

تحلیل عددی نورد دندانه بر روی دیواره جانبی ظروف جدار نازک به روش شکل دهی چرخشی

رسول مهشید^۱، حسن مسلمی نایینی^۲، مهران مرادی^۳

استفاده از ورق فلزی در ساخت قطعات بدلیل کم کردن وزن و ذخیره سازی فضا رو به گسترش است. از جمله این قطعات پوسته کلاچ در اتومبیل های دنده اتوماتیک را می توان نام برد. فرآیند شکل دهی چرخشی به عنوان یک روش جدید برای تولید این قطعه استفاده می گردد. این روش از الگوی دو قالب فرو رونده تبعیت می کند. در این مقاله، بر اساس یک شبیه سازی هندسی قالب های مورد استفاده در روش شکل دهی چرخشی طراحی می شوند. بعد از آن وضعیت تغییر شکل قطعه با یک مدل ساده سازی شده در نرم افزار تجاری اجزای محدود ANSYS شبیه سازی شده و تحلیل می گردد. در پایان با استفاده از این مدل، یک قالب بهینه پیشنهاد می شود.

واژه های راهنما: پوسته کلاچ، شکل دهی چرخشی، اجزای محدود، پروفیل بهینه

۱- مقدمه

هم اکنون تغییر شکل ورق فلزی توسط فرآیندهای شکل دهی در حال توسعه است. در این روشها ورق فلزی تحت فرآیندهای مختلف به قطعات با شکل های پیچیده و دقت بالا تبدیل می شوند. یکی از موارد مهم استفاده ورق در تولید پوسته کلاچ^۴ است. روش های مختلفی جهت ایجاد پروفیل اسپیلاین بر روی دیواره ظروف جدار نازک وجود دارد که در مرجع [۱] آمده است.

در این مقاله روش شکل دهی چرخشی^۵ مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد. این روش از الگوی تغذیه شعاعی دو قالب فرورونده (two dies-plunge-feed) به مانند آنچه در نورد دنده با استفاده از حرکت چرخشی قالبها انجام می شود، تبعیت می کند (شکل ۱). ولی اصل تغییر شکل با نورد دنده متفاوت است. در

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲ دانشیار بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، moslemi@modares.ac.ir (نویسنده مخاطب)
۳ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

⁴ Clutch hub

⁵ Rotary forming

این روش ماده خام با چرخیدن دو قالب بیرونی در مقابل هم بصورت خمشی، کششی در جهت شعاعی به داخل شیارهای یک قالب داخلی فرو می‌رود و بطور عملی ثابت شده که ایجاد پروفیل اسپیلاین بر روی دیواره ظروف کشش عمیق شده، به این روش کاملاً عملی و موفقیت‌آمیز است [۲]. این روش نسبت به روشهای قبلی ساده‌تر و انعطاف پذیر است و علاوه بر این برای ساخت مجموعه این نوع قطعه‌ها مناسب بوده و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. در سال ۱۹۹۳ ماتسونوگا و همکاران با تغییر دستگاه نورد دنده، روش شکل‌دهی چرخشی را برای تولید پوسته کلاچ بکار بردند [۳]، [۵]. با توجه به اینکه دستگاه قبلی اشکالاتی داشت، در سال ۱۹۹۴ توسط گروه فوق تغییراتی در دستگاه آزمایش صورت گرفت. صلبیت دستگاه جدید افزایش داده شد و ارتعاشات آن کاهش یافت. نحوه جریان ماده در فضای بین دو قالب، اختلاف ضخامت در دیواره‌های راست و چپ قطعه، دقت گامی و دقت در جهت محوری در این مرحله حل نشده باقی ماندند [۴]، [۵]. در سال ۱۹۹۵ بمنظور مشاهده جزئیات بیشتر از وضعیت تغییر شکل قطعه و ارایه یک طرح مناسب برای قالبها، شبیه‌سازی عددی فرآیند توسط این گروه با استفاده از نرم‌افزار تجاری ABAQUS انجام گردید. با استفاده از نتایج این تحلیل و انجام آزمایش، دقت گامی قطعه در حد مورد نظر حاصل شد ولی در جهت محوری با وجود بهبود، دقت لازم بدست نیامد. همچنین وضعیت اختلاف ضخامت دیواره‌ها در کناره‌های راست و چپ قطعه نیز بدتر شد [۶]، [۷]. در سال ۱۹۹۷ مدل چرخشی قالبها تحلیل عددی شد و با استفاده از این مدل که به واقعیت نزدیکتر بود، یک طرح جدید برای قالبها ارائه گردید. بعد از انجام آزمایش توسط قالبهای بدست آمده در این قسمت دقت گامی و اختلاف ضخامت دیواره در کناره‌های راست و چپ به مقدار مورد نظر رسید ولی همچنان مشکل عدم دقت در جهت محوری قطعه وجود داشت [۸]. بر این اساس در سال ۲۰۰۰ میلادی شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند توسط ازاکا و همکاران انجام شد و با ایجاد یک تغییر در قالبها مشکل برگشت فنری (دقت در جهت محوری) حل گردید. تصحیح قالبها به این صورت بود که عمق دندان قالب داخلی افزایش پیدا کرد که مقدار عددی آن بر اساس یک بهینه‌سازی بدست آمده بود [۹]، [۱۰]، [۱۱].

در این مقاله بر اساس یک شبیه سازی هندسی قالبهای مورد نیاز در روش شکل‌دهی چرخشی طراحی می‌شوند. در این فرآیند قالبها تحت یک حرکت پیچیده با هم درگیر می‌شوند. شبیه‌سازی چنین فرآیندی بسیار مشکل و زمان‌گیر است. از این رو یک مدل ساده پیشنهاد می‌گردد. پروفیل دندان قالب تحت یک سیستم ترکیبی تغییر می‌کند. وضعیت تغییر شکل قطعه با یک مدل ساده‌سازی شده در نرم افزار تجاری اجزای محدود ANSYS شبیه‌سازی شده و تحلیل می‌گردد. در پایان با استفاده از این مدل، یک قالب بهینه پیشنهاد می‌شود.

۲- دستگاه و شرایط آزمایش

دستگاه مورد نظر بطور شماتیک در شکل ۲ نشان داده می‌شود. در فرآیند شکل‌دهی چرخشی از سه قالب استفاده می‌شود. ظرف جدار نازک بر روی قالب وسطی قرار می‌گیرد. دو قالب بیرونی از دو طرف در جهت

شعاعی به قالب داخلی نزدیک می‌شوند و قطعه خام را در حالی که می‌چرخند، به داخل فضای بین دندانهای قالب داخلی هل می‌دهند. چرخش قالب بیرونی و قالب داخلی با نسبت سرعت ثابت ضروری است. شرایط انجام آزمایش به شرح زیر است [۵]:

- (۱) در هنگام نصب قطعه خام، پهلوی قالب داخلی و قالب بیرونی در هر دو طرف تنظیم می‌شود.
 - (۲) قطعه خام بر روی قالب نصب می‌شود و قالب بیرونی همزمان با قالب داخلی در فاصله کمی از قطعه می‌چرخد. در نتیجه حرکت جک، قالب بیرونی جلو می‌رود، قطعه را نورد کرده و آن را بداخل هل می‌دهد.
 - (۳) تغذیه شعاعی وقتی که به مقدار مشخصی رسید، متوقف می‌شود.
 - (۴) قالب بیرونی از قطعه جدا می‌شود و چرخش متوقف می‌گردد.
- بدلیل اینکه سرعت چرخش قطعه ۱۸/۴ r.p.m. است، سرعت چرخش قالب بیرونی ۸/۸۳ r.p.m. می‌شود. همچنین تغذیه شعاعی قالب بیرونی در هر یک دور چرخش قطعه ۰/۲۶ mm است. روغن SAE20 برای روغنکاری بکار برده می‌شود.

۳- شبیه‌سازی قالبها

۳-۱- شبیه‌سازی هندسی

قطعه اولیه در شکل ۳ نشان داده شده است. این قطعه از ورق SPCD و طی دو بار کشش بدست می‌آید. ارتفاع تقریبی آن ۲۷ میلیمتر و ضخامت آن ۲/۳ میلیمتر می‌باشد. ضخامت دیواره جانبی از ته به طرف لبه ضخیم می‌شود و لبه در مقایسه با ته تقریباً ۱۰٪ ضخیم شده است. سوراخهای محیطی در ته ظرف برای سبک کردن قطعه می‌باشد. شکل ۴ پروفیل دندانۀ قطعه هدف را نشان می‌دهد. پروفیل دندانۀ بیرونی به شکل دوزنقه است و تعداد آنها ۲۴ دندانۀ اسپیلاین می‌باشد.

همانگونه که در شکل ۴ نشان داده می‌شود، پروفیل قالب داخلی با پروفیل داخلی دندانهای قطعه یکسان است. تغییر در فاصله پهلویی کناره قالبها بدلیل اختلاف سرعتهای محیطی، همراه با پیشروی فرآیند اجتناب‌ناپذیر است. یکی از پارامترهای اساسی در طراحی قالبها این فرآیند برای به حداقل رساندن اثر معکوس اختلاف فاصله پهلویی، انتخاب قطر اصلی (F) در قالب بیرونی (شکل ۵) است. با استفاده از شکل ۵ برای بدست آوردن قطر اصلی قالب بیرونی فرض بر این است که سر قالب و ته دندانۀ قطعه در نقطه C در مرحله میانی تغییر شکل بازای تغذیه شعاعی ۲ میلیمتر (بدلیل محدودیتهای طراحی دستگاه) دارای سرعت محیطی یکسان هستند. شکل ۵ پروفیل دندانۀ قالب بیرونی را بطور دقیق نشان می‌دهد. تعداد دندانهای این قالب ۵۰ عدد است. در این شکل تعیین قطر (F) در طراحی قالب بیرونی بسیار مهم می‌باشد. تغییر شکل اصلی دندانۀ قطعه بوسیله سر قالب بیرونی در نقطه C انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی قالبها فرض می‌شود که در لحظه پایانی تغییر شکل فاصله دهانه قالب بیرونی و قالب داخلی ۱/۸ میلیمتر است. شکل ۶ فرم دهانه اتصال می‌باشد. کناره قسمت بیرونی قطعه در نقطه D باید مستقیم باشد در نتیجه کناره قالب بیرونی در این نقطه به صورت منحنی است، اما در اینجا بطور تقریبی با یک کمان دایره‌ای جایگزین می‌شود.

برای اینکه در هنگام تغییر شکل اتصال قالب بیرونی و قطعه (ورق) به آهستگی صورت پذیرد، در سر C و ته E از دندانۀ قالب بیرونی کمانهای دایره‌ای بکار می‌رود. پس از طراحی قالبها و انجام آزمایش مشخص شده است که این روش در ایجاد پروفیل اسپیلاین بر روی ظروف جدار نازک موفق بوده است [۲]. آزمایش های صورت گرفته نشان داد که اختلاف فاصله پهلویی ما بین قالبها در حین تغییر شکل تأثیر زیادی بر روی فرآیند دارد. برای جلوگیری از کاهش بیش از اندازه ضخامت ورق در ته دندانۀ قطعه و کنترل برگشت فنری، باید مقدار بار شعاعی را بهینه سازی کرد. فرم دندانهای که شکل می‌گیرد در کناره‌های راست و چپ آن متفاوت است. بنابراین باید فرآیند فوق را در یکی از نرم‌افزارهای اجزای محدود شبیه‌سازی نمود تا وضعیت تغییر شکل قطعه را با جزئیات آن نشان دهد. بمنظور دسترسی به اطلاعات بیشتر راجع به وضعیت قطعه پس از آزمایش توسط قالبهای طراحی شده در بالا (دقت گامی، پایداری فرآیند، اختلاف ضخامت دیواره‌های راست و چپ دندان، دقت محوری و ...) به مرجع [۲] مراجعه گردد.

۴- شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار تجاری ANSYS

در تحلیل مراحل مختلف شکل‌دهی به کمک نرم‌افزار ANSYS یک سری خواص و فرضیه‌ها بین همه مراحل شکل‌دهی مشترک است، که در زیر به سه گروه، خواص مکانیکی ماده، مدل تحلیلی و پروفیل دندانته دسته‌بندی شده‌اند. بعد از انجام تحلیل اجزای محدود نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [۷] مقایسه می‌شود.

۴-۱- خواص مکانیکی ماده

در کلیۀ تحلیلها از خواص ورق St12 (SPCD) به عنوان جنس قطعۀ خام استفاده شد. ماده ایزوتروپ در نظر گرفته می‌شود. ضریب الاستیسیته یانگ $E = 200 \text{ Gpa}$ و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ می‌باشند. از آنجا که در حین تغییر شکل، ماده هم تغییر شکل الاستیک و هم تغییر شکل پلاستیک دارد، این مقدار برای ضریب پواسون معقول به نظر می‌رسد. اصطکاک کولمب^۶ ما بین قالب و قطعه با ضریب اصطکاک ۰/۱ فرض گردید. مقدار اصطکاک معقول است، زیرا فرآیند بصورت سرد انجام می‌شود. با وجود اینکه قطعۀ خام طی دو بار کشش بدست آمده است ولی فرض می‌شود، منحنی جریان ماده با نتایج آزمایش کشش ساده ورق SPCD (شکل ۷) یکسان است و از اثر کار سختی بوجود آمده صرف‌نظر می‌گردد.

۴-۲- مدل تحلیلی

فرضیه‌های بکار رفته در هندسۀ قطعه بدین صورت است که، دیواره ته قطعۀ کشش عمیق شده یک قید ایجاد می‌کند که باعث سه بعدی شدن تغییر شکل می‌گردد، اما برای ساده‌سازی از اثر دیواره در ته قطعه

⁶ Coulomb

صرفنظر می‌شود. قطعه به مانند یک لوله با طول نامحدود فرض می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده تغییر شکل سه بعدی قطعه به یک تغییر شکل دو بعدی تبدیل شده و مسأله به صورت کرنش صفحه‌ای^۷ قابل بررسی می‌گردد. به علت وجود تقارن، منطقه تحلیل به کوچکترین بخش متقارن در قطعه یعنی نصف گام محدود می‌شود. اندازه‌های قطعه، مقادیر میانگین قطعه واقعی انتخاب می‌شوند. قطر اصلی ۱۱۷/۳ میلی‌متر و ضخامت آن ۲/۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. کلیه تحلیلها با فرض وجود جریان پایدار در سراسر فرآیند شکل‌دهی، به صورت حالت یکنواخت^۸ انجام گردید. این فرض منطقی بنظر می‌رسد، زیرا فرآیند در حالت سرد انجام می‌گیرد و در نتیجه تنش جریان مستقل از نرخ کرنش بوده و تنها وابسته به میزان کرنش است. کلیه تحلیلها، به روش حل تکراری نیوتن-رافسون کامل انجام می‌شود. کلیه تحلیلها با فرض تغییر شکل‌های بزرگ^۹ در مسأله انجام گردید. در همه تحلیل‌های شکل‌دهی از سه نوع المان استفاده شد. برای شبیه‌سازی ماده از المان مربعی شکل مرتبه دوم (هشت گره‌ای) که هر گره دارای دو درجه آزادی می‌باشد، استفاده شد. این المان در نرم افزار PLANE82 نام دارد. این المان اعوجاجها را به خوبی مدل می‌کند. از المان تماس سه گره‌ای برای شبیه‌سازی سطوح تماس انعطاف پذیر در تحلیلها استفاده شده است. این المان در نرم افزار، CONTACT172 نام دارد. قالبها جسم صلب در نظر گرفته می‌شوند. برای شبیه‌سازی سطوح تماس صلب، از المان سطح صلب دو بعدی که TARGET169 نام دارد استفاده شده است. برای شبیه‌سازی اصطکاک بین سطوح تماس، با فرض تبعیت اصطکاک از رابطه $F_f = \mu F_N$ بدست می‌آید، مقدار F_f با افزایش F_N افزایش می‌یابد تا میزان تنش تسلیم برشی به $S_y/\sqrt{3}$ برسد. از این پس مقدار F_f ثابت مانده و مستقل از نیروی عمودی عمل می‌کند. شبیه‌سازی دقیق این فرآیند نورد نسبتاً مشکل و زمان گیر است، زیرا قالب و قطعه کار در یک حرکت پیچیده با هم ترکیب می‌شوند. بنابراین یک مدل تغییر شکل ساده شده (مدل خمشی-کششی) با استفاده از روش اجزای محدود الاستیک-پلاستیک پیشنهاد می‌گردد. مش‌بندی قطعه بگونه‌ای است که ماده خام را به ۳۲ قسمت مساوی در جهت محیطی و ۸ قسمت مساوی در جهت شعاعی تقسیم‌بندی می‌کند. شکل ۸ مدل اجزای محدود با لقمه مش‌بندی شده و ترتیب قرارگرفتن قالبها را نشان می‌دهد. بعلاوه تقارن، حرکت گره‌های مرزی قطعه در جهت محیطی ثابت می‌گردد.

۳-۴- پروفیل قالبها

شکل ۸ قالبی را نشان می‌دهد که در قسمت قبلی با استفاده از شبیه‌سازی هندسی بدست آمد و آزمایش با آن انجام گرفت. از این به بعد این قالب، قالب سرگرد^{۱۰} نامیده می‌شود. در تحلیل عددی نوع حرکت قالبها نسبتاً با حرکت اصلی آنها متفاوت است و شکل قالب بیرونی در این مدل یک منحنی ترکیبی از حرکت قالبها می‌باشد. در شکل ۹ نحوه تطابق دهانه ما بین قالب خارجی و قالب داخلی در این تحلیل نشان داده

⁷ Plane strain

⁸ Steady state

⁹ Large deformation

¹⁰ Round head tool

می‌شود. در نتیجه در لحظه پایانی فرآیند، دهانه ما بین قالبها به مانند حرکت اصلی می‌باشد. قالب داخلی در تحلیل مثل قسمت قبلی است.

۵- نتایج و بحث

شکل ۱۰ نتایج تحلیل و آزمایش را در آخرین مرحله تغییر شکل نشان می‌دهد. مقدار بار (فرورفتگی) x برابر با ۳/۰ میلی‌متر است. در آزمایش قطعه در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. شبکه شطرنجی در قسمت کناری قطعه تولیدی به حالت حرف S تغییر شکل داده شده که تأکید بر وجود تغییر شکل برشی دارد. شبکه ته فضای دندان به شکل چتر تغییر شکل داده شده است. این پدیده بیانگر این است که ورق در جهت محیطی انبساط پیدا می‌کند. همچنین وقتی فرآیند تا این مرحله پیش می‌رود، نتایج آزمایش و تحلیل در ارایه حالت تغییر شکل پروفیل دندان به خوبی توافق دارند. در آخرین مرحله تغییر شکل بدلیل اینکه ماده، فضای قالب داخلی را پر می‌کند، تشخیص اختلاف فاصله پهلویی در قالب داخلی و خارجی دشوار است. بطور ساده در موقعیتهایی که قطعه و قسمت بر جسته قالب داخلی تماس پیدا می‌کنند، در نتایج آزمایش، ورق از روی قالب بلند شده است اما در تحلیل این پدیده بطور آشکار دیده نمی‌شود زیرا در تحلیل جابجایی ورق در جهت محیطی محدود شده است و قالب فقط ماده را به داخل در جهت شعاعی هل می‌دهد. اما در فرآیند نورد واقعی جهت فشار بوسیله قالب تغییر می‌کند و در ابتدا و انتهای اتصال قالب و قطعه، ورق بطور نسبی خمیده می‌شود. در این خمش گوشه دندان قالب داخلی بعنوان تکیه‌گاه عمل می‌کند، زیرا ورق از روی سر دندان قالب داخلی بلند می‌شود. پس نمی‌توان این مدل ساده‌سازی شده را برای تحلیل دقیق حالت تماس ورق و قالب بیرونی بکار برد. این مدل قادر است جایگزین حالتی نزدیک به وضعیت تغییر شکل نهایی (در فرآیند واقعی) ورق شود و بعنوان یک مدل تقریبی در طراحی اولیه قالب مؤثر است.

با توجه به اینکه قطعه تولید شده توسط قالبهای قبلی نتوانست دقت‌های مورد نظر پروفیل دندان و برگشت فتری را کسب کند، تصمیم گرفته شد که یک پروفیل بهینه برای قالب بیرونی با استفاده از این مدل اجزای محدود در ANSYS بدست آورده شود. شرایط حاکم در این تحلیل بدین‌گونه است که، تکه‌ای صاف با طول معین در مسیر سطح خارجی دیوار جانبی دندانهای قطعه تشکیل شود. فضای ما بین قالبها کاملاً با ماده پر شود. ضخامت قطعه در کلیه قسمتها بزرگتر یا مساوی ۱/۶ میلی‌متر باشد، بگونه‌ای که بار شعاعی کمینه شود. الگوی طراحی پروفیل دندان این قالب بیرونی (بهینه) در شکل ۱۱ نشان داده می‌شود. کمان دایره‌ای $R1$ در سر دندان قالب بیرونی، از ایجاد ماده مرده جلوگیری می‌کند و تغییر شکل را به کل فضای دندان می‌دهد. با قرار دادن کمان دایره‌ای $R2$ در قسمت ته دندان قالب بیرونی، ماده به آسانی در قسمت زاویه‌دار دندان جریان پیدا می‌کند و فشار در سر دندان قطعه تولیدی کاهش می‌یابد.

با تغییر شعاعهای $R1$ و $R2$ و انجام محاسبات پی در پی با استفاده از این مدل و حل اجزای محدود الاستیک-پلاستیک پروفیل قالب بهینه بدست آورده می‌شود. در این مسأله عمق دندان، پهنای آن، میزان فشار وارده توسط قسمت ته دندان قالب و تشکیل طول معین در قسمت زاویه‌دار دندان قطعه بهینه سازی

می‌شود. در شکل ۱۲ پروفیل دندانۀ قالب بیرونی بهینه نشان داده می‌شود. شکل ۱۳ نتیجه تحلیل و آزمایش گزارش شده با استفاده از این قالب را نشان می‌دهد. ضخامت دیواره در کناره‌های راست و چپ متفاوت هستند. دلیل آن این است که قالب بیرونی و دایرۀ سرعت ثابت قطعه از بیرون به داخل حرکت داده شده و اختلاف سرعت محیطی اولیه افزایش پیدا کرده است. متعاقب آن اختلاف ضخامت دیواره در کناره راست و چپ دندانۀ بر اثر اختلاف فاصلۀ پهلویی در اولین مرحلۀ فرآیند، بطور قابل توجه اتفاق افتاده است و این اختلاف ضخامت تا آخرین مرحلۀ فرآیند ننگه داشته می‌شود. این پدیده را مدل عددی نتوانست پیش‌بینی کند. برای اینکه ضخامت دیواره در راست و چپ دندانۀ یکسان باشد باید موقعیت دایرۀ سرعت ثابت را تنظیم کرد. اما مشخص شد که نتایج حاصل از آزمایش و نتایج تحلیل عددی به خوبی در مورد خود پروفیل دندانۀ ای که تغییر شکل داده شده تطبیق می‌کنند و این مدل تحلیل عددی می‌تواند به عنوان یک طرح مقدماتی، طراحی پروفیل دندانۀ قالب را انجام دهد. برگشت فنری نسبت به قبل وضعیت مناسبتری پیدا نمود، اما هنوز نتوانسته مقدار مورد نظر را کسب کند.

شکل ۱۴ کانتورهای تنش و کرنش فون مایزر را که در تحلیل با قالب جدید بدست آمده، نشان می‌دهد. در این شکلها دیده می‌شود که بطور نسبتاً خوبی هدفهای تعریف شده در مسأله بهینه سازی ارضاء شده است. ایجاد کمان $R2$ جریان ماده را در زیر سر دندانۀ قالب بیرونی بهبود بخشد و مقدار ماده مرده را در این منطقه کاهش داد. کمان $R1$ باعث شد که ماده راحتتر به قسمت زاویه دار دندانۀ جریان یابد و علاوه بر این فشار را در سر دندانۀ قالب داخلی کاهش داده است.

۶- نتیجه گیری نهایی

۱- روش شکل دهی چرخشی با استفاده از دو قالب فرو رونده برای ایجاد پروفیل اسپیلاین ارایه می‌گردد. قالبها با استفاده از یک شبیه سازی هندسی بدست می‌آیند. آزمایش‌های صورت گرفته نشان داد که روش مذکور در تولید قطعات دارای پروفیل اسپیلاین موفق است.

۲- اختلاف فاصلۀ پهلویی ما بین قالبها در حین تغییر شکل تأثیر زیادی بر روی فرآیند دارد.

۳- در این فرآیند قالبها تحت یک حرکت پیچیده با هم درگیر می‌شوند. شبیه سازی چنین فرآیندی بسیار مشکل و زمان گیر است. از این رو یک مدل ساده پیشنهاد می‌گردد. پروفیل دندانۀ قالب تحت یک سیستم ترکیبی تغییر می‌کند. نتایج تحلیل و آزمایش بطور نسبتاً خوب در آخرین مرحلۀ تغییر شکل ورق مطابقت می‌کنند و ثابت کرد که این مدل ساده می‌تواند برای طراحی اولیه قالب بیرونی بکار رود.

۴- در قسمت سر و ته پروفیل دندانۀ قالب بیرونی کمانهای دایره‌ای قرار داده شد. اندازه این کمانها با استفاده از مدل تحلیلی محاسبه می‌شود. اگر چه ضخامت دیواره در راست و چپ دندانۀ اختلاف داشت اما پروفیل دندانۀ قطعه دقت مورد نظر را بدست آورد و توانست مؤثر بودن این مدل را ثابت کند.

۵- برای اینکه بتوان جزییات بیشتری از نحوه تغییر شکل قطعه بدست آورد، باید در آینده حرکت اصلی قالبها و دیواره ته قطعه شبیه سازی شوند. با استفاده از نتایج این تحلیل می توان یک پروفیل بهینه مطلوبتر برای حل مسأله اختلاف ضخامت دیواره در کناره های راست و چپ و برگشت فنری قطعه پیشنهاد نمود.

۷- مراجع

[۱] مهشید، ر.، تحلیل عددی نورد دندان بر روی دیواره جانبی ظروف جدار نازک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۸۱).

[2] Takemasu, T., Matsunaga, R., Ozaki, T., Kamashita, R., Tsukamoto, H., Spline Rolling of Deep Drawn Cups, Advanced Technology of Plasticity, Proceedings of the 5th ICTP, Vol. II, PP. 691-694(1996).

[3] Matsunaga, R., Ozaki, T., Takemasu, T., Kamashita, R., and Tsukamoto, H., Spline Rolling of Deep Drawn Cups, Proceedings of the 1993 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity, (In Japanese), PP. 765-768(1993).

[4] Matsunaga, R., Ozaki, T., Takemasu, T., Kamashita, R., and Tsukamoto, H., Spline Rolling of Deep Drawn Cups, Proceedings of the 1994 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity, (In Japanese) , pp. 635-638 (1994).

[5] Matsunaga, R., Ozaki, T., Takemasu, T., Kamashita, R., and Tsukamoto, H., Spline Rolling of Deep Drawn Cups, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, (In Japanese), Vol. 37, No. 424, PP. 527-532 (1996).

[6] Matsunaga, R., Ozaki, T., Takemasu, T., Kamashita, R., and Tsukamoto, H., Numerical Simulation of Spline Rolling of Deep Drawn Cups, Proceedings of the 1995 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity, (In Japanese), PP. 309-310 (1995).

[7] Matsunaga, R., Ozaki, T., Takemasu, T., Kamashita, R., and Tsukamoto, H., Development of Numerical Simulation Model for Forming Loop Spline -Spline Rolling of Deep Drawn Cups II-, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, (In Japanese), Vol. 37, No. 431, pp. 1367-1372 (1996).

- [8] Matsunaga, R., Ozaki, T., Takemasu, T., Kamashita, R., Tsukamoto, H., and Tanaka, A., Optimum Design of Outer Tools Using the Spline Rolling Simulation Model -Spline Rolling of Deep Drawn Cups III-, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, (In Japanese), Vol.39, No. 446, pp. 206-210 (1998).
- [9] Matsunaga, R., Ozaki, T., Takemasu, T., Kamashita, R., and Tsukamoto, H., Suppression of spring back of products in spline rolling of deep drawn cups, Proceedings of the 1996 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity, (In Japanese), PP. 309-310 (1996).
- [10] Matsunaga, R., Ozaki, T., Takemasu, T., Kamashita, R., and Tsukamoto, H., Improvement of the Tooth Trace Accuracy of Spline -Spline Rolling of Deep Drawn Cups IV-, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, (In Japanese), Vol.42, No. 491, PP. 1203-1207 (2001).
- [11] Matsunaga, R., Takemasu, T., Ozaki, T., Miyahara, H., Kamashita, R., and Tsukamoto, H., Spline Rolling of Deep Drawn Cups, Advanced Technology of Plasticity, proceedings of the 6th ICTP, Vol. III, PP. 2431-2436 (1999)

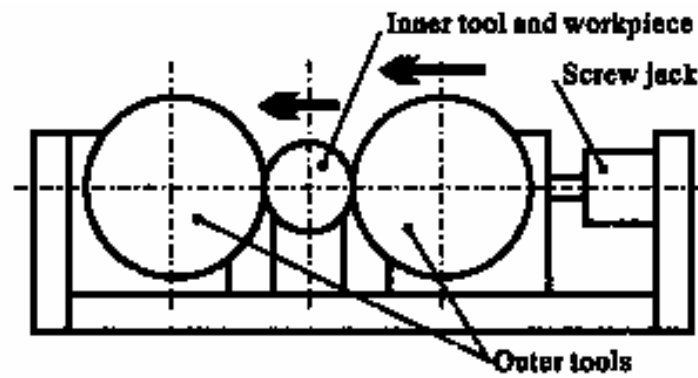
فهرست نمادها و نشانه‌ها

$R2$	شعاع کمان در سر دندانه قالب بیرونی	F_f	نیروی اصطکاک
S_y	تنش تسلیم برشی	F_N	نیروی عمودی
x	مقدار بار (فرورفتگی)	E	مدول یانگ
		$R1$	شعاع کمان در سر دندانه قالب بیرونی

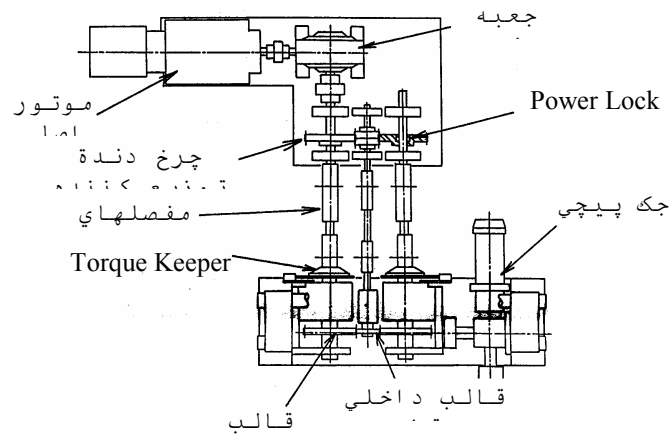
نمادها و نشانه‌های یونانی

v	ضریب پواسون	μ	ضریب اصطکاک
-----	-------------	-------	-------------

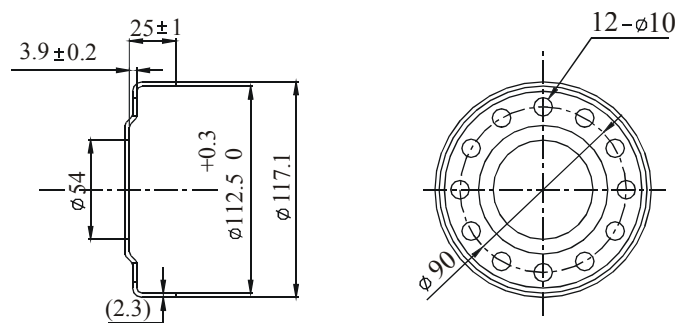
شکلها



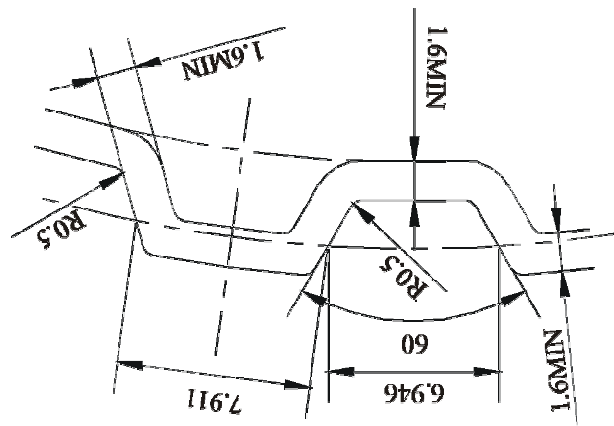
شکل ۱- نحوه عملکرد قالبها [۱۱]



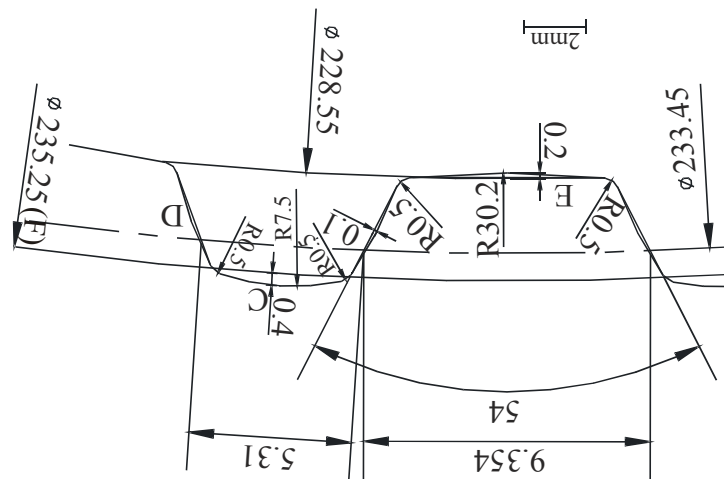
شکل ۲- دستگاه آزمایش [۳]



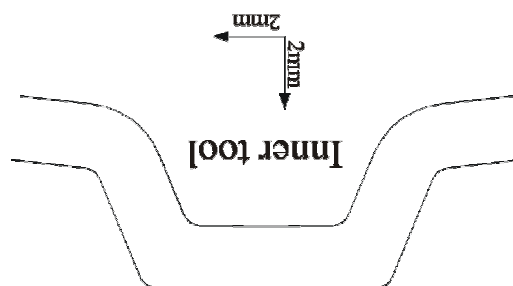
شکل ۳- قطعه حاصل از فرآیند کشش عمیق



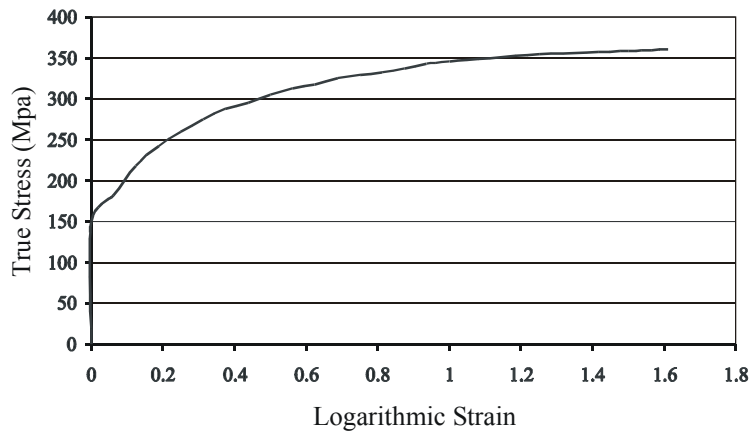
شکل ۴- ابعاد قطعه هدف



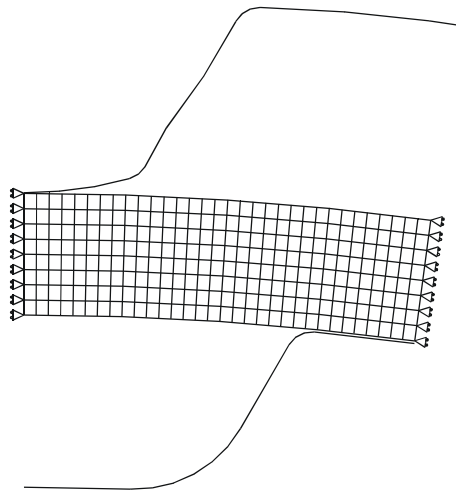
شکل ۵- پروفیل قالب بیرونی



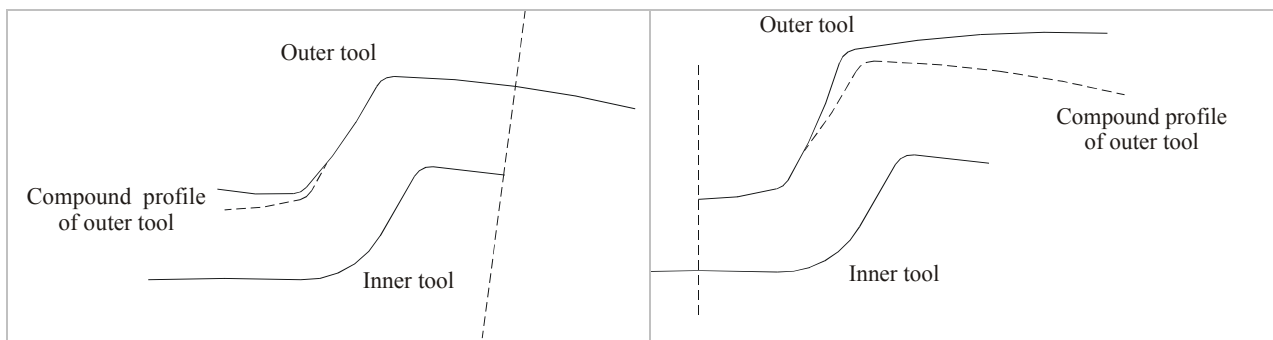
شکل ۶- فاصله هندسی



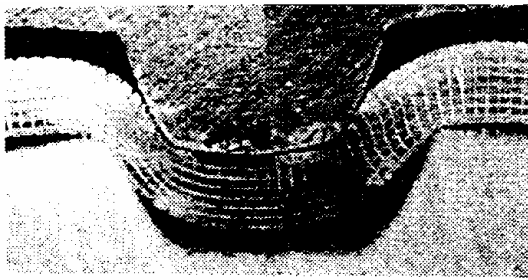
شکل ۷- منحنی تنش-کرنش ورق SPCD در دمای محیط



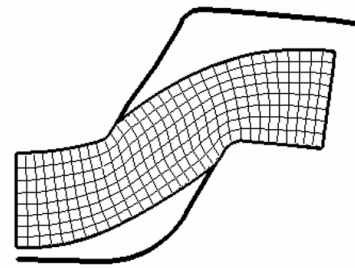
شکل ۸- مدل هندسی اجزاء محدود



شکل ۹- ترکیب پروفیل دندانه در قالب بیرونی

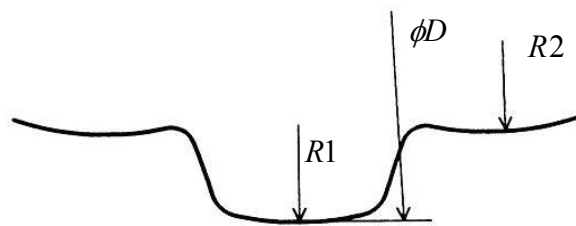


آزمایش [Y]

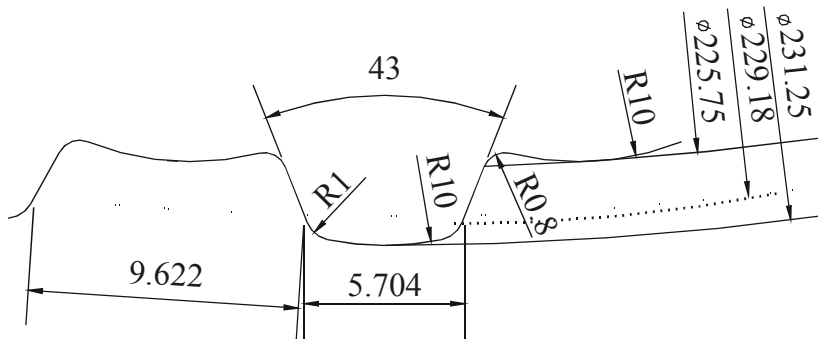


تحلیل

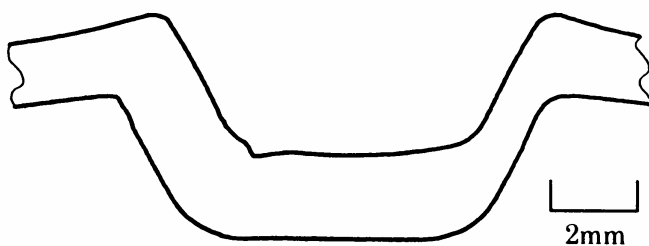
شکل ۱۰- مقایسه مابین نتایج تحلیل و آزمایش



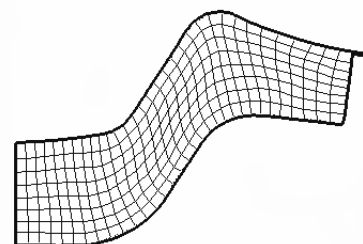
شکل ۱۱- مدل قالب بیرونی بهینه



شکل ۱۲- طرح بهینه شده پیشنهادی برای قالب بیرونی



آزمایش [Y]



تحلیل

Abstract

Sheet metals are being used in industrial parts. in order to reduce the weight. such as deep drawn cups with splines in automatic transmission of car. Rotary forming process is used for manufacturing these parts as a new method. This method is a two-dies-plunge-feed type. In this paper. based on a geometrical simulation. the dies for rotary forming process are designed. Numerical analysis by the elastic-plastic F.E.M (ANSYS) is performed to investigate the deformation of deep drawn cup. It is experimentally confirmed that a splines is successfully formed. Finally. an optimum design is proposed by this model.