۷۰ و ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس، نیروهای عمودی به‌ترتیب تقریباً ۴۰ و ۲۸ درصد بیش‌تر گردیده که مؤید روند مشاهدات پیشین نیز بوده است [۱، ۲، ۴، ۹، ۲۳]. علت این افزایش آن است که با بزرگ‌تر شدن ابزار، برای اعمال فشار عمودی مورد نیاز جهت شکل‌دهی خمیری ورق، به‌دلیل افزایش سطح مقطع ابزار، ناحیه‌ی بزرگ‌تری از ورق تحت تغییرشکل پلاستیک قرار گرفته و نیاز به نیروی بیش‌تری می‌باشد. به عبارت دیگر با کاهش قطر ابزار تمرکز نیرو و کرنش بیش‌تر شده و چون ناحیه‌ی پلاستیک ورق کوچک می‌شود، نیاز به نیروی کم‌تری برای شکل‌دهی می‌باشد.

در نهایت از دو سطر آخر جدول ۲ می‌توان دریافت که در دمای بالاتر، نیروهای شکل‌دهی کم‌تری برای شکل دادن ورق مورد نیاز است. این نتایج کاهش در حدود ۱ درصد برای قطر ابزار ۸ میلی‌متر و ۱۰ درصد برای قطر ابزار ۱۶ میلی‌متر را با افزایش دما از ۷۰ به ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس را به نمایش می‌گذارد. با گرم‌تر و در نتیجه نرم‌تر شدن ورق همان‌طور که در نمودارهای تنش-کرنش در شکل ۳ نمایش داده شد، متحنی سیلان ماده افت کرده و برای رسیدن به یک کرنش خاص، تنش و نیروی کم‌تری مورد نیاز است. به همین دلیل می‌توان اذعان داشت که با گرم‌تر شدن ورق، نیروهای شکل‌دهی مورد نیاز نیز کم‌تر می‌شود. البته اختلاف این نیروها در دمای ۱۹۰ کم‌تر از دمای ۷۰ درجه سلسیوس است که می‌تواند به‌دلیل اختلاف فاحش تنش سیلان ماده در این دو دما باشد.

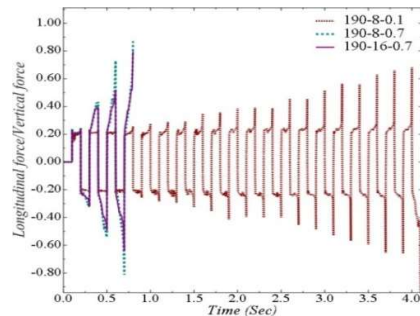
دورانبیت و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ی خود، با لغزاندن ابزار بر روی ورق در آزمایش شیار و اندازه‌گیری نیروهای طولی و عمودی توسط دینامومتر، ضریب اصطکاک را محاسبه نمودند. به‌دلیل عدم اعمال گام عمودی در مسیر به ورق، با تقسیم نمودن نیروی طولی به عمودی، این ضریب اصطکاک محاسبه گردید. در مطالعه‌ی حاضر، نیروهای طولی علاوه بر غلبه بر اصطکاک، صرف تغییرشکل ماده به‌دلیل اعمال گام عمودی طی هر مسیر حلزونی نیز می‌شوند. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ حاصل تقسیم نیروی طولی به عمودی به‌ترتیب برای دو دمای ۷۰ و ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس نمایش داده شده است. می‌توان دید که برای گام عمودی ۰٫۱ میلی‌متر، در طول مسیر شیار، نسبت نیروی طولی به عمودی تقریباً برابر ۰٫۲ است که همان ضریب اصطکاک بین ابزار و ورق می‌باشد که برای نرم‌افزار تعریف شده است. می‌توان دریافت که در این حالت بخش اعظم نیروی طولی صرف غلبه بر اصطکاک بین ابزار و ورق شده و تأثیر چندانی بر روی تغییرشکل پلاستیک ماده در جهت طولی ندارد. البته به‌تدریج و با نفوذ ابزار در قطعه کار، سهم نیروی طولی لازم برای ایجاد تغییرشکل در ماده اندکی بیش‌تر شده است. با افزایش گام عمودی مشاهده می‌شود که در مسیر اول به‌دلیل نفوذ ناچیز ابزار در ورق، باز هم نسبت نیروی طولی به نیروی عمودی به مقدار ضریب اصطکاک نزدیک است. اما با پایین‌تر رفتن ابزار و نفوذ بیش‌تر آن در ورق در خلال مسیرهای بعدی، این نسبت افزایش یافته زیرا در این حالت دیگر نیروهای طولی تنها ناشی از اصطکاک بین ورق و ابزار نبوده و بخشی از آن صرف تغییرشکل

قبل از وقوع شکست در قطعه مورد ارزیابی قرار گرفت زیرا بیشترین مقادیر نیرو در انتهای هر مسیر به ابزار وارد می‌گردد. همان‌طور که در شکل مذکور نیز قابل مشاهده است، تنش مؤثر بزرگ‌ترین مقدار خود را در محل اتصال ابزار به کلگی دستگاه دارد. علت آن است که تنش‌های خمشی وارد شده به ابزار در این نقطه بیشینه بوده و نقطه‌ی بحرانی ابزار تحت سه بار طولی، عرضی و عمودی، قسمت انتهایی آن یعنی نقطه اتصال آن با کلگی دستگاه است. بالاترین مقدار تنش مؤثر محاسبه شده در ابزار برابر ۶۴۴۶ مگاپاسکال بود. طبق انتظار، کم‌ترین مقدار تنش مؤثر نیز در ناحیه‌ی نوک ابزار اتفاق افتاد که مقدار آن برابر با ۴۵،۹ مگاپاسکال بود.

با توجه به نیروهای وارد شده به ابزار قابل استنباط است که تنش‌های اصلی وارد شده به ابزار از نوع تنش قائم است. نیروهای عمودی، تنش قائم فشاری و نیروهای طولی تنش خمشی در ابزار ایجاد می‌کنند. توزیع تنش قائم در ابزار در شکل ۱۶ ارائه گردیده است. در این‌جا مقادیر بیشینه‌ی تنش قائم در محل درگیری ابزار و کلگی دستگاه اتفاق افتاده است. ملاحظه می‌گردد که در قسمت چپ ابزار تنش‌ها از جنس فشاری و در قسمت راست ابزار این تنش‌ها کششی هستند. در واقع در این شکل می‌توان فهمید که ابزار به سمت راست حرکت می‌نموده و به انتهای مسیر خود رسیده است. طبیعتاً تحت خمش وارده به ابزار نیمی از ابزار دچار کشش و نیمی دچار فشردگی می‌گردد. بیش‌ترین مقدار برای تنش‌های قائم فشاری و کششی به ترتیب برابر ۶۸۹،۶ و ۶۴۹،۹ مگاپاسکال است. با دقت در این دو عدد می‌توان میزان نقش تنش‌های خمشی ناشی از نیروی طولی و قائم ناشی از نیروی عمودی را ارزیابی نمود. اختلاف قدرمطلق مقادیر بیشینه‌ی تنش‌های کششی و فشاری به دلیل تنش قائم فشاری ناشی از نیروی عمودی وارد شده به ابزار است. از آن‌جا که این دو عدد اختلاف زیادی با هم ندارند می‌توان نتیجه گرفت که نقش تنش‌های خمشی بسیار بیشتر از تنش‌های ناشی از نیروی عمودی در ابزار است زیرا تنش‌های فشاری ناشی از نیروی عمودی، تا حدی تنش‌های کششی را خنثی کرده و با تنش‌های فشاری ناشی از خمش جمع می‌شوند. چون اختلاف ایجاد شده در مقادیر تنش‌های کششی و فشاری اندک است پس می‌توان نتیجه گرفت که تنش حاصل از نیروی عمودی ناچیز است.



شکل ۱۵- توزیع تنش مؤثر در ابزار شکل‌دهی در انتهای مسیر و قبل از وقوع ترک



شکل ۱۴- حاصل تقسیم نیروهای طولی به عمودی نسبت به زمان در دمای ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس

۴- شبیه‌سازی فرایند با ابزار تغییرشکل‌پذیر

نیروهای وارد بر ابزار، اعم از عمودی و طولی، تنش‌هایی را به ابزار اعمال می‌کنند. نیروهای عمودی مسبب تنش‌های محوری فشاری و کماتش در ابزار بوده و نیروهای طولی (در راستای شیار)، باعث ایجاد تنش‌های خمشی در ابزار می‌گردند. از آن‌جا که تنش‌های وارد به ابزار دارای سطح مقطع کم‌تر، مقادیر بالاتری دارند، ابزار با قطر ۸ میلی‌متر، دچار تنش‌های بزرگ‌تری در مقایسه با ابزار با قطر ۱۶ میلی‌متر می‌شد. بیش‌ترین مقدار نیروی عمودی در بین آزمایش‌های منتخب با قطر ابزار ۸ میلی‌متر متعلق به آزمایش با کد ۷-۸-۷۰ بود زیرا در این آزمایش ورق در دمای کم‌تری قرار داشته و نسبت به آزمایش در دمای ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس، تنش سیلان بیش‌تری داشت. بر اساس نکات ذکر شده، حالت بحرانی در بین آزمایش‌های مورد مطالعه آزمایش با کد ۷-۸-۷۰ بود. برای این آزمایش اقدام به شبیه‌سازی ابزار به‌صورت تغییرشکل‌پذیر^۱ با اجزاء C3D8R شد تا مقادیر تنش در آن ارزیابی گردد.

ابزار به‌کار رفته در این پژوهش از جنس فولاد سرعت بالا^۲ بود. مقادیر چگالی و ضریب یانگ آن به ترتیب برابر با ۸۱۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲۱۰ گیگاپاسکال در نرم‌افزار وارد شد [۲۵]. با در نظر گرفتن این‌که ۳۰ میلی‌متر از طول ابزار از کلگی دستگاه بیرون بوده و عملیات شکل‌دهی را بر روی ورق انجام می‌داد، اقدام به شبیه‌سازی ابزار به‌صورت تغییرشکل‌پذیر گردید. سپس مسئله‌ی مورد نظر توسط نرم‌افزار به تحلیل گذاشته شد. به دلیل این‌که ابزار تغییرشکل‌پذیر بوده و جرم داشت، زمان‌های واقعی برای مراحل مختلف فرایند تعریف شد که زمان حل را بسیار بالا برد. پس از اتمام تحلیل انجام شده، مقادیر عمق شکل‌دهی و کم‌ترین ضخامت ورق دوباره اندازه‌گیری گردید تا عدم تأثیرگذاری تغییر نوع ابزار در نتایج اطمینان حاصل شود. خطای مقادیر جدید نسبت به حالتی که ابزار صلب فرض شده بود ناچیز و کم‌تر از ۵ درصد بود.

۴-۱- تنش‌های اعمالی به ابزار

تنش‌های مؤثر (مایبزی) اعمال شده به ابزار در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. این تنش‌ها در پایان آخرین مسیر طی شده توسط ابزار

^۱ Deformable
^۲ High Speed Steel (HSS)

در انتهای مسیر به دلیل افزایش نیروی طولی را نیز محاسبه نمود. براساس مقدار بیشینه نیروی طولی در انتهای مسیری که بیشترین مقدار نیروی طولی مشاهده گردیده (برابر ۱۷۱۵ نیوتن)، خیز ابزار از رابطه (۶) به دست می‌آید:

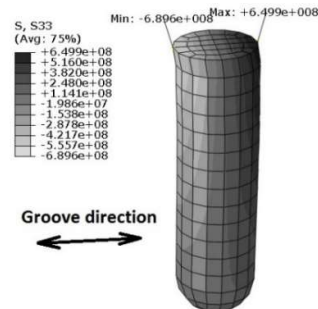
$$\Delta x = \frac{F_L L^3}{3EI} = \frac{1715 \times (0.03)^3}{3 \times 210 \times 10^9 \times \frac{\pi(0.004^4)}{4}} \quad (6)$$

$$= 3.65 \times 10^{-4} \text{ m}$$

این بدان معناست که نوک ابزار در انتهای مسیری که بیشترین نیروی طولی به آن وارد گردیده، به اندازه‌ی کم‌تر از ۰/۴ میلی‌متر خیز در راستای شیار برداشته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از داده‌های تجربی، اقدام به شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی تدریجی گرم آلیاژ تیتانیوم گردید. اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده با تعریف نمودارهای حد شکل‌پذیری تجربی برای نرم‌افزار و مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی عمق شکل‌دهی و کم‌ترین ضخامت ورق، ارزیابی شد. توزیع کرنش‌های مؤثر نشان داد که کشیدگی ورق در ناحیه‌ی میانی آن که شبکه‌ی اجزاء محدود کوچک‌تری به آن اختصاص داده شده بود، صورت گرفت و این امر در تأیید ناحیه‌بندی مناسب ورق بود. پس از آن نیروهای شکل‌دهی وارد بر ابزار مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده گردید که به‌جای مدل کردن تمامی قسمت‌های مورد استفاده در آزمایش‌های عملی و با تعیین شرایط مرزی و دمایی مناسب برای ورق می‌توان تا حد زیادی زمان حل مسئله را کاهش داد. به‌علاوه با طراحی قسمت‌بندی مناسب می‌توان به تحلیل دقیق‌تر ناحیه‌ی تغییرشکل یافته پرداخت و باز هم در زمان حل صرفه‌جویی نمود. نیروهای عرضی در جهت عمود بر مسیر شیار به‌دلیل تقارن همواره صفر بود. نیروهای عمودی و طولی به‌ترتیب در دو راستای میله ابزار و مسیر شیار، روندی افزایشی با پیشرفت فرایند نشان داد زیرا نفوذ بیش‌تر ابزار در ورق منجر به افزایش سطح درگیر ابزار و قطعه و نیز ناحیه‌ی گسترده‌تر تحت تغییرشکل پلاستیک گردید. این نیروها در مقایسه با آزمایش شیار دیگر فلزات مانند آلومینیم بیش‌تر بود که علت آن استحکام بالاتر تیتانیوم در مقایسه با مواد قبلی بوده است. این امر منجر به ایجاد اصطکاک بیش‌تر بین ورق و ابزار و در نتیجه حرارت تولید شده زیاد گردید. با افزایش گام عمودی از ۰/۱ و ۰/۷ میلی‌متر، در دمای ۷۰ و ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس به ترتیب ۲۰ و ۱۰ درصد افزایش در نیروهای عمودی مشاهده گردید که علت آن اعمال کرنش بیش‌تر در هر مسیر به ورق بود. ابزار بزرگ‌تر با قطر ۱۶ میلی‌متر در مقایسه با ابزار با قطر ۸ میلی‌متر، به‌ترتیب در دو دمای ۷۰ و ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس، ۴۰ و ۲۸ درصد افزایش نیرو را نمایش داد زیرا حجم بیش‌تری از ماده برای قطر ابزار بزرگ‌تر تحت تغییرشکل پلاستیک قرار می‌گرفت. افزایش دمای اولیه‌ی ورق نیز کاهش نیرو را در بر داشت که علت آن کاهش تنش سیلان فلز در دماهای بالاتر بود. همچنین مشاهده گردید که نیروهای طولی وارد بر ابزار، حاصل اصطکاک بین ابزار و ورق و نیز تغییرشکل پلاستیک ورق بود. در گام ۰/۱ میلی‌متر، بخش اعظم این نیرو در نتیجه‌ی اصطکاک بین ابزار و ورق بوده و با تقسیم نیروی طولی به نیروی عمودی می‌توان ضریب اصطکاک ورودی به نرم‌افزار را به‌دست آورد. اما با افزایش گام



شکل ۱۶- نمایش تنش‌های قائم (محوری) بر روی ابزار در انتهای آخرین مسیر

با دانستن استحکام فشاری ابزار از جنس فولاد سرعت بالا که برابر ۳۲۵۰ مگاپاسکال [۲۵] است و نیز بیشینه مقدار تنش قائم فشاری در ابزار، می‌توان ضریب اطمینان را از رابطه‌ی (۱) محاسبه نمود:

$$F.S. = \frac{3250}{689.6} = 4.71 \quad (1)$$

به علاوه با دانستن استحکام خمشی ابزار برابر ۱۵۰۰ مگاپاسکال [۲۵] و نیز بیشینه مقدار تنش خمشی کششی، می‌توان نوشت:

$$F.S. = \frac{1500}{649.9} = 2.31 \quad (2)$$

با دقت در ضرایب اطمینان محاسبه شده می‌توان دریافت که تنش‌های خمشی مهم‌ترین تنش‌ها در ابزار شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی تدریجی هستند.

۴-۲- تحلیل کمانش ابزار

پیش‌تر اشاره گردید که بار محوری فشاری می‌تواند در ابزار ایجاد کمانش نماید. بار بحرانی که سبب ایجاد کمانش می‌گردد، از رابطه‌ی (۳) قابل محاسبه است [۲۶]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (3)$$

با توجه به این‌که ابزار از یک طرف توسط کلگی دستگاه به‌صورت گیردار مهار شده و از طرف دیگر آزادانه حرکت دارد، مقدار طول معادل آن (L_e)، دو برابر طول بیرون زده از کلگی است. پس بر اساس رابطه‌ی (۴) مقدار بار بحرانی برای کمانش عبارت است از:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \left(210 \times 10^9 \times \frac{\pi(0.004^4)}{4} \right)}{(2 \times 0.03)^2} = 115765.8 \text{ N} \quad (4)$$

از آن‌جا که بار عمودی اعمال شده به ابزار برابر ۲۴۳۸ نیوتن بود، ضریب اطمینان برای کمانش طبق رابطه‌ی (۵) قابل محاسبه است:

$$F.S. = \frac{P_{cr}}{F_v} = \frac{115765.8}{2438} = 47.5 \quad (5)$$

از مقادیر فوق می‌توان نتیجه گرفت که تنش‌های قائم ایجاد شده در ابزار در اثر خمش، نقش قوی‌تری داشته و امکان شکست در ابزار تحت تنش‌های قائم بسیار محتمل‌تر از وقوع کمانش در آن است.

۴-۳- خیز ابزار

ابزار شکل‌دهی در ابتدا و انتهای مسیر شیار، با بیش‌ترین مقادیر نیروهای طولی روبروست. این نیروها و تنش‌های ایجاد شده توسط آن‌ها در قسمت‌های قبل مورد ارزیابی قرار گرفت. اما علاوه بر مطالب ذکر شده، برای بحرانی‌ترین حالت که همان آزمایش با قطر ابزار ۸ و گام عمودی ۰/۷ میلی‌متر بود، می‌توان بیش‌ترین میزان جابجایی ابزار

[8] Minutolo F. C., Durante M., Formisano A. and Langella A., Forces analysis in sheet incremental forming and comparison of experimental and simulation results. *Intelligent production machines and systems*, pp. 229-234, 2011.

[9] Filice L., Ambrogio G. and Micari F., On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring. *CIRP annals-Manufacturing technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 245-248, 2006.

[10] Kim Y. and Park J., Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. *Journal of materials processing technology*, Vol. 130, pp. 42-46, 2002.

[11] Ji Y. and Park J., Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature. *Journal of materials processing technology*, Vol. 201, No. 1, pp. 354-358, 2008.

[12] Durante M., Formisano A., Langella A. and Minutolo F. M. C., The influence of tool rotation on an incremental forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4621-4626, 2009.

[13] Pandivelan C. and Jeevanantham A., Formability Evaluation of AA 6061 Alloy Sheets on Single Point Incremental Forming using CNC Vertical Milling Machine. *Journal of Materials and Environmental Science*, Vol. 6, pp. 1343-1353, 2015.

[14] Minutolo F. C., Durante M., Formisano A. and Langella A., Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, No. 1, pp. 145-150, 2007.

[15] Bouffiuox C., Lequesne C., Vanhove H., Dufloy J., Pouteau P., Duchène L. and Habraken A., Experimental and numerical study of an AlMgSc sheet formed by an incremental process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 11, pp. 1684-1693, 2011.

[16] Dejardin S., Thibaud S., Gelin J.-C. and Michel G., Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 2, pp. 363-369, 2010.

[17] Khazaali H. and Fereshteh-Saniee F., A comprehensive experimental investigation on the influences of the process variables on warm incremental forming of Ti-6Al-4V titanium alloy using a simple technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-13, 2016.

[18] Ambrogio G., Ciancio C., Filice L. and Gagliardi F., Theoretical model for temperature prediction in Incremental Sheet Forming-Experimental validation. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 108, pp. 39-48, 2016.

[19] Place A. T. I. S. P., ATI Ti-6Al-4V, Grade 5 Technical Data Sheet, 1, PA 15222-5479 U.S.A., 2011, pp. 4.

[20] Guo Z., Saunders N., Schillé J. and Miodownik A., Modelling high temperature flow stress curves of titanium alloys. *MRS International Materials Research Conference*, Chongqing, China June 9-12, 2008.

[21] Pohlak M., Küttner R., Majak J., Karjust K. and Sutt A., Simulation of incremental forming of sheet metal products *Proceeding of the fourth International DAAAM Conference*, Tallinn, Estonia, April 29-30, 2004.

[22] Li Y., Daniel W. J., Liu Z., Lu H. and Meehan P. A., Deformation mechanics and efficient force prediction in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 221, pp. 100-111, 2015.

[23] Dufloy J. R., Szekeres A. and Vanherck P., Force measurements for single point incremental forming: an experimental study. *Advanced Materials Research*, Vol. 6, pp. 441-448, 2005.

[24] Ghasemi H. and Soltani B., Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 89-96, 2015.

[25] Des Fonderies S. A., Marichal Ketin J., *SIRIUS High Speed Steel*. Accessed on 25 July 2016; <http://www.mkb.be>.

[26] Beer F. P., Jr E. R. J., DeWolf J. T., Mazurek D. F., *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill, New York, 2009.

عمودی، سهم نیرویی که صرف تغییر شکل پلاستیک در ماده‌ی درگیر با ابزار گردیده، در نیروهای طولی افزایش یافت. تحلیل تنش‌های وارد به ابزار شکل‌دهی نشان داد که شکست ناشی از تنش‌های خمشی، به خصوص به دلیل ضعف فولاد سرعت بالا در کشش، در مقایسه با امکان وقوع کمانش در ابزار شکل‌دهی محتمل‌تر بوده و از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. همچنین بیش‌ترین مقدار خیز نوک ابزار در انتهای آخرین مسیر شیار و قبل از وقوع ترک اتفاق افتاد. این خیز برای ابزار با قطر ۸ میلی‌متر و نیروی طولی ۱۷۱۵ نیوتن، کم‌تر از ۰/۴ میلی‌متر محاسبه شد.

۶- نمادها

A	سطح مقطع ابزار (m ²)
E	ضریب یانگ (Pa)
F _l	نیروی طولی (N)
F _v	نیروی عمودی (N)
F.S.	ضریب اطمینان
I	گشتاور دوم سطح ابزار (m ⁴)
L	فاصله‌ی نوک ابزار تا کلگی دستگاه (m)
L _e	طول معادل ابزار در کمانش (m)
M	گشتاور خمشی (N.m)
P _{cr}	نیروی بحرانی کمانش (N)
γ	دورترین فاصله تا تار خنثی در مقطع ابزار (m)
Δx	خیز نوک ابزار (m)
σ _c	تنش قائم فشاری (Nm ⁻²)
σ _M	تنش خمشی (Nm ⁻²)

۷- مراجع

[1] Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Dufloy J. and Allwood J., Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 88-114, 2005.

[2] Dufloy J., Tunckol Y., Szekeres A. and Vanherck P., Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, No. 1, pp. 65-72, 2007.

[3] Petek A., Kuzman K. and Kopač J., Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming. *Archives of Materials science and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 35-42, 2009.

[4] Aeren R., Eyckens P., Van Bael A. and Dufloy J., Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 9-12, pp. 969-982, 2010.

[5] Bagudanch I., Centeno G., Vallengano C. and Garcia-Romeu M., Forming force in Single Point Incremental Forming under different bending conditions. *Procedia Engineering*, Vol. 63, pp. 354-360, 2013.

[6] Bagudanch I., Garcia-Romeu M., Centeno G., Elías-Zúñiga A. and Ciurana J., Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 219, pp. 221-229, 2015.

[7] Henrard C., Bouffiuox C., Eyckens P., Sol H., Dufloy J., Van Houtte P., Van Bael A., Duchene L. and Habraken A., Forming forces in single point incremental forming: prediction by finite element simulations, validation and sensitivity. *Computational mechanics*, Vol. 47, No. 5, pp. 573-590, 2011.