



بررسی تجربی و عددی پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی قطعه مخروطی شکل در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی

توحید بیات بداقی، داود اکبری*، حسن مسلمی نائینی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۲-۲۳

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۲۳

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۲۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۸-۲۹

کلمات کلیدی:

شکل‌دهی چرخشی برشی

یش فرم

تحلیل اجزای محدود

خلاصه: شکل‌دهی چرخشی برشی، نوعی از فرآیند شکل‌دهی است که برای تولید قطعاتی با نسبت وزن به استحکام بالا کاربرد دارد. در این پژوهش، پارامترهای لازم برای تولید یک نمونه مخروطی شکل با ضخامت ثابت و به کمک طراحی یک پیش فرم مناسب استخراج شده است. پارامترهای مهم در این خصوص شامل مقدار بهینه سرعت چرخشی سنبه، میزان پیشروی غلتکهای شکل‌دهی، میزان فشار پشت مرگک و ضریب اصطکاک بهینه فرآیند می باشد. در این راستا پارامترهای ذکر شده با استفاده از مدلسازی اجزای محدود، در فرآیند تولید نمونه مزبور پیاده سازی شده و با نتایج تجربی تولید قطعه مقایسه و اعتبارسنجی گردید. در روش تولیدی پیشنهادی، از یک پیش فرم جدید کاپ شکل به جای ورق صاف استفاده شده و نتایج قطعات تولید شده با نتایج قطعات تولید شده از ورق صاف مقایسه گردید. استفاده از این پیش فرم به منظور بهبود فرآیند شکل‌دهی و جهت مقایسه با روش مرسوم می باشد. با مقایسه نتایج، مقدار بهینه پارامترهای شکل‌دهی در تولید استخراج گردید و مشاهده شد که استفاده از پیش فرم معرفی شده، بدلیل مشخصات ابعادی و هندسی، نتایج مطلوب تری در قطعه نهایی حاصل می نماید. از این رو و با توجه به نتایج حاصله و همچنین صحنه گذاری مناسب نتایج، می توان از آن برای افزایش کیفیت و بهینه سازی این فرآیند در قطعات پیچیده تر بهره برد.

۱- مقدمه

تولید قطعات خاص و پیچیده با نسبت وزن به استحکام بالا از موادی نظیر مس، آلومینیوم و فولاد زنگ نزن با ترانس‌های بسته ابعادی و هندسی، یکی از نیازهای روبه‌رشد در صنایع مختلف می باشد. این قطعات ممکن است از لحاظ هندسی تقارن محوری و یا تقارن صفحه‌ای داشته باشند.

قطعات مخروطی پوسته‌ای با ضخامت ثابت و یا متغیر، از این دست قطعات می باشد که مصارف زیادی در صنایع مختلف دارد. صرف هزینه‌های بالای تأمین مواد اولیه تولید، ساخت و انجام آزمون‌های نهایی برای کنترل و همچنین نرخ بالای خرابی برخی قطعات، باعث شده است که صنایع برای حل این مشکل، به سراغ روش‌های نوین در حوزه ساخت بروند. شکل‌دهی چرخشی^۱ برشی یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای تولید قطعات مخروطی پوسته‌ای می باشد. این روش یکی از انواع شکل‌دهی چرخشی است که به دلیل دقت خاص عملکردی، از

دقیق‌ترین روش‌های شکل‌دهی است. از این رو و با بررسی‌های انجام شده، روش به‌عنوان مناسب‌ترین روش جهت بدست آوردن مشخصات نهایی مورد نظر در تولید بسیاری از قطعات معرفی شده است. در این فرآیند، قطعه کار در ناحیه بین ماندرل دوار و ابزار (به شکل اهرم یا غلتک) که به صورت محوری و یا محوری - شعاعی حرکت می کند، به صورت نقطه‌ای در محل تماس، تغییر شکل دائمی ایجاد می کند. با این روش قطعاتی به شکل مخروط، نیم کره، لوله، استوانه یا ترکیبی از آنها، در تنوعی از اندازه و شکل ساخته می شوند.

با توجه به فیزیک فرآیند و تعدد پارامترهای دخیل در آن، تحقیقات مختلفی بر روی فرآیند مزبور انجام گرفته که در هر یک از آنها، اثر برخی از پارامترها بررسی شده است. مارینی و همکاران طی یک مقاله مروری، بررسی جامعی در خصوص فرآیند شکل‌دهی برشی انجام دادند [۱]. رضوی و همکاران فرآیند شکل‌دهی چرخشی را بر روی یک قطعه ساده بصورت عملی اجرا کردند و موانع موجود در تحلیل اجزا محدود فرآیند شکل‌دهی چرخشی یک قطعه را مورد بررسی قرار دادند. برای انجام این آزمایش، شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی در

1 Spinning

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Daakbari@modares.ac.ir



و روش تحلیل سری‌های زمانی برای بدست آوردن پارامترهایی که در آزمایشات تجربی نمی‌توان بدست آورد، استفاده کردند. همچنین شبیه‌سازی این فرآیند را در نرم افزار آباکوس انجام دادند [۱۱]. کین شنگ ژو^۷ و همکاران تحلیل المان محدود فرآیند شکل‌دهی چرخشی با استفاده از دو مدل ساده شده الاستیک-پلاستیک و ریجید-پلاستیکرا انجام دادند. نتیجه تقریباً یکسان و تفاوت در توزیع ناحیه تنش و کرنش مشاهده گردید. میزان کرنش در مدل صلب-پلاستیک کمتر از مدل دیگر بود. با افزایش نیروی شکل‌دهی شعاع نوک ابزار باید افزایش می‌یافت. شبیه‌سازی فرآیند را در نرم‌افزار دیفرم انجام دادند [۱۲]. کن ایچیرو^۸ و همکاران یک شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود فرآیند شکل‌دهی چرخشی را بر پایه مدل‌سازی متقارن در نرم افزار آباکوس انجام دادند [۱۳]. آلبرتی^۹ و فراتینی تحلیل ساده‌شده سه بعدی بر پایه تغییر شکل ریجید-پلاستیک با استفاده از مدل کردن متقارن را انجام دادند [۱۴].

عمده تحقیقات صورت گرفته در خصوص این فرآیند، به‌دلیل تعدد پارامترهای مؤثر، معطوف به یک یا چند پارامتر اثرگذار است. در حالی که برای بدست آوردن کیفیت مناسب و مورد انتظار برای هر قطعه و زمان سیکل تولید مطلوب، در ابتدا لازم است تا تمامی عوامل و پارامترها با استفاده از تجربه و مهارت‌های مهندسی بصورت هماهنگ تنظیم شوند. در عمل برای همه حالات کاربردی، یک تنظیم مشخص و کلی قابل تجویز نیست. از این رو معمولاً بهبود در یک جنبه منجر به بروز مشکل در یک یا چند جنبه دیگر خواهد شد. هدف این پژوهش بررسی تجربی ایجاد یک پیش‌فرم اولیه برای تولید نمونه برای بهبود پارامترها و شرایط تولیدی و همچنین بهبود قطعه نهایی از نظر پارامترهای هندسی می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی دقیق نرم‌افزاری این فرآیند برای قطعه مورد نظر و بررسی پارامترهای اثر گذار از اهداف اصلی در این تحقیق است. در این راستا نمونه مخروطی شکل با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر (در کل طول یال آن) مطابق با پارامترهای طراحی شده مدل‌سازی و نتایج حاصله با نتایج تجربی حاصل از تولید عملی نمونه مذکور مقایسه و اعتبارسنجی شده است. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل مقدار بهینه سرعت چرخشی سنبه یا مندرل، میزان پیشروی غلتک‌های شکل‌دهی، میزان

نرم‌افزار شبیه‌سازی انجام گرفت و برای مشاهده توزیع کرنش، با شبکه بندی ورق اولیه بصورت عینی این توزیع کرنش را بر روی قطعه کار مشاهده نمودند [۲]. گویلو و همکاران فرم‌دهی چرخشی برشی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را از منظر خواص میکرو ساختاری به صورت تجربی بررسی کردند [۳]. در این مقاله آنان تغییرات تنش موضعی را در شکل‌دهی چرخشی برشی ماده مذکور بررسی نمودند. ژان و همکاران مشاهده کردند با رشد نرخ پیشروی رولرها، افزایش نیروی شکل‌دهی چرخشی و افزایش ضخامت دیواره‌ها، شکل ظاهری ضعیف و دقت قطعه کاهش می‌یابد. همچنین در طی فرآیند مشاهده گردید که با افزایش نیروی شکل‌دهی چرخشی با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها، شکل ظاهری قطعه ضعیف و دقت ابعادی آن کاهش می‌یابد [۴]. علاوه بر فعالیت‌های تجربی، از روش اجزای محدود در مدل‌سازی و تحلیل بسیاری از فرآیندهای ساخت استفاده شده است [۵]. باجیان^۱ و همکاران در آنالیز نرم‌افزاری فرآیند به این نتیجه رسیدند که مدل اجزا محدود با در نظر گرفتن تغییر شکل الاستیک، نمی‌تواند به تنهایی برای آنالیز برگشت فتری قطعات در فرآیند شکل‌دهی چرخشی پیچیده استفاده شود [۶]. سان لی^۲ و همکاران به این نتیجه رسیدند که برای ساده‌سازی فرآیند آنالیز می‌توان از بررسی اثرات تغییر شکل الاستیک به‌دلیل ناچیز بودن آن، در فرآیند شکل‌دهی چرخشی، صرف نظر کرد. هرچه پارامترهای فرآیند کمتر باشند در نهایت آنالیز نهایی به اندازه‌های مطلوب نزدیکتر خواهد بود [۷]. لی وانگ^۳ و لانگ با بررسی مسیرهای مختلف در فرآیند شکل‌دهی به این نتیجه رسیدند که مسیر مقعر بیشترین نیروی ابزار و میزان کاهش ضخامت در قطعه را ایجاد می‌کند [۸]. جیمز^۴ و همکاران مشاهده کردند بیشترین لاغرشدگی به شدت به نیروی میانگین وابسته است. استراتژی‌هایی در راستای کاهش نیروی متوسط به پارگی قطعه کار خواهد انجامید [۹]. هان دونگ^۵ و همکاران مکانیزم تغییر شکل پوسته آلیاژ تیتانیوم در فرآیند شکل‌دهی چرخشی داغ تحت اعمال شرایط نیروی اعمالی مختلف مورد بررسی قرار دادند و با نرم‌افزار آباکوس به شبیه‌سازی آن پرداختند [۱۰]. کلینر^۶ و همکاران از دو روش طراحی آماری تجربی

- 1 Bai Qian
- 2 Sun Li
- 3 L. Wang
- 4 James
- 5 Han Dong
- 6 Kleiner

- 7 QinSheng Xue
- 8 Ken Ichiro
- 9 Alberti

فشار پشت مرغک و ضریب اصطکاک بهینه فرآیند می‌باشند.

اینکه تأثیر محسوسی در کیفیت کار بوجود آورند [۱].

براساس تحقیقات و تجربیات قبلی، انتخاب صحیح میزان فشار زیر سری و نگه دارنده بلنک اثر قابل توجهی در کیفیت مورد انتظار فرآیند شکل‌دهی دارد. فشار خیلی کم نشیمنگاه نمی‌تواند مانع گرایش قطعه کار به کمانش شود و موجب بی‌ثباتی فرآیند می‌گردد. از طرفی دیگر فشار خیلی زیاد موجب جریان بیش از حد و زیاد فلز به سمت محیط پیرامونی شده و باعث نازک شدن غیر قابل قبول و ضخامت ناهمگون قطعه خواهد شد [۱].

شکل مسیر شکل‌دهی چرخشی و حرکت غلتک بر ضخامت دیواره در سراسر طول قطعه کار تأثیری اساسی دارد. می‌توان با تعریف پاس‌های اضافی و انجام شکل‌دهی چرخشی طی چندین مرحله با مسی‌رهای میانی از بروز عیوبی مثل ترک اجتناب کرد [۸]. از طریق تعیین نوع و شکل مماس مسیر حرکت و تماس غلتک با قطعه کار در هر پاس می‌توان احتمال کمانش یا پیچش را کم نمود.

طراحی غلتک، نکته‌ای اساسی در مؤلفه‌های شکل، دقت و صحت می‌باشد که به خوبی اثر خود را در پروفیل ضخامت دیواره در سراسر طول قطعه کار نشان می‌دهد [۸]. ضمن اینکه قطر غلتک تأثیر اندکی بر کیفیت محصول دارد، دماغه و شعاع شانه نسبتاً کوچک غلتک باعث کاهش یکنواختی ضخامت خواهد شد. در عملیات نهایی و پرداخت کاری، شعاع کوچک دماغه غلتک باعث ایجاد دقت بیشتری می‌گردد. ضمن اینکه افزایش شعاع باعث صافی سطح بهتری خواهد شد. سطوح فوق‌العاده صاف تنها وقتی بدست می‌آیند که از ابزار پرداخت

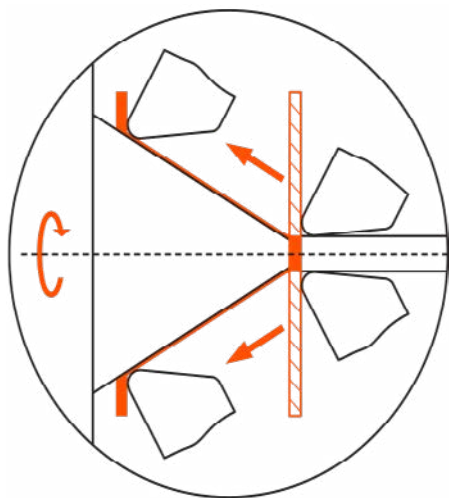
۲- معرفی روش و پارامترها

فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی، حالت خاصی از شکل‌دهی چرخشی است که در آن سطح مقطع قطعه در حین انجام عملیات تغییر می‌کند و از این‌رو در ساخت قطعاتی با ضخامت متغیر قابل کاربرد است. در شکل ۱ شماتیکی از این فرآیند نشان داده شده است. با توجه به تعدد پارامترهای دخیل در این فرآیند، جهت دستیابی به دقت مناسب محصول بایستی این پارامترها به دقت بررسی و بهینه‌سازی گردند. از جمله پارامترهای مهم مؤثر بر این فرآیند عبارتند از [۱ و ۳]:

- فاصله بین مندرل و ابزار شکل دهنده
- شعاع سر ابزار شکل دهنده
- میزان پیشروی ابزار شکل دهنده
- تعداد دوران مندرل و میزان پیشروی دستگاه
- ضخامت اولیه ورق در حال تغییر شکل
- نوع مواد
- زاویه مخروط مندرل
- دقت نصب و رو به رو بودن و هماهنگی غلتک‌ها نسبت به هم و نسبت به مندرل و قطعه کار
- سختی ماده در مفهوم مقاومت به تغییر شکل ماده و تنش جریان
- زاویه حمله و زاویه پرداخت ابزار شکل دهنده
- هندسه پیش فرم (شکل هندسی پیش فرم اولیه قبل از شکل‌دهی)

- تختی منطقه تحت تغییر شکل پیش فرم
- نوع روانکار مورد استفاده و دمای آن
- دمای تغییر شکل
- توزیع ضخامت در ورق یا پیش فرم
- سرعت نسبی نسبت به مندرل

در تحلیل این فرآیند و ارتباط پارامترها باید توجه داشت که خارج قسمت نرخ تغذیه غلتک با سرعت مندرل که به عنوان نسبت تغذیه شناخته می‌شود که باید در طول عملیات ثابت بماند. درحالی‌که سرعت و تغذیه می‌توانند هرکدام در محدوده مجاز تغییر کنند بدون



شکل ۱: شماتیک فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی
Fig. 1. Schematic of Shear forming process

برای ثابت نگهداشتن ماده اولیه یا پیش فرم بر روی مندل در مختصات مورد نظر برای شروع فرآیند، از ابزای بنام مرغک استفاده می‌گردد که باید فشاری یکنواخت و کافی را در طول کل فرآیند بر روی سنبه اعمال نماید تا قطعه‌کار در اثر نیروهای وارده به آن، از مختصات خود خارج نگردد. کوچکترین حرکت یا جابجایی و یا لغزش قطعه‌کار از مختصات تنظیم شده آن بر روی سنبه، موجب عدم تقارن قطعه تولید شده و یا ایجاد چروکیدگی و در نهایت خراب شدن کیفیت سطح قطعه‌کار خواهد شد.

۳-۲- تجهیزات و اجزای مکانیزم شکل‌دهی

دستگاه: برای تولید قطعه در نظر گرفته شده که یک قطعه مخروطی با ضخامت ثابت $2/5$ میلی‌متر می‌باشد، از دستگاه مخصوص فرم‌دهی چرخشی استفاده خواهد شد. این دستگاه دارای دو اسلایدر^۱ می‌باشد و اسلایدرها با تبعیت از دو شابلون دقیق طراحی، ساخته و نصب شده بر روی دستگاه، حرکت در راستای محور طولی دستگاه را انجام می‌دهند.

جنس قطعه مخروطی شکل: قطعه مخروطی شکل برای انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی، یک لاینر^۲ ضخامت ثابت با جنس مس با درجه خلوص ۹۹/۹۹ با شماره استاندارد C11000 می‌باشد.

ماده اولیه یا پیش فرم: همانطوری که پیش‌تر به آن اشاره شد، در تولید نمونه‌های مشابه در این فرآیند، ماده اولیه یک ورق صاف می‌باشد بین مرغک و مندرل قرار می‌گیرد و سپس ابزار شکل‌دهی شروع به شکل دادن ورق می‌نماید. با توجه به هندسه و جنس قطعه، تجربیات و مطالعات صورت گرفته در خصوص عیوب بارز و تکرار شده [۱۵]، در این مقاله استفاده از پیش فرم یکی از راهکارهای اصلی کاهش عیوب در نظر گرفته شد. با آزمایش شکل‌های مختلف و با توجه به شرایط دستگاه موجود، در نهایت شکل پیش فرم نهایی طراحی و بجای ورق اولیه صاف به کار گرفته شد. شکل ۲ هندسه پیش فرم به کار گرفته شده را نشان می‌دهد.

در قسمت دهانه داخلی پیش فرم طراحی شده، یک حفره تعبیه شده است که برای هم محور شدن پیش فرم و مندرل در زمان بستن آن بر روی مندرل بکار گرفته می‌شود.

غلtek یا ابزار شکل‌دهی: غلtek یا ابزار شکل‌دهی در این

کاری مطابق با استاندارد برای آینه‌ای کردن قطعه‌کار استفاده شود. نسبت قطر بلنک به قطر مندرل به عنوان نسبت شکل‌دهی چرخشی شناخته می‌شود. نسبت‌های بزرگتر و یا ورق‌های نازک‌تر مشکلات بیشتری در فرآیند اسپینینگ بوجود می‌آورند. همین که این نسبت از دو حد فراتر رود دیگر تضمینی برای موفق بودن فرآیند مگر در حالات استثنایی وجود نخواهد داشت. با تکرار پاس‌ها هر بار بالاتر رفتن استحکام مکانیکی عملیات شکل‌دهی چرخشی مشکل‌تر خواهد شد. برای بدست آوردن کیفیت مناسب و مورد انتظار و زمان سیکل تولید مطلوب از قطعه کار لازم است تا بسته به موضوع تمامی عوامل و پارامترها با استفاده از تجربه و مهارت‌های مهندسی فرآیند بصورت هماهنگ تنظیم شوند. چنانچه پیش از این نیز شرح داده شد، در عمل برای همه حالات یک تنظیم مشخص وجود ندارد و باید بر اساس فرآیند مورد بررسی، پارامترها تعیین گردد.

تعداد و نوع مراحل عملیات شکل‌دهی چرخشی یا در اصطلاح روند فرآیند، تعیین‌کننده مراحل است که باید در طی آن نمونه تکمیل گردد. به عنوان مثال تعداد دفعات رفت و برگشت یا پاس‌های میان مرحله و یا نرخ تغذیه و سایر موارد از این دست تعیین‌کننده روند فرآیند می‌باشد.

۳- آزمایش تجربی

۳-۱- شرح آزمایش

برای انجام آزمایش تجربی ساخت نمونه قطعه مخروطی مدنظر از جنس مس با درجه خلوص بالا درصد تعیین گردید. در ابتدا ماده اولیه ورق صاف و در ادامه پیش فرم طراحی شده، استفاده گردید. رولر یا غلtek یا ابزار شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی از اجزاء اصلی و تاثیرگذار بر مشخصات نهایی قطعه کار تولیدی می‌باشد. در ابزارهای شکل‌دهی دو زاویه حمله و پرداخت و شعاع نوک ابزار بر مشخصات مکانیکی و کیفیت سطح قطعه تولیدی تأثیر به‌سزایی دارند. در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی تمامی اجزاء درگیر در فرآیند تأثیر خود را در هندسه و مشخصات نهایی قطعه کار می‌گذارند. مندرل یا سنبه نیز که پیش فرم اولیه روی آن خوابانده می‌شود و عملاً شکل نهایی قطعه کار نیز است، با توجه به تolerانس‌های بسیار بسته‌ای که در قطعه مخروطی شکل مورد نظر موجود می‌باشد، لزوماً از تolerانس‌های بسیار بسته در طراحی و تولید برخوردار است.

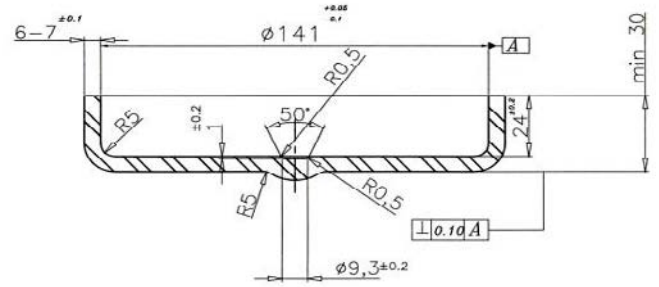
1 Slider

2 Liner

بسته‌ای که در قطعه نهایی مورد نظر است، در طراحی مندرل چه از نظر ابعادی و چه از نظر تolerانس‌های نصبی، الزامات ویژه‌ای لحاظ می‌گردد. مشخصات هندسی مندرل طراحی شده برای قطعه، در شکل ۴ نشان داده شده است.

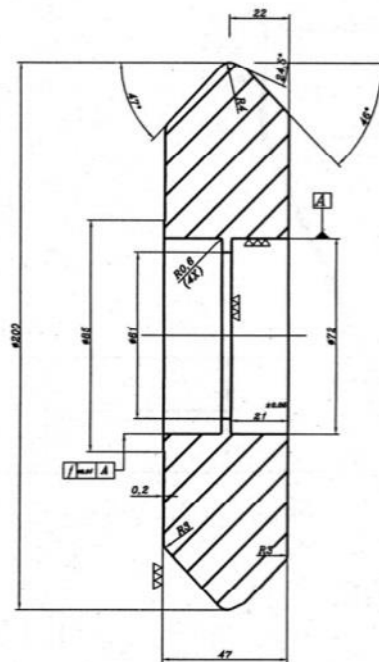
شابلون‌ها: مسیر حرکتی ابزار یا غلتک شکل‌دهی از طریق الگو گیری از یک شابلون دنبال می‌شود. غلتک‌ها از طریق یک مکانیزم مکانیکی، از دو عدد شابلون که در دو طرف دستگاه نصب شده‌اند برای شکل‌دهی هندسه استفاده می‌کنند. این شابلون‌ها، فاصله غلتک تا سنبه را که تعیین‌کننده ضخامت نهایی قطعه می‌باشد نیز تعیین می‌کنند.

مرغک: برای ثابت نگهداشتن ماده اولیه یا پیش فرم بر روی مندرل در مختصات مورد نظر برای شروع فرآیند، از ابزای بنام مرغک استفاده می‌گردد که باید فشاری یکنواخت و کافی را در طول کل فرآیند بر روی سنبه اعمال نماید تا قطعه‌کار در اثر نیروهای وارده به آن، از مختصات خود خارج نگردد. نیروی پشت مرغک که قطعه‌کار را بر روی سنبه نگه می‌دارد نیز در مشخصات و کیفیت قطعه تولیدی تأثیر بسزایی دارد. اگر نیروی مرغک زیاد لحاظ گردد موجب پارگی در نوک قطعه‌کار و همچنین عدم جریان یافتن فلز در قسمت ابتدایی قطعه‌کار می‌گردد. در صورتی که نیروی پشت مرغک نیز کم باشد، جابجا شدن قطعه‌کار از مرکز سنبه و خراب شدن قطعه‌کار یا تولید قطعه‌ای غیرمتقارن حاصل خواهد شد. فشار تنظیم شده برای مرغک در مورد قطعه‌کار به صورت تجربی تعیین می‌گردد.



شکل ۲: هندسه پیش فرم نهایی مورد استفاده

Fig. 2. The geometry of the used preform

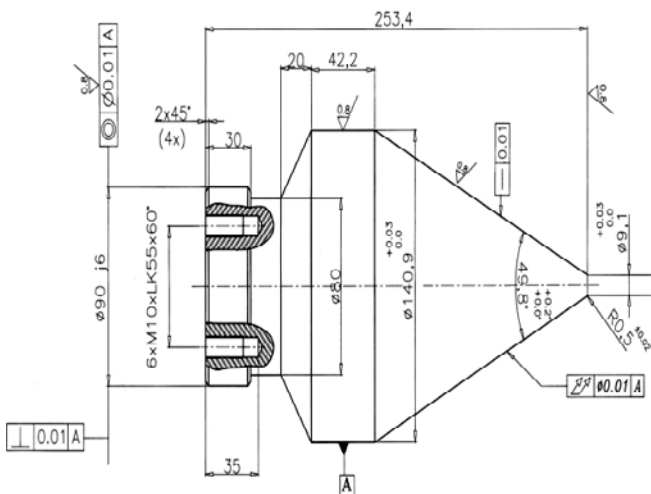


شکل ۳: مشخصات هندسی غلتک شکل‌دهی

Fig. 3. The geometry of Forming Rollers

فرآیند از اجزاء اصلی و تاثیرگذار بر مشخصات نهایی قطعه کار تولیدی می‌باشد. دو ابزار یا غلتک شکل‌دهی هرزگرد بطور همزمان برای شکل دادن ورق اولیه با قطعه کار درگیر می‌شوند. در ابزارهای شکل‌دهی دو زاویه حمله و پرداخت و شعاع نوک ابزار در مشخصات مکانیکی و کیفیت سطح قطعه تولیدی تأثیر به سزایی دارند. با توجه به تجربه قبلی و انجام آزمایش‌های گوناگون بر روی قطعات مختلف و با جنس‌های متفاوت، هندسه نهایی غلتک‌ها طبق زوایا و ابعاد ارائه شده در شکل‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

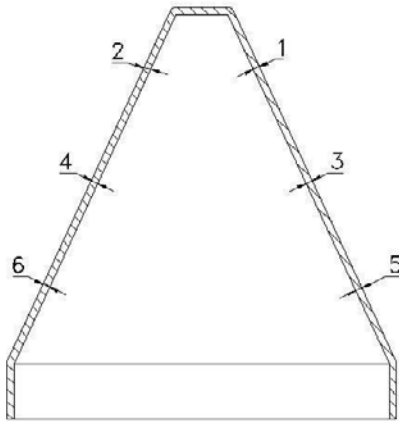
مندرل یا سنبه: بخشی است که فرم قطعه روی آن خوابانده می‌شود و عملاً شکل نهایی قطعه است. با توجه به تolerانس‌های بسیار



شکل ۴: مشخصات سنبه یا مندرل مورد استفاده در ساخت نمونه

Fig. 4. The specifications of used Mandrel

۳-۳- تولید نمونه



شکل ۵: مکان‌های اندازه‌گیری ضخامت دیواره قطعات در نمونه تولیدی
 Fig. 5. Measuring points of the wall thickness in produced samples

۴-۳- بررسی تجربی پارامترها

برای هر کدام از سرعت‌های پیشروی انتخاب شده، سه حالت پیشروی غلتک در نظر گرفته و نتایج بدست آمده در قالب نمودار مقایسه‌ای شکل‌های ۶ تا ۸ تهیه گردیده است. پیکان‌های نشان داده شده در شکل‌ها نشان دهنده محدوده پذیرش است.

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پراکندگی در ضخامت‌های بدست آمده در میزان پیشروی (۰-۱۰۰) از محدوده مورد پذیرش بسیار پایین‌تر است و غیر قابل قبول است. همچنین پراکندگی ضخامت‌های بدست آمده از میزان پیشروی (۰-۲۲۰) نیز در نزدیکی مرز پایین محدوده پذیرش و در دو نقطه در داخل محدوده می‌باشد. اما ضخامت‌های قطعه تولید شده با میزان پیشروی (۰-۱۵۰) میلی‌متر بر دقیقه کاملاً در داخل محدوده پذیرش واقع است و پراکندگی قابل قبولی را دارد.

در شکل ۷ پراکندگی در ضخامت‌های بدست آمده در میزان پیشروی (۰-۱۰۰) از محدوده مورد پذیرش بسیار پایین‌تر است و مورد قبول نیست. همچنین پراکندگی ضخامت‌های بدست آمده از میزان پیشروی (۰-۲۲۰) نیز پایین‌تر از پایین محدوده پذیرش می‌باشد. اما ضخامت‌های قطعه تولید شده با میزان پیشروی (۰-۱۵۰) میلی‌متر بر دقیقه در داخل محدوده پذیرش واقع است ولی پراکندگی آن در کل بازه مورد پذیرش است. اعداد هم روی مرز پایینی و هم روی مرز بالایی مشاهده می‌شوند.

با بررسی نتایج در سه نمودار شکل ۸ در سه سرعت چرخشی متفاوت، نتیجه می‌شود که میزان پیشروی (۰-۱۵۰) میلی‌متر بر

پس از طراحی و ساخت اجزا و قطعات مورد نیاز نظیر پیش‌فرم، سنبه یا مندرل، غلتک‌های شکل‌دهی، شابلون‌ها و مرغک، باید پارامترهای دستگاه شکل‌دهی برای ایجاد نمونه مطلوب تنظیم گردد. مهمترین پارامترهای مورد بررسی در این قسمت سرعت چرخشی سنبه یا مندرل و میزان پیشروی غلتک‌ها می‌باشد.

با توجه به نتایج آزمایش‌های اولیه در تولید قطعات مشابه، سرعت چرخشی سنبه در سه محدوده ۱۹۵، ۳۴۰ و ۴۲۰ دور بر دقیقه و میزان پیشروی در سه محدوده (۰-۱۰۰)، (۰-۱۵۰) و (۰-۲۲۰) مورد آزمون قرار می‌گیرند.

مهمترین مشخصات ابعادی و هندسی که در عملکرد قطعه مخروطی شکل مهم و تعیین‌کننده است عبارتند از راست بودن یال داخلی و خارجی مخروط، گردی در هر مقطع از مخروط، زاویه داخلی مخروط، اختلاف زاویه سنبه با زاویه داخلی، صافی سطح داخلی و خارجی و ضخامت دیواره مخروط در مناطق مختلف آن.

با توجه به اینکه باید صحت نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شود، بنابراین پارامتری را باید جهت اندازه‌گیری در نظر گرفت که در نرم‌افزار شبیه‌سازی قابل اندازه‌گیری باشد. از آنجا که امکان اندازه‌گیری دقیق پارامترهای اشاره شده در بالا نظیر راست بودن و صافی سطح در نرم‌افزار شبیه‌سازی وجود ندارد، ضخامت دیواره مخروط در مقاطع مختلف، از روی نمونه‌های تولید شده استخراج گردیده و با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده است. اندازه‌گیری در شش نقطه از یال مخروط مطابق شکل ۵ انجام شد و نتایج بدست آمده در قالب نمودارها با یکدیگر مقایسه شد.

با توجه به شکل هندسی قطعه‌کار و حساسیت بالای آن و همچنین تلرانس‌های بسته قطعه نهایی، از ابزار اندازه‌گیری غیرمخرب فراصوتی برای تعیین ضخامت پوسته در نواحی مختلف استفاده شده است. بدین ترتیب که با بستن قطعه‌کار بر روی قیدوبند کنترلی طراحی شده و نصب فیکسچر، پراب^۱ فراصوت در محل‌های مورد نظر قرار گرفته و پس از اندازه‌گیری ضخامت نقطه مورد نظر، با چرخاندن فیکسچر کنترلی به میزان ۱۸۰ درجه ضخامت نقطه مقابل مکان اندازه‌گیری شده نیز مورد سنجش قرار گرفت.

1 Probe

همانطوری که در نمودار نیز به وضوح قابل مشاهده است، در بازه قابل پذیرش که با دو پیکان مشخص شده‌اند، سرعت چرخشی ۳۴۰ دور بر دقیقه، از میانگین پراکندگی کمتری برخوردار است. برای آزمایش تکرارپذیری نتایج بدست آمده از شکل‌دهی چرخشی برشی پیش فرم، چهار نمونه با تنظیمات بدست آمده ساخته شده است که نتایج اندازه‌گیری ضخامت دیواره نشانگر پراکندگی قابل قبولی می‌باشند.

با بررسی دقیق نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط حسگر ضخامت‌سنج، و با توجه به نتایج حاصل از تجارب تولید نمونه‌های اولیه، پارامترهای نهایی برای شکل‌دهی چرخشی برشی قطعه مخروطی با ضخامت ثابت بصورت زیر تعیین می‌گردد:

سرعت چرخشی بهینه سنبه یا مندرل : ۳۴۰ rev/min

سرعت پیشروی بهینه غلتک ها : ۱۵۰ mm/min

نوع روانکار مصرفی برای این فرآیند (برای جنس مس) ترکیب ۳۰ درصد روغن ۶۸ و ۷۰ درصد گازوئیل می‌باشد.

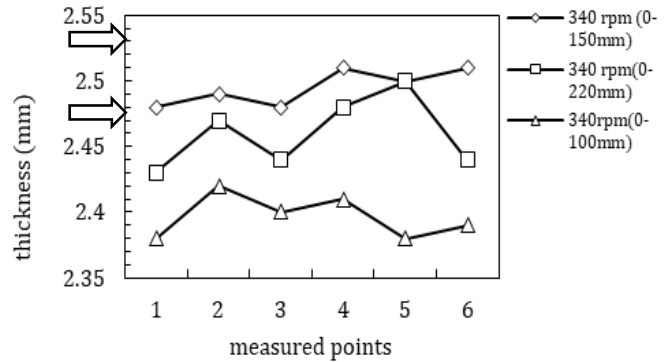
در شکل ۱۱ نمونه نهایی تولید شده با روش و پارامترهای مذکور نشان داده شده است.

با مشاهده نمونه‌های تولیدی از ورق صاف و پیش فرم، مشاهده می‌گردد که به علت انجام یک فرآیند تکمیلی بر روی ورق صاف (پرسکاری) و تبدیل آن به یک پیش فرم، به دلیل اصلاح دانه‌بندی در قسمت دو طرف سوراخ پیش فرم (محلی که به یال مخروط تغییر شکل داده می‌شود) و یکنواخت‌تر شدن و تختی بالای آن منطقه، رفتار تغییر شکل پلاستیک قطعه در حین فرآیند شکل‌دهی یکسان‌تر می‌گردد و این مطلب با کاهش درصد تغییرات در ضخامت قطعه کاملاً مشهود است.

۴- شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی

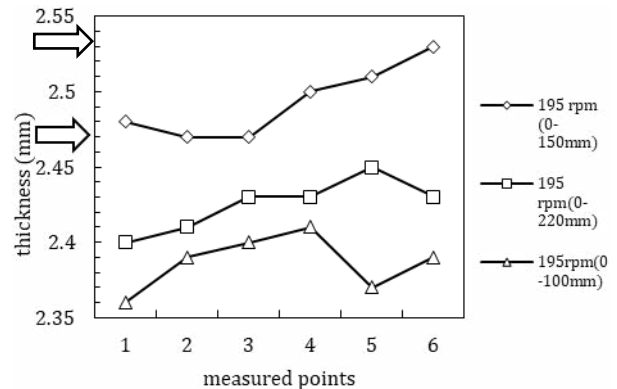
به منظور شبیه‌سازی نرم‌افزاری فرآیند با هندسه‌ای منطبق با نمونه واقعی و با مطالعات انجام گرفته در مورد فعالیت‌های مشابه قبلی در مقالات مشابه، پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها به شکل زیر تعیین گردید [۱ و ۳]:

- تحلیل سه بعدی المان محدود بر پایه تغییرشکل صلب-پلاستیک با استفاده از حالت تقارن محوری
- غلتک شکل‌دهی: 3D Shell discrete rigid



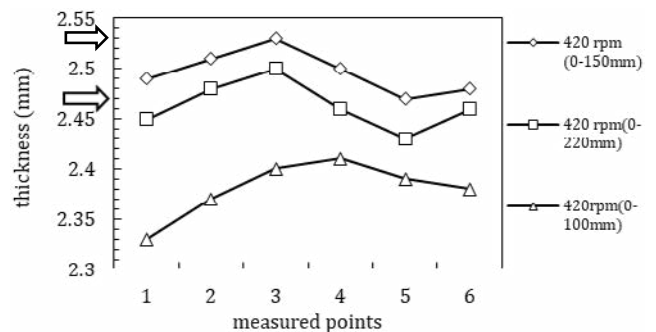
شکل ۶: نمودار مقایسه ضخامت‌ها در سرعت چرخشی ۳۴۰ دور بر دقیقه

Fig. 6. The chart of wall thickness comparison in 340 rpm rotational speed



شکل ۷: نمودار مقایسه ضخامت‌ها در سرعت چرخشی ۱۹۵ دور بر دقیقه

Fig. 7. The chart of wall thickness comparison in 195 rpm rotational speed



شکل ۸: نمودار مقایسه ضخامت‌ها در سرعت چرخشی ۴۲۰ دور بر دقیقه

Fig. 8. The chart of wall thickness comparison in 420 rpm rotational speed

دقیقه قابل‌قبول‌ترین نتایج را بدست می‌دهد. با نهایی شدن این موضوع، نحوه توزیع پراکندگی ضخامت مقایسه گردیده و نتایج آن در قالب نمودار شکل ۹ نشان داده شده است.

- مرغک: 3D Shell discrete rigid
- مندرل یا سنبه: 3D Shell discrete rigid
- ورق قطعه کار: 3D deformable
- ضریب اصطکاک: 0.3
- نرم افزار شبیه سازی: ABAQUS 3-6.14

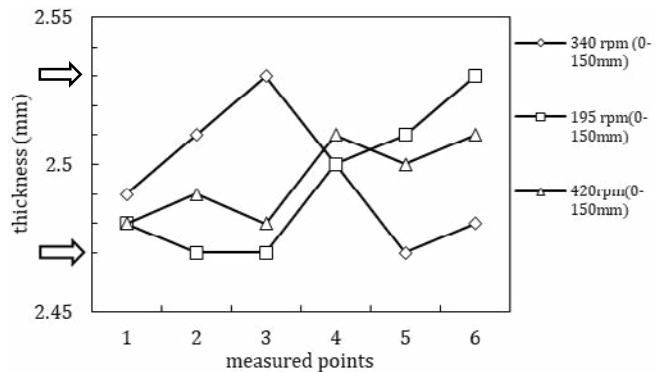
۲-۴- تعریف هندسه مدل

برای انجام شبیه سازی فرآیند شکل دهی برشی چرخشی قطعه مخروطی، در ابتدا نیاز است که مدل هندسی نمونه به همراه کلیه اجزای فرآیند در نرم افزار مدل گردند. با توجه به ابعاد نهایی اجزای طراحی شده نظیر پیش فرم، بلنک ساده، مندرل یا سنبه، غلتک های شکل دهی و مرغک، مدل سازی آن ها در نرم افزار صورت گرفت. همچنین با توجه به آزمایش های صورت گرفته بر روی نمونه ورق های مورد استفاده برای ساخت قطعه مخروطی مسی، از خواص الاستیک-پلاستیک بدست آمده برای تعریف ماده در نرم افزار شبیه سازی استفاده شده است. مدل هندسی اجزا و قطعات شبیه سازی شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

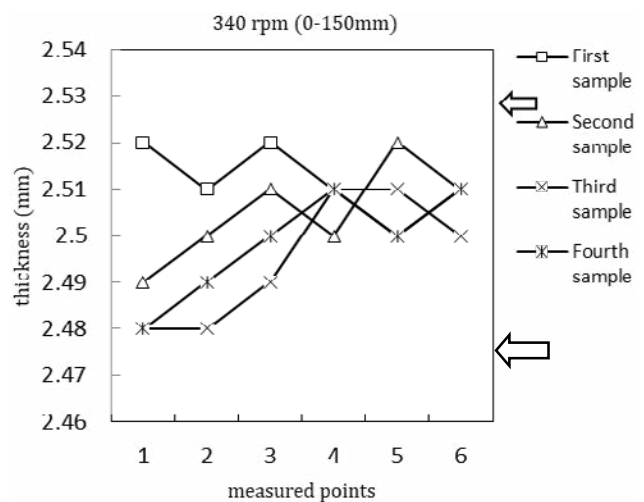
۳-۴- شرایط مرزی و بارگذاری

نیروی پشت مرغک که نگهدارنده پلیت یا پیش فرم در زمان کل فرآیند می باشد، به عنوان یکی از شرایط مرزی تعریف شده است. مقدار این نیرو با استفاده از مقادیر تقریبی موجود در مستندات دستگاه و داده های تجربی قبلی تعیین شده است. سرعت دورانی مندرل یا سنبه با اندازه 40 rad/s و حول محور اصلی سنبه اعمال می گردد. سرعت دورانی مرغک نیز برابر با سرعت سنبه می باشد.

همانطور که پیش تر در بخش های ابتدایی این بخش به آن اشاره شد، برای امان هایی که به صورت صلب^۱ تعریف شده اند نظیر غلتک ها، در زمان طراحی اولیه مدل آنها در نرم افزار، یک نقطه مرجع^۲ در نظر گرفته می شود که در این مرحله از آن ها استفاده می گردد. غلتک ها هرزگرد می باشند، لذا با تعریف کردن یک سیستم مختصات محلی^۳ برای آنها و استفاده از نقطه مرجع، محور غلتک ها که نسبت به محور ابزار در زاویه 45° قرار دارند، تعریف می شود. با توجه به



شکل ۹: مقایسه نتایج سرعت های چرخشی متفاوت سنبه با هم
Fig. 9. The chart of wall thickness comparison in tested rotational speeds

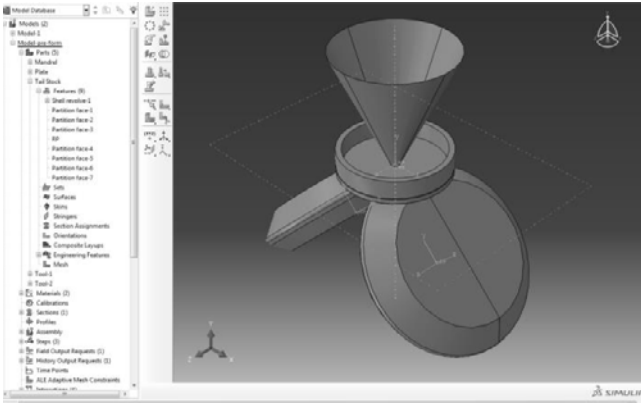


شکل ۱۰: نمودار نتایج پنج قطعه مخروطی شکل تولید شده از پیش فرم
Fig. 10. The chart of wall thickness comparison of 5 produced samples from preform



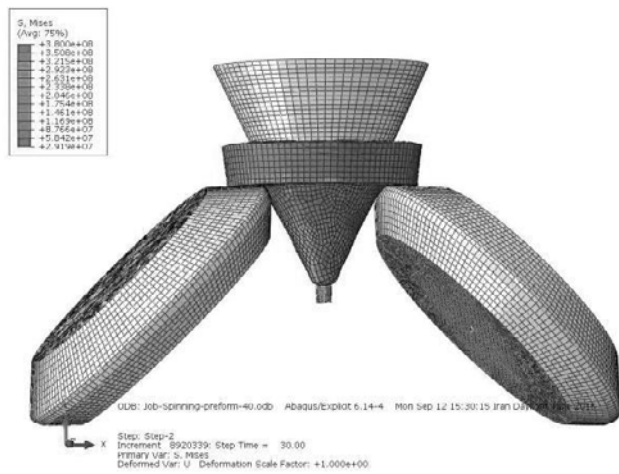
شکل ۱۱: نمونه تولید شده نهایی قطعه مخروطی مسی
Fig. 11. The final produced copper conic sample

- 1 Rigid
- 2 Reference Point
- 3 Local coordinate system



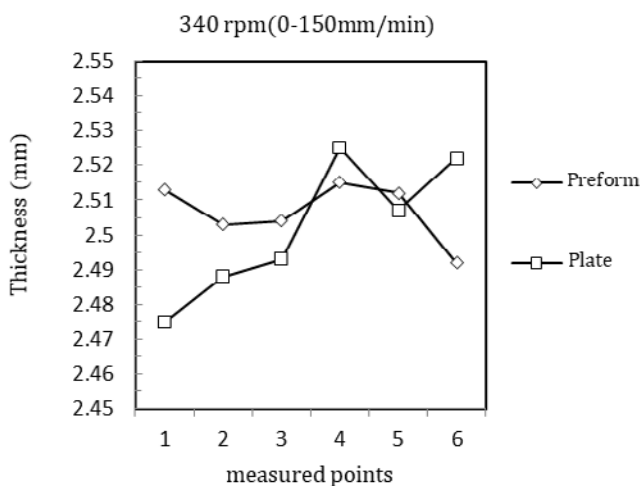
شکل ۱۲: مدل سازی و مونتاژ اجزا در محیط نرم افزار شبیه سازی

Fig. 12. Modeling and simulating the process



شکل ۱۳: مدل اجزای محدود فرآیند در حین تحلی بر روی پیش فرم

Fig. 13. The finite element simulation of the preform forming



شکل ۱۴: مقایسه نتایج حاصل از اندازه گیری ضخامت در دو مدل ورق صاف و پیش فرم حاصل از شبیه سازی

Fig. 14. The chart of wall thickness comparison between preform and blank in result of simulation

اینکه در زمان شکل دهی، حرکت آنها در یک صفحه می باشد سرعت غلتکها در راستای هریک از محورها با توجه به هندسه فرآیند استخراج و در نرم افزار وارد می گردد.

با توجه به در دسترس بودن نتایج تجربی در بخش شکل دهی چرخشی برشی و همچنین تست های جدیدی که بر روی پیش فرم طراحی شده انجام گرفته است، میزان سرعت چرخشی مطلوب ۳۴۰ دور بر دقیقه و میزان پیشروی (۱۵۰ میلی متر بر دقیقه) لحاظ می گردد. هر دو نمونه ورق صاف و پیش فرم ساخته شده مدل سازی شده و نتایج آنها مقایسه می شوند. در شکل ۱۳ مدل اجزای محدود فرآیند در حین تحلیل نشان داده شده است.

۴-۴- مشاهده و مقایسه نتایج شبیه سازی

شبیه سازی های ابتدایی بر روی ورق صاف و پیش فرم برای به دست آوردن میزان نیروی لازم در پشت مرغک صورت پذیرفته است. همانگونه که قبلاً عنوان شد، نیروی کم باعث خارج شدن ورق یا پیش فرم از روی مندرل و یا از محور آن می شود و نیروی زیاد باعث ایجاد اعوجاج در المانها و تغییر شکل بیش از حد المانها در قسمت نوک مخروط می گردد. نتایج نهایی تقریباً یکسان و مقداری معادل تنش اعمالی ۶۰ MPa را نشان می دهد.

شبیه سازی های بعدی برای به دست آوردن نیروی اصطکاک بهینه برای هر دو مدل ورق می باشد. اصطکاک زیاد باعث خرابی، تغییر شکل بیش از حد المانها یا ایجاد چروکیدگی بر روی ورق اولیه می شود و اصطکاک کم باعث عدم انجام شکل دهی ورق می شود. با انجام شبیه سازی ها و برآورد نتایج، مقدار بهینه این پارامتر بین ۰/۲-۰/۳ می باشد.

پس از انجام شبیه سازی ها و با توجه به اندازه گیری های انجام شده بر روی ضخامت دیواره پال مخروطی قطعه شبیه سازی شده، در هر دو حالت صفحه تخت و به کارگیری پیش فرم، ضخامتها در ناحیه قابل پذیرش قرار دارند اما ضخامت دیواره در مدل پیش فرم به نسبت ورق صاف دارای پراکندگی کمتری می باشد. مقایسه اندازه ضخامت در این دو حالت در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می گردد، در نقاط مختلف بجز نقاط ۴ و ۶، ضخامت نمونه ورق کمتر از نمونه پیش فرم پیش بینی شده است. دلیل این امر یکنواخت تر شدن تغییرات جریان پلاستیک مواد در

۵- تشریح نتایج و تأثیر پارامترها

همانطور که در نتایج و شکل‌های مربوطه آورده شده است، برای انجام ضخامت‌سنجی از قطعات تولید شده، شش نقطه اندازه‌گیری می‌شود که این نقاط دو به دو در یک صفحه واقع شده‌اند. با این فرض، هرچه نقاط بدست آمده در یک صفحه به هم نزدیکتر باشند و پراکندگی نقاط کمتر باشد، یکنواختی بیشتری در یال قطعه مشاهده می‌گردد. با مطالعه دقیق‌تر نمودارهای بدست آمده از مقایسه نتایج ضخامت‌های قطعه کار در سرعت‌ها و پیشروی‌های مختلف، مشاهده می‌گردد که در سه سرعت مورد بررسی با میزان پیشروی ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تقریباً نتایج بدست آمده برای قطعات تولیدی در محدوده پذیرش می‌باشند. با این حال پراکندگی نقاط در سرعت چرخش ۳۴۰ rpm کمتر می‌باشد. این نتایج فقط در حوزه ضخامت قطعه می‌باشد در صورتی که موارد پایش شده دیگر نظیر راستی بیرونی و داخلی یال‌های مخروط، کیفیت سطح و غیره نیز در نظر گرفته شوند، سرعت‌های چرخشی دیگر نتایج ضعیف‌تری دارند.

با بررسی پارامترها، تأثیر تغییر پارامترها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

(۱) با افزایش سرعت پیشروی غلتک‌ها از ۱۰۰ mm/min به ۱۵۰ mm/min در یک سرعت چرخشی ثابت، مقادیر راست بودن داخلی از ۰/۰۸۷ به ۰/۰۱۷ و راست بودن خارجی از ۰/۱۱۸ به ۰/۰۳ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی مقادیر برگشت فنری زاویه داخلی از ۷- به صفر تا حداکثر ۱+ کاهش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده این واقعیت است که با افزایش پارامتر مذکور، ماده تقریباً روی سنبه بیشتر سیلان نموده و راستی بهبود یافته است.

(۲) با افزایش سرعت پیشروی غلتک از ۱۵۰ mm/min به ۲۲۰ mm/min تغییر چندانی در مقادیر راست بودن ایجاد نمی‌شود. اما مقادیر زیری سطح از حداقل ۵/۰ در سرعت پیشروی ۱۵۰ mm/min به حداقل ۸/۰ در سرعت پیشروی ۲۲۰ mm/min می‌رسد.

(۳) در سرعت پیشروی غلتک ۱۵۰ mm/min، با افزایش سرعت چرخشی سنبه از ۱۹۵ rev/min به ۳۴۰ rev/min و حداقل زبری از ۰/۶ به ۵/۰ و حداکثر از ۱/۸ به ۱/۶ کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت چرخشی سنبه به ۴۲۰ rev/min حداقل زبری به ۱ می‌رسد.

(۴) مقایسه داده‌های حاصل از نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد

حالت پیش‌فرم‌دار است که باعث تغییرات برش در مقاطع مختلف و در نتیجه یکنواختی تغییر ضخامت می‌گردد. برای مقایسه دقیق‌تر دو حالت شبیه‌سازی شده، باید درصد تغییرات ضخامت در نقاط مختلف محاسبه و مقایسه گردد. در جدول ۱ نتایج کمی بدست آمده از اندازه‌گیری ضخامت قطعه نهایی حاصل از شبیه‌سازی در ۶ نقطه بر روی ورق و پیش‌فرم، آورده شده است.

درصد تغییر ضخامت بین نقاط متوالی در نمونه صاف و پیش‌فرم در جدول ۲ مقایسه شده است.

مشاهده می‌گردد که تغییرات ضخامت بین نقاط ۳ و ۴ در نمونه ورق بزرگتر از سایر موارد است که نشانگر تغییرات شدید جریان برشی مواد در این محدوده می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پیش‌فرم معرفی شده، باعث یکنواخت‌تر شدن تغییرات ضخامت مخروط می‌گردد.

جدول ۱: مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده از روی پیش‌فرم و ورق صاف

Table 1. The table of samples wall thickness measured points in comparison between preform and blank

ضخامت، mm	ضخامت، mm	شماره مختصات اندازه‌گیری شده
پیش فرم	ورق صاف	
۲/۴۷۶	۲/۵۱۳	مختصات اول
۲/۴۸۷	۲/۵۰۳	مختصات دوم
۲/۴۹۳	۲/۵۰۴	مختصات سوم
۲/۵۲۶	۲/۵۱۵	مختصات چهارم
۲/۵۰۸	۲/۵۱۱	مختصات پنجم
۲/۵۲۱	۲/۴۹۲	مختصات ششم

جدول ۲: درصد تغییرات ضخامت بین نقاط متوالی اندازه‌گیری شده

Table 2. The wall thickness percent change of the measured points

ضخامت، mm	ضخامت، mm	شماره مختصات اندازه‌گیری شده
پیش فرم	ورق صاف	
-۰/۰۴۰	۰/۴۴	نقاط ۲ و ۱
۰/۴۴	۱/۳۲	نقاط ۳ و ۴
-۰/۷۶	۰/۵۲	نقاط ۵ و ۶

مراجع

- [1] D. Marini, D. Cunningham, J. Corney, A Review of Flow Forming Processes and Mechanisms, *Key Engineering Materials*, 651 (2015) 750-758.
- [2] H. Razavi, F. Biglari, A. Torabkhani, Study of strains distribution in spinning process using FE simulation and experimental work, in: *Proceedings of the Tehran International Congress on Manufacturing engineering*, Tehran, Iran, 2005
- [3] T. McCormack, M. Tuffs, A. Rosochowski, S. Halliday, P. Blackwell, Shear forming of 304L stainless steel – microstructural aspects, *Procedia Engineering*, 207 (2017) 1719-1724.
- [4] M. Zhan, H. Yang, J. Zhang, Y. Xu, F. Ma, 3D FEM analysis of influence of roller feed rate on forming force and quality of cone spinning, *Journal of Materials Processing Technology*, 187 (2007) 486-491.
- [5] M. Moradi, M. Ghoreishi, A. Rahmani, Numerical and Experimental Study of Geometrical Dimensions on Laser-TIG Hybrid Welding of Stainless Steel 1.4418, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, 5, (2016), 23-32.
- [6] B. Qian, Y. He, Z. Mei, Finite element modeling of power spinning of thin-walled shell with hoop inner rib, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(1) (2008) 6-13.
- [7] L.-l. SUN, A.-q. NIE, X.-j. HU, K.-m. XUE, FE numerical simulation of automobile hub spinning forming process [J], *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 4 (2008) 014.
- [8] L. Wang, H. Long, A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness variation in conventional metal spinning, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12) (2011) 2140-2151.
- [9] J.A. Polyblank, J.M. Allwood, Parametric toolpath design in metal spinning, *CIRP Annals*, 64(1) (2015) 301-304.
- [10] D. Han, M. Zhan, H. Yang, Deformation mechanism of TA15 shells in hot shear spinning under various load

که حداقل گردی در هر مقطع در نمونه‌هایی که در سرعت پیشروی غلتک ۱۵۰ mm/min و سرعت چرخشی سنبه ۳۴۰ rev/min تولید شده اند، بدست آمده است.

با مشاهده نمونه‌های تولیدی از ورق صاف و پیش‌فرم به نظر می‌رسد که بدلیل انجام یک فرآیند تکمیلی بر روی ورق صاف (پرسکاری) و تبدیل آن به یک پیش‌فرم، اصلاح دانه‌بندی در قسمت دو طرف سوراخ پیش‌فرم (محلی که به یال مخروط تغییر شکل داده می‌شود) و یکنواخت‌تر شدن و تختی بالای آن منطقه، رفتار تغییر شکل پلاستیک قطعه در حین فرآیند شکل‌دهی یکسان‌تر می‌گردد و با کاهش درصد تغییرات در ضخامت قطعه این مطلب کاملاً مشهود است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی ورق صاف و پیش‌فرم، ضخامت‌های دیواره قطعه مخروطی نظیر کار تجربی اندازه‌گیری شده است و نتایج نیز این مطلب را نشان می‌دهد که نتایج پیش‌فرم نسبت به ورق صاف از پراکندگی کمتری برخوردار است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله تولید نمونه مخروطی شکل با روش فرم‌دهی چرخشی برشی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بررسی‌های عملی و تحلیل اجزای محدود صورت گرفته در این مقاله، نتایج زیر حاصل شده است:

- تولید تجربی قطعه نشان می‌دهد استفاده از پیش‌فرم در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی نمونه، باعث تولید قطعه با کیفیت بهتر می‌گردد.

- سرعت چرخشی بهینه مندرل یا سنبه برای ساخت قطعه مخروطی مسی با مشخصات و ابعاد آورده شده در این تحقیق ۳۴۰ rev/min می‌باشد.

- سرعت پیشروی بهینه غلتک‌های شکل‌دهی برای ساخت قطعه مخروطی مسی با مشخصات و ابعاد مورد نظر در تحقیق حاضر ۱۵۰ mm/min می‌باشد.

- شعاع بهینه نوک غلتک با توجه ۴ میلی‌متر و بهترین زاویه حمله برای غلتک شکل‌دهی ۴۷° و بهترین زاویه فرار غلتک شکل‌دهی ۲۴/۵° می‌باشد.

- نوع روانکار مصرفی برای این فرآیند (برای جنس مس) ترکیب ۳۰ درصد روغن ۶۸ و ۷۰ درصد گازوئیل می‌باشد

- finite element simulation of shear spinning process based on axisymmetric modeling, *Journal of manufacturing processes*, 7(1) (2005) 51-56.
- [14] N. Alberti, L. Fratini, Innovative sheet metal forming processes: numerical simulations and experimental tests, *Journal of Materials Processing Technology*, 150(1-2) (2004) 2-9.
- [15] C. Wong, T. Dean, J. LinN, A review of spinning, shear forming and flow forming processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(14), (2003), 1419-1435.
- conditions, *Rare Metal Materials and Engineering*, 42(2) (2013) 243-248.
- [11] M. Kleiner, R. Göbel, H. Kantz, C. Klimmek, W. Homberg, Combined methods for the prediction of dynamic instabilities in sheet metal spinning, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(1) (2002) 209-214.
- [12] Q. Sheng-xue, C. Bao-cheng, L. Jie, C. Chao, Elastic-plastic Finite Element Simulation of Shear Spinning of Cone Part, (2013).
- [13] K.-i. Mori, T. Nonaka, Simplified three-dimensional