



بررسی تجربی و عددی نیروی شکل‌دهی ورق تیتانیوم Ti6Al4V در فرآیند شکل‌دهی افزایشی گرم الکتریکی یک قطعه مخروطی

محمد هنرپیشه^{*}، محمد جواد عبدالحسینی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴ تیر ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۵ دی ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۸ بهمن ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۱۹ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

شکل‌دهی افزایشی گرم
Ti6Al4V ورق
نیروی شکل‌دهی
شبیه سازی اجزای محدود

چکیده: در این مقاله، فرآیند شکل‌دهی افزایشی گرم الکتریکی ورق تیتانیوم Ti6Al4V، با استفاده از آزمایش‌های تجربی و تحلیل اجزای محدود بررسی شده است. آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوایی دارد. از این رو، شکل دادن این آلیاژ سبک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. قابلیت شکل‌دهی این آلیاژ در دمای محیط بسیار پایین بوده ولی در دمای بالا می‌تواند به خوبی شکل داده شود. در این مقاله، شکل هندسی قطعه نهایی مخروط ناقصی بود که از شکل‌دهی ورق مستطیلی به دست آمده و تأثیر پارامترهای فرآیند از قبیل زاویه دیواره، اندازه گام و قطر ابزار بر مقدار نیروی شکل‌دهی، بررسی شده است. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها نشان دادند افزایش اندازه گام و کاهش قطر ابزار موجب افزایش نیروی شکل‌دهی می‌شود. همچنین برای شکل‌دهی قطعات با زاویه دیواره بزرگتر، نیروی کمتری نیاز می‌باشد. همچنین بررسی شکل‌پذیری ورق در این فرآیند، با ایجاد حرارت متمرکز بر روی آن در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایش‌های تجربی این فرآیند روی ورق تیتانیوم Ti6Al4V، حاکی از همگرایی نتایج عددی و تجربی می‌باشد و اختلاف نتایج عددی و تجربی نیروی شکل‌دهی حدود ۷/۵٪ می‌باشد.

۱- مقدمه

استفاده از اجزایی با وزن کم در مهندسی حمل و نقل نوین به دلایل اقتصادی و محیط زیستی موجب بهبود محصول می‌شود. اما شکل‌دهی این گروه از مواد به علت قابلیت شکل‌دهی پایین آنها در دمای محیط، نیازمند طراحی فرآیندهای نوین می‌باشد، به گونه‌ای که حل این مشکل امکان پذیر گردد. یکی از این تغییرات، انجام فرآیند در دمای بالا است که علاوه بر کاهش نیروی شکل‌دهی، موجب افزایش و فعال شدن خطوط لغزش می‌شود تا به این وسیله شکل‌پذیری این گروه از مواد افزایش یابد [۱]. فرآیند شکل‌دهی افزایشی گرم یکی از فرآیندهای نوین شکل‌دهی ورق‌های فلزی می‌باشد که با توجه به انعطاف‌پذیری و قابلیت کنترل خوب در شکل‌دهی ورق‌های سخت‌شکل‌پذیر^۱ نظیر آلیاژهای تیتانیوم و منیزیم، مورد توجه محققان قرار گرفته است.

فراهم بودن یک ترکیب عالی از استحکام و مقاومت به خوردگی بالا و چگالی پایین در آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V سبب کاربرد رایج این آلیاژ β - α تیتانیوم شده است. این آلیاژ تقریباً ۸۰٪ کل تیتانیوم مورد استفاده در ایالات متحده آمریکا را به خود اختصاص داده است [۲]. آلیاژ Ti6Al4V قابلیت شکل‌دهی ضعیفی در دمای محیط دارد. از این رو معمولاً شکل‌دهی با سرعت پایین، نظیر شکل‌دهی سوپر پلاستیک در دمای بالا در حدود

۷۵۰-۹۵۰°C برای این آلیاژ به کار می‌رود [۳-۵]. اگرچه شکل‌دهی سوپر پلاستیک اجازه تولید اشکال پیچیده در ورق فلزی را فراهم می‌آورد اما در عوض نیاز به قالب‌های مقاوم به حرارت و تجهیزات حرارتی گران‌قیمت خواهد داشت. در سال‌های اخیر، شکل‌دهی افزایشی به عنوان یک روش شکل‌دهی انعطاف‌پذیر که موجب تولید قطعات با تیراژ کم و البته با تنوع زیاد می‌باشد، معرفی شده است. این روش قابلیت تولید نمونه‌های اولیه با استفاده از ورق‌های فلزی را بدون استفاده از قالب فراهم آورده است و بر خلاف روش‌های سنتی شکل‌دهی، قطعات را در زمانی کوتاه‌تر و با قابلیت انعطاف بیشتر و همچنین هزینه کمتری تولید می‌کند [۶-۸]. این فرآیند بر خلاف فرآیند قالب‌گیری که فقط برای تولید انبوه صرفه اقتصادی دارد، جهت شکل‌دهی قطعات پیچیده در دسته‌های کوچک تا متوسط مقرون به صرفه می‌باشد [۹]. در خلال شکل‌دهی افزایشی تک نقطه‌ای، نبود قالب حمایت‌کننده بر دقت قطعه کار تأثیرگذار بوده که دقت محدود این فرآیند به عنوان عیب اساسی آن شناخته شده است [۱۰]. قاسمی و سلطانی [۱۱] در یک مطالعه تجربی به بررسی پارامترهای موثر بر نیروی شکل‌دهی، دقت ابعادی و توزیع ضخامت در فرآیند شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای ورق آلومینیوم Al1200 پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد افزایش سرعت پیشروی و سرعت چرخش ابزار موجب کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود. زاهدی و همکاران [۱۲] در یک تحقیق، به بررسی عددی و تجربی شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه ساخته شده از St12 و Al1050 در

1 Hard-to-form

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: honarpishe@kashanu.ac.ir

و سرعت دورانی بالا در ابزار، می‌تواند شکل‌دهی مواد سخت نظیر آلیاژ تیتانیوم را امکان‌پذیر نماید. همچنین سرعت دورانی ابزار در افزایش مقدار کشش ورق، تأثیر مثبت داشت. آمبروجیو و همکاران [۱۹] قابلیت شکل‌دهی سه آلیاژ سبک وزن AA2024-T3، AZ31B-O و Ti6Al4V را با استفاده از فرآیند شکل‌دهی نموی گرم الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با اعمال شار حرارتی بر روی ورق، حد شکل‌دهی آن افزایش یافت و بیشترین شیب دیواره برای آلیاژهای AA2024-T3، AZ31B-O و Ti6Al4V به ترتیب به ۴۰، ۶۰ و ۴۵ درجه رسید.

با توجه به مطالب ذکر شده، شکل‌دهی در شرایط گرم سبب وارد شدن تجهیزات و پارامترهای بیشتر و پیچیده تری در فرآیند می‌شود، اما این شرایط برای شکل‌دهی آلیاژهای سبک مانند Ti6Al4V ضروری است. از آنجا که این آلیاژ در دمای بالا خواص شکل‌دهی خوبی دارد، حرارت متمرکز نقش مهمی در فرآیند دارد اما از طرفی موجب اکسید شدن ورق می‌شود. از این رو در این تحقیق، تعدادی از ورق‌ها با استفاده از آبکاری الکتروشیمیایی^۳ پوشش دهی نیکل شدند. در مقاله حاضر با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به بررسی عددی رفتار ورق تیتانیوم Ti6Al4V در فرآیند شکل‌دهی افزایشی گرم الکتریکی پرداخته می‌شود و تأثیر پارامترهای فرآیند بر نیروی شکل‌دهی ورق در محدوده دمایی ۴۰۰-۵۰۰°C، با استفاده از آزمایش‌های تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- آماده‌سازی فرآیند

شکل ۱، تنظیمات و تجهیزات آزمایشگاهی به کار برده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. تجهیزات شامل منبع برق مستقیم^۴ (ترانسفورمر)، کابل، ابزار شکل‌دهی، ورق و ماشین فرز CNC می‌باشد. در این فرآیند که به صورت تک‌نقطه‌ای انجام می‌شود، با ایجاد جریان الکتریکی بین ورق و ابزار شکل‌دهی، حرارت موضعی در محل تماس ابزار و ورق ایجاد شده و این امر سبب انجام فرآیند شکل‌دهی به صورت گرم می‌شود. در حقیقت با اتصال کابل جریان مثبت به ابزار و کابل جریان منفی به فیکسچر نگهدارنده ورق، مطابق قانون ژول^۵، هنگامی که جریان برق مستقیم از ابزار به ورق جریان می‌یابد، چگالی جریان بالا موجب تولید حرارت می‌شود. با تنظیم مقادیر شدت جریان الکتریکی و ولتاژ منبع برق، محدوده دمایی مناسب برای انجام فرآیند مشخص می‌شود.

در این تحقیق، به منظور تنظیم و کنترل جریان در حین انجام فرآیند و در نتیجه دستیابی به محدوده دمایی مناسب در محل تماس ابزار با ورق، مقدار ولتاژ ورودی به رکتی‌فایر بین ۱۱۰ تا ۱۴۰ ولت تنظیم می‌شود که با این مقدار ولتاژ ورودی، میزان جریان الکتریکی خروجی از ۱۸۰ تا ۴۰۰ آمپر متغیر می‌باشد و در این بازه، محدوده دمایی ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس در سطح تماس ابزار و ورق قابل دسترسی می‌شود. نحوه اندازه‌گیری و کنترل

فرآیند شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد کرنش‌های پلاستیک بیشتری به لایه بیرونی وارد می‌شوند. همچنین افزایش شعاع ابزار و اندازه گام عمودی سبب کاهش زاویه حد شکل‌دهی می‌شوند. در سال‌های اخیر، تحقیقات مختلفی به منظور تحلیل شکل‌دهی آلیاژهای سبک با استفاده از فرآیند شکل‌دهی نموی صورت گرفته است. حسین و همکاران [۱۳] اولین بار قابلیت شکل‌دهی تیتانیوم خالص را در دمای محیط بررسی کردند. در این آزمایش تأثیر روانکار، گام ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار مورد مطالعه قرار گرفت. آنها نشان دادند قابلیت شکل‌دهی آلیاژهای تیتانیوم در دمای محیط بسیار پایین می‌باشد. همین شرایط برای آلیاژهای منیزیم نظیر AZ31B نیز وجود دارد. به طور کلی شکل‌دهی نموی برای آلیاژهای سبک که کاربرد صنایع هوا و فضایی دارند، در دمای محیط نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. دوفلو و همکاران [۱۴] در تحقیقی از یک منبع لیزر با توان W500 برای ایجاد حرارت به صورت موضعی بر روی ورق‌های A15182، 65Cr2 و Ti6Al4V استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد حرارت ایجادشده همراه با حرکت ابزار، موجب کاهش نیروی شکل‌دهی، بهبود دقت ابعادی و شکل‌پذیری ورق می‌شود. آمبروجیو و همکاران [۱۵] برای انجام شکل‌دهی نموی گرم ورق منیزیم از یک فیکسچر همراه با منبع حرارتی استفاده کردند. در این تحقیق کل ورق در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس گرم شده و شکل‌دهی ورق مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد افزایش بیش از حد دما سبب ایجاد لایه‌ای از اکسید بر روی ورق می‌شود که موجب افزایش نیروی شکل‌دهی و همچنین تردی ورق شده و سبب خرابی قطعه حاصله می‌شود. فان و همکاران [۱۶] یک روش جدید تحت عنوان شکل‌دهی افزایشی گرم الکتریکی^۱ را معرفی کردند. این فن‌آوری که اساس آن در استفاده از جریان الکتریسیته برای ایجاد حرارت موضعی در ورق می‌باشد، بهتر می‌توانست شکل‌دهی ورق‌های فلزی سخت‌شکل‌پذیر نظیر منیزیم AZ31 و تیتانیوم TiAl2Mn1.5 را کنترل نماید. آنها نشان دادند با افزایش شدت جریان الکتریکی، دما در ورق افزایش یافته و سبب افزایش شکل‌پذیری ورق می‌شود. فان و همکاران [۱۷] با استفاده از همین فرآیند، قابلیت شکل‌دهی ورق Ti6Al4V را در دماهای بالا مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق به منظور بهبود کیفیت سطح و نیز جلوگیری از اکسیداسیون در دماهای بالا، تأثیر روانکارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از پوشش کامپوزیتی مولیبدن دی سولفید زمینه نیکل^۲ در سطح ورق در دمای بالا بسیار مناسب می‌باشد. همچنین با تنظیم میزان شدت جریان الکتریکی در محدوده ۴۰۰ تا ۵۰۰ آمپر، می‌توان این آلیاژ را در محدوده دمایی ۰۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس با مقدار ناچیزی اکسید، به خوبی شکل داد. پالمبو و براندیزی [۱۸] تأثیر افزایش دما در شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای ورق Ti6Al4V را مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش نشان داده شد ایجاد حرارت به وسیله ترکیب باندهای الکتریکی

3 Electroplating

4 DC power source

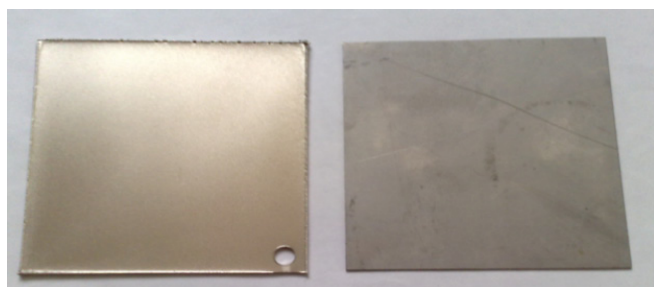
5 Joule's law

1 Electric hot incremental forming (EHIF)

2 Ni-MoS₂

۳- انجام آزمایش‌ها و نتایج

آزمایش‌های تجربی با استفاده از ورق‌های Ti6Al4V به ابعاد ۹۰×۹۰ و ضخامت ۱ میلی‌متر انجام می‌شود، به گونه‌ای که بر روی تعدادی از آنها روکش نیکل و بقیه آنها بدون پوشش و با استفاده از پودر مولیبدن دی سولفید (MoS_2) مورد آزمایش قرار می‌گیرند (شکل ۲). نحوه انجام آزمایش بر روی ورق‌های بدون پوشش به همراه پودر (MoS_2) و نیز ورق‌هایی که پوشش‌دهی نیکل شدند، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



(الف) (ب)

Fig. 2. (a) Ti6Al4V sheet with nickel coating, (b) uncoated sheet

شکل ۲: (الف) ورق Ti6Al4V با پوشش نیکل، (ب) ورق بدون پوشش

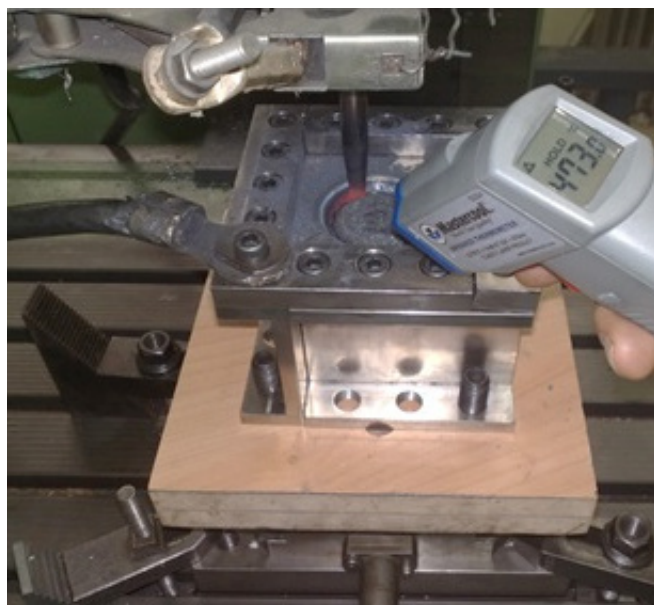


Fig. 3. Use of MoS_2 on the sheet during the test

شکل ۳: استفاده از پودر (MoS_2) روی ورق در حین انجام آزمایش

در این تحقیق، شکل هندسی قطعه نهایی، مخروط ناقصی به قطر ۶۰ و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر، و زاویه دیواره ۴۵، ۵۶ و ۶۴ درجه در نظر گرفته شده است. خصوصیات هندسی مدل و پارامترهای فرآیند در شکل ۵ و اطلاعات قطعات شکل‌دهی شده در آزمایش‌های تجربی، در جدول ۱ آورده شده است.

دمای شکل‌دهی در حین فرآیند نیز با استفاده از یک دستگاه ترمومتر در محل تماس ابزار با ورق انجام می‌شود.

همچنین از یک دستگاه دینامومتر کیستلر مدل 9257B، به منظور اندازه‌گیری نیروهای شکل‌دهی، در بین فیکسچر نگهدارنده ورق و میز ماشین فرز استفاده می‌شود. این دستگاه بر روی میز دستگاه فرز و بر روی صفحه‌ای که برای این منظور آماده شده بود نصب و راه اندازی شد. دینامومتر به گونه‌ای تنظیم شد که نیروهای F_x ، F_y و F_z را اندازه‌گیری کند و به شکلی نصب شد که نیروهای X و Y را مطابق با جهت محور X و Y میز فرز و نیرو در جهت محور اسپیندل دستگاه فرز را روی محور Z اندازه‌گیری کند. سپس به تنظیم نرم‌افزار آن (دایانور) پرداخته شد تا بتوان نمودارهای نیرویی فرآیند را تهیه کرد.

همان طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، به منظور جلوگیری از راهیابی جریان الکتریسیته به ماشین فرز و نیز جلوگیری از آسیب دیدن دینامومتر، یک قطعه چوب بین فیکسچر و دینامومتر استفاده می‌شود. همچنین یک قطعه عایق از جنس پلی اتیلن نیز بین ابزار شکل‌دهی و کولت نگهدارنده ابزار تعبیه می‌شود.



Fig. 1. The principles and process equipment

شکل ۱: تصویر آزمایشگاهی از اصول و تجهیزات فرآیند

برای انجام آزمایش‌ها، ابزارهای شکل‌دهی استوانه‌ای با سر نیم‌کره به قطر ۸ و ۱۲ میلی‌متر و از جنس فولاد تندبر مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین مسیر ابزار به صورت ماریچ مخروطی، ابتدا مدل هندسی مخروط ناقص با ابعاد مورد نظر در نرم‌افزار کتیا شبیه‌سازی شد. سپس مدل ساخته شده به نرم‌افزار پاورمیل انتقال داده و مسیر حرکت ابزار و نقطه شروع حرکت، روی نمونه مدل‌سازی شده، مشخص گردید. فایل خروجی نرم‌افزار، توسط ماشین CNC، خوانده شده و حرکت ابزار و در نتیجه شکل‌دهی، مطابق برنامه انجام شد.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به قطعات شکل‌دهی شده

Table 1. Details of formed parts

شماره قطعه	زاویه دیواره (deg)	گام ابزار (mm)	قطر ابزار (mm)	ارتفاع قطعه شکل‌دهی شده (mm)	ارتفاع تقریبی شروع بارگی در قطعه (mm)
۱	۶۴	۰/۳	۸	۹	۴
۲	۵۶	۰/۳	۸	۱۳	۸
۳	۵۶	۰/۵	۸	۱۲	۷
۴	۵۶	۰/۱	۸	۱۰	۵
۵	۵۶	۰/۳	۱۲	۱۳	۷
۶	۴۵	۰/۳	۸	۲۰	بدون شکست
۷	۴۵	۰/۳	۱۲	۲۰	بدون شکست

می‌آید. F_z ، بیشینه مؤلفه نیروی شکل‌دهی می‌باشد که در راستای عمودی اعمال می‌شود. F_x و F_y نیز مؤلفه‌های افقی نیروی شکل‌دهی می‌باشند. برای بررسی هر یک از پارامترهای ذکرشده در بالا، چند آزمایش انجام شده و روند تغییرات نیرو که با دینامومتر اندازه‌گیری شده است، با هم مقایسه می‌شوند. در انجام تمام آزمایش‌ها، مقدار نرخ پیشروی ابزار بین ۸۰۰ - ۱۲۰۰ mm/min متغیر می‌باشد. همچنین به منظور دستیابی به محدوده دمایی ۴۰۰-۵۰۰°C در محل تماس ابزار- ورق، جریان الکتریکی در مقدار ۴۰۰ آمپر تنظیم می‌شود.

۳-۱-۱- تأثیر اندازه زاویه دیواره

در این قسمت تأثیر اندازه زاویه دیواره بر مقدار نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۶، قطعات حاصل از انجام آزمایش‌ها با زاویه دیواره ۴۵°، ۵۶° و ۶۴° را نشان می‌دهد.

در شکل ۷ نمودار نیروها برای قطعات شکل‌دهی شده با زاویه دیواره ۴۵°، ۵۶° و ۶۴° نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش زاویه دیواره تا حدی می‌تواند موجب افزایش چگالی جریان الکتریسیته و حرارت موضعی شود به گونه‌ای که سبب کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود.

۳-۱-۲- تأثیر اندازه گام

در شکل ۸، نتایج حاصل از انجام سه آزمایش با مقادیر گام ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ میلی‌متر برای ابزار، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار گام ابزار، مقدار نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد. در حقیقت، با افزایش گام ابزار، چگالی جریان الکتریسیته برای ایجاد حرارت موضعی در ورق، کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در مطالعه فان و همکاران [۱۶] نیز اشاره شده است، این امر موجب جلوگیری از افزایش داکتیلیته و شکل‌پذیری ورق و در نتیجه افزایش نیروی شکل‌دهی ورق می‌شود.



Fig. 4. Performing a test on a nickel-plated sheet

شکل ۴: انجام آزمایش روی ورق با پوشش نیکل

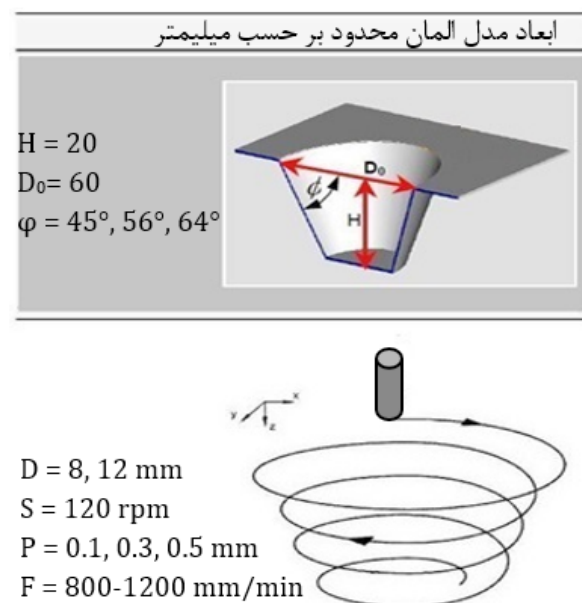


Fig. 5. The geometric dimensions of the piece and the characteristics of the movement path of the tool

شکل ۵: ابعاد هندسی قطعه و مشخصات مسیر حرکت ابزار

۳-۱-۳- بررسی پارامترهای فرآیند بر نیروی شکل‌دهی

با توجه به اینکه جریان الکتریکی به عنوان مؤثرترین پارامتر در قابلیت شکل‌دهی ورق و در نتیجه نیروی لازم جهت شکل‌دهی می‌باشد، سایر پارامترهای فرآیند از قبیل زاویه دیواره، نرخ پیشروی، گام و قطر ابزار نیز می‌توانند موجب تغییر در چگالی جریان الکتریسیته شده و بر حرارت ایجاد شده در محل تماس ابزار- ورق و در نتیجه نیروی شکل‌دهی مؤثر باشند.

نیروی شکل‌دهی در سه مؤلفه اندازه‌گیری می‌شود. مقدار نیرو از برآیند نیروها در راستای X، Y و Z، و از رابطه $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ به دست

۳-۱-۳- تأثیر اندازه قطر ابزار

در این قسمت به بررسی تأثیر اندازه قطر ابزار بر مقدار نیروی شکل‌دهی پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۹ و ۱۰، نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها با مقدار زاویه دیواره 45° و 56° ، در دو حالت قطر ابزار ۸ و ۱۲ میلی‌متر برای ابزار، نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰، می‌توان دریافت افزایش قطر ابزار در این فرآیند موجب کاهش مقدار نیروی شکل‌دهی می‌شود. به طور کلی با افزایش اندازه قطر ابزار و زاویه دیواره، سطح تماس ابزار با ورق افزایش می‌یابد و محدوده بزرگتری از ورق مشمول حرارت موضعی می‌شود. در نتیجه نرمی و حد شکل‌پذیری ورق افزایش و نیروی لازم جهت شکل‌دهی ورق در آن نقطه، کاهش می‌یابد [۱۶].

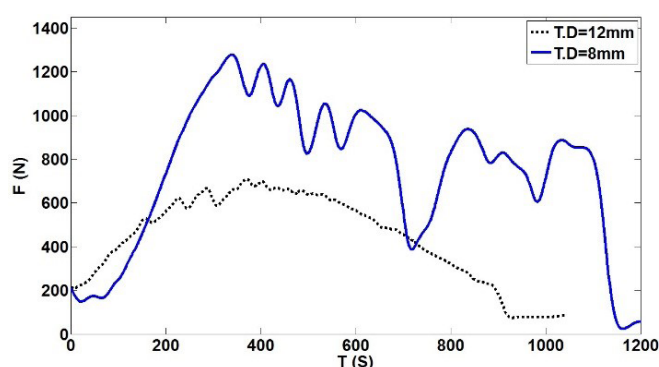


Fig. 9. Force variation in time according to the diameter of the various tools for the parts shaped with a 45° angle and a step of 0.3 mm

شکل ۹: تغییرات نیرو بر حسب زمان به ازای قطر ابزار مختلف برای قطعات شکل‌دهی شده با زاویه دیواره 45° درجه و گام 0.3 میلی‌متر

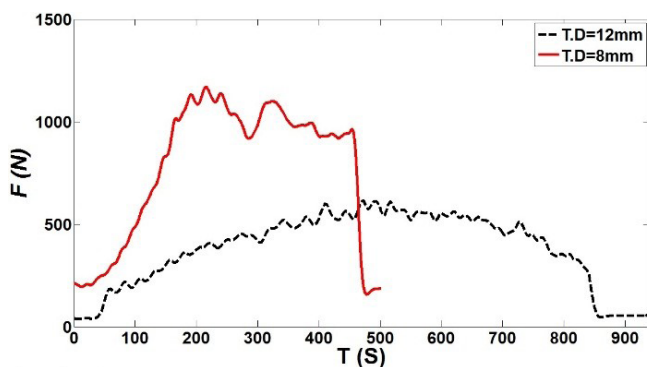


Fig. 10. Force variation in time according to the diameter of the various tools for the parts shaped with a wall angle of 56° and a step of 0.3 mm

شکل ۱۰: تغییرات نیرو بر حسب زمان به ازای قطر ابزار مختلف برای قطعات شکل‌دهی شده با زاویه دیواره 56° و گام 0.3 میلی‌متر

۴- مدل‌سازی اجزای محدود

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی افزایشی گرم الکتریکی، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. در این تحلیل، ورق در طول فرآیند دچار اعمال حرارت می‌شود، از این رو برای

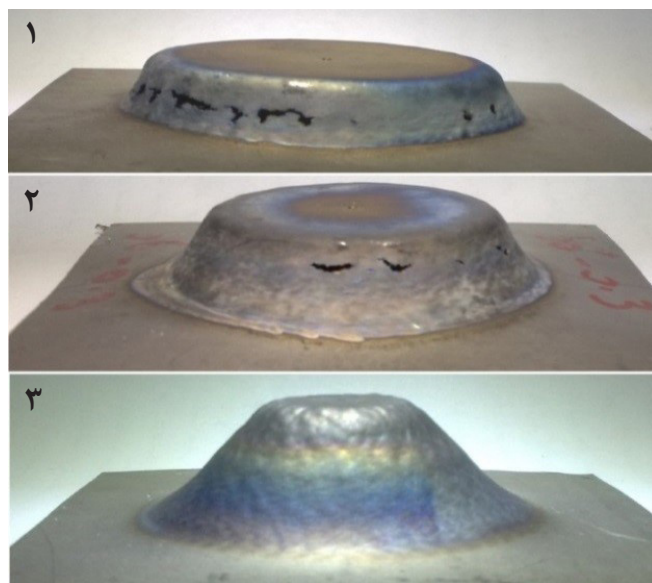


Fig. 6. Laboratory samples with wall angles: (1) 64° , (2) 56° , (3) 45°

شکل ۶: نمونه‌های آزمایشگاهی با زاویه دیواره‌های: (۱) 64° ، (۲) 56° ، (۳) 45° درجه

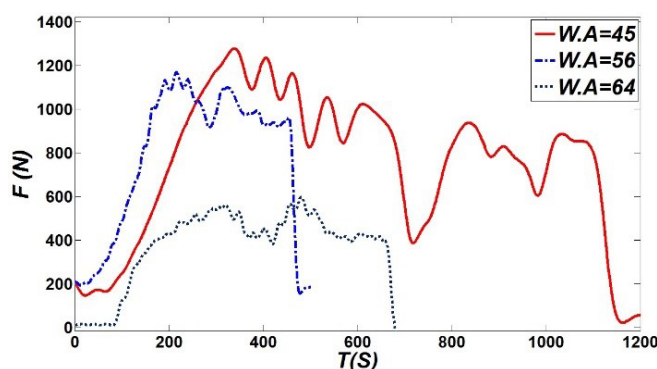


Fig. 7. The variation of force in terms of time for different wall angles for shaped parts with a step size of 0.3 and a diameter of 8 mm.

شکل ۷: تغییرات نیرو بر حسب زمان به ازای زاویه دیواره مختلف برای قطعات شکل‌دهی شده با اندازه گام 0.3 و قطر ابزار ۸ میلی‌متر

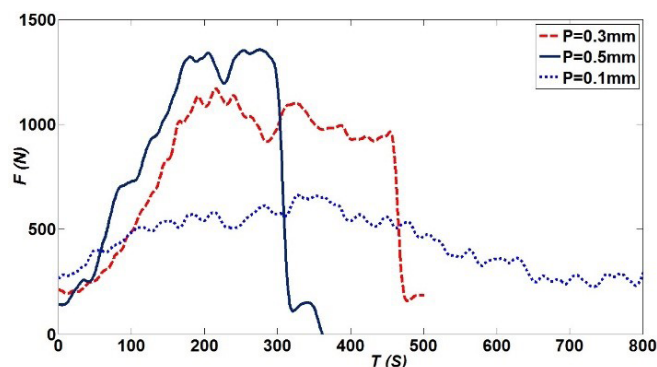


Fig. 8. Force variation in time for a different step size for components shaped at 56° and 8 mm diameter.

شکل ۸: تغییرات نیرو بر حسب زمان به ازای اندازه گام مختلف برای قطعات شکل‌دهی شده با زاویه 56° و قطر ابزار ۸ میلی‌متر

مرجع می‌باشند. A, B, C, m و n ثوابت ماده هستند که مقادیر آنها برای آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V مطابق با کاتالوگ مربوطه، در جدول ۴ آمده‌اند.

جدول ۲: خواص حرارتی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V در دماهای مختلف

Table 2. Thermal properties of Ti6Al4v titanium alloy at different temperatures

دما (°C)	انبساط حرارتی α ($\mu\text{m/m} \cdot ^\circ\text{C}$)	هدایت حرارتی λ (W/m.K)	گرمای ویژه C_p (J/Kg.K)
۱۷/۷۸	۱۱/۳	۶/۹۲	۳۸۷/۵۶
۹۳/۳۴	۱۱/۳	۷/۴۴	۴۰۶/۹۳
۲۰۴/۴۴	۱۱/۳	۸/۶۵	۴۲۶/۳۱
۴۲۶/۶۷	۱۱/۳	۱۱/۹۴	۴۷۴/۷۶
۵۳۷/۷۸	۱۱/۳	۱۳/۶۷	۵۱۷/۳۹
۹۵۸/۲۲	۱۱/۳	۱۸	۶۹۷/۶۱

جدول ۳: خواص الاستیک و چگالی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V در دماهای مختلف

Table 3. Elastic properties and density of Ti6Al4v titanium alloy at different temperatures

دما (°C)	ضریب پواسون	مدول یانگ E (GPa)	چگالی ρ (Kg/m ³)
۲۱/۱۱	۰/۳۱	۱۱۷/۲۱	۴۴۳۰
۲۰۴/۴۴	۰/۳۱	۱۰۶/۸۷	۴۴۳۰
۴۲۶/۶۷	۰/۳۱	۹۵/۱۵	۴۴۳۰
۶۴۸/۸۹	۰/۳۱	۸۲/۷۲	۴۴۳۰

جدول ۴: پارامترهای مدل جانسون- کوک برای آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V

Table 4. Johnson-cook model for Ti6Al4v titanium alloy

A (MPa)	B (MPa)	C	M	n	$\dot{\epsilon}_0$
۹۶۸	۳۸۰	۰/۰۱۹۷	۰/۵۷۷	۰/۴۲۱	۱

در این تحلیل، برای شبیه‌سازی رفتار تماس بین ابزار و ورق، از الگوریتم تماس سطح با سطح (روش پناستی) و برای تعریف شرایط اصطکاک بین ورق و ابزار از مدل اصطکاک کولمبی استفاده می‌شود. ضریب اصطکاک بین ورق و ابزار با استفاده از دستگاه دینامومتر، ۰/۱۷ به دست آمد. همچنین با توجه به نوع تماس بین ابزار و ورق، رسانایی حرارتی نیز بین ورق و ابزار، برقرار می‌شود. به دلیل اینکه ابزار نقش یک منبع حرارتی را ایفا می‌کند و در حین حرکت بر روی ورق، حرارت از ابزار به ورق منتقل می‌شود، مقدار ظرفیت گرمایی ابزار نیز با توجه به جنس آن، مشخص شد. در نهایت با توجه به محدوده دمایی موضعی بین ابزار و ورق، مقدار دمای مورد نظر به ابزار اختصاص داده می‌شود.

شبیه‌سازی فرآیند در حالت ایده‌آل از یک مدل اجزای محدود سه بعدی و الگوریتم حل دینامیکی صریح جابجایی- حرارتی^۱ استفاده شد. شکل ۱۱ مدل هندسی فرآیند را همراه با شرایط مرزی ورق در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد.

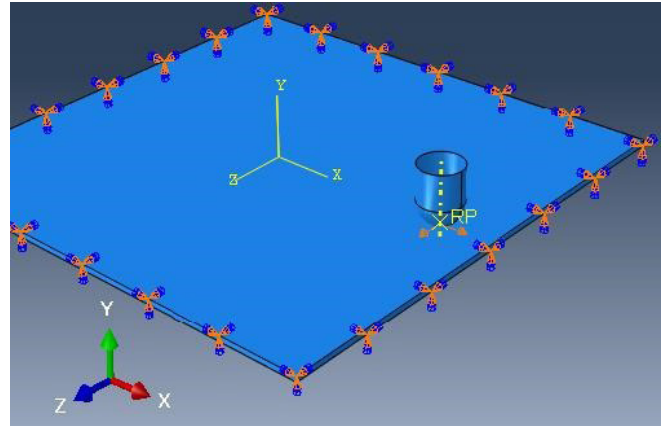


Fig. 11. Process model geometry in Abacus software

شکل ۱۱: مدل هندسی فرآیند در نرم‌افزار آباکوس

در این تحلیل، مدل شبیه‌سازی فقط شامل یک سنبه و یک بلانک به ابعاد ۹۰×۹۰×۱ میلی‌متر می‌باشد. سنبه به صورت صلب تحلیلی^۲ در نظر گرفته می‌شود و هیچ خواص ماده‌ای برای آن مشخص نمی‌شود. بنابراین مدل اجزای محدود، فقط شامل یک ماده الاستیک - پلاستیک برای بلانک تغییر شکل‌پذیر می‌باشد.

همانطور که اشاره شد، جنس ورق از آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V می‌باشد که خواص الاستیک و خواص حرارتی این ماده بر حسب دماهای مختلف، طبق منبع معتبر به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. همچنین معادلات مربوط به خواص حرارتی این ماده نیز مطابق با منابع [۲۱ و ۲۰] در زیر آورده شده است.

$$\alpha(T \text{ } ^\circ\text{C}) = 3 \times 10^{-9} \times T + 9 \times 10^{-6} \text{ [1/} ^\circ\text{C}] \quad (1)$$

$$\lambda(T \text{ } ^\circ\text{C}) = 7.039 \times e^{0.0011 \times T} \text{ [W / m.} ^\circ\text{C}] \quad (2)$$

$$C_p(T \text{ } ^\circ\text{C}) = 2.24 \times e^{0.0007 \times T} \times 10^6 / \rho \text{ [J / kg.} ^\circ\text{C}] \quad (3)$$

رفتار تنش- کرنش ورق نیز به وسیله مدل جانسون- کوک^۳ توصیف شده است، که مطابق معادله زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = (A + B \epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (4)$$

که در رابطه ۴، $T_r = ۲۵^\circ\text{C}$ دمای محیط، $T_m = ۱۶۵۵^\circ\text{C}$ دمای ذوب، σ_y تنش تسلیم، ϵ کرنش معادل و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش معادل و $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش معادل

- 1 Dynamic, Temp-disp, Explicit
- 2 Analytical rigid
- 3 Johnson-Cook

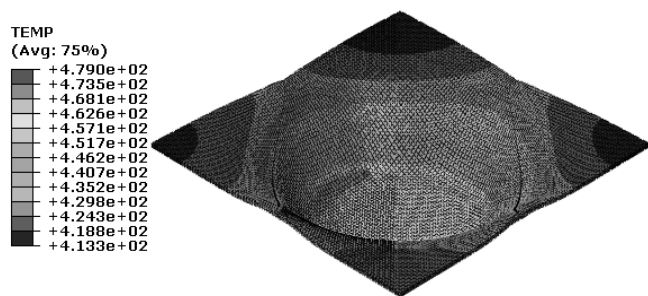
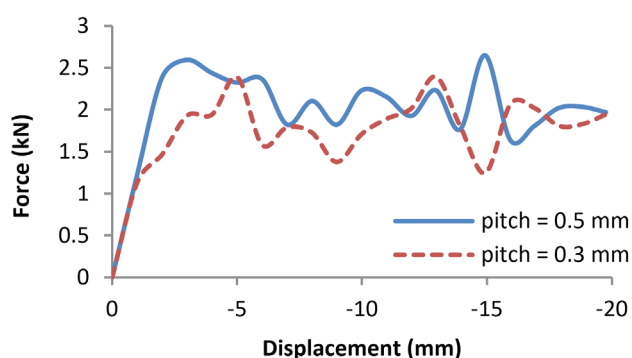


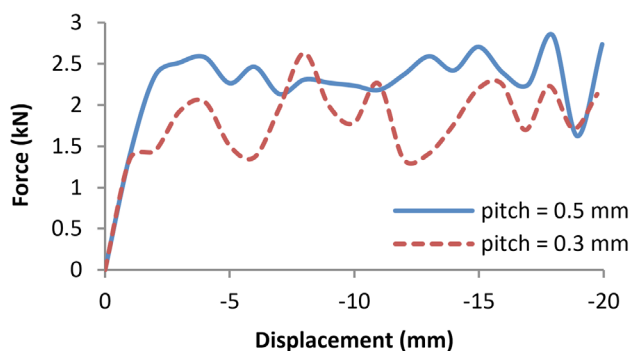
Fig. 14. A simulated piece during the process with a temperature range of 500-400 °C

شکل ۱۴: قطعه شبیه‌سازی شده در طول فرآیند با محدوده دمایی ۵۰۰-۴۰۰ °C

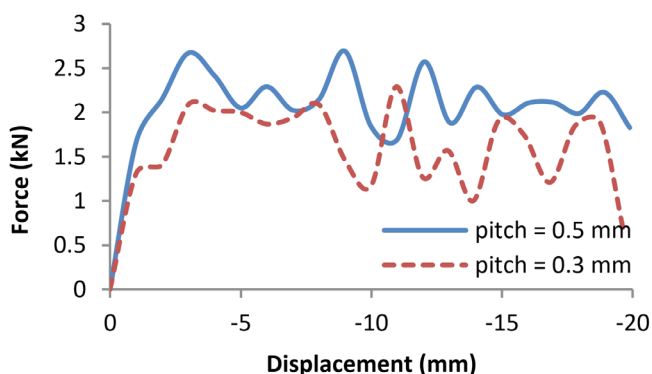
همچنین شکل ۱۵ نتایج عددی را برای ۴ حالت مختلف نیرو-جابجایی سنبه با اندازه گام‌های عمودی متفاوت بین ۰/۳ و ۰/۵ میلی‌متر نشان می‌دهد.



الف) $\phi = 56^\circ$, $f = 1200 \text{ mm/min}$



ب) $\phi = 56^\circ$, $f = 1500 \text{ mm/min}$



ج) $\phi = 64^\circ$, $f = 1200 \text{ mm/min}$

انتخاب المان مناسب به منظور شبیه‌سازی صحیح رفتار ورق در فرآیند و همچنین به دست آوردن جواب‌های دقیق بسیار اهمیت دارد. در این راستا برای مش‌بندی ورق از المان‌های ۳ بعدی با ۸ گره و به صورت کوپل جابجایی و حرارت با نقاط انتگرال‌گیر کاهش‌یافته (C3D8RT)، استفاده شد. همچنین به منظور افزایش دقت مدل و توزیع تنش در راستای ضخامت، سه المان در راستای ضخامت در نظر گرفته می‌شود. در نهایت ورق با تعداد ۳۰۰۰ المان مش‌بندی شد و در تحلیل‌ها، عدم وابستگی جواب‌ها به مش‌بندی، با ریزترکردن مش بررسی شد.

۴-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

در این بخش ابتدا به منظور اعتباربخشی به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، به مقایسه نتایج نیرو در حالت شبیه‌سازی و تجربی پرداخته می‌شود. در هر دو حالت، مقدار گام و قطر ابزار به ترتیب برابر ۰/۳ و ۸ میلی‌متر و زاویه دیواره ۴۵° می‌باشد (شکل ۱۲). اختلاف میانگین نتایج عددی و تجربی حدود ۵/۷٪ می‌باشد.

شکل ۱۳ قطعه شبیه‌سازی شده به وسیله تحلیل اجزای محدود را برای زاویه دیواره ۴۵° نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه مقدار نمایش داده شده در کانتور تنش، معادل ۴۴۰ MPa می‌باشد که به مراتب کمتر از حد تنش تسلیم ماده بوده و این نشان از سالم بودن قطعه شبیه‌سازی شده، همانند نمونه تجربی می‌باشد. همچنین دمای محل تماس ابزار با ورق در طول شبیه‌سازی فرآیند نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

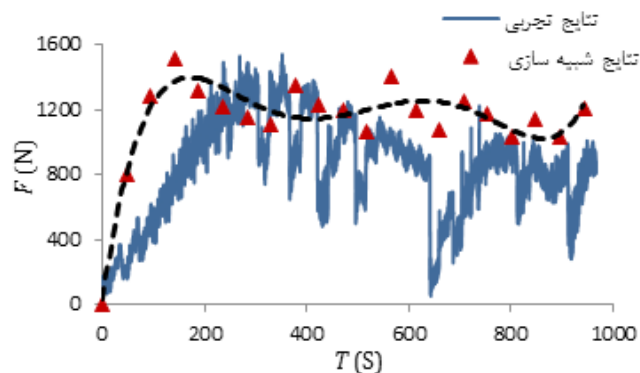


Fig. 12. Comparison of experimental and simulation of incremental forming force

شکل ۱۲: مقایسه تجربی و شبیه‌سازی نیروی شکل‌دهی افزایشی

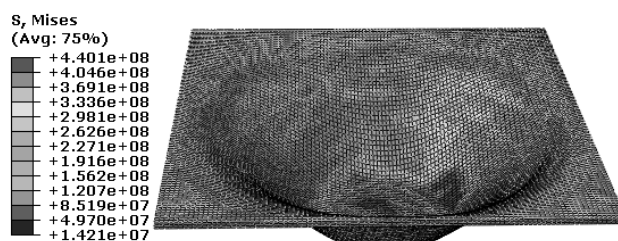


Fig. 13. Cone section with 45° angle wall by simulating finite element

شکل ۱۳: قطعه مخروطی با زاویه دیواره ۴۵° به وسیله شبیه‌سازی اجزای محدود

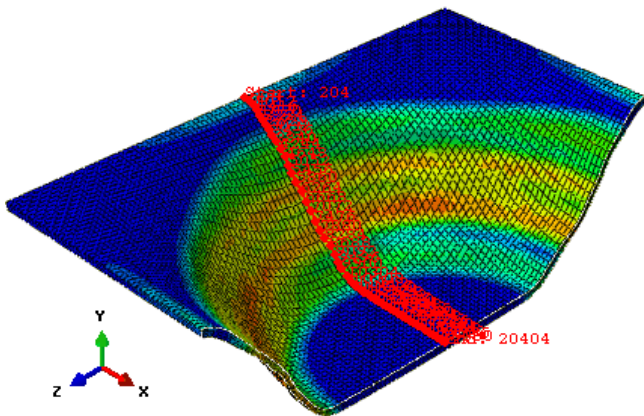
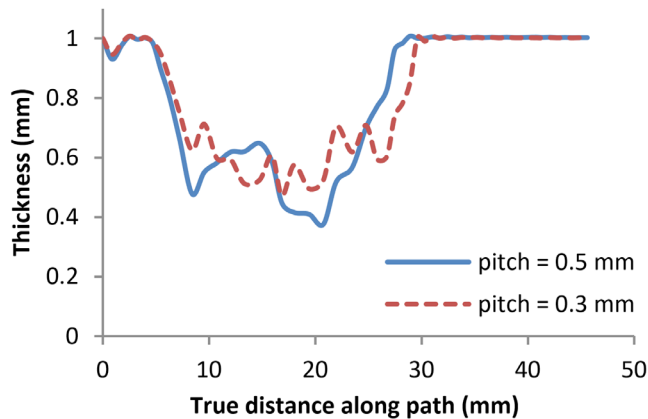


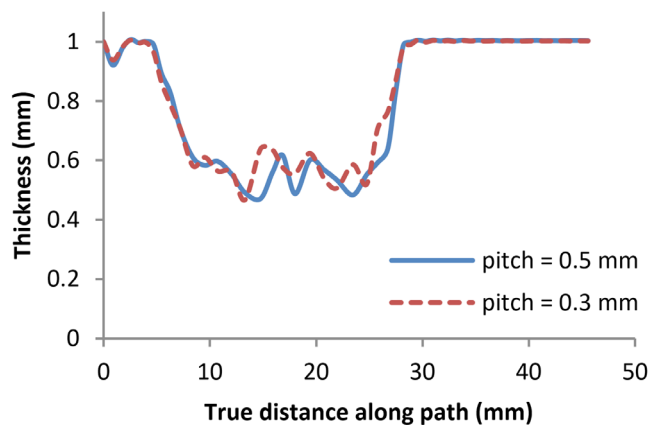
Fig. 17. Radial path specified to measure thickness distribution

شکل ۱۷: مسیر شعاعی مشخص شده جهت اندازه‌گیری توزیع ضخامت کمتر در دیواره قطعه شده است.

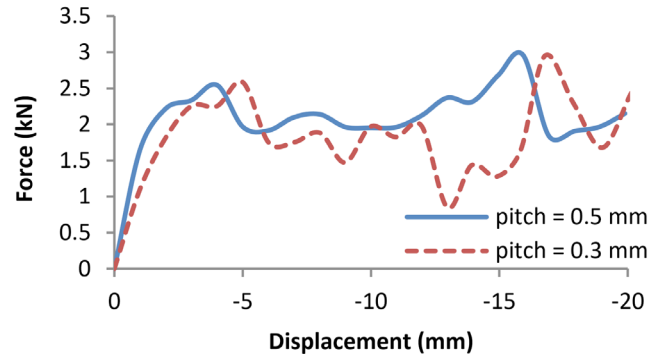
در پایان نیز به بررسی برگشت فنی در مدل اجزای محدود پرداخته می‌شود. برای این منظور مدل هندسی قطعه مخروطی با زاویه دیواره 45° که از نرم‌افزار کتیا به دست می‌آید (شکل ۱۹)، با قطعه شکل‌دهی شده در نرم‌افزار آباکوس مقایسه می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مدل CAD برای قطعه با زاویه دیواره 45° در شکل ۲۰ قابل مشاهده می‌باشد.



$\phi = 56^\circ$, $f=1200$ mm/min (الف)



$\phi = 56^\circ$, $f=1500$ mm/min (ب)



$\phi = 64^\circ$, $f = 1500$ mm/min (د)

Fig. 15. Effect of vertical step size on sheet forming force in four different modes

شکل ۱۵: تأثیر اندازه گام عمودی بر نیروی شکل‌دهی ورق در چهار حالت مختلف

همانطور که از شکل ۱۵ مشاهده می‌شود همچنان که اندازه گام عمودی افزایش می‌یابد واضح است که مقادیر نیروی سنبه نیز افزایش می‌یابد. این امر به دلیل رابطه مستقیمی است که اندازه بزرگی نیرو با اندازه گام عمودی دارد و به خوبی با روند افزایشی نشان داده شده در شکل‌ها مطابقت دارد. نکته دیگری از که بخش نتایج مدل‌سازی اجزای محدود قابل استخراج است، توزیع ضخامت ورق در عملیات شکل‌دهی می‌باشد. برای این منظور مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی در شکل ۱۶ قابل مشاهده می‌باشد.

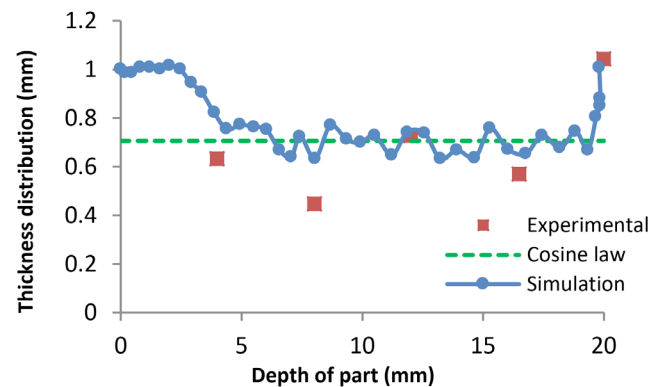


Fig. 16. Comparison of experimental and simulation of thickness distribution for wall angles of 56 degrees, tool diameter of 8 mm and step 0.3 mm

شکل ۱۶: مقایسه تجربی و شبیه‌سازی توزیع ضخامت برای زاویه دیواره 56° درجه، قطر ابزار ۸ میلیمتر و گام 0.3 میلیمتر

همچنین در شکل ۱۸ نتایج شبیه‌سازی مربوط به توزیع ضخامت در مسیر مشخص شده در شکل ۱۷ قابل مشاهده است.

همانطور که از شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش ضخامت در قسمت دیواره قطعه رخ می‌دهد و افزایش گام در برخی مواقع می‌تواند سبب افزایش مقدار کاهش ضخامت شود. از نتایج ارائه شده این طور به نظر می‌رسد که با کاهش زاویه دیواره قطعه، تأثیر افزایش گام در جلوگیری از کاهش ضخامت دیواره، کمتر می‌شود. همچنین از شکل مذکور ملاحظه می‌شود در زاویه دیواره 64° افزایش مقدار گام تا حدودی موجب کاهش

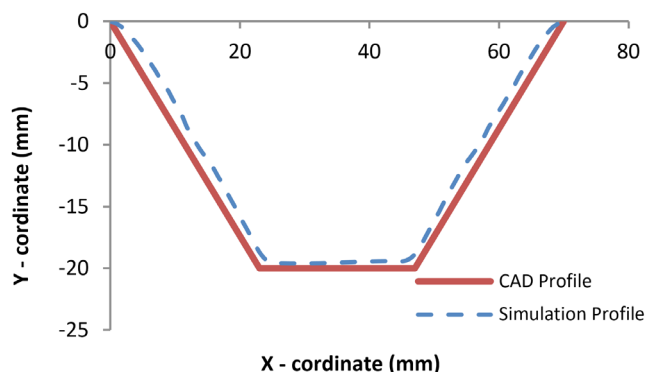


Fig. 20. Comparison of surface curved profiles obtained from simulation and CAD model for workpiece with angle 45°

شکل ۲۰: مقایسه منحنی پروفیل سطح حاصل از شبیه‌سازی و مدل CAD برای قطعه کار با زاویه دیواره 45°

از انجام این فرآیند مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت که با توجه به نتایج حاصل، دستاوردهای این تحقیق عبارتند از:

۱. با توجه به قابلیت شکل‌دهی پایین آلیاژ Ti6Al4V در دمای محیط، انجام فرآیند EHIF بر روی این ورق، به علت شکل‌دهی ورق در حالت گرم، موجب افزایش قابلیت شکل‌دهی این آلیاژ سبک می‌شود، به طوری که این ورق می‌تواند در محدوده دمایی $400 - 500^\circ\text{C}$ بدون اکسیداسیون و با دقت ابعادی نسبتاً قابل قبولی، در زاویه دیواره 45° ، به طور کامل و بدون ترک شکل داده شود.

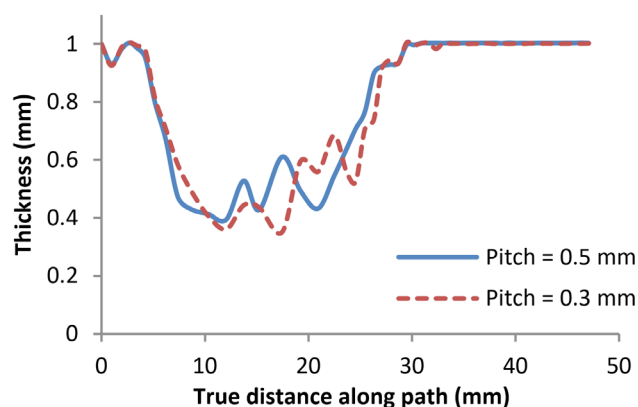
۲. تأثیر پارامترهای فرآیند از قبیل زاویه دیواره، اندازه گام و قطر ابزار بر قابلیت شکل‌دهی ورق در این فرآیند از اهمیت بالایی برخوردار است. با افزایش زاویه دیواره قطعه، شکل‌پذیری ورق در این فرآیند کاهش می‌یابد.

۳. با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان داده شد با افزایش اندازه گام عمودی و کاهش قطر ابزار، چگالی جریان الکتریسیته کاهش یافته و در نتیجه حرارت لازم جهت افزایش نرمی و شکل‌پذیری موضعی ورق نیز کمتر می‌شود. از این رو نیروی لازم برای شکل‌دهی ورق افزایش می‌یابد.

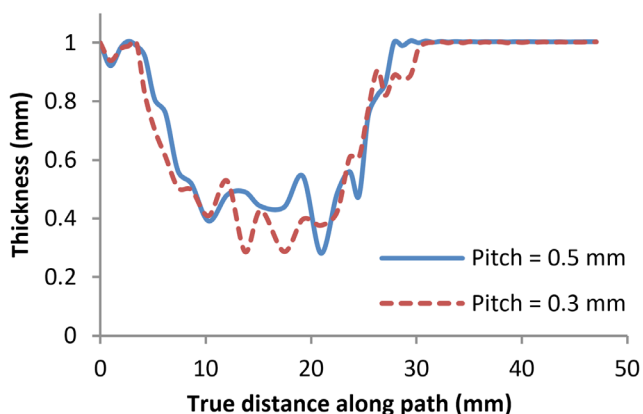
۴. با توجه به همگرایی نتایج عددی و تجربی و صحت نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود فرآیند، تأثیر سایر پارامترهای فرآیند بر شکل‌دهی ورق در حالت گرم می‌تواند با استفاده از این روش مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

۵. قطعات شکل‌دهی شده پس از آزمایش معمولاً مقداری برگشت فنری داشتند که این مورد در حدود $0/3$ تا 2 میلیمتر به ترتیب در کف و دیواره‌ها، گزارش شد.

۶. پارامترهای مؤثر در این فرآیند از جمله جریان الکتریکی جریان، نرخ پیشروی و گام ابزار، اصلی‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای این فرآیند می‌باشند که با تنظیم صحیح و کنترل مناسب این سه



(ج) $\phi = 64^\circ$, $f=1200 \text{ mm/min}$



(د) $\phi = 64^\circ$, $f=1500 \text{ mm/min}$

Fig. 18. The effect of tool vertical step on the thickness distribution of the sheet in four different modes

شکل ۱۸: تأثیر مقدار گام عمودی ابزار بر توزیع ضخامت ورق در چهار حالت مختلف

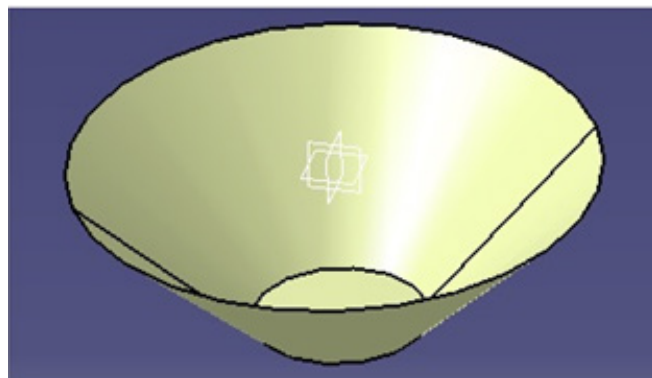


Fig. 19. CAD model for cone-shaped profile with a 45° angle

شکل ۱۹: مدل CAD برای پروفیل مخروطی شکل با زاویه دیواره 45°

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، فرآیند شکل‌دهی افزایشی گرم الکتریکی ورق Ti6Al4V، مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین با استفاده از دینامومتر، نیروی شکل‌دهی نمونه‌های آزمایشگاهی حاصل

forming process for small batch and prototype parts, *Proceedings of the Ninth Int Conf Sheet Metal* (2001) Leuven.

- [10] A. Al-Obaidi, V. Kr?usel, D. Landgrebe, Hot single-point incremental forming assisted by induction heating, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82(5-8) (2016) 1163-1171.
- [11] H. ghasemi, B. Soltani, Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming, *Modares Mechanical Engineering* 14(1) (2014) 89-96.
- [12] A. Zahedi, B. Mollaei-Dariani, M. Morovvati, Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, 14(14) (2014) 1-8.
- [13] G. Hussain, L. Gao, Y. Zhang, Formability evaluation of pure titanium sheet in the cold incremental forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37 (2008) 920-926.
- [14] J. R. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert, H. De Baerdemaeker, Laser assisted incremental forming: formability and accuracy improvement, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2007) 273-276.
- [15] G. Ambrogio, L. Filice, G. L. Manco, Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) 257-260.
- [16] G. Fan, L. Gao, G. Hussain, Z. Wu, Electric hot incremental forming: a novel technique, *nternational Journal of Machine Tools and Manufacture* 48(15) (2008) 1688-1692.
- [17] G. Fan, F. Sun, X. Meng, L. Gao, G. Tong, Electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 49 (2010) 941-947.
- [18] G. Palumbo, M. Brandizzi, Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed, *Materials and Design* 40 (2012) 43-51.
- [19] G. Ambrogio, L. Filice, F. Gagliardi, Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming, *Materials and Design* 34 (2012) 501-508.
- [20] G. Chen, C. Ren, X. Yang, X. Jin, T. Guo, Finite element simulation of high-speed machining of titanium

پارامتر، می‌توان به شکل‌دهی قطعه‌ای سالم با زاویه دیواره بیشتر از ۴۵° دست پیدا کرد.

فهرست علائم

T	زمان (s)
F	نیروی شکل‌دهی (N)
P	گام ابزار (mm)
$W.A$	زاویه دیواره (deg)
$T.D$	قطر ابزار (mm)
S	تنش (MPa)

منابع

- [1] M. Kleiner, M. Geiger, A. Klaus, Manufacturing of lightweight components by metal forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52(2) (2003) 521-543.
- [2] D. Eylon, S.R. Seagle, State of titanium in the USA-the first 50 years. In: Gorynin IV, Ushkov SS (eds) *Titanium 99, Science and Technology*, CRISM "PROMETHEY", 2000.
- [3] H. S. Lee, J. H. Yoon, C. H. Park, Y. G. Ko, D. H. Shin, A study on diffusion bonding of superplastic Ti-6Al-4V ELI grade, *Journal of Materials Processing Technology* 187 (2007) 526-529.
- [4] A. K. Ghosh, C. H. Hamilton, Mechanical behavior and hardening characteristics of a superplastic Ti-6Al-4V alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A* 10 (1979) 699-706.
- [5] M. Vanderhastan, L. Rabet, B. Verlinden, Ti-6Al-4V: deformation map and modelization of tensile behavior, *Matreials and Design* 29 (2008) 1090-1098.
- [6] S. Matsubara, Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical-head tool, *JOURNAL-JAPANSOCIETYFOR TECHNOLOGY OF PLASTICITY* 35 (1994) 1311-1316.
- [7] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, A symmetric single point incremental forming of sheet metal, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54(2) (2005) 623-60.
- [8] J. R. Duflou, Y. Tunckol, A. Szekeres, P. Vanherck, Experimental study on force measurements for single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology* 189 (2007) 65-72.
- [9] D. Leach, A. J. Green, A. N. Bramley, A new incremental

T. Marusich, An enhanced constitutive material model for machining of Ti-6Al-4V alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 2238- 2246.

alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 56 (2011) 1027-1038.

[21] R. Liu, S. Melkote, R. Pucha, J. Morehouse, X. Man,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Honarpisheh and M. J. Abdolhoseini, "Experimental and Numerical Investigation of Forming Force of Ti6Al4V Sheet in Electric Hot Incremental Forming Process of a Conical Part" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(2) (2017) 401-412.

DOI: 10.22060/mej.2016.799



