بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-گرایش ساخت و تولید

مطالعه تجربی و عددی شکل‌دهی حجمی ورق فلزی برای ساخت بوش فلنج‌دار

نگارنده:
حسین رضوانی ولوکلایی

استاد راهنما
دکتر سید هادی قادری

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم به

وجود نازنین دخت رسول مهربانی‌ها

و تقدیم به

ساحت مقدس آفتاب غایب از نظر

سپاس گذاری

- در ابتدا و همانند هر وقت دیگر پروردگار متعال را بابت نعمات و الطاف دائمیش شکرگزارم که به این بنده‌ی حقیر، توفیق تحصیل و اتمام مقطعی دیگر را ارزانی نمود.

- به ثمر رسیدن این پژوهش مرهون راهنمایی‌ها و حمایت‌های استاد گرامی جناب آقای دکتر سید هادی قادری است؛ بر خود لازم می‌دانم از صمیم قلب مراتب سپاس خود را از زحماتشان ابراز نمایم و برایشان از درگاه خداوند منّان سلامتی و توفیق روزافزون مسئلت دارم.

- همچنین از پدر و مادر خود که با دعای خیرشان مرا در این مسیر حمایت کردند سپاسگزارم. و در پایان نیز از آقایان دکتر مجتبی قطعی، دکتر محمدباقر نظری، مهندس نوید رضایی و تمامی افرادی که در انجام این پایان نامه اینجانب را صمیمانه کمک کردند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

حسین رضوانی- بهمن ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب **حسین رضوانی ولوکلایی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک-ساخت و تولید** دانشکده‌ی **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **مطالعه تجربی و عددی شکل‌دهی حجمی ورق فلزی برای ساخت بوش فلنجدار** تحت راهنمائی **دکتر سید هادی قادری** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University Of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ : ۹۵/۱۱/۱۹

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

فرآیند شکل‌دهی حجمی ورق فلزی، اغلب ترکیبی از فرآیند شکل‌دهی ورق فلزی و شکل‌دهی حجمی است که در آن جریان مواد در سه بعد انجام می‌گیرد. فرآیند تولید بوش فلزی به طور مرسوم با استفاده از ماشینکاری انجام می‌گیرد. این فرآیند علاوه بر زمان‌بر بودن، دورریز زیادی هم تولید می‌کند. فرآیند بازیافت نیز معمولاً با هزینه همراه خواهد بود. روش جایگزین برای این روش، می‌تواند استفاده از روش شکل‌دهی ورق در ترکیب با روش‌های شکل‌دهی حجمی باشد. ترکیب این روش‌ها، مزیت‌هایی مانند دقیق بودن ابعاد قطعه نهایی، کاهش ماشین‌کاری نهایی، افزایش سرعت تولید، خواص بهتر محصول به دلیل کار سختی ماده را به‌دست می‌دهد. در این پایان‌نامه مطالعه بر روی ساخت بوش فلنجدار از ورق‌های آلیاژ آلومینیوم AA3003، فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و مس، با استفاده از شکل‌دهی حجمی ورق فلزی مورد نظر قرار گرفته است. قالب از لحاظ مکانیکی و هندسی باید طوری طراحی گردد که علاوه بر ایجاد جریان مناسب مواد، نیروهای شکل‌دهی را تحمل کرده و دچار شکست نشود. در این راستا، ابتدا پروفیل سنبه و کانال قالب جهت تولید بوش فلنجدار استاندارد و قرار دادن هسته قالب درون حلقه فشاری، طراحی و اجرا شد. در طراحی حلقه فشاری، روابط تئوری همراه با آزمون شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت که در این طراحی، ابعاد حلقه فشاری با قرار دادن نیروهای فشاری مختلف محاسبه شد. در گام بعد، آزمون کشش تک‌محوری و فرآیند شکل‌دهی بوش فلنجدار انجام شد. در ادامه، نمونه‌ها شکل داده شده و مورد آزمون سختی‌سنجی قرار گرفت. آزمون سختی‌سنجی بر روی نمونه‌ها نشان می‌دهد در قسمت‌های فلنجدار بوش، سختی به نسبت زیاد شده و در دیواره‌ها سختی کمی ایجاد شده است. در انتها برای تعیین دقت و صحت، نتایج تجربی با شبیه‌سازی مقایسه شد.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی حجمی ورق فلزی، بوش فلنجدار، تغییر شکل مومسان، جریان مواد، تریبولوژی، آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۳، فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

فهرست عنوان‌ها

فهرست شکل‌ها .... ح

فهرست جدول‌ها .... ش

فصل ۱ مقدمه ۱

۱-۱- معرفی فرآیند SBMF ۲
۱-۲- فرآیندهای SBMF ۳
۱-۲-۱ کله‌زنی ورق فلزی ۴
۱-۲-۲ فرآیند اتوکاری ۷
۱-۲-۳ آهنگری ۹
۱-۲-۴ سکه‌زنی ۱۱
۱-۲-۵ فلوفرمینگ ۱۲
۱-۲-۶ روش‌های فلوفرمینگ ۱۵
۱-۲-۷ فلوفرمینگ مستقیم ۱۵
۱-۲-۸ فلوفرمینگ معکوس ۱۶
۱-۲-۹ مزایا و معایب فلوفرمینگ ۱۸
۱-۲-۱۰ شکل‌دهی مداری ۱۹
۱-۳- معرفی تریبولوژی در SBMF ۲۱
۱-۴- معرفی ماده‌ی مورد تحقیق و خواص آن ۲۳
۱-۴-۱ مس ۲۳
۱-۴-۲ آلیاژهای آلومینیم ۳۰۰۳ .... ۲۴
۱-۴-۳ فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ .... ۲۴
۱-۵- پیشینه‌ی تحقیق ۲۶
۱-۶- ساختار پایان‌نامه ۳۲

فصل ۲ تحلیل عددی شکل‌دهی بوش فلنجدار ۳۵

۲-۱- معرفی نرم‌افزار آباکوس ۳۶
۲-۲- طراحی پروفیل سنبه و هسته‌ی قالب ۳۸
۲-۳- بررسی نحوه شکل‌گیری بوش فلنجدار ۴۲
۲-۴- طراحی هسته‌ی قالب و حلقه فشاری ۴۳
۲-۵- شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی بوش فلنجدار ۴۵

۲-۶- مدل‌سازی هندسی ۴۶
۲-۷- تعیین خصوصیات ورق ۴۷
۲-۸- تعیین تعداد گام حل، خروجی‌ها و نوع تحلیل ۴۸
۲-۹- تعیین شرایط اصطکاکی و نوع تماس سطوح ۴۹
۲-۱۰- تعریف شرایط مرزی و بارگذاری ۵۰
۲-۱۱- شبکه‌بندی و تعیین نوع المان‌ها ۵۰

فصل ۳ طراحی و اجرای آزمون‌های تجربی ۵۳

۳-۱- دستگاه پرس ۵۳
۳-۲- قالب بوش فلنجدار ۵۴
۳-۲-۱ اجزای قالب بوش فلنجدار ۵۵
۳-۲-۲ طراحی قالب ۵۶
۳-۳- مواد خام اولیه ۵۹
۳-۴- روانکار مورد استفاده در فرآیند ۶۱
۳-۵- آزمون شکل‌دهی بوش فلنجدار ۶۲
۳-۶- آزمون سختی‌سنجی ۶۵
۳-۶-۱ آماده‌سازی نمونه‌ها جهت پالیش کردن ۶۵
۳-۶-۲ آزمون سختی ۶۷
۳-۷- آزمون کشش ورق ۷۰
۳-۷-۱ دستگاه کشش ۷۰
۳-۷-۲ نمونه‌های آزمایش کشش ۷۳
۳-۸- وسایل اندازه‌گیری ۷۴

فصل ۴ نتایج و بحث ۷۵

۴-۱- نتایج حل عددی ۷۵
۴-۱-۱ تحلیل توزیع تنش در قالب ۷۶
۴-۱-۲ بررسی زوایای Φ، Ψ و شعاع‌های R_1 و R_2 ۸۱
۴-۲- نتایج تجربی و صحت سنجی با نتایج عددی ۹۵
۴-۲-۱ آزمون کشش ۹۵
۴-۲-۲ آزمون شکل دهی بوش فلنجدار ۹۷
۴-۲-۱ نتایج و بررسی ریز سختی‌سنجی ویکرز ۱۰۴
۴-۲-۲ نمودار نیرو–جابجایی ۱۰۹
۴-۲-۳ مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی ۱۱۱

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۱۵

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۵

۵-۲- پیشنهادها ۱۱۶

منبع‌ها ۱۱۹

پیوست الف ۱۲۳

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: طبقه‌بندی فرآیندهای SBMF [۴]......۴

شکل ۱-۲: شکل‌دهی چرخ زنجیر دارای دندانه‌های ضخیم [۵]......۵

شکل ۱-۳: (۱) شکل‌دهی دو مرحله‌ای گرده‌های تیلورد با ضخیم شدن موضعی (۲) شکلدهی ورق‌های تیلورد با ضخیم شدن موضعی در فرآیند کشش عمیق فنجان‌های مربعی شکل [۶]، [۷]......۶

شکل ۱-۴: شکل دادن دندانه‌ی خارجی در قطعات فنجانی شکل با داشتن گوشه‌های تیز [۸]......۷

شکل ۱-۵: شکل دادن مرحله‌ای قطعات فنجانی شکل با داشتن لبه‌های ضخیم [۹]......۷

شکل ۱-۶: فرآیند اتوکاری......۸

شکل ۱-۷: شکل دادن ضخامت کم در دیواره‌ی قطعات با استفاده از فرآیند اتوکاری [۱۱]......۸

شکل ۱-۸: شکلدهی هزارخاری دندانه‌های قطعه فولادی استحکام بالا با استفاده از روش حرارت‌دهی در دیوارهی فنجان [۱۲]......۹

شکل ۱-۹: مقایسه بین آهنگری حجمی و آهنگری صفحه [۱۴]......۱۱

شکل ۱-۱۰: فرآیند سکه‌زنی......۱۲

شکل ۱-۱۱: نمونه‌ای از قطعات صنعتی تولید شده با استفاده از فرآیند فلوفرمینگ [۱]......۱۴

شکل ۱-۱۲: چرخدنده داخلی تولید شده با استفاده از فلوفرمینگ......۱۴

شکل ۱-۱۳: فرآیند فلوفرمینگ (الف) فلوفرمینگ مستقیم (ب) فلوفرمینگ معکوس [۱۷]......۱۵

شکل ۱-۱۴: دسته‌بندی انواع فرآیندهای فلوفرمینگ از نظر تغییر ضخامت و اشکال قابل تولید [۱۹]۱۷

شکل ۱-۱۵: (۱) اساس ماشین‌های آهنگری دورانی یا مداری (۲) انواع حرکت‌های قالب بالایی (الف) حرکت دورانی یا شعاعی (ب) حرکت خط مستقیم (ج) حرکت مارپیچی (د) حرکت ستاره‌ای [۲۱].۲۰

شکل ۲-۱: طرحواره بوش استاندارد با ابعاد (DIN 172)......۳۸

شکل ۲-۲: طرحواره هسته قالب وسنبه با ابعاد......۳۹

شکل ۲-۳: طرح‌واره گرده اولیه با ابعاد ۴۰
شکل ۲-۴: شمای کلی و مراحل فرآیند شکل‌دهی بوش ۴۲
شکل ۲-۵: طرح‌واره محاسبه‌ی هسته قالب و حلقه‌ی فشاری ۴۵
شکل ۲-۶: طرح‌واره قالب شکل‌دهی بوش ۴۷
شکل ۲-۷: منحنی تنش-کرنش مومسان آلیاژ AA3003 ۴۸
شکل ۲-۸: نحوه‌ی نمایش شبکه‌بندی اجزای قالب ۵۱
شکل ۳-۱: دستگاه پرس هیدرولیک ژاو آریا ۵۴
شکل ۳-۲: طرح‌واره اجزای قالب بوش فلنج‌دار ۵۵
شکل ۳-۳: قالب شکل‌دهی بوش فلنج‌دار مورد استفاده شده در آزمایش، (الف) کل مجموعه‌ی قالب، (ب) مجموعه بالای قالب و (ج) مجموعه پایین قالب ۵۶
شکل ۳-۴: طرز محاسبه درجه استحکام پیچ‌ها ۵۷
شکل ۳-۵: پرداخت شدن سطح سنبه و سطح داخلی هسته‌ی قالب با استفاده از سنگزنی ۵۸
شکل ۳-۶: پله ۱ mm هسته‌ی قالب جهت موقعیت‌دهی گرده‌ی اولیه ۵۸
شکل ۳-۷: سوراخ ایجاد شده بر روی صفحه نگهدارنده قالب ۵۹
شکل ۳-۸: گرده‌ی اولیه‌های مورد استفاده شده برای آزمایش، (الف) گرده‌ی اولیه‌های مسی با ضخامت ۲ و ۳ mm و قطرهای داخلی مختلف، (ب) گرده‌ی اولیه آلیاژی فولاد ضدزنگ ۳۰۴ و (ج) گرده‌ی اولیه‌های آلیاژی AA3003 ۶۰
شکل ۳-۹: روانکار مورد استفاده در فرآیند ۶۱
شکل ۳-۱۰: شکل‌گیری بوش با استفاده از خمیر مجسمه‌سازی ۶۲
شکل ۳-۱۱: نحوه نمایش بسته شدن مجموعه قالب بر روی پرس ۶۳
شکل ۳-۱۲: استوپرهای مختلف جهت ایجاد جریان یکسان مواد در انتهای قطعات ۶۴
شکل ۳-۱۳: چسبیدن قطعه به سنبه به دلیل روانکاری نشدن سنبه ۶۴
شکل ۳-۱۴: قطعات مانت شده، سمباده خورده و پالیش شده ۶۷

شکل ۳-۱۵: دستگاه پالیش (METCO) ۶۷
شکل ۳-۱۶: فرورونده‌ی ویکرز ۶۹
شکل ۳-۱۷: (الف) سختی سنج پروف‌تشنیک، (ب) قرار گرفتن فرورونده بر روی نمونه ۷۰
شکل ۳-۱۸: دستگاه کشش اینسترون (الف) تصویر کلی دستگاه، (ب) موقعیت تغییر طول سنج و نمونه‌ی کشش ۷۲
شکل ۳-۱۹: ابعاد استاندارد نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 ۷۳
شکل ۳-۲۰: نمونه‌های آزمایش کشش از آلیاژ AA3003 بر اساس استاندارد ASTM-E8 ۷۴
شکل ۳-۲۱: تجهیزات اندازه‌گیری (الف) ریزسنج ضخامت (ب) کولیس دیجیتال ۷۴
شکل ۴-۱: توزیع تنش با P=0 در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز ۷۶
شکل ۴-۲: توزیع تنش با P=500 MPa در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز ۷۷
شکل ۴-۳: توزیع تنش با P=1000 MPa در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز ۷۷
شکل ۴-۴: توزیع تنش با P=1500 MPa در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز ۷۸
شکل ۴-۵: توزیع تنش با P=2000 MPa در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز ۷۸
شکل ۴-۶: توزیع تنش فشاری در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) P=0 (MPa) و (ب) P=500 (MPa) ۷۹
شکل ۴-۷: توزیع تنش فشاری در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) P=1000 (MPa) و (ب) P=1500 (MPa) ۷۹
شکل ۴-۸: توزیع تنش فشاری در هسته قالب و حلقه فشاری، P=2000 (MPa) ۸۰
شکل ۴-۹: توزیع تنش حلقوی در قالب ۸۱

شکل ۴-۱۰: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۴۵^o و R_2 =۱ mm........۸۲

شکل ۴-۱۱: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۴۵^o و R_2 =۲ mm........۸۲

شکل ۴-۱۲: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۴۵^o و R_2 =۳ mm........۸۳

شکل ۴-۱۳: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۵۰^o و R_2 =۱ mm........۸۳

شکل ۴-۱۴: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۵۰^o و R_2 =۲ mm........۸۴

شکل ۴-۱۵: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۵۰^o و R_2 =۳ mm........۸۴

شکل ۴-۱۶: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۵۵^o و R_2 =۱ mm........۸۵

شکل ۴-۱۷: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۵۵^o و R_2 =۲ mm........۸۵

شکل ۴-۱۸: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۵۵^o و R_2 =۳ mm........۸۶

شکل ۴-۱۹: شکل‌دهی نادرست بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۰^o و R_1 =۰/۵ mm........۸۷

شکل ۴-۲۰: شکل‌دهی نادرست بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۰^o و R_1 =۱ mm........۸۷

شکل ۴-۲۱: شکل‌دهی نادرست بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۱۰^o و R_1 =۰/۵ mm........۸۸

شکل ۴-۲۲: شکل‌دهی نادرست بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۱۰^o و R_1 =۱ mm........۸۸

شکل ۴-۲۳: نحوه‌ی شکل‌گیری بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۲۰^o و R_1 =۰/۵ mm........۸۹

شکل ۴-۲۴: نحوه‌ی شکل‌گیری بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۲۰^o و R_1 =۱ mm........۸۹

شکل ۴-۲۵: نحوه‌ی شکل‌گیری بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۳۰° و R_1 =۰/۵ mm ۹۰

شکل ۴-۲۶: نحوه‌ی شکل‌گیری بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۳۰° و R_1 =۱ mm ۹۰

شکل ۴-۲۷: توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در جابجایی مختلف سنبه (برش ۲۷۰ درجه از مقطع). Ψ =۶۲°، R_2 =۲ mm، Φ =۴۵° و R_1 =۱ mm ۹۲

شکل ۴-۲۸: توزیع کرنش پلاستیک آلیاژ AA3003 با d_s= ۸/۵ mm در جابجایی مختلف سنبه (برش ۲۷۰ درجه از مقطع) ۹۳

شکل ۴-۲۹: توزیع کرنش پلاستیک آلیاژ AA3003 در جابجایی مختلف سنبه (برش ۲۷۰ درجه از مقطع) و با لقی ۰/۰۵ mm بین سنبه و هسته قالب ۹۴

شکل ۴-۳۰: توزیع کرنش پلاستیک آلیاژ AA3003 (الف) بدون استوپر (ب) با استوپر ۹۴

شکل ۴-۳۱: نمونه‌ی کشیده شده تا شکست از آلیاژ AA3003 با نرخ کرنش اولیه s^{-1} ۰/۰۰۱ جهت تعیین نمودار تنش-کرنش ۹۵

شکل ۴-۳۲: نمودار تنش_کرنش مهندسی برای آلیاژ AA3003 ...... ۹۶

شکل ۴-۳۳: نمودار تنش-کرنش حقیقی برای آلیاژ AA3003 ...... ۹۶

شکل ۴-۳۴: نمونه‌های شکل داده شده از جنس مس با قطر داخلی ۸/۵ mm به روش تجربی، (الف) ضخامت ۲ mm (ب) ضخامت ۳ mm ۹۷

شکل ۴-۳۵: نمونه‌های شکل داده شده از جنس مس با قطر داخلی ۹ و ۱۰ mm به روش تجربی،...۹۸

شکل ۴-۳۶: نمونه شکل داده شده از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به روش تجربی ۹۹

شکل ۴-۳۷: نمونه‌های درست شکل نگرفته شده از جنس آلومینیوم ۳۰۰۳ به روش تجربی...... ۹۹

شکل ۴-۳۸: نمونه شکل داده شده از جنس آلومینیوم ۳۰۰۳ به روش تجربی...... ۱۰۰

شکل ۴-۳۹: ابعاد بوش مسی شکل داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه ۱۰ mm و ضخامت ۳ mm ۱۰۰

شکل ۴-۴۰: ابعاد بوش مسی شکل داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه ۹ mm و ضخامت ۳ mm ۱۰۱

شکل ۴-۴۱: ابعاد بوش ضدزنگ ۳۰۴ شکل‌داده شده...... ۱۰۱

شکل ۴-۴۲: ابعاد بوش آلومینیوم شکل‌داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه ۱۰ mm ۱۰۲

شکل ۴-۴۳: ابعاد بوش آلومینیوم شکل‌داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه mm ۹ .... ۱۰۲
شکل ۴-۴۴: بوش مسی شکل داده شده، (الف) قبل از ماشینکاری (ب) بعد از ماشینکاری ۱۰۳
شکل ۴-۴۵: بوش مسی شکل داده شده، (الف) قبل از ماشینکاری (ب) بعد از ماشینکاری ۱۰۳
شکل ۴-۴۶: بوش آلومینیومی شکل داده شده، (الف) قبل از ماشینکاری (ب) بعد از ماشینکاری ... ۱۰۴
شکل ۴-۴۷: بوش فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ شکل داده شده، (الف) قبل از ماشینکاری (ب) بعد از ماشینکاری ۱۰۴
شکل ۴-۴۸: نمایش نقاط سختی بر روی نمونه‌ها ۱۰۵
شکل ۴-۴۹: آزمون سختی بر روی آلومینیوم ۳۰۰۳ (الف) نمونه قبل از آزمون (ب) نمونه قبل از تغییر شکل (ج) نمونه بعد از تغییر شکل ۱۰۵
شکل ۴-۵۰: نمودار سختی آلومینیوم ۳۰۰۳ قبل از تغییر شکل ۱۰۶
شکل ۴-۵۱: نمودار سختی آلومینیوم ۳۰۰۳ بعد از تغییر شکل ۱۰۶
شکل ۴-۵۲: آزمون سختی بر روی مس (الف) نمونه قبل از تغییر شکل (ب) نمونه بعد از تغییر شکل ۱۰۶
شکل ۴-۵۳: نمودار سختی مس قبل از تغییر شکل ۱۰۷
شکل ۴-۵۴: نمودار سختی مس بعد از تغییر شکل ۱۰۷
شکل ۴-۵۵: آزمون سختی بر روی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (الف) نمونه قبل از آزمون (ب) نمونه قبل از تغییر شکل (ج) نمونه بعد از تغییر شکل ۱۰۸
شکل ۴-۵۶: نمودار سختی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ قبل از تغییر شکل ۱۰۸
شکل ۴-۵۷: نمودار سختی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بعد از تغییر شکل ۱۰۹
شکل ۴-۵۸: مقایسه منحنی نیرو- جابجایی آلومینیوم۳۰۰۳، شبیه‌سازی با تجربی ۱۱۰
شکل ۴-۵۹: منحنی نیرو- جابجایی تجربی مس با ضخامت mm ۲ .... ۱۱۰
شکل ۴-۶۰: منحنی نیرو- جابجایی مس با ضخامت mm ۳ .... ۱۱۱
شکل ۴-۶۱: منحنی نیرو- جابجایی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ .... ۱۱۱

شکل ۴-۶۲: مقایسه هندسه بوش فلنج‌دار شکل داده شده از آلیاژ AA3003 (الف) تجربی و (ب) شبیه‌سازی ۱۱۲
شکل ۴-۶۳: مقایسه هندسه بوش فلنج‌دار شکل داده شده از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (الف) تجربی و (ب) شبیه‌سازی ۱۱۲

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ورق از آلیاژ AA3003 .... ۴۷

جدول ۳-۱- خصوصیات ورقهای مسی و فولادی [۲۵]، [۲۳] ۶۰

جدول ۳-۲- مشخصات آزمون کشش تجربی ۷۳

جدول ۴-۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA3003 .... ۹۶

فهرست نشانه ها

قطر بزرگ سنبه	$D_{1\text{p}}$
قطر وسط سنبه	$D_{2\text{p}}$
قطر کوچک سنبه	$D_{3\text{p}}$
شعاع گوشه پله	$R_{1\text{p}}$
شعاع لبه سنبه	$R_{2\text{p}}$
طول وسط سنبه	$L_{1\text{p}}$
طول ابتدای سنبه	$L_{2\text{p}}$
قطر موقعیت‌دهی گرده	D_1
قطر وسط کانال	D_2
قطر انتهایی کانال	D_3
زاویه ناحیه (ب)	Ψ
زاویه ناحیه (ج)	φ
شعاع لبه ناحیه (ج)	R_1
شعاع لبه ناحیه (ب)	R_2
طول وسط کانال	L_1
طول انتهایی کانال	L_2
تنش تسلیم	σ_{y}
ضریب اطمینان	f
سطح مقطع	A
تنش	σ
چگالی	ρ
ضریب پواسون	ν
تنش حلقوی	σ_{θ}
بیشترین تنش برشی	τ_{Max}
استحکام کششی نهایی	σ_{UTS}
فاصله شعاعی	r
شعاع داخلی هسته قالب	a
شعاع خارجی هسته قالب	b
شعاع خارجی استوانه خارجی	c
مقدار تداخل	e
مدول یانگ	E
فشار داخلی	p
قطر خارجی گرده	D_{s}
قطر داخلی گرده	d_{s}
ضخامت گرده	t_{s}

فصل ۱ مقدمه

در بین تمام فرآیندهای تولید، فناوری شکل‌دهی فلزات دارای جایگاه ویژه‌ای است زیرا موجب تولید قطعات با خواص مکانیکی بهتر و با حداقل اتلاف مواد می‌شود. در شکل‌دهی فلزات، ماده آغازین دارای هندسه نسبتاً ساده‌ای است. ماده در طی یک یا چند عملیات، تغییر شکل مومسان می‌یابد و به هندسه نسبتاً پیچیده‌ای در می‌آید. شکل‌دهی فلزات شامل تعداد زیادی از فرآیندهای تولید است که محصولات صنعتی، قطعات نظامی و کالاهای مصرفی تولید می‌کنند. این فرآیندها شامل فرآیندهای شکل‌دهی حجمی[1] و فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی[2] است. ترکیب این فرآیندها، یک روش جدیدی را با نام فرآیند شکل‌دهی حجمی ورق فلزی[3] ایجاد کرده است.

کاربردهای اولیه‌ی SBMF به سال‌های اخیر برمی‌گردد. امروزه SBMF در صنایع هوافضا، خودروسازی، نیروگاهی و نظامی استفاده می‌شود. چرخ‌دنده فنجانی شکل داخلی و خارجی، چرخ‌زنجیر، قطعات فنجانی

[1] Bulk Forming
[2] Sheet Metal Forming
[3] Sheet Bulk Metal Forming (SBMF)

شکل، قطعات لبه‌دار و چرخ‌دنده مخروطی، نمونه قطعاتی هستند که معمولاً به وسیله‌ی SBMF انجام می‌گیرند [۱].

۱-۱- معرفی فرآیند SBMF

فرآیندهای ساخت و تولید قطعات صنعتی به دو گروه با براده‌برداری و بدون براده‌برداری تقسیم می‌شوند. تولید قطعات به کمک قالب از جمله قدیمی‌ترین روش‌های تولید بدون براده‌برداری است. قالب جزء ابزارهای دقیق به حساب می‌آید و استفاده از آن در تولید دارای مزایایی از جمله: صرفه‌جویی در مصرف مواد خام، امکان تولید انبوه قطعات، پایین بودن بهای تمام شده قطعات تولید شده، یکنواخت بودن قطعات تولید شده و بالا بودن قابلیت تعویض است. یکی از مهم‌ترین گروه فرآیندهای بدون براده‌برداری، شکل‌دهی فلزات[۱] است. عبارت شکل‌دهی فلزات به گروهی از روش‌های تولید اطلاق می‌شود که توسط آن‌ها ماده‌ی معین که معمولاً بدون شکل یا دارای هندسه ساده است، بدون اینکه در جرم یا ترکیب ماده تغییری ایجاد شود به قطعه سودمندی تبدیل می‌شود. شکل‌دهی فلزات شامل دو دسته است: (الف) فرآیندهای شکل‌دهی حجمی و (ب) فرآیندهای شکل‌دهی ورق. به عملیات تغییر شکل بر روی قطعاتی که دارای سطح بیرونی کوچکی نسبت به حجم قطعه باشند فرآیند تغییر شکل حجمی می‌گویند. در تمامی فرآیندهای تغییر شکل حجمی ضخامت یا سطح مقطع تغییر پیدا می‌کند؛ نظیر آهنگری[۲]، اکستروژن[۳]، نورد[۴] و کشش. در فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی محصولاتی که با استفاده از این فرآیندها ساخته می‌شوند بسیار متنوع‌اند. مانند شکل‌دهی خمشی، کشش عمیق[۵] و شکل‌دهی انبساطی. در واقع، روش‌های شکل‌دهی ورق فلزی از پرکاربردترین و ارزان‌ترین روش‌های شکل‌دهی محسوب می‌شود. [۲].

---

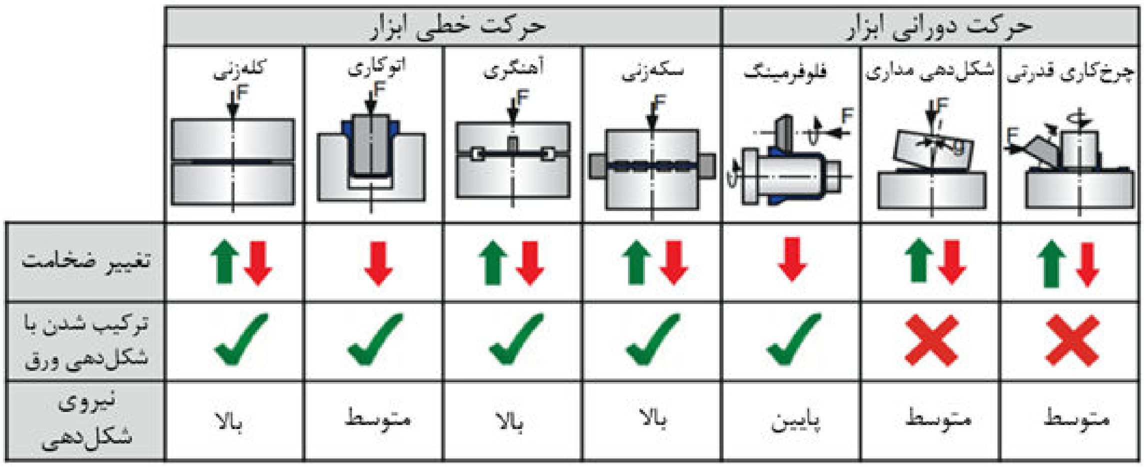
1 Metals Forming
2 Forging
3 Extrusion
4 Rolling
5 Deep Drawing

ترکیب شکل‌دهی معمولی ورق و شکل‌دهی حجمی یک فناوری جدید برای شکل‌دهی شکل‌های نیمه تمام و بسیار سبک وزن و با ضخامت‌های نازک است. فرآیند SBMF، اغلب ترکیبی از فرآیند شکل‌دهی ورق فلزی و شکل‌دهی حجمی است که در آن جریان مواد در سه بعد انجام می‌شود در صورتی که در شکل‌دهی سنتی ورق فلزی، معمولاً تغییری در ضخامت ورق ایجاد نمی‌شود و حجم عمده‌ای از تغییر شکل در ناحیه‌ی کوچکی متمرکز است. SBMF روشی جدید از فرآیندهای تولید است که باعث تولید قطعات فولادی سبک وزن با مقاومت بالا جهت پاسخ دادن به افزایش تقاضای مشتری ارائه شده است. در این فرآیندها، حجم زیادی از ورق فلزی بر اثر اعمال نیروها تغییر شکل داده و به شکل نهایی تبدیل می شود. در این فرآیند ورق‌ها تحت شکل‌دهی پیچیده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال قطعه‌ای از یک موتور خودرو مثل حلقه همگام‌ساز[1]، منجر به کاهش وزن خودرو و با ادغام آن با دیگر قطعات باعث افزایش قدرت خودرو می‌گردد. استفاده از فرآیندهای شکل‌دهی برای تولیدات انبوه این نوع از محصولات ایده‌آل به نظر می‌رسد. این روش معمولاً باعث به حداقل رساندن ضایعات و ساخت هزینه مواد می شود [۳].

۱-۲- فرآیندهای SBMF

دسته‌بندی فرآیندهای SBMF شامل فرآیندهایی است که به تازگی ترکیب شده است و همچنین کاربرد آنها گسترش یافته است. شکل ۱-۱ طبقه‌بندی از فرآیندهای SBMF را نشان می‌دهد.

[1] Synchronizer ring



شکل ۱-۱: طبقه‌بندی فرآیندهای SBMF [۴]

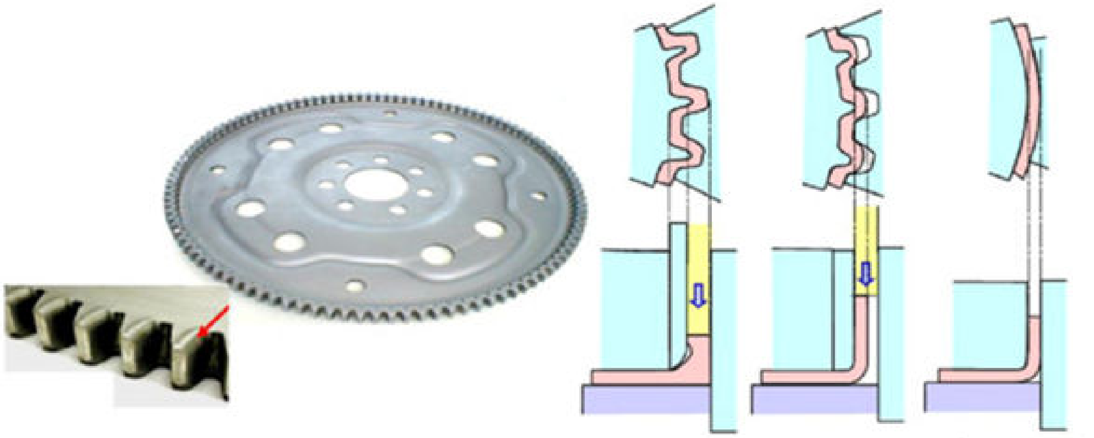
از آنجایی که محصولات تولید شده به صورت نیمه تمام می‌باشد، ضخامت نمونه به طور معمول بین ۱ تا ۵ میلیمتر متغیر است و معمولاً از ورق و یا صفحه[۱] استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱-۱ نیز نمایان است ابزارهای فرآیند SBMF ممکن است حرکت خطی یا چرخشی داشته باشند و می‌توانند با روش‌های مختلف نیز ترکیب شوند [۴]. در ادامه انواع فرآیندهای مختلف شکل‌دهی حجمی ورق فلزی و کاربرد آن‌ها در صنعت شرح داده شده است.

۱-۲-۱ کله‌زنی[۲] ورق فلزی

فرآیند کله‌زنی از خانواده آهنگری باز است که جایگاه ویژه و مهمی در صنعت دارد. عملیات کله‌زنی به شکل‌ها و اهداف مختلفی در صنعت انجام می‌پذیرد. گاهی این فرآیند برای چاق کردن قطعه یعنی برای افزایش قطر یا ضخامت استفاده می‌گردد. از نظر ظاهر، سنبه‌ها در این فرآیند می‌توانند موازی یکدیگر و یا دارای شکل‌های متفاوت و یا منحنی شکل باشند. در حالت‌هایی که این فرآیند برای پیش‌فرم استفاده می‌شود، شکل سر سنبه‌ها به صورتی انتخاب می‌گردد که برای حالت‌های بعدی شکل‌دهی، فرم شکل داده شده مناسب باشد. این پروسه در آزمایشگاه نیز برای به دست آوردن منحنی تنش-کرنش در حالت

---
[1] Plate
[2] Upseting

فشاری استفاده می‌شود [۱]. در شکل ۱-۲ نمونه‌ای از تولید چرخ‌زنجیر که در چند مرحله شکل‌دهی می-شود و کله‌زنی در مرحله اول آن انجام می‌گیرد را نشان می‌دهد.

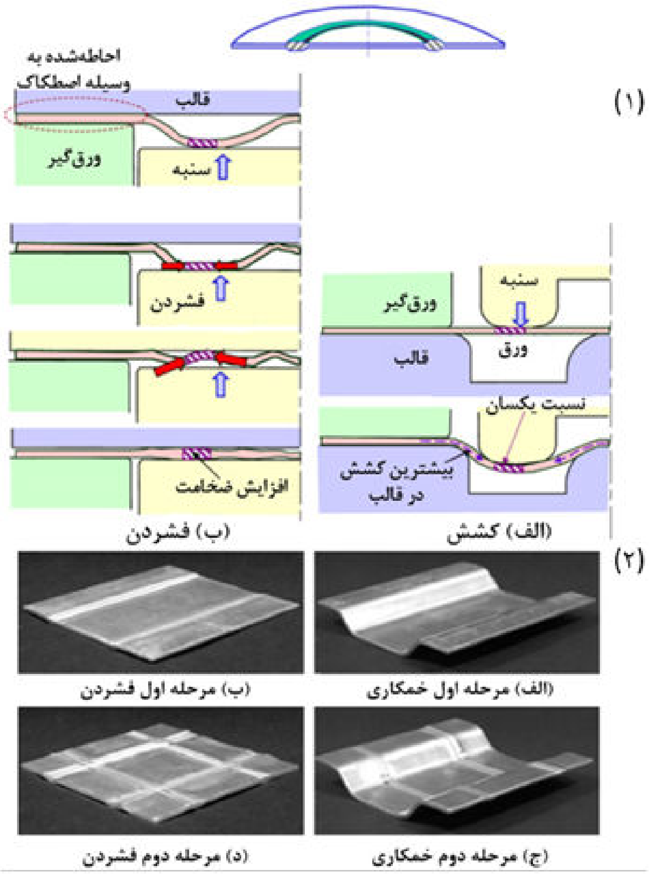


شکل ۱-۲: شکل‌دهی چرخ زنجیر دارای دندانه‌های ضخیم [۵]

در فرآیند کله‌زنی دست‌یابی به فشار همگن روی سطح قطعه، به خاطر وجود اصطکاک، غیر ممکن است و به همین خاطر اصطکاکی که بین انتهای نمونه و ابزار وجود دارد در ظاهر سطح خارجی قطعه تغییر شکلی را ایجاد می‌نماید که به آن بشکه‌ای شدن[1] می‌گویند. جهت توزیع یکنواخت تنش می‌توان با قرار دادن نمونه بین دو سنبه مخروطی شکل به دست آورد. پیدا کردن زاویه‌ی صحیح مخروط و ماشین‌کاری دقیق دو سر نمونه دشوار است. به همین دلیل این کار به راحتی قابل انجام نیست. یک تقریب برای فشار همگن را می‌توان با روانکاری خوب و مناسب بین صفحات بالا و پایین پرس و دو سر نمونه به دست آورد. این کار را باید با بارگذاری‌های جزئی انجام داد و بین هر بارگذاری جزئی[2]، روانکاری را تکرار کرد. به محض مشاهده تغییر شکل جداره استوانه به صورت بشکه، قطر آن را قبل از ادامه کار کاهش داد، آنگاه بر روی صفحات، تنش تسلیم، برابر با فشار خواهد بود و برای اندازه‌گیری کرنش بار برداشته شده و کرنش اندازه‌گیری می‌شود و این در شرایطی است که باری بر روی نمونه نباشد. سپس برای ادامه کار دوباره

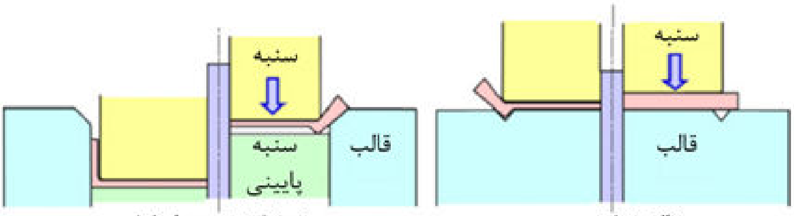
[1] Barrelling
[2] Partial

بارگذاری می‌شود. در شکل ۱-۳ نمونه‌ای از تولید گرده‌های تیلورد با ضخیم شدن موضعی که در فرایند کشش عمیق برای شکل دادن قطعات فنجانی مربعی شکل کاربرد دارند را نشان می‌دهد.

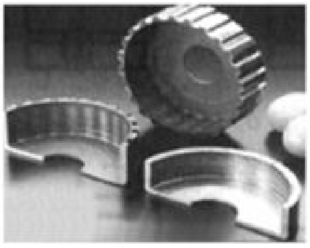


شکل ۱-۳: (۱) شکل‌دهی دو مرحله‌ای گرده‌های تیلورد با ضخیم شدن موضعی (۲) شکل‌دهی ورق‌های تیلورد با ضخیم شدن موضعی در فرآیند کشش عمیق فنجان‌های مربعی شکل [۶]، [۷]

در شکل ۱-۴ شکل دادن دندانه‌ی خارجی در قطعات فنجانی شکل که دارای گوشه‌های تیز است را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱-۵ شکل دادن مرحله‌ای قطعات فنجانی شکل که دارای لبه‌های ضخیم است را نشان می‌دهد.

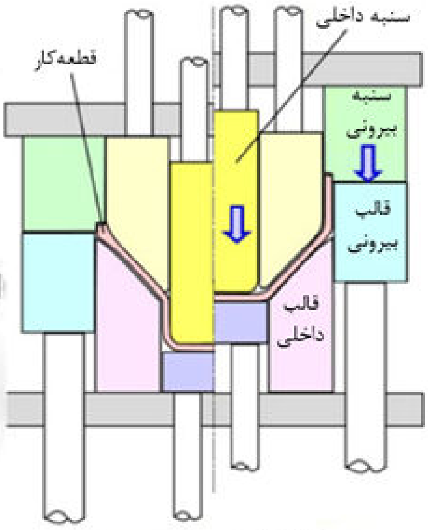


(ب) کشش و اتوکاری (الف) فشردن



(ج) محصول تولیدی

شکل ۱-۴: شکل دادن دندانه‌ی خارجی در قطعات فنجانی شکل با داشتن گوشه‌های تیز [۸]



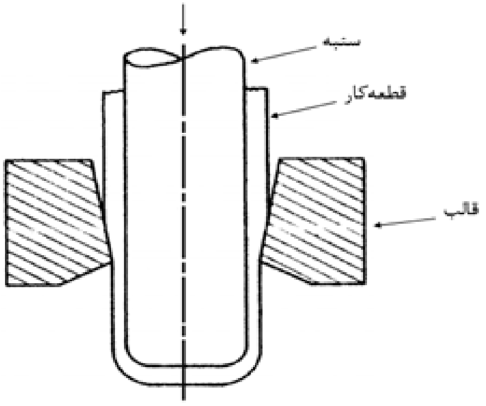
(ب) محصول تولیدی (الف) کشش و فشردن

شکل ۱-۵: شکل دادن مرحله‌ای قطعات فنجانی شکل با داشتن لبه‌های ضخیم [۹]

۱-۲-۲ فرآیند اتوکاری

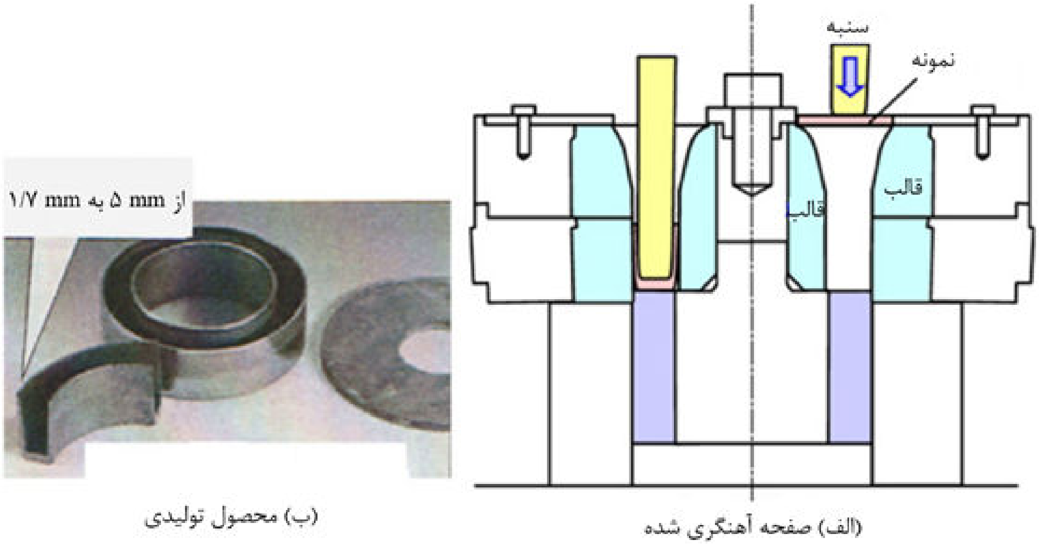
اتوکاری از جمله روش‌های شکل دادن فلزات است که کاربرد وسیعی در صنعت دارد. ترکیب این فرآیند با کشش عمیق، امکان تولید قطعات توخالی جداره نازک با ضخامت دیواره یکنواخت را فراهم می‌آورد. در این روش می‌توان نسبت ارتفاع به قطر قطعه توخالی را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. در فرآیند

اتوکاری، قطعه جداره نازک تولید شده در فرآیند کشش عمیق، توسط یک سنبه متحرک از درون یک قالب مناسب عبور داده می‌شود تا ضخامت دیواره آن کاهش یابد [۱۰]. شکل ۱-۶ فرآیند اتوکاری را که شامل یک قالب ساکن و یک سنبه متحرک است را نشان می‌دهد.



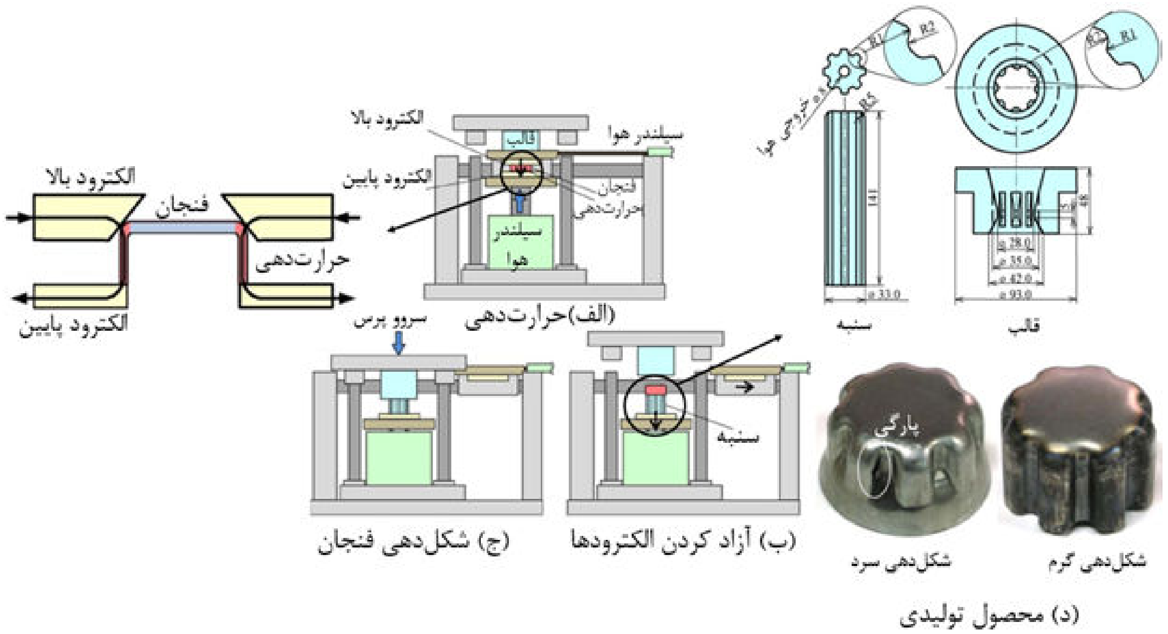
شکل ۱-۶: فرآیند اتوکاری

در شکل ۱-۷ شکل دادن قطعات با استفاده از فرآیند اتوکاری و شکل ۱-۸، شکل‌دهی با استفاده از فرآیند شکل‌دهی هزارخاری[1] را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۷: شکل دادن ضخامت کم در دیواره‌ی قطعات با استفاده از فرآیند اتوکاری [۱۱]

1 Spline forming



شکل ۱-۸: شکل‌دهی هزارخاری دندانه‌های قطعه فولادی استحکام بالا با استفاده از روش حرارت‌دهی در دیواره‌ی فنجان [۱۲]

۱-۲-۳ آهنگری

در بین تمام فرآیندهای تولید، فناوری آهنگری دارای جایگاه ویژه‌ای است زیرا کمک می‌کند تا قطعات با خواص مکانیکی عالی با کمترین اتلاف ماده تولید شود. در آهنگری، ماده آغازین دارای هندسه نسبتاً ساده‌ای است؛ این ماده طی یک یا چند عملیات به یک محصول با ترکیب نسبتاً پیچیده تغییر شکل مومسان می‌یابد. آهنگری به ابعاد شکل نهایی یا نزدیک شکل نهایی، نیازمندی‌های براده‌برداری را به شدت کاهش می‌دهد که به صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در ماده و انرژی منجر می‌شود. آهنگری معمولاً به قالب نسبتاً گرانی نیاز دارد. در نتیجه، این فرآیند زمانی صرفه‌ی اقتصادی دارد که تعداد زیادی از قطعات تولید شوند و یا خواص مکانیکی مورد نیاز در محصول نهایی را تنها با یک فرآیند آهنگری بتوان بدست آورد.

در حال حاضر بسیاری از قطعات صنعتی که در ماشین‌ها و صنایع نظامی استفاده می‌شود با روش آهنگری تهیه می‌شوند. این فرآیند دارای اهمیت زیادی در صنعت است و یکی از دلایل آن وسعت کاری و

دامنه وسیع تولیدات، به این روش می‌باشد. قطعات تولید شده به این روش عموماً دارای دقتی مناسبی نیستند و برای رسیدن به دقت لازم، عملیات ماشینکاری پس از انجام این فرآیند بر روی قطعه انجام می-گیرد. فرآیندهای آهنگری را می‌توان در دسته‌بندی‌های مختلف بیان نمود. گاهی دسته‌بندی بر اساس حرکت ماده در قالب است. به طور مثال می‌توان آن را به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد.

الف) آهنگری باز[1] ب) آهنگری بسته[2]

در آهنگری باز، عامل یا نیرویی در مقابل جریان و حرکت ماده وجود ندارد. در آهنگری بسته عواملی مانع از جریان آزاد فلز شده و بنابراین ماده باید با توجه به شکل قالب جریان یابد.

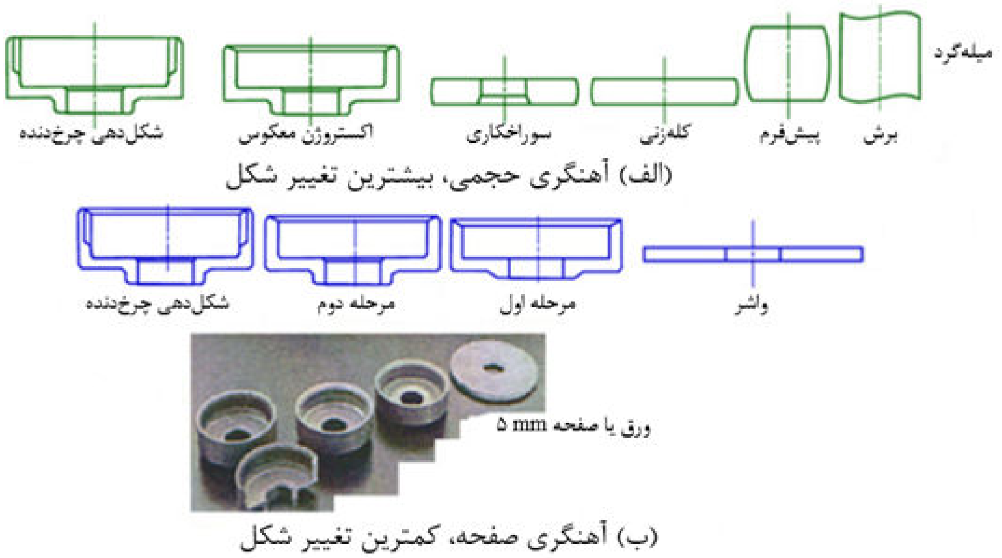
فرآیند آهنگری را می‌توان بر اساس دمایی که در آن انجام می‌شود، به ۳ دسته تقسیم بندی کرد و نتیجه به صورت زیر می‌باشد.

الف) آهنگری سرد ب) آهنگری گرم ج) آهنگری داغ

نوع اول در دمای محیط انجام می‌شود و دارای دقت مناسبی می‌تواند باشد و نیروی زیاد و پرس قوی نیاز دارد. نوع دوم که در بین $\frac{1}{2}$ تا $\frac{1}{3}$ دمای نقطه ذوب انجام می‌گیرد، نیروی کمتری لازم دارد و دقت کمتری نسبت به حالت قبل در قطعه نهایی می‌دهد. در آهنگری داغ شبکه کریستال‌ها و شکل آن‌ها تغییر می‌یابد و دمای انجام آن بیشتر از $\frac{1}{2}$ نقطه ذوب می‌باشد. یک حالت دیگر نیز می‌توان در نظر گرفت و آن حالت ایزوترم است، یعنی دمای فرآیند ثابت باشد یا به تعبیری، حرارت از نظر تنش و نیرو عامل تغییری در قطعه نباشد. آچارهای صنعتی با روش آهنگری تولید شده و در مرحله آخر با یک قالب آرایش دقت نهایی را بدست می‌آورند. میل‌لنگ‌ها و میل‌پولوس ماشین‌های سواری با این روش تولید می‌شوند و نهایتاًعملیات تراش و سنگ‌زنی روی آن‌ها انجام خواهد شد. اما اکثر قطعات ذکر شده دارای شکل‌های پیچیده‌ای می-باشند و عموماً در یک مرحله تولید نمی‌شوند و ابتدا چند مرحله پیش‌فرم را می‌گذرانند، سپس فرم اصلی

[1] Open Die
[2] Close Die

را می‌گیرند [۱]، [۱۴]. شکل ۱-۹ نمونه‌های تولید شده از فرآیند آهنگری را نشان می‌دهد. در این شکل بین آهنگری پلیت و آهنگری حجمی ورق یا پلیت مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است فرآیند آهنگری حجمی با تعداد مراحل کمتری از آهنگری معمولی باعث تولید قطعه می‌گردد.



شکل ۱-۹: مقایسه بین آهنگری حجمی و آهنگری صفحه [۱۴]

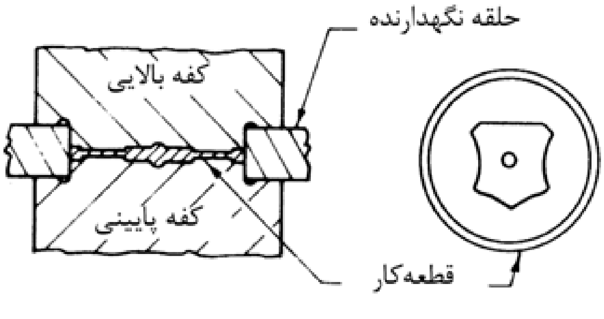
۱-۲-۴ سکه‌زنی[1]

در عملیات فلزکاری ورق‌ها، سکه‌زنی برای شکل‌دادن فرورفتگی‌ها یا برآمدگی‌های مقاطع در قطعه استفاده می‌شود. در طی فرآیند، فلز بدلخواه نازک یا کلفت می‌شود تا پستی یا بلندی‌های مطلوب در مقطع ایجاد شود. از این روش به طور گسترده برای حروف‌زنی روی ورق فلزی یا قطعاتی نظیر سکه‌ها استفاده می‌شود. پایین‌زنی، نوعی فرآیند سکه‌زنی است که در آن فشار عملیات باعث کاهش ضخامت در ناحیه‌ی خمشی می‌شود.

فرآیند سکه‌زنی عبارتند از: سکه‌زنی بدون پلیسه، سکه‌زنی با پلیسه، سکه‌زنی در قالب بسته و اندازه‌سازی تقسیم‌بندی می‌شوند. این فرآیند در سکه‌های فلزی، قطعات زینتی مانند ظروف غذا خوری طرح‌دار،

[1] Coining

دکمه‌های فلزی و اندازه‌سازی قطعات موتور هواپیما کاربرد دارد. شکل ۱-۱۰ فرآیند سکه‌زنی را نشان می‌دهد [۱۵].



شکل ۱-۱۰: فرآیند سکه‌زنی

۱-۲-۵ فلوفرمینگ[1]

فلوفرمینگ فلزات یکی از قدیمی‌ترین فرآیندهای تولید اقتصادی و ارزان قطعات متقارن و توخالی فلزی می‌باشد. بنابر مدارک و اسناد تاریخی، فلوفرمینگ فلزات از زمان مصریان باستان شناخته شده بود و برای ساخت بشقاب‌های نقره‌ای از آن استفاده می‌شد. اما گفته می‌شود که پایه‌های اصلی صنعت فلوفرمینگ فلزات در ابتدای قرن دهم میلادی توسط چینی‌ها بنا نهاده شد. از آن زمان سال‌های زیادی گذشت تا این فرآیند به جهان غرب برده شد. این صنعت برای اولین بار در قرن ۱۳ میلادی و در زمان سلطنت ادوارد سوم به انگلستان وارد شد و پس از یک دوره پانصد ساله در حدود سال ۱۸۴۰ میلادی فردی به نام جردن این صنعت را به آمریکا وارد کرد. در ابتدا فرآیند توسط دستگاه‌های ساده‌ای انجام می‌گرفت که به علت دستی بودن هدایت ابزار نقش اپراتور و داشتن مهارت و تجربه کافی در این کار بسیار حائز اهمیت بود. طی سال‌های متمادی فرآیند فلوفرمینگ فلزات به روشی غیر قابل تغییر باقی ماند. در آن سال‌ها اصولاً از فلزات نرم مانند آلومینیوم و مس و غیره با ضخامت‌های کم برای فلوفرمینگ استفاده می‌شد و فلزات سخت و ورق‌های ضخیم را نمی‌توانستند توسط فلوفرمینگ شکل‌دهی نمایند.

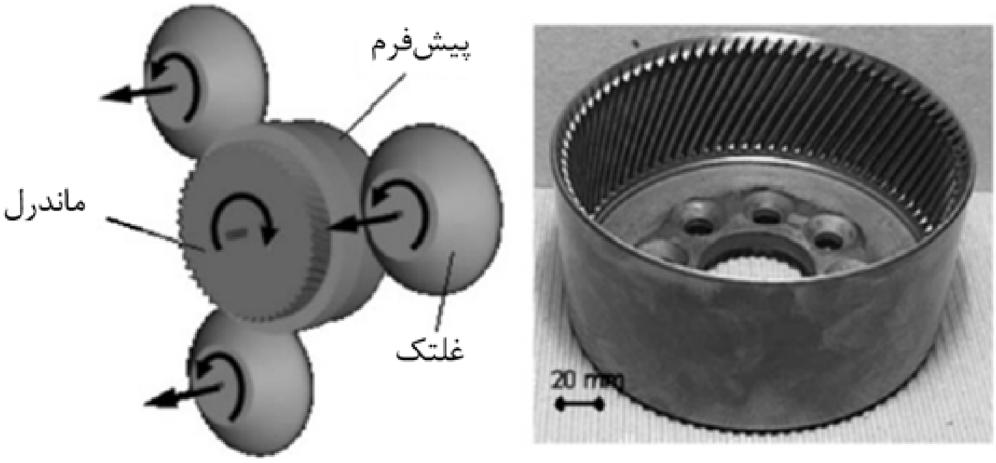
[1] Flow Forming

کم کم با گسترش نیازهای صنعت به قطعات متقارن، توخالی و دقیق‌تر از نظر ابعادی، این فرآیند نیز روند تکاملی خود را طی نمود. متعاقباً در طراحی دستگاه‌های فلوفرمینگ هدایت ابزارهای شکل‌دهی به جای دست اپراتور به عهده تجهیزات مکانیکی گذاشته شد. توسط این فرآیند امکان فلوفرمینگ فلزات سخت‌تر و با ضخامت بیشتر وجود داشت.

در طول سال‌های اخیر فرآیند فلوفرمینگ به طور هم‌زمان در چندین کشور از جمله سوئد، آلمان، انگلستان، ژاپن و آمریکا توسعه‌ی فراوانی یافت و متعاقب آن روش‌های دیگری از این فرآیند مانند شکل-دهی بر شکل و فلوفرمینگ لوله یا فلوفرمینگ معرفی شدند. با ظهور هواپیما همراه با پیشرفت شگفت-انگیز موتور توربین گاز این هواپیما نیاز به فرآیندهای فلوفرمینگ و دیگر فرآیندهای مرتبط با آن‌ها بیش از پیش احساس شد و این مسئله عامل بسیار مهمی در توسعه‌ی این فرآیند بود. دقت ابعادی قطعات تولیدی و اقتصادی بودن این فرآیندها دو عامل بسیار مهم در گسترش گرایش به استفاده از این فرآیندها در صنایع مختلف به خصوص صنایع هوافضایی بود. متقابلاً به علت اهمیت صنایع هوافضا و نیز صنایع تسلیحاتی برای قدرت‌های جهانی گسترش و توسعه فرآیندهای فلوفرمینگ روند فزاینده‌ای پیدا کرد به گونه‌ای که امروزه تایید تسلیحات پیشرفته و کلیدی مانند: تولید بدنه‌های جدار نازک راکت و موشک، موتور موشک، محفظه‌های CNG و طیف وسیعی از مخازن تحت فشار بدون استفاده از فرآیندهای فلوفرمینگ ممکن نیست [۱۶]. شکل ۱-۱۱ نمونه‌ای از قطعات دقیق مورد مصرف در صنایع که به روش-های فلوفرمینگ ساخته شده‌اند را نشان می‌دهد.

شکل ۱-۱۱: نمونه‌ای از قطعات صنعتی تولید شده با استفاده از فرآیند فلوفرمینگ [۱]

فرآیند فلوفرمینگ یا چرخ‌کاری لوله[1]، زیر شاخه‌ای از کار سرد و بدون براده‌برداری است که در حضور مقدار بسیار زیادی از سیال خنک‌کننده انجام می‌شود. در محاسبه طول نهایی لوله، فلوفرمینگ از رابطه حجم ثابت مواد در طول فرآیند پیروی می‌کند. در بیشتر موارد سطح مقطع دیواره تا بیش از ۹۰ درصد ضخامت اولیه‌ی دیواره کاهش می‌یابد. کیفیت سطح قسمت داخلی قطعه نهایی تقریباً برابر با کیفیت سطح خارجی ماندرل است . شکل ۱-۱۲ نمونه‌ای از قطعه‌ای که با استفاده از روش فلوفرمینگ ساخته شده است، را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۲: چرخدنده داخلی تولید شده با استفاده از فلوفرمینگ

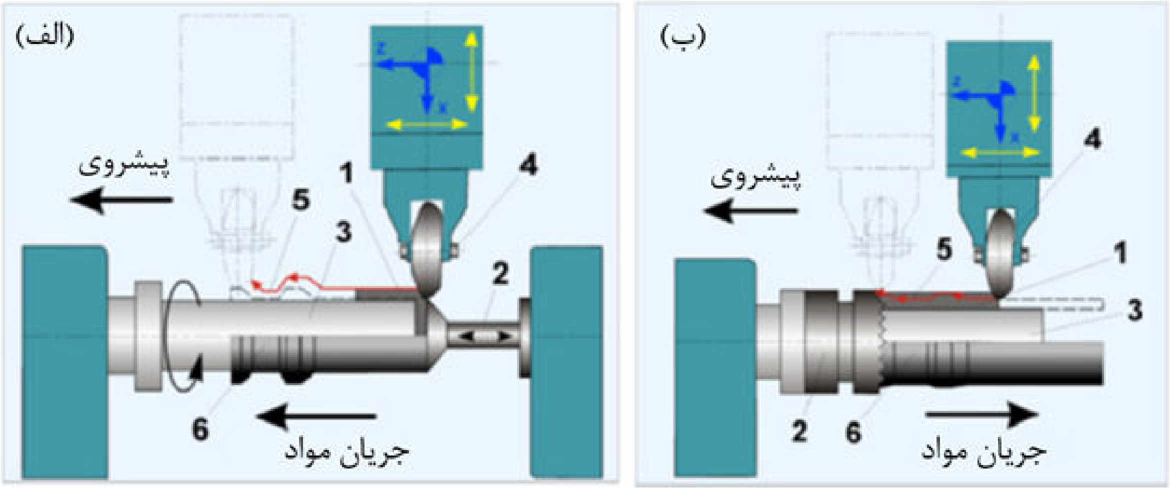
[1] Tube Spinning

۱-۲-۶ روش‌های فلوفرمینگ

دو نوع روش شناخته شده و رایج در فلوفرمینگ با نام‌های مستقیم و معکوس وجود دارند که بیانگر ارتباط میان جریان فلز با جهت حرکت ابزار در طول عملیات می‌باشند.

۱-۲-۷ فلوفرمینگ مستقیم[1]

این روش برای شکل‌دهی به پیش‌فرم‌هایی که یک‌طرف آن به صورت کامل یا ناقص بسته باشد، کاربرد دارد. در فلوفرمینگ مستقیم یک زبانه‌ی اضافی روی ماندرل وجود دارد که برای ثابت نگه داشتن پیش‌فرم است. در این روش، امتداد ازدیاد طول قطعه‌کار در جهت حرکت محوری غلتک‌ها است. شکل ۱-۱۳ (الف) فرآیند فلوفرمینگ مستقیم را نشان می‌دهد. برتری اصلی فلوفرمینگ مستقیم نسبت به فلوفرمینگ معکوس این است که مشکل پیچش در قطعه‌کار نهایی وجود نخواهد داشت و دقت بیشتری دارد.



شکل ۱-۱۳: فرآیند فلوفرمینگ (الف) فلوفرمینگ مستقیم (ب) فلوفرمینگ معکوس [۱۷]

[1] Forward Flow Forming

۱-۲-۸ فلوفرمینگ معکوس[1]

نوع دیگر فلوفرمینگ، فلوفرمینگ معکوس است که برای قطعات با سوراخ راه‌به‌در استفاده می‌شود. در این فرآیند، برای ثابت نگه داشتن پیش‌فرم به ماندرل از یک حلقه دندانه‌دار استفاده می‌شود. کاربرد دیگر این حلقه برای بارگذاری مجدد قطعه تمام شده است. شکل ۱-۱۳ (ب) فرآیند فلوفرمینگ معکوس را نشان می‌دهد.

روش فلوفرمینگ معکوس نسبت به روش مستقیم دو برتری اصلی دارد که عبارتنداز:

۱- پیش‌فرم مورد مصرف، لوله‌ای شکل و ساده است. چون دیگر برای ثابت نگه داشتن قطعه‌کار نیازی به فلنج و لبه نیست.

۲- برای ایجاد کاهش در ضخامت دیواره قطعه‌کار، کافی است، غلتک‌ها در جهت محور به اندازه ۵۰ درصد طول نهایی قطعه‌کار جابجا شوند. یعنی اگر غلتک‌ها در جهت محور اصلی دستگاه به اندازه x حرکت کنند قطعه‌کاری با طول 2x تولید می‌گردد. این کار علاوه بر افزایش نرخ تولید، باعث تولید قطعاتی با طول بیشتر از ظرفیت دستگاه می‌شود.

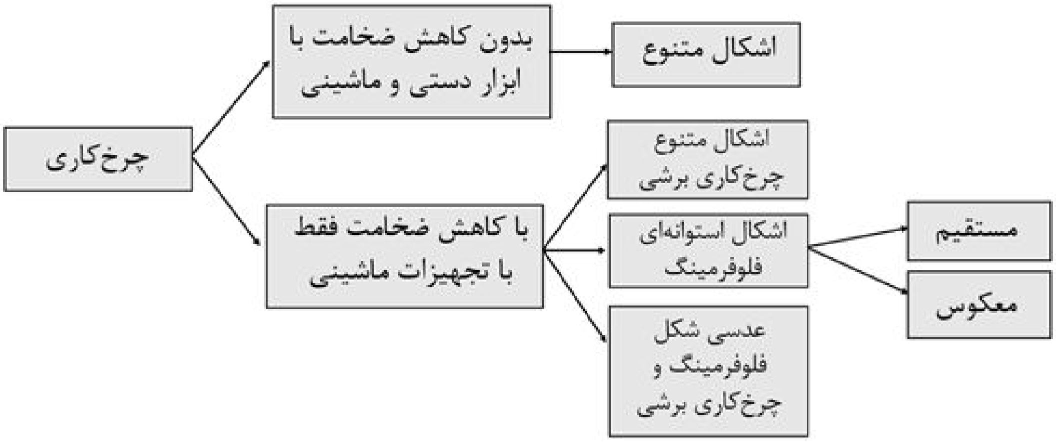
فلزاتی که نرمی و شکل‌پذیری نسبتاً پایینی دارند، با این روش کاهش ضخامت قابل قبولی را از خود نشان می‌دهند. بارزترین ضعف روش معکوس، مربوط به این نکته است که قسمت سر لوله که ابتدا مورد شکل-دهی قرار می‌گیرد بیش‌ترین فاصله را از موضع اولیه خودش طی می‌کند. در نتیجه آن قسمت از لوله بیش‌ترین پتانسیل را در پذیرش انحراف و پیچش خواهد داشت [۱۸].

نحوه‌ی استفاده از این فرآیند به این شکل است که در آن با استفاده از ترکیب نیرو و چرخش، اشکالی با محور تقارن و بدون درز قابل تولید می‌باشند. در این روش فلز که عمدتاً به شکل ورق و یا قطعه‌ی پیش شکل‌دهی شده می‌باشد بین ماندرل و ابزار شکل‌دهی تحت فشار قرار گرفته و شکل می‌گیرد. فلوفرمینگ

[1] Backward Flow Forming

یکی از اقتصادی‌ترین روش‌ها در تولید محدود و نمونه‌سازی برای ساخت قطعات فلزی با تقارن محوری می‌باشد.

در این فرآیند، قطعه‌کار در ناحیه‌ای بین ماندرل دوار و ابزار (اهرم یا غلتک) که به صورت محوری و یا محوری-شعاعی حرکت می‌کند، به صورت تک نقطه‌ای در محل تماس تغییر شکل دائمی ایجاد می‌کند. با این روش قطعاتی با اشکال مخروط، نیم‌کره، لوله و استوانه توخالی در طیفی گسترده از جهت اندازه و کانتور ساخته می‌شود. اگر چه ساخت قطعاتی با اشکال بیضوی هم با این فرآیند امکان‌پذیر است ولی به سهولت شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای نیست. شکل ۱-۱۴ فرآیندهای مختلف فلوفرمینگ را نشان می‌دهد که بر اساس روش تولید، تغییر ضخامت و درجه حرارت تقسیم‌بندی شده است.



شکل ۱-۱۴: دسته‌بندی انواع فرآیندهای فلوفرمینگ از نظر تغییر ضخامت و اشکال قابل تولید [۱۹]

امروزه اکثر ماشین‌های چرخ‌کاری لوله برای نظارت بر عملیات چرخ‌کاری به سیستم‌های کنترل عددی مجهز شده‌اند. در چرخ‌کاری لوله استوپ‌های مکانیکی برای محدود کردن حرکت مجموعه‌ی کشویی‌های متقاطع به کار می‌روند. با این کار، قطر قطعه‌کار قابل کنترل می‌شود. در ماشین‌های مجهز به کنترل عددی، به جای استوپ‌های مکانیکی از کنترل رایانه‌ای استفاده می‌شود که به دلیل انعطاف‌پذیر بودن نسبت به استوپ‌های مکانیکی برتری دارند. با این روش به راحتی می‌توان خیز را جبران کرد و از

مخروطی شدن لوله جلوگیری کرد. جدیدترین ابزاری که برای کنترل و جبران خیزها در ماشین‌های چرخ‌کاری استفاده شده است، آشکار کننده‌های لیزری هستند که به صورت خودکار، عملیات اندازه‌گیری و جبران انحرافات را انجام می‌دهند [۲۰].

۱-۲-۹ مزایا و معایب فلوفرمینگ

مزایای فرآیند فلوفرمینگ:

- تولید بدون براده
- تولید قطعات بدون درز و یکپارچه
- کار سرد و بهبود خواص ماده مثل استحکام تسلیم، عمر خستگی و غیره
- تولید قطعات با ضخامت دیواره متغیر
- تولرانس کنترل شده و دقت بسیار بالا در تولید
- پرداخت سطح عالی
- عدم نیاز به عملیات‌هایی نظیر ماشین‌کاری، سنگ‌زنی و غیره.
- بالا بودن سرعت تولید
- اقتصادی بودن در مقایسه با سایر روش‌ها

معایب فلوفرمینگ عبارتنداز:

- تغییر نامطلوب خواص مواد
- اعوجاج[۱] در قطعه‌کار

مهم‌ترین محدودیت‌های این فرآیند، عبارتند از:

[1] Distortion

- خصوصیات ذاتی فلز در زمینه شکل‌پذیری؛ محدودیت اصلی در اجرای این فرآیند به میزان تحمل فلز در مقابل تغییر شکل پلاستیک در یک مرحله بستگی دارد. البته با انجام عملیات آنیل بین مرحله‌ای می‌توان این محدودیت را تا حدی جبران کرد.
- قدرت و توان دسترس ماشین‌آلات [۱۸].

۱-۲-۱۰ شکل‌دهی مداری[1]

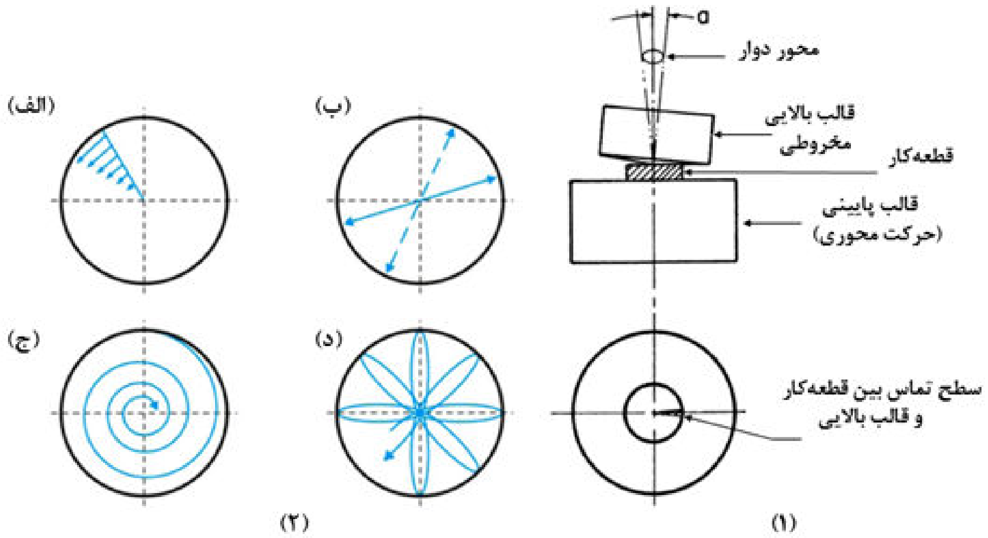
شکل‌دهی مداری یا آهنگری دوار یک فرآیند آهنگری دو قالبه است که فقط یک قسمت کوچک از قطعه-کار در هر لحظه و به صورت پیوسته تغییر شکل می‌یابد. باید توجه داشت که آهنگری دوار با فرآیند آهنگری شعاعی[2] اشتباه گرفته نشود. آهنگری شعاعی یک فرآیند شکل‌دهی گرم و سرد است که از دو یا چند سندان یا قالب شعاعی برای تولید جسم صلب یا قطعات لوله‌ای با سطح مقطع‌های ثابت یا متغیر در طول آن‌ها استفاده می شود. در شکل‌دهی مداری محور قالب بالایی در یک زاویه کمی نسبت به محور قالب پایین انحراف دارد که باعث می شود نیروی آهنگری فقط به سطح کوچکی از قطعه‌کار وارد شود. وقتی که یک قالب نسبت به قالب دیگر می‌چرخد، سطح تماس بین قالب و قطعه‌کار که به آن اصطلاحاً رد پا (اثر قالب) می‌گویند به صورت پیوسته داخل قطعه‌کار گسترش پیدا کرده و تغییر شکل تا حصول شکل نهایی به صورت تدریجی انجام می‌گیرد.

زاویه‌ی انحراف بین دو قالب نقش بسیار مهمی در اندازه نیرویی که به قالب وارد می شود دارد. زاویه انحراف بیشتر باعث رد پای کوچک‌تر و اندازه نیروی کمتر برای کامل کردن همان مقدار تغییر شکل در مقایسه با سطح تماس بیشتر می‌شود. این زاویه‌ی انحراف معمولاً در حدود ۱ تا ۲ درجه است. توجه به این نکته ضروری است که هر چه این زاویه انحراف بیشتر باشد طراحی، نگهداری و تعمیرات قالب مشکل-تر است.

---

1 Orbital Forming
2 Radial Forging

مرسوم‌ترین روش انجام فرآیند در حالتی است که قالب بالایی به دور محور قالب پایینی بچرخد. در شکل ۱-۱۵ مثال‌های دیگری از حرکت قالب بالایی در عرض قطعه‌کار به صورت مستقیم، مارپیچ و یا به صورت حرکت مداری می‌باشد.



شکل ۱-۱۵: (۱) اساس ماشین‌های آهنگری دورانی یا مداری (۲) انواع حرکت‌های قالب بالایی (الف) حرکت دورانی یا شعاعی (ب) حرکت خط مستقیم (ج) حرکت مارپیچی (د) حرکت ستاره‌ای [۲۱]

قطعاتی مانند چرخ‌دنده‌های مخروطی، فلانچ‌ها، توپی‌ها، بادامک‌ها، یاتاقان غلتکی، قطعات کلاچ شاخکی، دیسک‌های چرخ با توپی، رینگ‌های یاتاقان، رینگ‌هایی با پروفیل‌های مختلف و پوشش‌های انتهای یاتاقان را می‌توان با این روش تولید کرد. این قطعات متقارن محوری هستند و توسط حرکت دورانی شکل داده می‌شوند. این فرآیند مخصوصاً برای قطعاتی که دارای نسبت طول به قطر بالا هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطعات تولیدی فولادی با درجه سختی راکول سی قابلیت آهنگری دوار خوبی دارند. عموماً مواد سخت‌تر باید آهنگری گرم شوند.

از مزایای شکل‌دهی دوار می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: ۱- نیروی کمتر برای شکل‌دهی به دلیل سطح تماس کمتر ۲- اصطکاک کمتر بین قالب و قطعه‌کار ۳- دقت بالا ۴- عدم نیاز جابه‌جایی قطعه‌کار بین

ایستگاه‌های کاری ۵- قیمت ابزار کمتر نسبت به شکل‌دهی معمولی ۶- نیروی شکل‌دهی کمتر اجازه می‌دهد قطعاتی که در فرآیند معمولی باید گرم‌کار شوند به صورت سردکار شکل گیرند. ۷- نیاز به روانکاری کمتر

از معایب این روش هم می‌توان به ۱- گران بودن تجهیزات ۲- مشکل بازگشت الاستیک قطعه نهایی ۳- نازک شدن مرکزی قطعات اشاره نمود [۲۲].

۱-۳- معرفی تریبولوژی[1] در SBMF

در اطراف ما فرآیندهای بی‌شماری وجود دارند که به حرکت و رفتار دینامیکی جامدات، مایعات و گازها وابسته‌اند. به عنوان مثال جریان داشتن خون در رگ‌ها، حرکت یک دوچرخه، بالا رفتن آسانسور و غیره نتیجه فعالیت سیستم‌های بیولوژیکی و مکانیکی هستند. علاوه بر این‌ها، برخی پدیده‌های غیر مکانیکی که در مبحث الکترونیک یا اپتیک قرار می‌گیرند نیز بر پایه حرکت ذراتی بسیار کوچک مانند الکترون‌ها، یون‌ها و کوانتوم استوار شده‌اند. معمولاً هر جا حرکتی وجود داشته باشد، مقاومت در برابر حرکت یا اصطکاک هم وجود دارد. پدیده‌ی اصطکاک به دلیل برهم کنش‌های فیزیکی بین اجسامی که نسبت به هم حرکت می‌کنند، به وجود می‌آید. اگر یکی از اجسام متحرک، جامد باشد تأثیر اصطکاک به صورت سایش ظاهر می شود که معمولاً به صورت تخریب سطحی جسم جامد خود را نشان می‌دهد. معمولاً هر گاه صحبت از اصطکاک می‌شود، تصور می‌شود دو جسم جامد با یکدیگر در تماس‌اند؛ اما حرکت نسبی بین جامد و مایع (کشتی ها، لوله آب) یا بین جامد و گاز (هواپیما ها، توربین گازی) نیز باعث به وجود آمدن اصطکاک می‌گردد.

با پیشرفت‌های صنعتی پس از جنگ جهانی دوم، نیاز به استفاده از سرعت‌های بالاتر و نیروها و درجه حرارت‌های بیشتر، بیش از پیش احساس می‌شد. این مسأله به همراه روش‌های نوین تولید و نیز ساخت

[1] Tribology

مواد مهندسی جدید باعث شد تا اصطکاک، سایش و روانکاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شود. اهمیت موضوع سبب شد تا جمعی از متخصصین و صاحب‌نظران در سال ۱۹۶۶ در کشور انگلستان دور هم جمع شوند و جنبه‌های مختلف این پدیده‌ها را مورد بررسی قرار دهند. این دانشمندان پس از پایان کار خود در گزارشی توصیه کردند که باید مطالعات مربوط به اصطکاک، سایش و روانکاری سامان یابد و جایگاهی مستقل در علوم مهندسی پیدا کند. آنها پس از مشورت با دست‌اندرکاران لغت نامه آکسفورد، واژه تریبولوژی را برای این گستره‌ی جدید پیشنهاد نمودند.

تریبولوژی (برهم‌کنش میان دو جسم) از واژه یونانی "تریبو" به معنای لغزش دو جسم روی یکدیگر مشتق شده است و تمام فرآیندهای اصطکاکی بین دو جسم که با هم در تماس هستند و نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند را در بر می‌گیرد. تریبولوژی را به این صورت هم می‌توان تعریف کرد: مطالعه‌ی اصطکاک، سایش و روانکاری. فرآیندهای مرتبط با تریبولوژی شامل تمام پدیده‌هایی هستند که در آنها یک جسم روی جسم دیگری می‌لغزد یا حرکت می‌کند. با این تعاریف تمام این مثال‌ها در این دامنه جای می‌گیرند: بلبرینگ، چرخدنده، میل‌لنگ، سیلندر، پیستون، تراشکاری، شکل‌دهی فلزات، پولیش‌کردن، سوراخکاری، روشن‌کردن یک کبریت، حرکت مفصل‌ها در بدن انسان و هزاران پدیده‌ی دیگر. اگرچه واژه‌ی تریبولوژی نسبتاً جدید است اما مطالعه‌ی اصطکاک، سایش و روانکاری پیشینه‌ای بسیار طولانی دارد و در این زمینه‌ها بیشترین کارهای علمی و عملی بر روی پدیده اصطکاک صورت گرفته است. زیرا که اصطکاک از دیرباز تأثیر خود را در زندگی روزمره نشان داده است [۱۸]، [۱۹].

تأثیرات شرایط تریبولوژی بر کیفیت محصولات و دوام ابزار در فرآیندهای شکل‌دهی فلزی مهم می‌باشد. هنگامی‌که عملیات شکل‌دهی حجمی و شکل‌دهی ورق فلزی در یک فرآیند ترکیب می‌شوند، شرایط تریبولوژی (برهم‌کنش میان دو جسم) از اهمیت عمده‌ای برخوردار می‌باشد. در SBMF، تنش‌های تماسی

معمولی می‌تواند بسته به فرآیند تا مقدار ۲۵۰۰ مگا پاسکال برسد [۲۰] که به سرعت نسبی بین ابزار و قطعه‌کار و اندازه‌ی سطح نیز وابسته است [۲۶].

۱-۴- معرفی ماده‌ی مورد تحقیق و خواص آن

۱-۴-۱ مس

در میان مواد، فقط مس دارای ترکیب خوبی از هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، استحکام، انعطاف‌پذیری، ماشین‌کاری خوب به علاوه مقاومت به خوردگی، اکسیداسیون، خزش و خستگی می‌باشد. سهولت جوشکاری و اتصال‌دهی یکی دیگر از خواص مس است. در مواردی که نیاز به استحکام و سختی بالا باشد، مس خالص به واسطه نرمی ذاتی کاربرد ندارد. برای مصارفی که هدایت الکتریکی خوب، استحکام بالا و خواص دمای بالا احتیاج است، آلیاژهای مس که حاوی کروم یا بریلیم هستند، استفاده می‌شوند. از طرفی اضافه کردن این عناصر به مس خالص باعث کاهش هدایت الکتریکی آن می‌شود. لذا آلیاژ برای رسیدن به حالت بهینه استحکام و هدایت الکتریکی باید تحت عملیات حرارتی قرار بگیرد. اضافه کردن نقره به مس خالص دمای نرم شوندگی مس را بالا می‌برد، ضمن اینکه اثر کمی بر هدایت الکتریکی دارد. نقره همچنین خواص مکانیکی مس به‌ویژه مقاومت خزشی آن را بهبود می‌دهد. آلیاژهای مس به خاطر چنین خصوصیاتی کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف دارند. امّا به دلیل افزایش قیمت مس و دستیابی به مواد مطلوب ارزان‌تر و با روش‌های ساخت بهتر، روند استفاده از آن نزولی شده است. حدود ۷۵٪ مس استخراج شده در صنایع الکتریکی برای انتقال الکتریسیته و مابقی به دلیل هدایت حرارتی خوب در تجهیزاتی که انتقال حرارت در آنها موردنظر است و در صنایع دستی و هنری به دلیل رنگ و شکل‌پذیری خوب به کار می‌رود. گرچه استحکام تسلیم بعضی از آلیاژهای مس بالا است ولی استحکام آنها کمتر از آلیاژهای آلومینیم و منیزیم می‌باشد. در عوض مقاومت خستگی، خزشی و سایشی آلیاژهای مس از آلیاژهای آلومینیم و منیزیم بهتر است [۲۷].

۱-۴-۲ آلیاژهای آلومینیم ۳۰۰۳

آلیاژهای آلومینیوم معمولاً شامل ۹۰-۹۶٪ آلومینیوم بوده و علاوه بر آلومینیوم دارای یک یا چند عنصر دیگر هستند که به منظور بهبود خواص به آلیاژ به آن افزوده شده‌اند. معمولاً این آلیاژهای علاوه بر عناصر آلیاژی اصلی شامل چندین عنصر آلیاژی فرعی نیز هستند که مقدار بسیار کمی داشته ولی تاثیر زیادی بر خصوصیت‌های آنها دارند.

حلالیت منگنز در آلومینیم ٪۱/۸۲ است ولی مقدار منگنز در آلیاژهای آلومینیوم برابر با ٪۱/۲۵ است. علت این اختلاف حضور آهن به عنوان ناخالصی است که باعث کاهش حلالیت می‌شود. تنها آلیاژ پرمصرف آلومینیم – منگنز، آلیاژ ۳۰۰۳ است. افزودن منگنز به آلومینیوم از طریق تشکیل محلول جامد و توزیع ظریف رسوب‌های نامحلول، استحکام آن را افزایش می‌دهد. افزودن ٪۱ منیزیم سبب افزایش استحکام می‌شود. آلیاژهای گروه ۳xxx دارای استحکام متوسط، انعطاف پذیری بالا و مقاومت خوردگی مطلوبی هستند. این آلیاژها برای ساخت قوطی‌های نوشابه، وسایل آشپزخانه و غیره به کار می‌رود [۲۸].

۱-۴-۳ فولاد زنگ‌نزن[1] ۳۰۴

اولین فولاد زنگ‌نزن به صورت آلیاژ مارتنزیتی Fe-Cr-C توسط دانشمند انگلیسی به نام هاری بررلی (Harry Brearley) در ۱۹۱۲ تهیه شد. اولین ریخته‌گری تجارتی فولاد زنگ‌نزن در سال ۱۹۱۳ در شفیلد انگلستان به بهره‌برداری رسید و حق ثبت آمریکایی جهت این اختراع در سال ۱۹۱۶ به آقای هاری بررلی اهدا گردید.

رایج‌ترین نوع فولاد زنگ‌نزن فولادهای سری ۳۰۰ هستند که خود به انواع مختلفی مثل ۳۰۳، ۳۰۴، ۳۰۵، ۳۱۶، ۳۲۱ و ۳۴۷ تقسیم می‌شود و در بین این سری، فولاد ۳۰۴ از بقیه فولادها بسیار پرکاربردتر و رایج‌تر است. فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و تعداد دیگری از فولادهای این سری شامل ۱۸ درصد کروم و ۸

[1] Stainless Steel 304

درصد نیکل هستند و به همین دلیل به نام فولاد ۸-۱۸ هم شناخته می‌شوند. علاوه بر این کربن این فولادها کمتر از ۰/۰۸٪ است و خاصیت آهنربایی ندارند. اضافه کردن نیکل به فولادهای زنگ‌نزن مقاومت به خوردگی را در محیط‌های خنثی و یا اکسیدکننده‌ی ضعیف افزایش می‌بخشد. از طرفی قیمت آنها را نیز افزایش می‌دهد. هم‌چنین مقدارکافی نیکل قابلیت انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری فولادها را افزایش می‌دهد. زیرا امکان نگهداری آستینت (FCC) در دمای محیط را فراهم می‌کند. افزایش مولیبدن به فولادهای زنگ‌نزن مقاومت به خوردگی را در حضور یون‌های کلر افزایش می‌دهد، حال آن‌که افزودن آلومینیوم مقاومت به پوسته شدن را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد. کروم نیز برای افزایش مقاومت به خوردگی، اضافه می‌شود. کروم عنصری اساسی است که با تشکیل یک فیلم اکسید در سطح فولاد آن را زنگ‌نزن می‌سازد. هنگامی که فولاد زنگ‌نزن بریده یا خراش داده می‌شود، کروم موجود در سطح سریعاً اکسید می‌شود و فیلم اکسید ناحیه صدمه دیده را ترمیم می‌کند. به دلیل همین خاصیت خود ترمیمی[1] است که فولاد را زنگ‌نزن می‌نامند. از جمله ویژگی‌های ممتاز برای این دسته از آلیاژها شکل‌پذیری عالی، چقرمگی زیاد در دمای اتاق و دمای پایین و مقاومت خوب در برابر پوسته شدن، اکسایش و خزش می-باشد که خواص خود را تا دماهای بالا حفظ می‌کند. ورق‌های فولادی زنگ‌نزن یکی از پر مصرف‌ترین تجهیزات مورد استفاده در صنایع گاز، آب، نفت، هوا، پتروشیمی، نیروگاهی، صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی می‌باشد. ورق فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ برای مخازن آب سختی‌گیری شده، هوای فشرده ابزار دقیق و خودروسازی، و همچنین ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ برای مخازن و سیستم های صنایع دارویی، صنایع غذایی و شیمیایی، و همچنین ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۱۷ نیز برای مخازن حاوی آب دریا مورد کاربرد دارند [۲۹].

[1] Self healing

۱-۵- پیشینه‌ی تحقیق

روش المان محدود در سه دهه‌ی اخیر به ابزاری قدرتمند در شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی تبدیل شده است. این ابزار با کاهش زمان و هزینه تولید، جایگاه خاصی در تمامی زمینه‌های صنعت پیدا کرده است. دقت مطلوب در این ابزار محاسبه، شدیداً به دقت روش عددی در شبیه‌سازی‌ها و میزان انطباق با پدیده‌های فیزیکی بستگی دارد. در نتیجه، محققان بسیار زیادی توجه خود را به افزایش کیفیت مدل‌های ساختاری و روش‌های عددی معطوف کرده‌اند.

موری [۳۰]، تعریفی از فرآیندهای شکل‌دهی حجمی ورق فلزی و قطعاتی که با استفاده از این روش انجام انجام می‌گیرند، پرداخته است.

سویارسلین و همکاران [۳۱]، به بررسی عددی و تجربی ساخت دندانه چرخ‌دنده در ورق فولادی DC04 با ضخامت ۱ mm و همچنین آسیب‌های به وجود آمده در دندانه، پرداخته‌اند. آنها، جهت شکل‌دادن دندانه بر روی ورق ۱ mm، برای اینکه ناحیه‌ی شکل‌دهی به دلیل شکل‌دهی قطعات نازک آسیب نبینند، از فرآیند شکل‌دهی افزایشی استفاده کرده‌اند. آنها برای این کار، از گوه[1] استفاده کرده‌اند. گوه از فولاد عملیات حرارتی شده (۱/۷۷۳۴) استفاده شده است. آزمون به این صورت است که گوه در جهت ضخامت ورق، در هر ۰/۵ mm، فرآیند را تکرار کرده تا به عمق ۴ mm رسیده و شکل نهایی دندانه به پایان می‌رسد. در طول آزمایش نیروی شکل‌دهی و جابجایی‌ها اندازه‌گیری شده است. سپس نمونه‌های شکل‌داده شده، زیر میکروسکوپ نوری و (SEM)[2] مشاهده شده است. همچنین در این تحقیق، با استفاده از روش عددی و استفاده از زیربرنامه‌ی VUMAT نرم‌افزار آباکوس و مدل آسیب گارسون[3]، به بررسی تخلخل، جوانه‌زنی، رشد و مراحل آسیب ترک پرداخته‌اند. مطالعه‌ی تجربی نشان می‌دهد که بروز ترک‌های بزرگ در سطح دندانه‌ها، در قسمت لبه دندانه زیاد است. علت این ترک‌های بزرگ، وجود

---

[1] Identer
[2] Scanning electron microscope
[3] Gurson

تخلخل‌ها، رشد و بهم پیوستگی می‌باشد. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی، وقوع ترک در قسمت‌های لبه‌ی دندانه نشان داده شده است. در این مدل بر اساس فرمول‌ها و پارامترهای انتخاب شده، دیده می‌شود که رشد ترک حفره‌ها، با توجه به ناحیه‌ی برشی از ترک اولیه است و زمان و مکان مسیر انتشار ترک‌ها دیده نمی‌شود.

مرکلین و اوپل [۳۲]، ورق تیلورد را با استفاده از فرآیند شکل‌دهی حجمی ورق فلزی تولید کرده‌اند. تولید این نوع ورق برای عملیات مستقیم کشش عمیق و یا اکستروژن، جهت تولید اجزایی مانند حلقه همگام‌ساز (قطعه‌ای در جعبه‌دنده ماشین) مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند شکل‌دهی به این گونه است که ابتدا ورق از جنس فولادی DC04 و با ضخامت ۲ mm است، درون قالب موقعیت‌دهی می‌شود. سپس سنبه کله‌زنی که دارای قطر مشخصی است و همچنین، قسمت سر سنبه که با زاویه‌ی ۰/۵ درجه می‌باشد، ورق را شکل می‌دهد. با فشار سنبه بر روی ورق، و زاویه‌ای که بر روی سنبه قرار دارد، مواد از مرکز قطعه به صورت شعاعی به قسمت دیواره جریان پیدا می‌کند. به این صورت که بعد از شکل‌دهی، سطح قطعه به صورت عرقچین در می‌آید. ضخامت ورق در ناحیه‌ی بیرونی بیشتر از ناحیه‌ی داخلی شده است. جریان مواد در مرکز نشان می‌دهد، که ضخامت ورق در قسمت عرقچین از ۲ mm به ۱/۷ mm و در دیواره‌ها به ۲/۳ mm رسیده است. بر این اساس، جریان شعاعی مواد باعث ضخیم شدن ورق در قسمت خارجی شده است. بیشترین نیرو جهت جریان مواد، در حدود ۵۰۰۰ kN بوده است. این افزایش نیرو به دلیل افزایش کرنش سختی در انتقال ضخامت ورق و بنابراین پر شدن قالب است.

شیپر و همکاران [۳۳]، تولید چرخدنده حلقه‌ای فنجانی شکل را با استفاده از روش شکل‌دهی حجمی ورق فلزی، مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای کاهش اصطکاک نیروی شکل‌دهی، و جریان بهتر مواد در فرآیند، یک روش جدید را به مجموعه قالب اضافه کرده‌اند. آنها نوسان دادن سنبه را به منظور شکل‌دهی بهتر ارائه داده‌اند. همچنین یک پوشش جدیدی را برای بهبود سختی و مقاومت به سایش ابزار شکل‌دهی ارائه

کردند. نوسان دادن سنبه به این طریق است که سنبه قالب، با یک پیستون دوار، همراه با یک سیلندر با فرکانس بالا در یک سیستم هیدرولیکی ترکیب شده است. این روش، نرخ جریان بالا را در یک فرکانس بالا امکان‌پذیر می‌کند. آنها همچنین برای بررسی افزایش دوام ابزار، ابتدا اطلاعاتی از شرایط تریبولوژیکی مانند تماس‌های فشاری، سرعت لغزش و شرایط اصطکاکی را بررسی و قسمت‌هایی از ابزار که با این شرایط در تماس هستند، را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها ابتدا سطوح ابزار را با استفاده از پالس خیلی کوتاه لیزری تمیز کردند و سپس پوشش‌ها را روی سطح ابزار اعمال نمودند. آنها از پوشش‌های (a-C:H)[1] و (a-C:H:W)[2] برای پوشش‌دهی ابزار استفاده کرده‌اند. هر دو پوشش با ضخامتی در حدود µm ۳/۵ و زبری µm ۰/۱،انجام گرفته است، اما پوشش (a-C:H) دارای سختی بالاتری در حدود GPa ۲۴/۵ در مقایسه با پوشش (a-C:H:W) که دارای سختی پایین‌تری در حدود GPa ۱۳/۳ دارد. هر دو پوشش، در آزمون پالیش‌کاری قطعات کار سرد شده، در حالت خشک انجام گرفته است. همچنین تماس‌های فشاری بین ۱ تا GPa ۳ متغیر بوده است. نتایج نشان می‌دهد پوشش (a-C:H)، تنها در سیکل کاری سوم، شکست خورده است و ضریب اصطکاک آن به بالای ۰/۷ رسیده است. در صورتی که در پوشش (a-C:H:W)، در سیکل کاری ۵۹، ضریب اصطکاک آن ۰/۶ شده است. این آزمون، بر روی نمونه‌های فولادی (۱/۳۳۴۳) انجام گرفته است.

چنیدر و مرکلین [۳۴]، با استفاده از شکل‌دهی حجمی ورق فلزی، چرخدنده خارجی فنجانی شکل ساخته‌اند. آنها برای ساخت این قطعه، از ترکیب شکل‌دهی کشش عمیق و کله‌زنی و در دمای محیط استفاده کرده‌اند. به این صورت که ابتدا، ورق فولادی DC04 با ضخامت ۲ mm درون قالب موقعیت‌دهی می‌شود. قالب این روش، یک پرس هیدرولیک سه مرحله‌ای می‌باشد که هر دو کفه‌ی قالب در طول

[1] Pure hydrocarbon coating
[2] Tungsten-modified hydrogenated amorphous carbon coating

فرآیند می‌توانند جابجا شده و نیروهای شکل‌دهی را فراهم کنند. علاوه بر این یک فنر گازی[1] در ابتدای فرآیند به جای ورق‌گیر استفاده شده است. نیروی این فنر میبایست در حدی باشد که روی سطح قطعه خراشی ایجاد نکند. سپس از فرآیند کشش عمیق، برای شکل‌دهی دیواره قطعه‌ی فنجانی شکل، استفاده شده است. بعد از شکل‌دهی دیواره قطعه‌ی فنجانی شکل، سنبه فرآیند کشش عمیق در همان حالت مانده و فرآیند کله‌زنی از طرف مقابل برای شکل‌دهی دندانه‌های خارجی قطعه، به دیواره قطعه فشار وارد کرده است. آنها این فرآیند را برای قطعاتی با قطرهای خارجی مختلف و با توجه به ثابت بودن حجم، آزمایش کرده‌اند. دلیل از این کار هم این بود که می‌خواستند بهترین قطر را برای شکل‌دهی قطعه انتخاب کنند. نیروی فرآیند کشش عمیق برای قطعه‌ای که قطر کمتری داشته است زیاد بوده است. همچنین برای فرآیند کله‌زنی با نیروی ۱۲ kN بررسی کرده‌اند که درصد پرشدگی مواد در قسمت دندانه، چقدر خواهد بود. آنها همچنین عیب‌های به وجود آمده در پرشدگی مواد را در نرم‌افزار Simufact forming 10 شبیه‌سازی کرده‌اند. مقدار پر شدن دندانه قطعه در قالب نشان می‌دهد که چه مقدار از حجم هندسه و یا نیروهای شکل‌دهی در طول فرآیند در پر شدن قالب مؤثر است. لازم به ذکر است که نیروهای قالب و فنر گازی در نتایج در نظر گرفته نشده است.

سالفلد و همکاران [۳۵]، تأثیرات برهم‌کنش[2] دستگاه پرس را بر روی ساخت حلقه همگام‌ساز که با استفاده از شکل‌دهی حجمی ورق فلزی ساخته می‌شوند، و از اینکه معمولاً تأثیرات ماشین‌ها در تجزیه و تحلیل فرآیند شکل‌دهی نادیده گرفته می‌شود، به‌صورت تجربی و عددی جهت افزایش کیفیت قطعه مورد مطالعه قرار دادند. معمولاً در شکل‌دهی قطعات نامتقارن با استفاده از فرآیند SBMF، نیروی شکل‌دهی در جهت‌های عمودی و افقی نسبت به تولید قطعه‌ی متقارن بالاست. این نیروها، باعث جابجایی قالب شکل‌دهی و اجزای قالب می‌شود که منجر به کاهش کیفیت قطعات تولیدی می‌شود. علاوه بر این

[1] Gas Spring
[2] Interaction

نیروهای افقی دارای پیچیدگی‌هایی می‌باشند. قطعاتی مانند دنده‌های چرخدنده در حلقه همگام‌ساز، عواملی چون ثابت ماندن، جابجایی و انتقال نیرو نیاز به انطباق هندسی بالا و همچنین دقت بالا و همچنین با توجه به خواص مکانیکی نهایی، امری مهم است. آنها ابتدا، قالب را در نرم‌افزار Simufact forming 9.0، صلب مدل کرده‌اند. همچنین ورق استفاده شده با ضخامت ۳ mm از جنس DC04 و DP600 به عنوان مدل الاستیک و پلاستیک در نظر گرفته شده است. نتیجه‌ی شبیه‌سازی برای هر دو ورق نشان می‌دهد، بیش از ۵۰ درصد نیروی شکل‌دهی، در جهت افقی بوده است. برای شکل‌دهی ورق DC04، نیروی افقی در حدود ۲۰۰ kN بوده است. در صورتی که این نیرو برای ورق DP600، دو برابر ورق DC04 بوده است. نتایج نشان می‌دهد، ضخامت ورق کاهش یافته برای هر دو مواد، بدون ترک انجام گرفته است. در مورد دستگاه پرس، برای نشان دادن ویژگی‌های دستگاه پرس و با توجه به نیروهای بالا با دقت مورد نیاز، یک مدل شبیه‌سازی (MBS)[1] در نرم‌افزار انسیس انجام گرفته است. همچنین برای طراحی اجزای پرس، داده‌های مورد نیاز از تولید کننده دریافت شده است. در این MBS، اجزای قالب مانند کفه‌های پرس، بدنه‌ی پرس، میل راهنماها توسط مدل FE جایگزین شده است. بنابراین سیستم چند بدنه هیبرید[2] توسعه یافته، اجاز می‌دهد شبیه‌سازی با دقت بالا و اندازه قابل قبول انجام گیرد. همچنین جابجایی تجهیزات پرس با استفاده از سیستم اندازه‌گیری نوری تعیین می‌شود. و در انتها، سیستم‌های نوری و کنترل کامپیوتری دستگاه، به یکدیگر وصل شده‌اند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی که در آن مدل اجزای پرس به عنوان صلب در نظر گرفته شده است، جابجایی را در نیروی عمودی ۱۸۰۰ kN، صفر نشان می‌دهد. در صورتی که اجزای پرس مثل، بدنه‌ی پرس، در نیروی ۱۶۰۰ kN، جابجایی عمودی در حدود ۰/۶۲ mm داشته است. و یا

[1] Multi-body simulation model
[2] Hybrid multi-body

کفه‌ی پرس در همین نیرو، جابجایی عمودی در حدود mm ۱ داشته است. همچنین، پیستون در همین نیرو، جابجایی عمودی در حدود mm ۱/۳ داشته است.

ویلند و مرکلین [۳۶]، به بررسی سایش ابزار پوشش داده شده و ابزار پوشش داده نشده تحت شرایط بارگذاری حجمی پیچیده پرداخته‌اند. اختلاف درجه حرارت بالا بین سطح ورق‌گیر و ابزار، حرکت نسبی بین این دو سطح و نیروهای مکانیکی در طی عملیات شکل‌دهی، باعث سایش بیش از اندازه بر روی سطح ابزار می‌شود که برای کاهش سایش، از پوشش‌های AlCrN استفاده شده است.

لوفلر و همکاران [۳۷]، به مطالعه‌ی اثربخشی شرایط تریبولوژیکی در سطوح قطعه‌کار و کناره‌های ابزار جهت بهبود کیفیت محصولات شکل‌دهی حجمی ورق فلزی پرداخته‌اند. این مطالعه نشان داده است شرایط تریبولوژیکی که به صورت موضعی در سطوح ابزار به کار گرفته شده است منجر به بهبود کیفیت دندانه در چرخدنده شده است.

کرستینگ و همکاران [۳۸]، نیز از شرایط تریبولوژیکی جهت کیفیت سطح ابزارهای شکل‌دهی استفاده نمودند. آنها روش‌هایی مناسب جهت انتخاب سطوح بهینه و فرآیندهای پوشش دادن روی سطوح ابزارهای شکل‌دهی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها جهت انتخاب سطوح بهینه، ۱۴ نمونه از ورق DP600 را با استفاده از فرآیند فرزکاری ماشینکاری کرده‌اند. سپس با استفاده از شبیه‌سازی، شش سطح را جهت آزمایش تجربی انتخاب نمودند. علاوه بر این، سه روش از پوشش‌های مختلف جهت پوشش دادن روی سطوح ابزارها را انتخاب کردند که از این سه روش، پوشش a-C:H:W بهترین رفتار اصطکاک بین تمام سطوح انتخاب شده را نشان داد که این رفتار در فرآیند شکل‌دهی دندانه چرخدنده مورد تأیید قرار گرفت. علاوه بر آزمایش فشرده‌سازی حلقه[1]، با آزمایش اکستروژن پین[2] ضریب اصطکاک برای سطوح انتخاب شده با بیشترین و کمترین مقدار اصطکاک مشخص شد.

---

[1] ring-compression test
[2] pin-extrusion test

بیسرر و همکاران [۳۹]، بلنک تیلورد را با استفاده از عملیات حرارتی القایی و اسپری خنک کننده آب – هوا [1] مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، تنش و کرنش سه بعدی در طول شکل‌گیری ورق، باعث می-شود حفره‌هایی در قطعه رخ دهد. بسته به خواص جریان مواد، تنش‌های کششی پسماند می‌تواند در اجزای شکل گرفته شده وجود داشته باشد. در طول عملیات، اجزای بارگذاری شده منجر به خستگی قطعه و همچنین تنش‌های کششی پسماند در قطعه باعث شروع ترک و در نتیجه رشد ترک نامطلوب خواهد شد. پس از فرآیند شکل‌دهی، ریزساختارهای مربوط به تنش پسماند فشاری را می‌توان با عملیات حرارتی از سطح قطعه خارج کرد. این تنش‌های پسماند می‌تواند شروع ترک بالقوه‌ای در سطح و یا در نواحی زیر سطحی باشد. برای اندازه‌گیری تنش پسماند و به منظور بررسی تنش‌های پسماند فشاری با شرایط خنک‌کننده مختلف، از پراش‌سنجی اشعه ایکس [2] استفاده شده است. سپس بعد از شکل‌دهی، با استفاده از اسپری خنک‌کننده دو فازی آب – هوا جهت به دست آوردن تنش پسماند فشاری در سطح آنها انجام گرفته شده است.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

با توجه به رشد و اهمیت صنایع مختلف از جمله خودروسازی و هوا-فضا در دنیا، نیاز به تحقیق و پژوهش در زمینه‌ی روش‌های ساخت و تولید مورد استفاده در این صنایع امری ضروری است. فرآیند شکل‌دهی حجمی و شکل‌دهی ورق فلزی به عنوان فرآیندهای شکل‌دهی، سالهاست که در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی، هوافضا و قطعه‌سازی و صنایع دیگر در داخل و خارج از کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما علیرغم پژوهش‌های نظری و عملی راجع به ترکیب این فرآیندها به عنوان شکل‌دهی حجمی ورق فلزی و استفاده از این فرآیندها در تولید محصول در خارج از کشور، تا کنون تحقیق خاصی در داخل کشور در

[1] Water–Air Spray Cooling
[2] x-ray diffractometer

این زمینه انجام نگرفته است. بنابراین با توجه به نیاز کشور، لزوم بررسی و پژوهش در این حوزه احساس می‌شود. تحقیق حاضر سعی کرده گامی کوچک در این زمینه بردارد.

در این پایان‌نامه، شکل‌دهی بوش فلنج‌دار با فرآیند SBMF از ورق آلیاژ آلومینیوم AA3003، مس و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. از مهمترین مسائلی که باید مورد توجه قرار گیرد، طراحی قالب می‌باشد. قالب از لحاظ مکانیکی و هندسی باید طوری طراحی گردد که علاوه بر ایجاد جریان مناسب مواد، نیروهای شکل‌دهی را تحمل کرده و دچار شکست نشود. در این راستا، ابتدا پروفیل سنبه و کانال قالب جهت تولید بوش فلنج‌دار استاندارد و قرار دادن هسته قالب درون حلقه فشاری، طراحی و اجرا خواهد شد. به منظور امکان مقایسه‌ی نتایج، در شبیه‌سازی عددی از پارامترهای مشابه با آزمایش‌های تجربی استفاده شده است.

از نوآوری‌های این پایان‌نامه می‌توان به ارائه‌ی یک روش جدید تولید بوش فلنج‌دار با استفاده از فرآیند SBMF با توجه به روش‌های مرسوم ماشینکاری اشاره کرد.

پایان‌نامه‌ی حاضر شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل اول، مقدمه‌ای راجع به SBMF، فرآیندهای آن، ویژگی‌ها و پارامترهای دخیل در آن آورده شده است. همچنین اشاره‌ای به پژوهش‌های پیشین در این زمینه و اهداف پژوهش شده است. فصل دوم، به طراحی پروفیل هسته قالب، محاسبه‌ی هسته قالب و حلقه فشاری و شبیه‌سازی‌های المان محدود شکل‌دهی بوش فلنج‌دار اختصاص دارد. در فصل سوم، به آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی بوش فلنج‌دار پرداخته شده است. در فصل چهارم، نتایج پژوهش و در نهایت در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار ارائه شده است.

فصل ۲ تحلیل عددی شکل‌دهی بوش فلنجدار

یکی از روش‌هایی که امروزه بیشترین کاربرد را در حل مسائل مهندسی دارد، شبیه‌سازی به کمک روش اجزای محدود[1] می‌باشد. این روش به طور گسترده‌ای برای بررسی فرآیندهای شکل‌دهی فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش اجزای محدود با استفاده از روابط و الگوریتم‌های پیچیده می‌تواند تعداد پارامترهای زیادی را وارد مدل کرده و مدل را به واقعیت نزدیک‌تر کند. وجود این روابط پیچیده که در طی سال‌ها تحقیق و پژوهش توسعه یافته‌اند، منجر به توسعه نرم‌افزارهای تجاری زیادی شده‌اند. گوناگونی این روابط پیچیده موجب شده است تا هر یک از این نرم‌افزارها دارای نقاط ضعف و قوتی باشند. بنابراین هر کاربر روش اجزای محدود باید شناخت کافی از مسئله مورد نظر، نرم‌افزار و روش‌های مختلف مدل‌سازی موجود در نرم‌افزار داشته باشد، تا بتواند به یک مدل مناسب برای حل مسئله برسد. نرم-

---

[1] Finite element (FE)

افزارهای متعددی بر اساس روش اجزای محدود به وجود آمده است که از مشهورترین آن‌ها می‌توان به نرم‌افزارهای آباکوس[۱]، انسیس[۲] و ال اس دیانا[۳] اشاره کرد.

فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به دلیل ماهیت پیچیده‌ای که دارند، (وجود شرایط تماسی و اصطکاکی پیچیده، تغییر شکل مومسان زیاد، تغییر شرایط مرزی و هندسه در طول فرآیند) از جمله مسائل پیچیده مهندسی برای مدل‌سازی می‌باشند.

۲-۱- معرفی نرم‌افزار آباکوس

نرم‌افزار آباکوس در سال ۱۹۷۸ توسط هیبیت[۴]، کارلسون[۵] و سورنسن[۶] به بازار عرضه شد و به دلیل قابلیت‌های منحصر به فردش به سرعت مورد توجه قرار گرفت، به نحوی که امروزه بسیاری از شرکت‌های اتومبیل‌سازی بزرگ دنیا، شرکت بویینگ، هوندا و موتورلا از آن استفاده می‌کنند [۴۰]. این نرم‌افزار قادر است مسائل بسیار متنوعی، از جمله مسائل تحلیل تنش، تحلیل حرارتی، تحلیل دینامیک و آنالیز مودال را حل نماید. یک بسته‌ی نرم‌افزاری آباکوس دارای سه محصول اصلی است که شامل موارد زیر است:

۱- **Abaqus/CAE:** به عنوان یک رابط گرافیکی کاربر در بسته‌ی نرم‌افزاری آباکوس گنجانده شده است. این محصول به کاربر کمک می‌کند که یک مدل هندسی را سریعاً و به سادگی بسازد، یا از یک نرم‌افزار مدل‌سازی دیگر وارد آباکوس نماید. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مدل هندسی قطعه را گسسته‌سازی کرد و خواص مواد آن را تعیین و شرایط مرزی و بار اعمالی را مشخص نمود. تمام عملیات با استفاده از منوها، جعبه‌ابزارها و پنجره‌های گرافیکی انجام شده و همه مراحل مدل‌سازی به صورت گرافیکی نمایش پیدا می‌کنند. مدل ایجاد شده در این قسمت با پسوند cae ذخیره می‌شود.

---
[1] ABAQUS
[2] ANSYS
[3] LS-DYNA3D
[4] Hibitt
[5] Karlsson
[6] Sorensen

پس از اتمام مدل‌سازی مسئله، مدل ایجاد شده به یکی از دو تحلیل‌گر نرم‌افزار تحویل[۱] داده می‌شود. در واقع زیرمجموعه‌های آباکوس/استاندارد[۲] و آباکوس/صریح[۳] تحیل‌گرهای موجود در بسته‌ی نرم‌افزاری آباکوس هستند.

۲- Abaqus/Standard: محصول اصلی شرکت آباکوس است که با استفاده از آن می‌توان گستره‌ی وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی شامل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و الکترونیک را تحلیل کرد. این محصول یک تحلیل‌گر کلی است و دستگاه معادلات حاکم را در هر نمو به صورت ضمنی[۴] تحلیل می‌کند. کاربر در صورت استفاده از این تحلیل‌گر می‌تواند میزان نمو در هر مرحله[۵] را تعیین نماید یا از روش نیوتن-رافسون اصلاح شده استفاده نماید.

۳- ABAQUS/Explicit: یک تحلیل‌گر خاص است و معادلات حاکم را بر پایه‌ی روش انتگرال‌گیری صریح تحلیل می‌نماید. این تحلیل‌گر خاص، برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد و ضربه-ی انفجار، آزمایش ضربه، مچالگی و همچنین مسائل شبه استاتیکی یا مسائل غیرخطی که در آنها شرایط تماس تغییر می‌کند (مانند شکل‌دهی) مناسب است. در این روش تعیین اندازه‌ی نمو در مسائل غیرخطی ممکن نبوده و خود نرم‌افزار بر اساس شرایط پایداری، میزان نمو در هر مرحله را به صورت اتوماتیک محاسبه می‌نماید. از مزایای روش صریح نسبت به روش ضمنی می‌توان به سرعت بالای آن در حل مسائل پیچیده مانند تحلیل ضربه و تماس و تصادف اشاره کرد [۴۱]. گرچه زمان مورد نیاز برای تحلیل در صورت استفاده از آباکوس/استاندارد بیشتر است، اما نتایج برآمده از این روش دارای دقت بالاتری هستند.

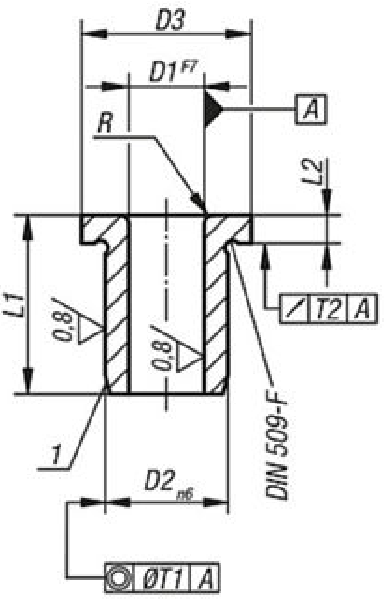
در این پژوهش از نسخه‌ی ABAQUS-6.14 برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

---

[1] Submit
[2] Abaqus/Standard
[3] Abaqus/Explicit
[4] Implicit
[5] Increment

۲-۲- طراحی پروفیل سنبه و هسته‌ی قالب

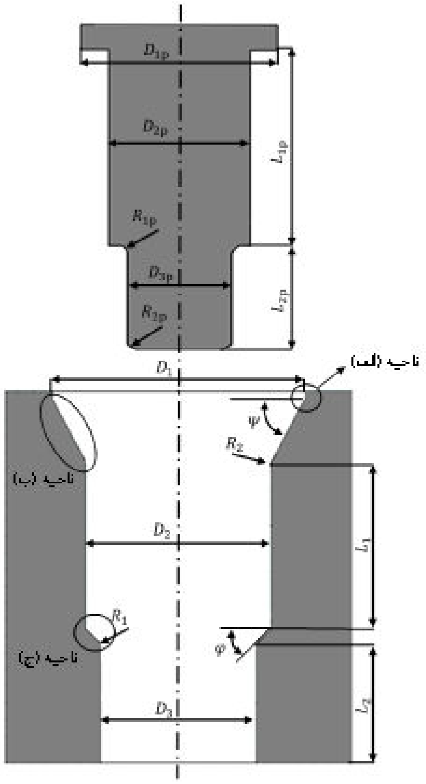
به منظور انجام طراحی قالب، ابتدا پروفیل هسته‌ی قالب طراحی می‌شود. در این راستا، ابعاد پروفیل هسته‌ی قالب بر اساس ابعاد یک بوش استاندارد طراحی شده است. شکل ۲-۱، طرحواره بوش استاندارد همراه با ابعاد آن را نشان می‌دهد.



T_{2b}	T_{1b}	R_b	L_{2b}	L_{1b} اندازه	L_{1b}	D_{3b}	D_{2b}	D_{1b}
۰/۰۳	۰/۰۲	۲	۴	بلند/متوسط/ کوتاه	۱۶/۲۸/۳۶	۳۰	۲۶	از ۱۵/۵ تا ۱۸

شکل ۲-۱: طرحواره بوش استاندارد با ابعاد (DIN 172)

سپس با داشتن ابعاد یک بوش استاندارد، سعی در طراحی هسته‌ی قالب و سنبه شده است. شکل ۲-۲، طرحواره هسته قالب وسنبه همراه با ابعاد آن را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲-۳، طرحواره گرده اولیه همراه با ابعاد آن را نشان می‌دهد.



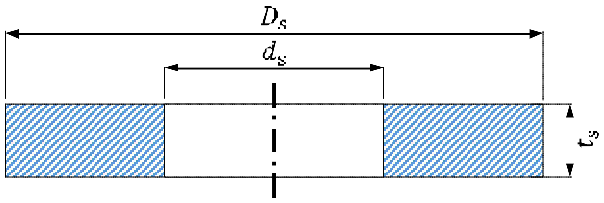
هسته قالب

ابعاد (mm)	نام نماد	نماد
۳۴	قطر موقعیت‌دهی گرده	D_1
۲۵	قطر وسط کانال	D_2
۲۱	قطر انتهایی کانال	D_3
۶۲°	زاویه ناحیه (ب)	Ψ
۴۵°	زاویه ناحیه (ج)	Φ
۱	شعاع لبه ناحیه (ج)	R_1
۲	شعاع لبه ناحیه (ب)	R_2
۲۲	طول وسط کانال	L_1
۲۱	طول انتهایی کانال	L_2

سنبه

ابعاد (mm)	نام نماد	نماد
۳۳	قطر بزرگ سنبه	D_{1p}
۲۴/۹۸	قطر وسط سنبه	D_{2p}
۱۸	قطر کوچک سنبه	D_{3p}
۱	شعاع گوشه پله	R_{1p}
۱/۵	شعاع لبه سنبه	R_{2p}
۴۹	طول وسط سنبه	L_{1p}
۲۰	طول ابتدای سنبه	L_{2p}

شکل ۲-۲: طرحواره هسته قالب وسنبه با ابعاد



ابعاد (mm)	نام نماد	نماد
۳۳/۹	قطر خارجی گرده	D_s
۱۰-۹	قطر داخلی گرده	d_s
۳-۲/۵	ضخامت گرده	t_s

شکل ۲-۳: طرحواره گرده اولیه با ابعاد

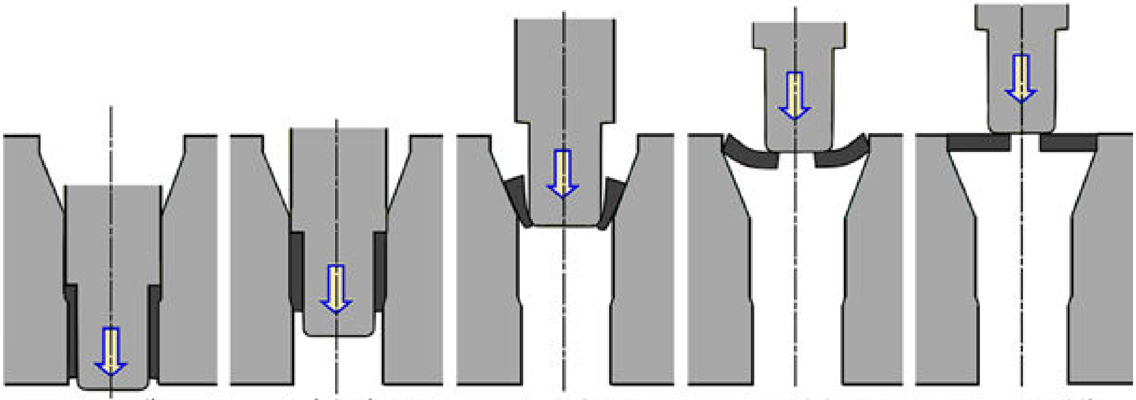
در شروع طراحی، قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) و قطر سنبه (D_{3p}) بررسی شده است. قطر سنبه (D_{3p}) می‌بایست با یک نسبتی از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) بیشتر باشد، تا در حین کشش گرده‌ی اولیه به وسیله‌ی سنبه در داخل قالب، از سنبه خارج نشود. در این طراحی، ابتدا گرده‌ی اولیه موقعیت‌دهی شده است. به این صورت که یک پله‌ی ۱ میلیمتری در ناحیه‌ی (الف) هسته‌ی قالب ایجاد شده است. سپس جهت کشیده شدن گرده‌ی اولیه به داخل قالب به وسیله‌ی سنبه، سعی در طراحی ناحیه‌ی (ب) هسته‌ی قالب شده است. زاویه این ناحیه باید به گونه‌ای باشد که گرده‌ی اولیه با حداقل اصطکاک به درون قالب کشیده شود. طراحی این زاویه با ۴۵ درجه شروع شده است. دلیل انتخاب این زاویه این بود که با انتخاب زاویه‌ای کمتر از این مقدار، به دلیل اصطکاک زیاد بین گرده‌ی اولیه و سطح قالب عملیات کشش گرده‌ی اولیه ممکن نبود. ولی این زاویه باعث عیب‌هایی در گرده‌ی اولیه می‌شد. به این صورت که در زاویه ۴۵ درجه، به دلیل اصطکاک زیاد بین سطوح گرده‌ی اولیه و قالب، و همچنین کشیده شدن مستمر گرده‌ی اولیه توسط سنبه به داخل قالب، باعث کرنش زیاد گرده‌ی اولیه شده و در نتیجه باعث پاره شدن آن می‌شود. همچنین به دلیل اصطکاک زیاد، و با رعایت نشدن نسبت قطر خارجی سنبه با قطر داخلی گرده‌ی اولیه، و به دلیل کرنش زیاد، قطر داخلی گرده‌ی اولیه از قطر سنبه بیشتر شده و عملیات کشش انجام نگیرد. لازم به ذکر است که گوشه‌ی تیز در سنبه باعث پاره شدن ورق می‌شود که در طراحی، این مورد نیز بررسی شده است. طراحی شعاع گوشه سنبه (R_{2p}) می‌بایست به نحوی باشد که ورق را با

کمترین اصطکاک کشیده و منجر به پاره شدن ورق نشود. همچنین باید به نحوی باشد که ورق را تا رسیدن به ناحیه‌ی (ج) هسته‌ی قالب به داخل قالب کشیده و در انتها از آن جدا شود. در مورد زاویه‌ی Ψ باید گفت که آنقدر می‌بایست این زاویه کاهش یابد که به یک زاویه مناسب دست می‌یافت. زاویه‌ی Ψ مناسب به دست آمده در این قالب ۶۲ درجه می‌باشد. لازم به ذکر است که شعاع R_2 در ناحیه‌ی (ب) نیز در نحوه مناسب بودن زاویه‌ی Ψ تأثیرگذار بوده است.

پارامترهای طراحی ناحیه‌ی (ج) هسته‌ی قالب نیز مانند ناحیه‌ی (ب)، می‌باشد. با این تفاوت که زاویه‌ی Φ در ناحیه‌ی (ج) هسته‌ی قالب، باید به گونه‌ای باشد که ورق از سر سنبه جدا شده و با پله‌ای که در سنبه تعبیه شده است، شکل بگیرد. سنبه ورق را بعد از این که از ناحیه‌ی (ب) جدا کرده، به داخل کانال قالب کشیده و هنگام رسیدن به زاویه‌ی Φ قالب، باید اصطکاک در این قسمت زیاد بوده که ورق از قسمت سر سنبه جدا کرده و ادامه شکل دادن ورق را در پله‌ای که در سنبه برای همین کار تعبیه شده است انجام گیرد. زاویه‌ی Φ قالب نیز از زاویه صفر درجه شروع شده و در زاویه ۴۵ درجه مناسب انتخاب شده است. همچنین شعاع R_1 در ناحیه‌ی (ج) قالب، نیز در نحوه مناسب بودن زاویه‌ی Φ تأثیرگذار بوده است. لازم به ذکر است که ارتفاع بین ناحیه‌ی (ب) و ناحیه‌ی (ج) نیز بسته به ابعاد و جنس گرده‌ی اولیه ورق، متفاوت است. ارتفاع بین دو زاویه بر اساس ضخامت ۳ mm طراحی شده است. لازم به ذکر است که اگر جنس گرده‌ی اولیه‌ی ورق، از جنس نرمی باشد و یا ضخامت کمتر از مقدار ذکر شده باشد، باید قطر داخلی گرده‌ی اولیه ورق(d_s) با قطر سنبه (D_{3p}) بیشتر باشد. در انتها نیز، برای این که جریان مواد به صورت یکسان در قسمت دیواره بوش منتقل شود، از استوپر استفاده شده است.

۲-۳-بررسی نحوه شکل‌گیری بوش فلنجدار

همان‌طور که در قسمت ۲-۲ از این فصل ذکر شد، قالب این روش، دارای یک کانال برای ورود قطعه مورد نظر است که در جریان مسیر کانال، دارای زوایا و شعاع‌های خاصی است. طرحواره مراحل شکل‌دهی بوش فلنجدار در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: شمای کلی و مراحل فرآیند شکل‌دهی بوش

در این روش، گرده‌ی اولیه در ناحیه‌ی (الف) کانال قرار گرفته (شکل ۲-۴ (الف)) و از بالا توسط سنبه به داخل کانال فشرده می‌شود (شکل ۲-۴ (ب)). قطعه حین عبور از کانال، با رسیدن به ناحیه‌ی (ب)، شروع به خم شدن می‌کند و با ادامه‌ی حرکت، سنبه قطعه را همراه خود به حرکت در می‌آورد (شکل ۲-۴ (ج)). در ادامه، قطعه در حین عبور از کانال، و با رسیدن به ناحیه‌ی (ج)، از قسمت سر سنبه جدا شده و با پله‌ی تعبیه شده در سنبه فشرده می‌شود (شکل ۲-۴ (د)). درانتها با فشار سنبه، قطعه به شکل بوش در می‌آید (شکل ۲-۴ (ه)). سنبه تا رسیدن به گپ (فاصله بین پله سنبه و ابتدای ناحیه‌ی (ج)) مورد نظر فشرده شده و به هر اندازه‌ای که قطعه فشرده شود، به همان اندازه نیز مواد در دیواره‌ها جریان می‌یابد. شدت تغییر شکل به زوایای کانال بستگی دارد. همچنین شعاع گوشه‌ها و انحنای رئوس کانال در محل تغییر زاویه نیز از جمله پارامترهای کنترلی این فرآیند است. در اینجا باید توجه شود که قطر داخلی گرده‌ی

اولیه (d_s) با قطر سنبه (D_{3p})، نباید از یک اندازه خاص کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر شود. معمولاً نسبت قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به قطر سنبه (D_{3p})، باید بین ۱/۸ تا ۲ باشد. این نسبت با استفاده از شبیه‌سازی شکل‌دهی بوش به دست آمده است. زیرا با کوچک‌تر شدن قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) از یک اندازه خاص که در (شکل ۲-۴ (د)) توضیح داده شده است، باعث می‌شود گرده‌ی اولیه از سر سنبه به دلیل اصطکاک زیاد جدا نگردد و باعث کرنش زیاد و خرابی قطعه‌کار شود. همچنین با زیاد شدن قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) از یک اندازه خاص، به دلیل اصطکاک کم بین سر سنبه و گرده‌ی اولیه، باعث می‌شود قطعه در همان مرحله ابتدایی، از سر سنبه جدا شده و شکل نگیرد. همچنین باید توجه داشت که ضخامت گرده‌ی اولیه (t_s) نیز از یک اندازه خاص کمتر و یا بیشتر نشود. زیرا با کمتر شدن ضخامت، باعث می‌شود جریان مواد در انتهای شکل‌دهی به خوبی شکل نگیرد و این یک عیب برای قطعه نهایی محسوب می‌شود. همچنین بیشتر شدن ضخامت از یک اندازه‌ی خاص، باعث ازدیاد اصطکاک در فرآیند می‌شود. دراین حالت فرآیند انجام نمی‌شود و یا باعث بالا رفتن نیروی وارده به قالب و شکسته شدن آن می‌شود.

۲-۴- طراحی هسته‌ی قالب و حلقه فشاری

یک عامل مهم در افزایش عمر هسته‌ی قالب ، طراحی سیستم‌های محفظه‌ای پیش تنش‌گذاری فشاری است که هسته‌ی قالب را در بر می‌گیرند. محفظه معمولی پیش تنش‌گذار، عموماً شامل حلقه‌های تنشی تکی یا دوگانه می‌باشد. بسته به پیچیدگی قطعه و تلرانس‌های لازم، پیش‌تنش فشاری ایجاد شده ممکن است خیلی کم باشد.

برای طراحی هسته‌ی قالب و حلقه فشاری[۱]، ابتدا قالبی با ابعاد بزرگ‌تر از حد معمول در نظر گرفته شده و پس از شبیه‌سازی میزان تنش‌های اعمالی به قالب مشخص می‌شود. سپس با استفاده از مراجع مختلف نزدیک‌ترین فولاد که بهترین مشخصات مورد انتظار را دارد، انتخاب می‌شود. در مراحل بعد به تدریج با

[1] Pressure ring

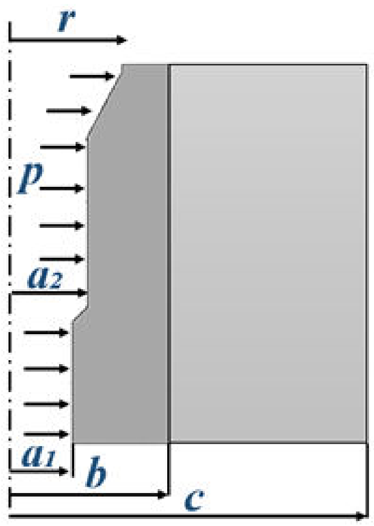
کاهش ابعاد قالب و در نظر گرفتن میزان تنش‌های اعمالی، به ابعاد بهینه‌ی قالب خواهیم رسید. کاسته شدن از هزینه‌ی مواد اولیه به دلیل کاهش ابعاد و جلوگیری از معیوب شدن قالب در حین کار که مخاطرات زیادی در پی خواهد داشت، اهمیت ابعاد بهینه‌ی قالب را هر چه بیشتر نمایان می‌کند.

در هنگام شکل‌دهی، اعمال تنش فشاری بالا روی سطح قالب، باعث ایجاد تنش حلقوی σ_θ کششی می‌شود. این تنش کششی می‌تواند منجر به شکست ناگهانی قالب شود. از این رو، قالب به صورت دو تکه با انطباق پرسی (تداخلی) طراحی شده است. این انطباق پرسی باعث ایجاد تنش حلقوی فشاری نسبتاً بالا روی سطح داخلی قالب و تنش حلقوی کششی در حلقه‌ی فشاری می‌شود. برای دو استوانه‌ی کشسان از جنس یکسان با انطباق پرسی، توزیع تنش حلقوی در استوانه‌ی داخلی و خارجی به ترتیب از رابطه‌ی ۲-۱ و ۲-۲ محاسبه می‌شود [۴۲] :

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2b(c^2 - a^2)}[-p(2a^2b)(1+\frac{c^2}{r^2}) - eE(c^2 - b^2)(1+\frac{a^2}{r^2})] \quad (۲-۱)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2b(c^2 - a^2)}[-p(2a^2b)(1+\frac{c^2}{r^2}) + eE(b^2 - a^2)(1+\frac{c^2}{r^2})] \quad (۲-۲)$$

در این روابط: r فاصله شعاعی، a شعاع داخلی هسته قالب، b شعاع خارجی هسته قالب، c شعاع خارجی استوانه خارجی، e مقدار تداخل، E مدول یانگ و p فشار داخلی است. در این قالب، هسته‌ی قالب از فولاد ابزار سختکاری شده 100MnCrW4 و حلقه‌ی فشاری از فولاد آلیاژی 34CrNiMo6 در حالت آنیل با تنش تسلیم ۸۰۰ MPa استفاده شده است [۴۳]. در قالب طراحی و ساخته شده $a_{\square}$ = ۱۰/۵ mm و $a_{\square}$ = ۱۲/۵ mm، b = ۲۳ mm، c = ۵۰ mm، E = ۲۱۰ GPa و e = ۰/۲ mm در نظر گرفته شد. شکل ۲-۵، طرح‌واره نحوه‌ی محاسبه‌ی هسته قالب و حلقه فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: طرح‌واره محاسبه‌ی هسته قالب و حلقه‌ی فشاری

از جمله مزایای قالب طراحی شده می‌توان به جا زدنی بودن هسته‌ی قالب آن اشاره کرد که در هنگام ایجاد مشکل برای هسته قالب نیازی به تعویض کل قالب نیست بلکه با صرف هزینه اندک می‌توان هسته دیگری را جایگزین آن کرد. همچنین به دلیل اینکه رینگ فشاری که از سختی به مراتب پایین‌تری نسبت به هسته قالب برخوردار است آن را احاطه کرده است در هنگام ایجاد ترک، از مخاطرات حاصل از شکست ترد جلوگیری می‌کند.

۲-۵- شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی بوش فلنجدار

یکی از بخش‌های مهم پژوهش صورت گرفته، شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی بوش فلنجدار است. در انجام مراحل شبیه‌سازی، سعی شد تا مدل المان محدود مشابه آزمایش تجربی شکل‌دهی بوش فلنجدار، باشد. در زیر شرح مختصری از مراحل شبیه‌سازی این فرآیند آمده است.

لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، از هر دو تحلیل‌گر استاندارد و صریح استفاده شده است. یعنی ابتدا تحلیل حلقه فشاری و هسته‌ی قالب در تحلیل‌گر استاندارد انجام شده است. هدف از این کار به

دست آوردن تنش‌های ایجاد شده در قالب، به دلیل پرسی جا زدن هسته‌ی قالب در داخل حلقه فشاری است. سپس با وارد کردن[۱] نتایج تحلیل از تحلیل‌گر استاندارد به تحلیل‌گر صریح، شبیه‌سازی شکل‌دهی نمونه انجام می‌گیرد. در ادامه به بررسی هر کدام از مراحل مذکور در مدل‌سازی مسئله مورد بررسی این پژوهش پرداخته شده است.

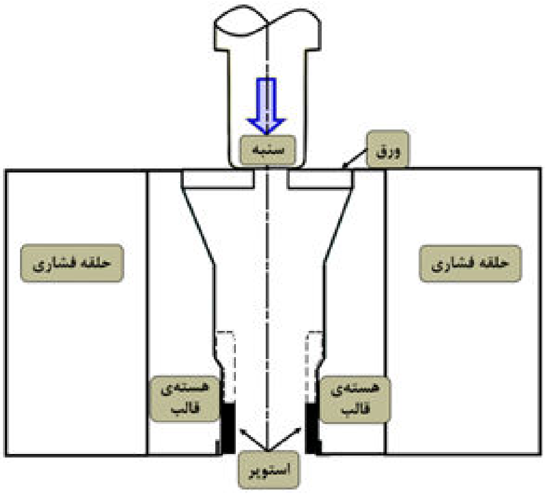
۲-۶- مدل‌سازی هندسی

اولین گام در حل المان محدود هر مسئله، تعیین دقیق هندسه‌ی اجزای مسئله می‌باشد که این کار در نرم‌افزار آباکوس صورت می‌پذیرد. مسئله‌ی مورد نظر در این تحقیق از گرده‌ی اولیه، سنبه، حلقه فشاری، هسته‌ی قالب و استوپر تشکیل شده است. با توجه به تقارن هندسه، بارگذاری و شرایط مرزی مسئله در جهت محیطی، فرآیند به صورت متقارن محوری شبیه‌سازی شده است. اجزای قالب به غیر از سنبه که به صورت صلب تحلیلی[۲] است، به صورت شکل‌پذیر در نظر گرفته شد. ورق به کار رفته به صورت تغییر شکل‌پذیر و با ضخامت ۲/۵ mm در نظر گرفته شد. همچنین، شبیه‌سازی سه بعدی این فرآنید نیز انجام گرفته است. نقشه‌ی مونتاژی و اجزای قالب در پیوست الف پایان‌نامه ارائه شده است. در شکل ۲-۶، طرحواره قالب بوش ارائه شده است.

---

[1] Import

[2] Analytical rigid



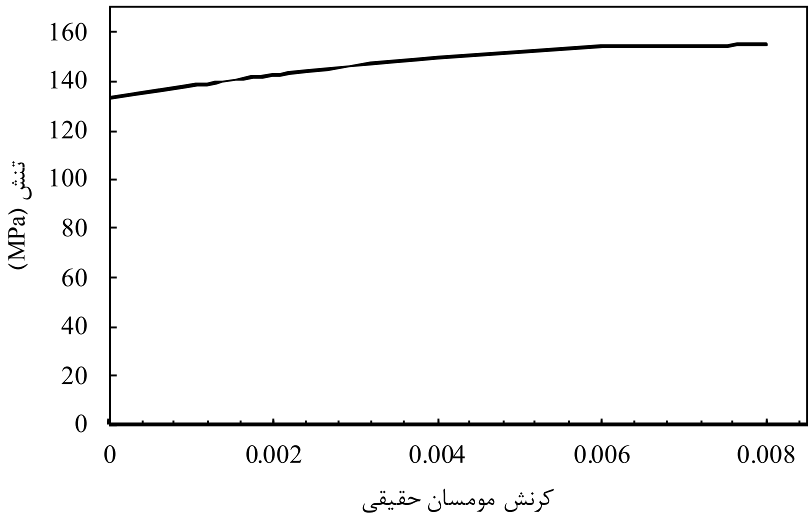
شکل ۲-۶: طرحواره قالب شکل‌دهی بوش

۲-۷- تعیین خصوصیات ورق

خصوصیات مکانیکی ورق، شامل منحنی تنش-کرنش مومسان حقیقی، نسبت پواسون، مدول یانگ و چگالی مطابق جدول ۲-۱ و شکل ۲-۷ برای آلیاژ AA3003 استفاده شد. نمودار شکل ۲-۷ از نتایج آزمون بخش ۴-۱-۱ به‌دست آمده است.

جدول ۲-۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ورق از آلیاژ AA3003

چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	نسبت پواسون [۴۴]
۲۸۰۰	۶۹	۱۳۳/۲	۰/۳۳



شکل ۲-۷: منحنی تنش-کرنش مومسان آلیاژ AA3003

۲-۸- تعیین تعداد گام حل، خروجی‌ها و نوع تحلیل

یک مسئله معمولاً از چند گام[1] تشکیل شده است که بارگذاری، شرایط مرزی اجزا، نوع تماس سطوح درگیر و خروجی‌های مطلوب ممکن است در گام‌های مختلف مسئله متفاوت باشد. در مسئله حاضر، تحلیل‌ها در دو تحلیل‌گر مختلف انجام شد. در ابتدا، با توجه به محاسبه‌ی تنش‌ها در هسته‌ی قالب و حلقه فشاری، از تحلیل‌گر استاندارد استفاده شد. در این تحلیل‌گر، از تحلیل نوع استاتیک عمومی[2] استفاده شد. سپس با وارد کردن[3] نتایج تحلیل از تحلیل‌گر استاندارد به تحلیل‌گر صریح، سنبه شروع به حرکت کرده و شکل‌دهی بوش انجام شد. در این تحلیل‌گر، از تحلیل نوع دینامیک صریح[4] استفاده شد. برای کاهش زمان محاسبات، در استفاده از تحلیل دینامیکی، زمان شکل‌دهی برابر ۰/۰۲ ثانیه در نظر گرفته شد.

---

[1] Step
[2] Static General
[3] Import
[4] Dynamic Explicit

از دیگر اقداماتی که باید در این مرحله انجام داد، تعیین خروجی‌های مناسب و مطلوب می‌باشد. در نرم-افزار آباکوس، دو نوع خروجی ارائه شده است که یکی به صورت میدانی[1] است و دیگری به صورت وابسته به زمان[2] است. در این تحقیق نیز خروجی‌های میدانی به عنوان خروجی مطلوب در نظر گرفته شد تا بدین ترتیب نمایش خروجی‌ها به صورت کانتوری و نموداری امکان‌پذیر باشد. در شبیه‌سازی این پژوهش، همه‌ی مؤلفه‌های جابه‌جایی، نیروهای عکس‌العمل، تنش و تنش فون میسز، کرنش پلاستیک و کرنش پلاستیک مؤثر به عنوان خروجی‌های تحلیل انتخاب شده‌اند.

۲-۹- تعیین شرایط اصطکاکی و نوع تماس سطوح

در این فرآیند، مشخصات فیزیکی تماس از نوع رفتار مماسی[3] تعریف شده است. همچنین برای تعیین ضریب اصطکاک، از نوع کولمبی و مقدار ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. نوع تماس‌ها نیز از نوع سطح به سطح[4] انتخاب گردیده است. لازم به ذکر است که برای هر دو نوع تحلیل، از همین شرایط استفاده شده است. همچنین برای تحلیل استاتیک عمومی، جهت بررسی تنش‌های ایجاد شده در حلقه فشاری و هسته‌ی قالب و همچنین جهت پیش‌تنش اولیه برای تحلیل دینامیکی، مقدار ۰/۲ جهت پرسی جا انداخته شدن حلقه فشاری و هسته قالب اعمال شده است. به این صورت که شعاع خارجی هسته‌ی قالب، ۰/۲ بزرگتر از شعاع داخلی حلقه‌ی فشاری اعمال شده است. این اندازه، در گام اول شبیه‌سازی، در تحلیل‌گر استاندارد و در قسمت Interference Fit اعمال شده است.

[1] Field Output
[2] History Output
[3] Tangential behaviour
[4] Surface to surface

۲-۱۰- تعریف شرایط مرزی و بارگذاری

در تحلیل استاتیک عمومی، شرایط مرزی بر روی قسمت کفِ حلقه فشاری و هسته‌ی قالب اعمال می‌شود. اما در قسمت تحلیل دینامیکی صریح مسئله، شرایط مرزی استفاده شده به دو دسته قیود تقسیم می‌شوند. نوع اول، قید مربوط به تقارن صفحه‌ای است که به کفِ هسته‌ی قالب، حلقه فشاری و استوپر داده می‌شود. نوع دوم، قید جابجایی است که برای محدودکردن درجه‌های آزادی قالب و همچنین جابه‌جایی سنبه به نقطه مرجع[1]، داده شده است. مقدار جابه‌جایی ۵۱ mm برای سنبه در نظر گرفته شد. نحوه‌ی اعمال جابه‌جایی در قسمت دامنه[2] به صورت گام نرم[3] تعیین شد.

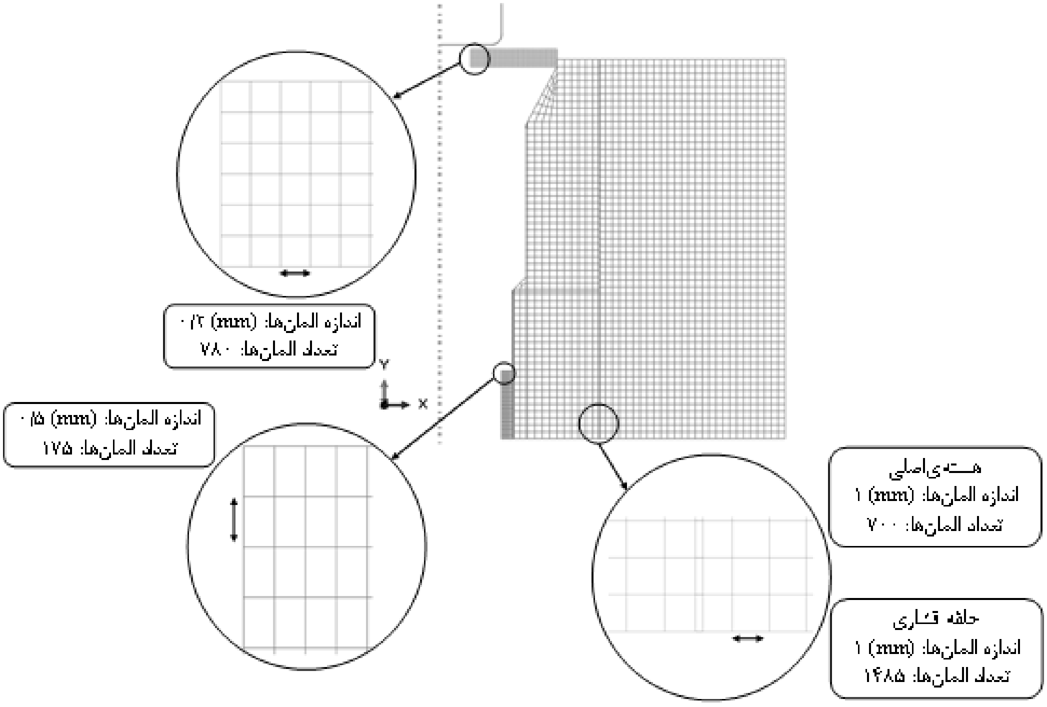
جهت وارد کردن پیش‌تنش ایجاد شده از تحلیل‌گر استاندارد به قسمت صریح مسئله، با استفاده از حالت اولیه[4]، و با انتخاب قطعاتی شامل حلقه فشاری و هسته‌ی قالب، این قطعات به قسمت دینامیک صریح مسئله وارد می‌شوند.

۲-۱۱- شبکه‌بندی و تعیین نوع المان‌ها

انتخاب شبکه‌بندی بهینه در دقت و کارایی تحلیل اجزای محدود یک اقدام اساسی محسوب می‌شود. یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تحلیل المان محدود، اندازه المان‌ها است. کاهش اندازه المان‌ها تا مقداری مشخص، دقت و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد و استفاده از المان‌های بزرگ دقت حل را کاهش می‌دهد. برای انجام تحلیل، از المان پیوسته‌ای، متقارن محوری با چهار گره و با انتگرال‌گیری

[1] Reference point
[2] Amplitude
[3] Smooth step
[4] Initial state

کاهش یافته[1]، برای ورق و دیگر قطعات، استفاده شد. اجزای صلب تحلیلی شامل سنبه نیازی به شبکه-بندی ندارد. شکل ۲-۸ نحوه نمایش شبکه‌بندی‌های اجزای قالب را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۸: نحوه‌ی نمایش شبکه‌بندی اجزای قالب

[1] CAX4R (A 4-node bilinear axisymmetric quadrilateral, reduced integration, hourglass control)

فصل ۳ طراحی و اجرای آزمون‌های تجربی

در این فصل، تجهیزات استفاده شده در محیط آزمایشگاه، برای انجام فرآیند SBMF، معرفی می‌شود. سپس فرآیند طراحی قالب و شکل‌دهی بوش فلنج‌دار در این مرحله انجام می‌شود. در انتها نمونه‌ها، جهت انجام آزمون کشش و سختی‌سنجی بررسی می‌شود.

۳-۱- دستگاه پرس

برای تأمین نیروی فشاری مورد نیاز برای فشردن ورق به داخل هسته‌ی قالب، از دستگاه پرس هیدرولیک، با ظرفیت نامی ۱۰۰ تن، استفاده شده است. تصویر این دستگاه در شکل ۳-۱ ارائه شده است. این دستگاه در طی انجام آزمایش به یک واحد کنترلی متصل بوده است. این واحد کنترلی، قادر به گزارش نیروی عکس‌العمل جک هیدرولیک، میزان جابجایی و سرعت حرکت جک، است. مقدار سرعت در این دستگاه قابل تنظیم بوده و از ۰/۱ mm/s تا ۱/۱ mm/s متغیر است.

شکل ۳-۱: دستگاه پرس هیدرولیک ژاو آریا

۳-۲- قالب بوش فلنجدار

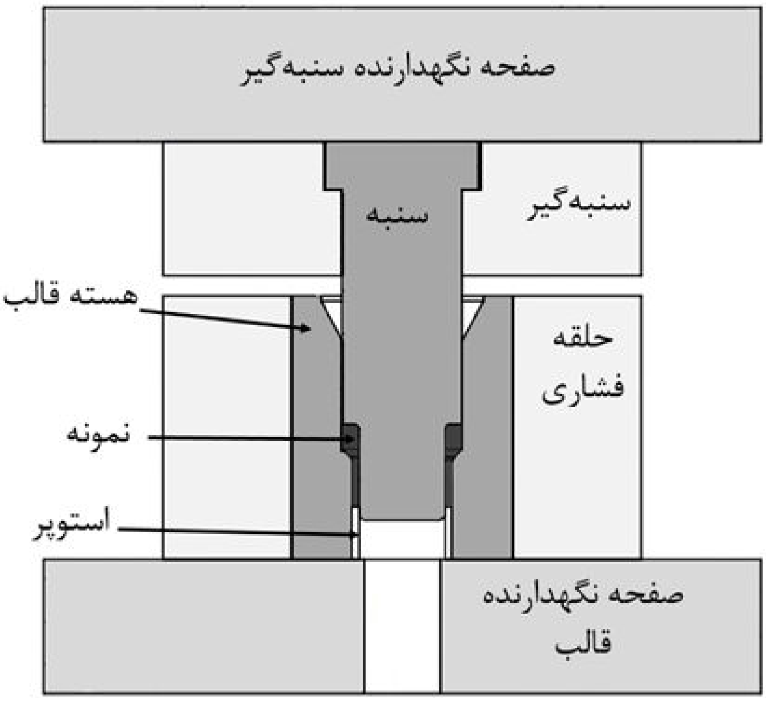
برای ایجاد تغییر شکل روی گرده‌ی اولیه، نیاز به طراحی و ساخت قالب بوش فلنجدار داریم. ابتدا اندازه-های ابتدایی قالب با توجه به اندازه‌های بوش استاندارد در جدول استاندارد [۴۳] مورد طراحی قرار گرفت و سپس در نرم افزار سالیدورکس[1] طراحی‌ها انجام گرفته و در نهایت اقدام به ساخت قالب گرفته شده است.

[1] Solid works

۳-۲-۱ اجزای قالب بوش فلنجدار

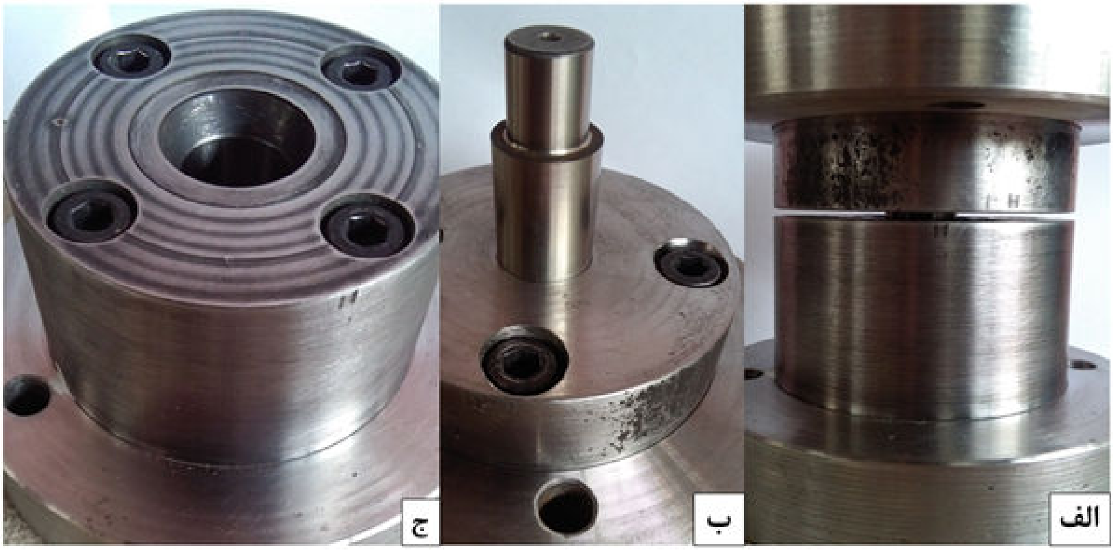
قالب مورد استفاده شده در این آزمایش دارای اجزای مهمی به عبارات زیر می‌باشد که در شکل ۳-۲ طرحواره اجزای قالب بوش فلنجدار نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳-۳ قالب شکل‌دهی بوش فلنجدار نیز نشان داده شده است.

۱- سنبه
۲- سنبه‌گیر
۳- صفحه نگهدارنده سنبه‌گیر
۴- هسته‌ی قالب
۵- حلقه فشاری[1]
۶- صفحه نگهدارنده قالب
۷- استوپر[2]



شکل ۳-۲: طرحواره اجزای قالب بوش فلنجدار

[1] Pressure ring
[2] Stopper



شکل ۳-۳: قالب شکل‌دهی بوش فلنجدار مورد استفاده شده در آزمایش، (الف) کل مجموعه‌ی قالب، (ب) مجموعه بالای قالب و (ج) مجموعه پایین قالب

با توجه به این که جنس قطعه مورد نظر از استحکام بالایی برخوردار بود و نیاز به نیروی بالای پرس برای انجام عملیات SBMF بود در انتخاب ماده اولیه قالب از مواد با استحکام مکانیکی بالا و قابل سخت‌کاری استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های مورد نظر از فولاد آلیاژی 34CrNiMo6 در بخش‌های مختلفی از قالب از جمله در سنبه‌گیر، صفحه نگهدارنده سنبه‌گیر، حلقه فشاری و صفحه نگهدارنده قالب استفاده شده است.

۳-۲-۲ طراحی قالب

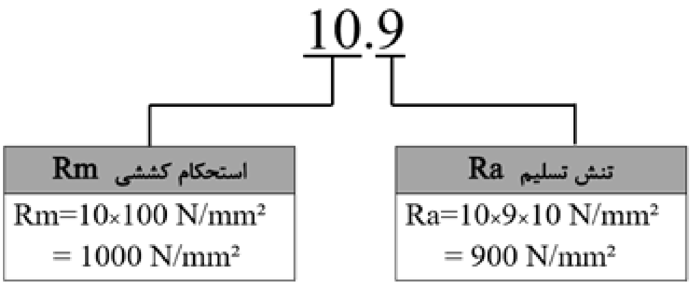
در طراحی قالب شکل‌دهی بوش فلنجدار، قسمت هسته قالب و حلقه فشاری در بخش ۲-۳ و ۲-۵ به دست آمده است. برای طراحی قسمت‌های دیگر قالب از جمله سنبه، سنبه‌گیر و صفحات نگهدارنده‌ی قالب و سنبه‌گیر از روابط ۳-۱ تا ۳-۳ استفاده شده است:

$$\tau_{Max} = \frac{\sigma_y}{2f} \quad (۱-۳)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (۲-۳)$$

$$A = \pi D t \quad (۳-۳)$$

این روابط برای محاسبه‌ی ضخامت سنبه‌گیر، صفحات نگهدارنده‌ی قالب و سنبه‌گیر و همچنین ضخامت قطر بزرگ سنبه (D_{1p}) استفاده شده است. در رابطه‌ی ۳-۱، f ضریب اطمینان می‌باشد که در طراحی، ۱/۵ در نظر گرفته شده است. همچنین در طراحی قالب از پیچ‌های استاندارد آلن M10 استفاده شده است که در شکل ۳-۵، نحوه‌ی محاسبات درجه استحکام پیچ استفاده شده در قالب را نشان می‌دهد. در رابطه-ی ۳-۴، با داشتن تنش تسلیم σ که از شکل ۳-۴ به دست می‌آید و قطر پیچ D، می‌توان نیروی مورد نیاز جهت انتخاب پیچ را به دست آورد.



شکل ۳-۴: طرز محاسبه درجه استحکام پیچها

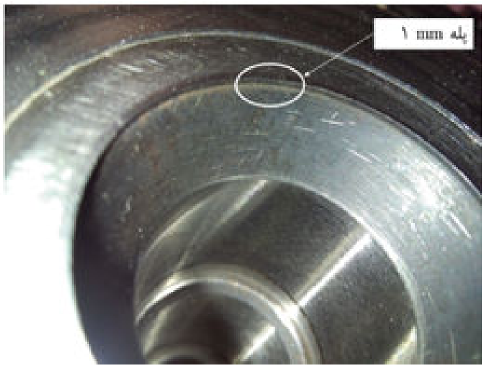
$$\sigma = \frac{F}{A} » F = \sigma \frac{\pi D^2}{4} \quad (۴-۳)$$

قطعات قالب با عملیات تراشکاری و فرزکاری به کمک دستگاه CNC ساخته شده است. پس از اتمام عملیات ماشینکاری به کمک عملیات حرارتی، هسته‌ی قالب ماتریس تا حدود HRC ۵۷ سخت شده است؛ همچنین پس از سخت‌کاری، هسته‌ی قالب سرد شده، و حلقه فشاری نیز گرم شده و هسته قالب به صورت پرسی داخل حلقه فشاری قرار داده شده است. سنبه قالب نیز از فولاد آلیاژی (۱/۲۰۸۰) X2 10Cr12 استفاده شده و پس از اتمام عملیات ماشین‌کاری به کمک عملیات حرارتی، تا حدود HRC ۵۵ سخت شده است. پس از عملیات ماشین‌کاری و سخت‌کاری، به دلیل آنکه نمونه نهایی می‌بایست از

کیفیت سطح قابل توجه‌ای برخوردار باشد، بدین جهت سطح سنبه و قسمت داخلی هسته قالب سنگ زده شده و پرداخت شده است که در شکل ۳-۵ نیز نمایان است.

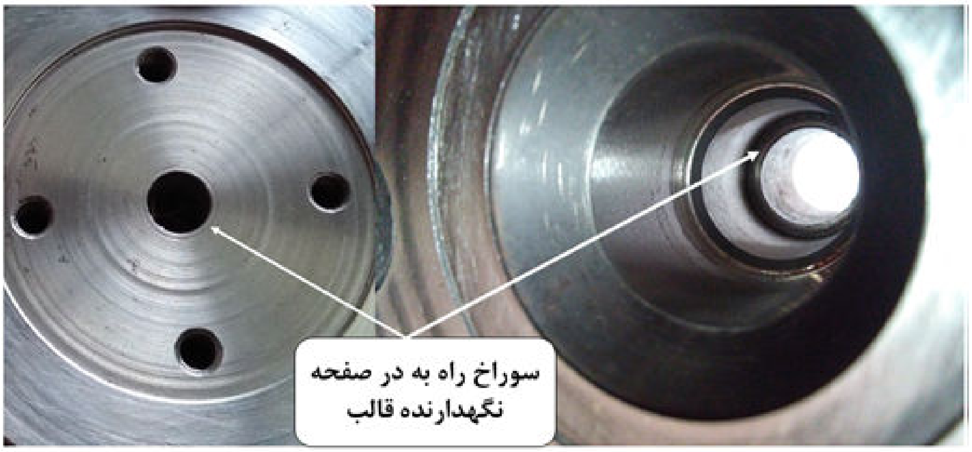
شکل ۳-۵: پرداخت شدن سطح سنبه و سطح داخلی هسته‌ی قالب با استفاده از سنگ‌زنی

در طراحی هسته‌ی قالب، برای موقعیت‌دهی گرده‌ها در ابتدای فرآیند همان‌طور که در شکل ۳-۶ نشان می‌دهد، پله‌ای در قالب اعمال شده است. این پله ۱ mm باعث می‌شود گرده‌ی اولیه به درستی روی سطح قالب موقعیت‌دهی شده و سپس سنبه نیروی مورد نیاز را اعمال می‌کند.



شکل ۳-۶: پله ۱ mm هسته‌ی قالب جهت موقعیت‌دهی گرده‌ی اولیه

از طرفی به دلیل اینکه بین سنبه و کانال هسته قالب، لقی کمی دارد و انطباق به صورت عبوری می‌باشد، و همچنین با استفاده کردن از روانکار، راه عبوری برای خروج هوا وجود ندارد، سوراخ راه به دری ایجاد شده است. این سوراخ بر روی مرکز صفحه نگهدارنده قالب و به قطر ۱۶ mm ایجاد شده است. شکل ۳-۷ صفحه نگهدارنده قالب با سوراخ ایجاد شده را نشان می‌دهد.

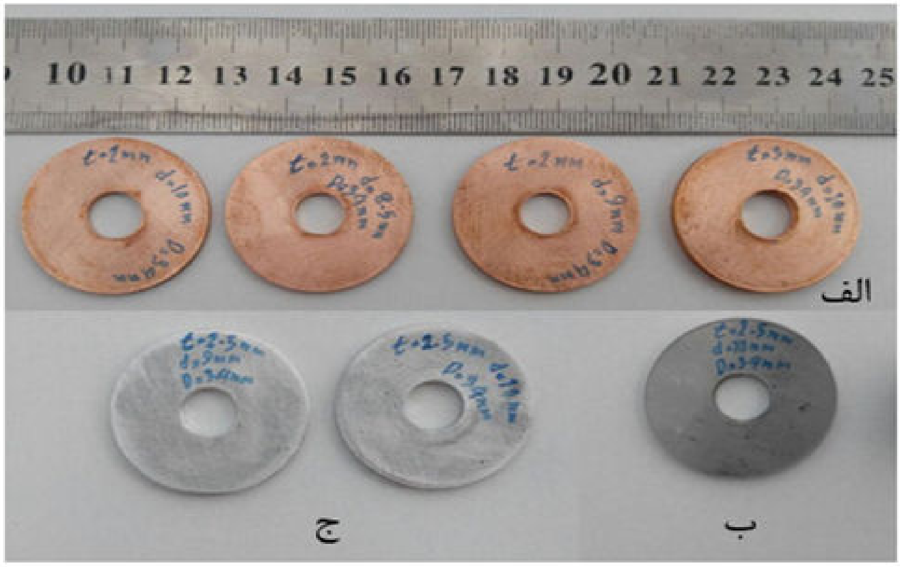


شکل ۳-۷: سوراخ ایجاد شده بر روی صفحه نگهدارنده قالب

۳-۳- مواد خام اولیه

برای اینکه شروع به انجام آزمایش SBMF کنیم نیاز به تعدادی مواد خام اولیه با ابعاد و سایز مشخص داریم. در شکل ۳-۸ نمونه‌های مسی، آلومینومی و فولادی نشان داده شده است. با توجه به ابعاد قالب و اندازه‌های داده شده برای آزمایش، ماده خام اولیه را به کمک برشکاری به ابعاد ۴۰×۴۰ mm برش داده شده است. سپس به قطرهای ۸/۵ mm، ۹ mm و ۱۰ mm سوراخکاری شده است. قطرهای سوراخکاری شده درون شفت قرار گرفته و پیچ شده است و در نهایت، روی دستگاه تراش بسته و به قطر ۳۴ mm روتراشی شده است. نکته‌ای که در مورد قطر خارجی گرده‌های آماده شده وجود دارد این است که با توجه به برابر بودن قطر ناحیه (الف) هسته‌ی قالب و قطر خارجی گرده اولیه (D_s) نیاز به این بود که جهت

سهولت قرارگیری نمونه‌ها درون قالب، قطر خارجی گرده‌های اولیه را به میزان ۰/۰۵ mm تا ۰/۱ mm کاهش دهیم.



شکل ۳-۸: گرده‌ی اولیه‌های مورد استفاده شده برای آزمایش، (الف) گرده‌ی اولیه‌های مسی با ضخامت ۲ و ۳ mm و قطرهای داخلی مختلف، (ب) گرده‌ی اولیه آلیاژی فولاد ضدزنگ ۳۰۴ و (ج) گرده‌ی اولیه‌های آلیاژی AA3003

خصوصیات ورق‌های مس و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در جدول ۳-۱ آورده شده است. همچنین خصوصیات آلیاژ آلومینیم ۳۰۰۳ در قسمت ۲-۸ آورده شده است.

جدول ۳-۱- خصوصیات ورق‌های مسی و فولادی [۲۵]، [۲۳]

جنس ورق	ضخامت h (mm)	چگالی ρ (Kg/m^3)	مدول یانگ E (GPa)	ضریب پواسون υ	تنش تسلیم σ_y (MPa)	استحکام کششی نهایی σ_{UTS} (MPa)
مس	۲ و ۳	۸۹۰۰	۱۳۰	۰/۳	۷۰	۲۲۰
فولاد ۳۰۴	۲/۵	۷۹۳۰	۲۰۰	۰/۲۹	۲۱۵	۵۱۵

۳-۴- روانکار مورد استفاده در فرآیند

MOLYSLIP EHT[1] یک مدل از گریس غلیظ[2] بنتون[3] ، ساخت کشور انگلستان است که حاوی مولیبدن دی‌سولفاید (MoS_2) و گرافیت می‌باشد، و برای درجه حرارت‌های بالا تا ۲۵۰°C طراحی شده است. از این گریس همچنین برای استفاده در دماهای معمولی که در آن فشار بالا و سرعت پایین است، توصیه می-شود. این نوع گریس، به طور کامل نسبت به آب، بخار آب و بسیاری از مواد شیمیایی مقاوم است و اسیدها و بازها هیچ تأثیری بر روی آن ندارد [۴۵]. در شکل ۳-۹ این نوع از گریس همراه با مشخصات آن نمایش داده شده است.

TECHNICAL DATA:

Grease Base	Bentone
Consistency N.L.G.I	No. 1
Solids Content	12 % (MoS_2, Graphite and others)
Worked penetration at 25°C	310/340
Drop Point	None
Temperature Range	10°c to 250°C

شکل ۳-۹: روانکار مورد استفاده در فرآیند

[1] MOLYSLIP Extra High Temperature Grease
[2] Non melt
[3] Bentone

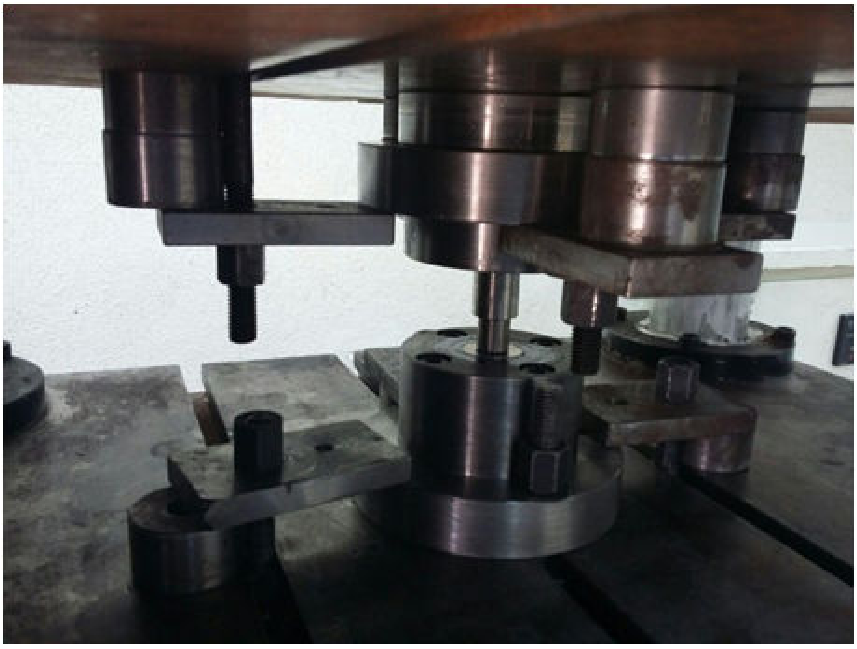
۳-۵- آزمون شکل‌دهی بوش فلنج‌دار

برای بررسی صحت و دقت بوش فلنج‌دار در شبیه‌سازی عددی، آزمون شکل‌دهی بوش فلنج‌دار با استفاده از آلیاژ AA3003، مس و ورق فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ انجام گرفته است. قطر خارجی گرده‌ی اولیه برای انجام این فرآیند mm ۳۳/۹، قطر داخلی آن‌ها ۸/۵، ۹ و mm ۱۰ و ضخامت ورق‌های فولادی و آلومینیومی mm ۲/۵ و برای مس ۲ و mm ۳ است.

در ابتدا و قبل از انجام آزمون تجربی ابتدا قالب ساخته شده به وسیله‌ی خمیر مجسمه‌سازی تست شده است. در این روش، ابتدا خمیر مجسمه‌سازی به اندازه‌ی کافی بر روی سنبه زده شده و با یک نایلون بر روی خمیر پیچانده شده است. سپس درون قالب روانکاری کرده و سنبه با نیروی دست به درون قالب فشرده شده است. دلیل استفاده از نایلون این است که خمیر بعد از خشک شدن و جدا کردن سنبه از درون قالب خرد می‌شود. هدف از این کار این بود که از صحت ساخت قالب اطمینان حاصل شود. شکل ۳-۱۰ شکل‌گیری بوش با استفاده از خمیر مجسمه‌سازی را نشان می‌دهد.

شکل ۳-۱۰: شکل‌گیری بوش با استفاده از خمیر مجسمه‌سازی

لازم به ذکر است که فرآیند شکل‌دهی بوش فلنجدار در دمای محیط انجام گرفته است. حال، بعد از اطمینان از صحت انجام فرآیند، قالب بر روی میز دستگاه پرس بسته شده است. ابتدا مجموعه‌ی بالای قالب، که شامل سنبه و سنبه‌گیر می‌باشد را درون مجموعه قالب پایینی قرار داده و روی میز پرس گذاشته می‌شود. این کار را به جهت هم‌محور شدن مجموعه قالب بالا و پایین انجام می‌شود. سپس در حالی که کل مجموعه‌ی قالب بر روی میز پرس قرار دارد، قسمت پایینی قالب، که صفحه‌ی نگهدارنده‌ی قالب نام دارد به کمک روبنده‌ها به میز پایینی دستگاه پرس بسته می‌شود. سپس دو میز دستگاه پرس را به یکدیگر نزدیک کرده به نحوی که میزان درگیری سنبه داخل هسته‌ی اصلی حفظ شده باشد، اقدام به محکم کردن قسمت صفحه‌ی نگهدارنده‌ی سنبه‌گیر قالب به کمک روبنده‌ها در میز بالایی دستگاه پرس می‌کنیم. پس از اطمینان از محکم بسته شدن دو طرف قالب به میزهای دستگاه پرس، به جهت قرار دادن ماده‌ی خام درون قالب، بین سنبه و ماتریس با جابجایی میز دستگاه پرس فاصله ایجاد می‌کنیم . شکل ۳-۱۱ نحوه‌ی نمایش بسته شدن مجموعه قالب بر روی دستگاه پرس را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱: نحوه نمایش بسته شدن مجموعه قالب بر روی پرس

لازم به ذکر است که جهت ایجاد جریان مواد مناسب و یکنواخت، در انتهای قطعات و با توجه به ارتفاع تمام شده‌ی قطعات نهایی، استوپرهایی با ارتفاع‌های مختلف ساخته شده و با استفاده از عملیات حرارتی سخت شده است. این استوپرها قبل از شروع فرآیند شکل‌دهی، درون ماتریس قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۱۲ استوپرهایی با ارتفاع‌های مختلف نمایش داده شده است.

شکل ۳-۱۲: استوپرهای مختلف جهت ایجاد جریان یکسان مواد در انتهای قطعات

قبل از قرار دادن ماده‌ی خام اولیه داخل قالب نیاز به مقداری روانکار است. این روانکار اصطکاک بین قطعه و بدنه‌ی داخلی هسته قالب را کاهش می‌دهد و میزان نیروی لازم برای پرس را نیز به همین نسبت کاهش می‌دهد. سنبه نیز قبل از اعمال نیرو، باید روانکاری شود. عدم روانکاری باعث چسبیدن قطعه به سنبه می‌شود. شکل ۳-۱۳ چسبیدن قطعه به سنبه را نشان می‌دهد.

شکل ۳-۱۳: چسبیدن قطعه به سنبه به دلیل روانکاری نشدن سنبه

پس از آغشتن سنبه و ماتریس به ماده روانکار، نمونه داخل ماتریس قرار داده شده است. نسبت کشش (قطر سنبه به قطر داخلی نمونه) در این فرآیند بین ۱/۸ تا ۲ است. این نسبت کشش با استفاده از شبیه‌سازی به دست آمده است. سپس، با جابجایی میز دستگاه پرس اقدام به اعمال بار به مقدار mm/s ۰/۲ روی ماده‌ی خام اولیه می‌کنیم. در طی انجام مراحل، بسته به نوع نمونه، میزان بار اعمالی متغیر می‌باشد. به نحوی که مقدار بار در ابتدای فرآیند در نمونه‌ی آلومینیومی از ۱ تن بر میلیمتر مربع به ۱۲ تن بر میلیمتر مربع در مراحل پایانی می‌رسید. همچنین در نمونه مسی بسته به ضخامت، از ۱ تن بر میلیمتر مربع در ابتدای فرآیند به ۳۰ تن بر میلیمتر مربع در مراحل پایانی می‌رسید و در مورد استیل ۳۰۴ نیز از ۴ تن بر میلیمتر مربع در ابتدا به ۶۰ تن بر میلیمتر مربع در مراحل پایانی می‌رسید. سپس در مرحله پایانی و بعد از شکل دادن نمونه‌های مورد نظر، سنبه آزاد شده و با باز کردن پیچ‌های ماتریس از صفحه‌ی نگهدارنده‌ی قالب، نمونه از داخل ماتریس خارج شده و با استفاده از وسایل اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور انجام برخی آزمایش‌ها از قبیل آزمون سختی‌سنجی و تست کشش نیاز است که نمونه به صورت کامل آماده سازی شود تا شرایط لازم را برای انجام آزمایش بدست آورد. در این تحقیق آزمون سختی‌سنجی و تست کشش بر روی نمونه‌ها انجام شده است که در ادامه به نحوه آماده‌سازی این نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌ها پرداخته شده است.

۳-۶- آزمون سختی‌سنجی

۳-۶-۱ آماده‌سازی نمونه‌ها جهت پالیش کردن

برای انجام آزمون‌هایی مانند اندازه‌گیری سختی، باید سطح نمونه صافی سطح مناسبی داشته و در جای خود ثابت شده باشد. هرگونه تخطی از صافی سطح مورد نیاز، دقت نتایج را به شدت کاهش می‌دهد. یکی

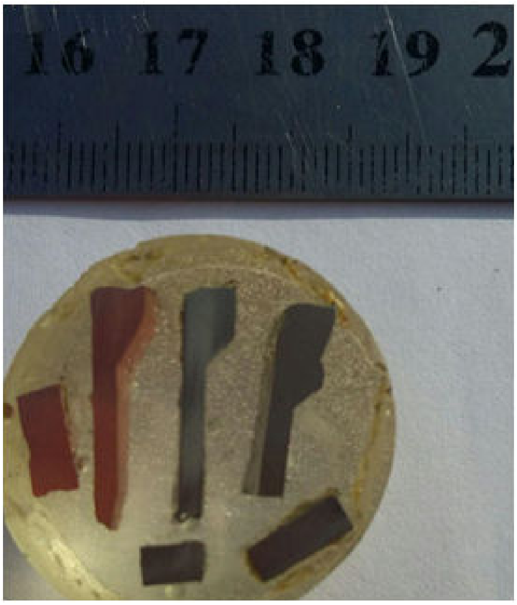
از راههای تثبیت نمونهها مانت کردن است. مانت کردن از طریق قرار دادن نمونه در ماده‌ای پلیمری انجام می‌شود. در این مطالعه از مخلوط دو ماده‌ی رزین[1] و سخت‌کننده[2] با نسبت ۲ به ۱ استفاده شد. ابتدا نمونه در قالب مناسبی قرار داده می‌شود و بدنه‌ی داخلی قالب توسط گریس چرب می‌شود تا قطعه‌ی مانت شده از آن به آسانی خارج شود. سپس مقدار مناسبی از هر دو جزء توزین شده و با یکدیگر مخلوط و هم زده می‌شود تا عملیات بسپارش[3] صورت پذیرد. نمونه روی شیشه‌ای که دور آن را به اندازه‌ی قطر لوله‌ی قالب گریس زده شده قرار گرفته؛ سپس قالب روی شیشه گذاشته می‌شود، رزین آماده شده در قالب ریخته شده و به مدت ۱۲ الی ۲۴ ساعت زمان داده می‌شود. پس از آن قطعه مانت شده از قالب خارج و آماده‌ی پالیش کاری می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های آماده سازی نمونه جهت سختی‌سنجی قرار دادن نمونه برش خورده به صورت پرسی در داخل مقطعی از پروفیل تفلون برش خورده است. به کمک این روش هم می‌توان نمونه را ثابت نگه داشت و ضمن اینکه قابلیت پالیش کاری نمونه را افزایش داد.

برای رسیدن به صافی سطح مورد نیاز، ابتدا نمونهها با سمباده‌های[4] شماره‌ی ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ سمباده می‌شوند. در نهایت برای تکمیل فرآیند پالیش‌کاری[5]، سطح نمونه توسط خمیر الماس، ابتدا با خمیر ۳-۴ میکرون و در مرحله بعدی با خمیر ۰/۵ – ۱ میکرون پالیش می‌شود تا سطح نمونهها کاملا صیقلی و آینه‌ای شود. پس از این مراحل، نمونه آماده‌ی آزمون‌های بعدی می شود. (شکل ۳-۱۴ و شکل ۳-۱۵)

---

[1] Resin
[2] Hardener
[3] Polymerization
[4] Sandpaper
[5] Polishing



شکل ۳-۱۴: قطعات مانت شده، سمباده خورده و پالیش شده

شکل ۳-۱۵: دستگاه پالیش (METCO)

۳-۶-۲ آزمون سختی

برای انجام آزمون سختی‌سنجی از دستگاه ریز سختی سنج پروفتشنیک[1] ساخت شرکت بیلز[2] آلمان استفاده شد. دستگاه ریز سختی سنج پروفتشنیک توانایی ۶ برابر بزرگ‌نمایی شیئی در ترکیب با بزرگ-

[1] Kb prueftechnik
[2] Bails

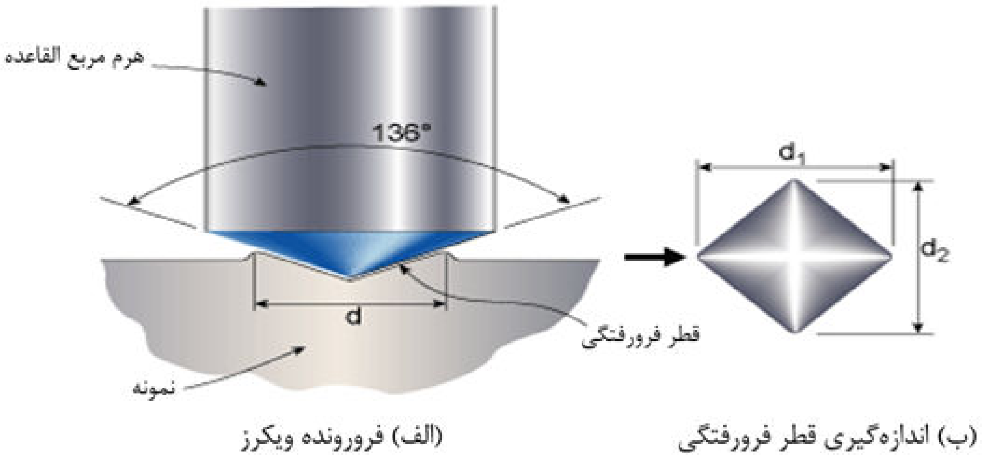
نمایی چشمی ۲۰ برابر را داراست. این دستگاه شامل اسکوپ نوری و یک فرورونده‌ی ویکرز می‌باشد که به یک رایانه متصل بوده و خروجی را نمایش می‌دهد. فرورونده ویکرز، با سر هرمی الماسِ با قاعده‌ی مربعی و با زاویه‌ی رأس°۱۳۶ است (شکل ۳-۱۶). این فرورونده بسته به نیاز از kg ۰/۰۱ تا kg ۱۰ به جسم نیرو وارد کرده و در آن نفوذ می کند. فرورونده به مدت ۱۰ ثانیه نیرو به جسم وارد کرده و سپس به حالت اولیه باز می‌گردد. استاندارد مورد استفاده در این آزمون ASTM E384 است. نمونه باید قبل از انجام آزمون مانت و پالیش شود. عملیات مانت کردن باید به گونه‌ای انجام پذیرد که قطعه در داخل مانت کاملاً ثابت شده و در اثر نیروی فرورونده حرکت نکند؛ هم‌چنین سطح نمونه باید کاملاً عمود بر محور فرورونده (با رواداری ± 1 درجه) باشد. آزمون در دمای محیط و در محدوده‌ی° C ۱۸ تا ° C ۲۵ انجام می‌شود. عدد سختی هرم الماسی یا عدد سختی ویکرز (VHN یا VPN) به صورت بار تقسیم بر مساحت فرورفتگی تعیین می‌شود. در عمل این مساحت از روی مقادیر میکروسکوپی طول‌ها و قطرهای اثر محاسبه می‌شود. عدد سختی را می‌توان با استفاده از رابطه ۳-۵ تعیین کرد:

$$\frac{2P\sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1.854\,P}{L^2} \qquad (۵\text{-}۳)$$

که P: بار، (kg)

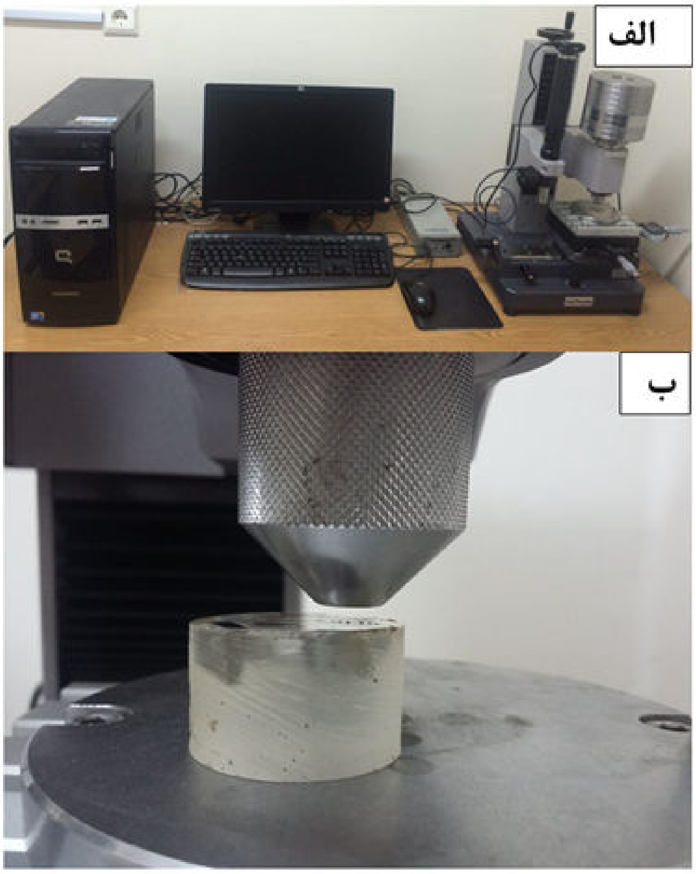
L : طول میانگین قطرها، (mm)

θ : زاویه °۱۳۶ بین وجوه مقابل الماس



شکل ۳-۱۶: فرورونده‌ی ویکرز

نیروهای به کار رفته در این آزمون ۵ کیلوگرم است. تصاویر فرورفتگی توسط نرم‌افزار هاردوین پردازش شده و با استفاده از طول اثر فرورفتگی و عمق آن، مقدار سختی مشخص می‌شود. شکل ۳-۱۷ دستگاه سختی سنج پروفتشنیک و نحوه‌ی قرار گرفتن نمونه در زیر فرورونده دستگاه نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۷: (الف) سختی سنج پروفتشنیک، (ب) قرار گرفتن فرورونده بر روی نمونه

۳-۷- آزمون کشش ورق

آزمون کشش[1] یکی از مهمترین آزمون‌های مواد فلزی است. برای محاسبه‌ی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA3003، نمونه‌هایی بر طبق استاندارد ASTM-E8[2] آماده گردیده است.

۳-۷-۱ دستگاه کشش

ماشین‌های تست کشش در انواع مختلف عرضه می‌شوند. بعضی از آنها تنها برای انجام تست کشش طراحی شده‌اند، در حالی که بعضی دیگر از نوع یونیورسال هستند و برای تست کشش و فشار تک محوری

[1] Tensile test
[2] Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

و همچنین خمش سه نقطه‌ای مناسب هستند. بعضی از این ماشین‌ها، کوچک و رومیزی هستند که نیروی حداکثر آنها بین ۵۰۰ N تا ۲۰ kN تغییر می‌کند.

علیرغم اندازه و نوع کاربرد ماشین، یعنی ماشین‌های کوچک یا بزرگ و ماشین‌های مورد استفاده برای آزمون کشش، فشار یا خمش، لازم است تعدادی ویژگی مشخص در ماشین وجود داشته باشد. این ویژگی‌ها عبارتند از:

۱- سیستمی برای تنظیم محل و نگهداری نمونه آزمایش در وضعیت مطلوب

۲- مکانیزمی برای اعمال نیرو به نمونه آزمایش و تغییر نیرو با آهنگ کنترل شده

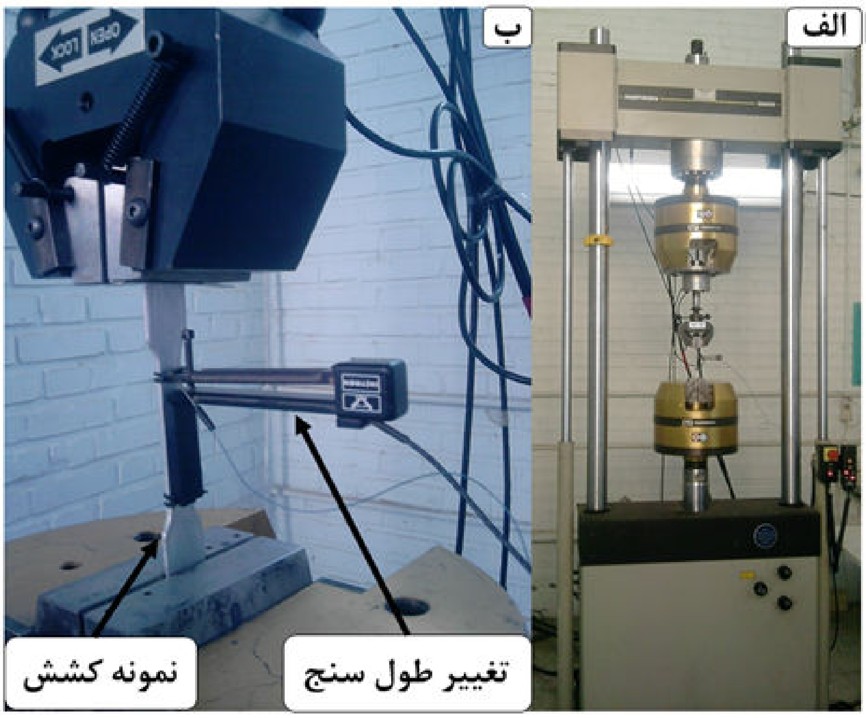
۳- سیستمی برای اندازه‌گیری دقیق نیروی وارد شده

علاوه بر این، در بعضی از ماشین‌های آزمایش، سیستمهایی برای اندازه‌گیری و ثبت دقیق تغییرات ابعاد نمونه آزمایش گنجانده شده‌اند، ولی عموماً این گونه اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاههای مجزا مانند ازدیاد طول‌سنج و پیچش‌سنج، که به نمونه‌ی آزمایش وصل می‌شوند، صورت می‌گیرد.

سیستم درونی ماشین آزمایش به منظور اعمال نیرو، ممکن است مکانیکی یا هیدرولیکی باشد. معمولاً سیستم مکانیکی شامل یک یا چند پیچ متصل به سر نیرو دهنده است و پیچ توسط مهره‌ای چرخان حرکت می‌کند. در سیستم‌های هیدرولیکی نیرو توسط یک پیستون هیدرولیکی که درون سیلندری مملو از روغن حرکت می‌کند، اعمال می‌شود.

در این آزمون، برای محاسبه‌ی تنش تسلیم و استحکام نهایی، از دستگاه کشش محوری اینسترون، استفاده شد. این دستگاه قابلیت اعمال نیروی کششی تا ۲۰۰ kN را دارد. جهت بستن نمونه‌ها بر روی فک‌ها، از یک طرف از فک خود دستگاه که به صورت هیدرولیکی می‌باشد استفاده شده است و در طرف دیگر، از فک مکانیکی دستی که در قسمت لودسل تعبیه شده است، استفاده گردید. نیروی فک‌های این

دستگاه از یه طرف توسط اهرمی مکانیکی تعبیه شده در بالای فک تأمین می‌شود، در طرف دیگر به صورت هیدرولیکی می‌باشد. تصویر این دستگاه در شکل ۳-۱۸ ارائه شده است. این دستگاه در طول انجام آزمایش به یک واحد رایانه‌ای متصل بوده و کلیه‌ی حرکات آن توسط کامپیوتر قابل کنترل است. نرخ کرنش اولیه، سرعت کشش و اندازه‌ی مرجع در تنظیم دستگاه برای انجام آزمایش در جدول ۳-۲ ارائه شده است. برای ثبت خروجی‌های دستگاه، تسهیلات کاملاً خودکار رایانه‌ای بر روی ماشین تعبیه شده که این خروجی‌ها را می‌توان به‌صورت فایل Excel با پسوند CSV.* دریافت کرد.



شکل ۳-۱۸: دستگاه کشش اینسترون (الف) تصویر کلی دستگاه، (ب) موقعیت تغییر طول سنج و نمونه‌ی کشش

یکی از عوامل مهم که در افزایش دقت و اطمینان بخشی به نتایج حاصل از این آزمون اثر دارد، ثبت دقیق میزان تغییر طول ناحیه مبنا با افزایش نیرو است. این امر با استفاده از تغییرطول‌سنج انجام می‌شود. از

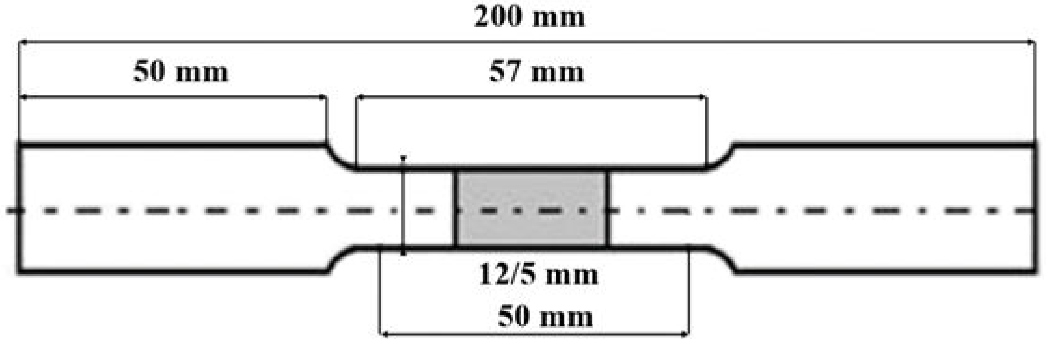
ویژگی‌های دستگاه مذکور، استقرار سیستم تغییرطول سنج بر روی خود دستگاه است که این امر قابلیت عملکردی آن را بالا برده است. این سیستم در شکل ۳-۱۸-ب نشان داده شده است.

جدول ۳-۲- مشخصات آزمون کشش تجربی

نوع آزمایش	سرعت کشش(mm/sec)	اندازه‌ی مرجع (mm)	نرخ کرنش اولیه (1/sec)
کشش تک‌محوره	۰/۰۵	۹۶	۰/۰۰۱

۳-۷-۲ نمونه‌های آزمایش کشش

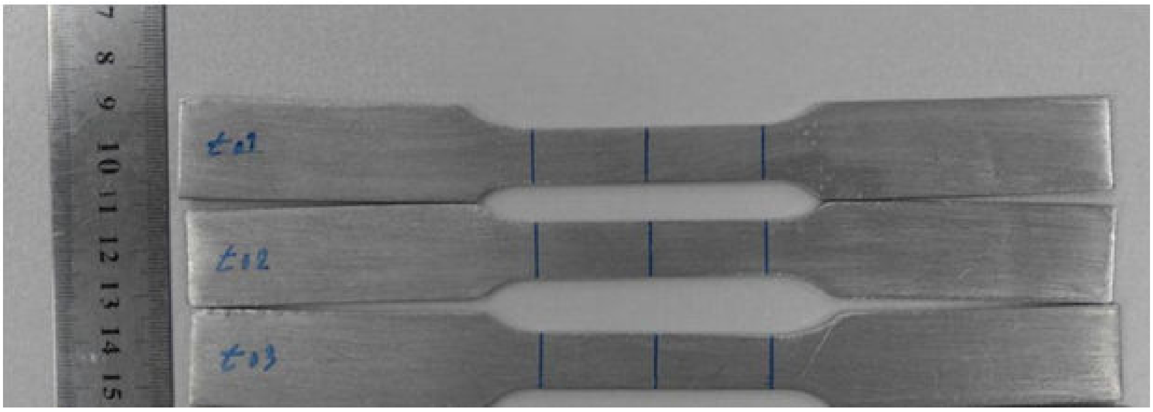
هندسه‌ی نمونه‌های کشش تک‌محوره بر طبق استاندارد ASTM-E8 [1] در شکل ۳-۱۹، آمده است.



شکل ۳-۱۹: ابعاد استاندارد نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8

از نمونه‌ی بالا سه عدد تهیه شد که برای به دست آوردن خواص مکانیکی ورق، استفاده شده است. تصویر سه نمونه‌ی کشش پیش از آزمون در شکل ۳-۲۰ آمده است.

[1] Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials



شکل ۳-۲۰: نمونه‌های آزمایش کشش از آلیاژ AA3003 بر اساس استاندارد ASTM-E8

۳-۸- وسایل اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری عرض و طول مرجع نمونه‌ی کشش تک‌محوره پیش و پس از آزمون کشش، از کولیس دیجیتال با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ mm، استفاده شد و برای اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌های کشش (تک-محوره) و ضخامت بوش شکل داده شده، از میکرومتر ضخامت‌سنج با دقت ۰/۰۱ mm استفاده شد. تصویر این دو وسیله اندازه‌گیری در شکل ۳-۲۱ ارائه شده است.

شکل ۳-۲۱: تجهیزات اندازه‌گیری (الف) ریزسنج ضخامت (ب) کولیس دیجیتال

فصل ۴ نتایج و بحث

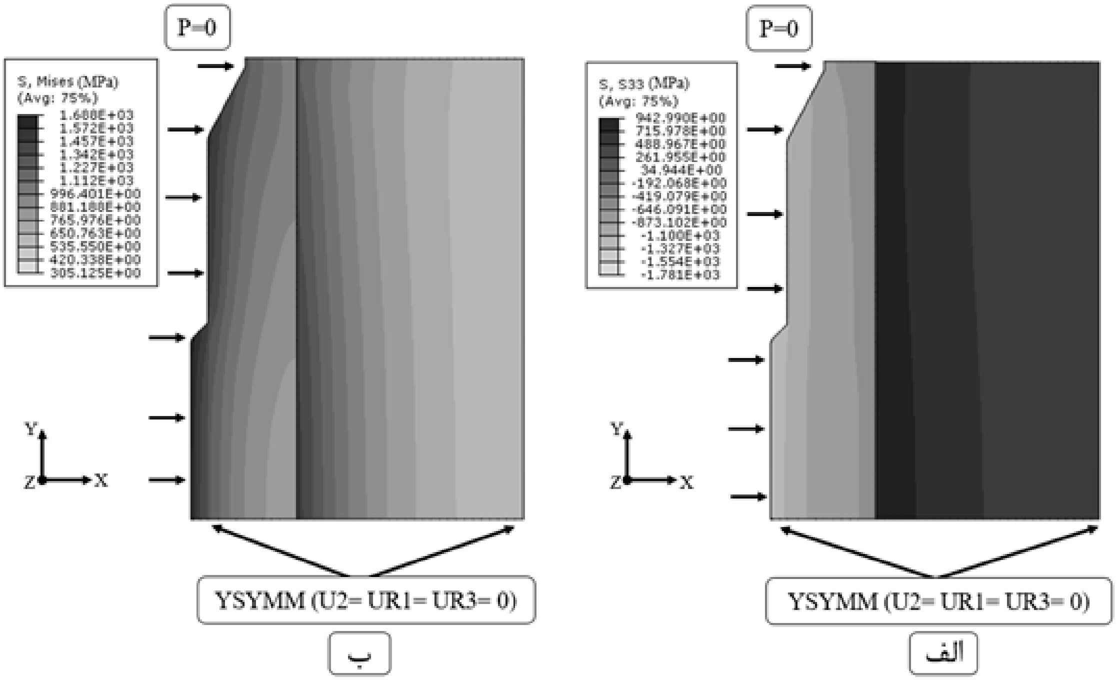
در این فصل، نتایج آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی همراه با تصاویر و نمودارهای مربوطه، ارائه شده است. در ابتدا، نتایج آزمون عددی شامل تنش‌های حلقوی در قالب و هسته‌ی اصلی، بررسی زوایای Φ، Ψ و شعاع‌های R_1 و R_2 در قالب بیان می‌شود. سپس، نتایج آزمون‌های تجربی شامل نتایج آزمون کشش، نتایج آزمون شکل‌دهی بوش فلنجدار و نتایج آزمون سختی ارائه شده است. در انتها، مقایسه‌ای بین نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی در شکل‌دهی بوش فلنجدار، انجام گرفته است.

۴-۱- نتایج حل عددی

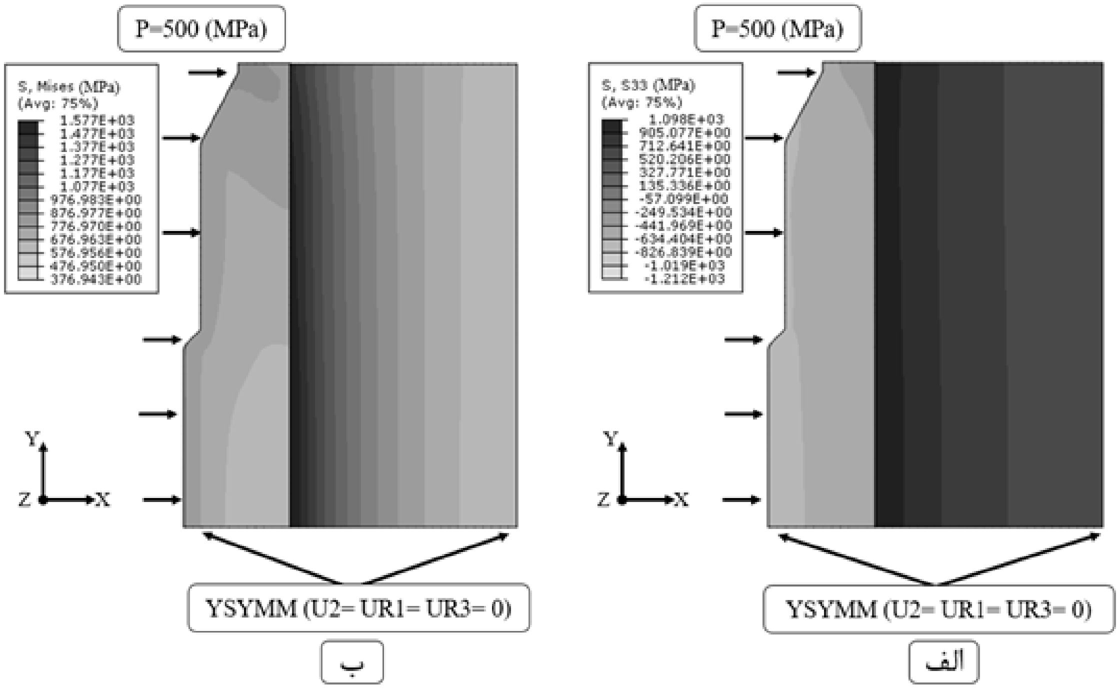
در این بخش، ابتدا نتایج تحلیل توزیع تنش حلقوی در هسته‌اصلی و حلقه فشاری ارائه و بررسی می‌شود. در ادامه، نتایج زوایای Φ، Ψ، شعاع‌های R_1 و R_2 بررسی می‌شود. در انتها، نتایج شبیه‌سازی شکل‌دهی بوش فلنجدار آلیاژ AA3003، شامل مقایسه‌ی نمونه‌ی شکل‌داده شده‌ی تجربی با عددی، گزارش خواهد شد.

۴-۱-۱ تحلیل توزیع تنش در قالب

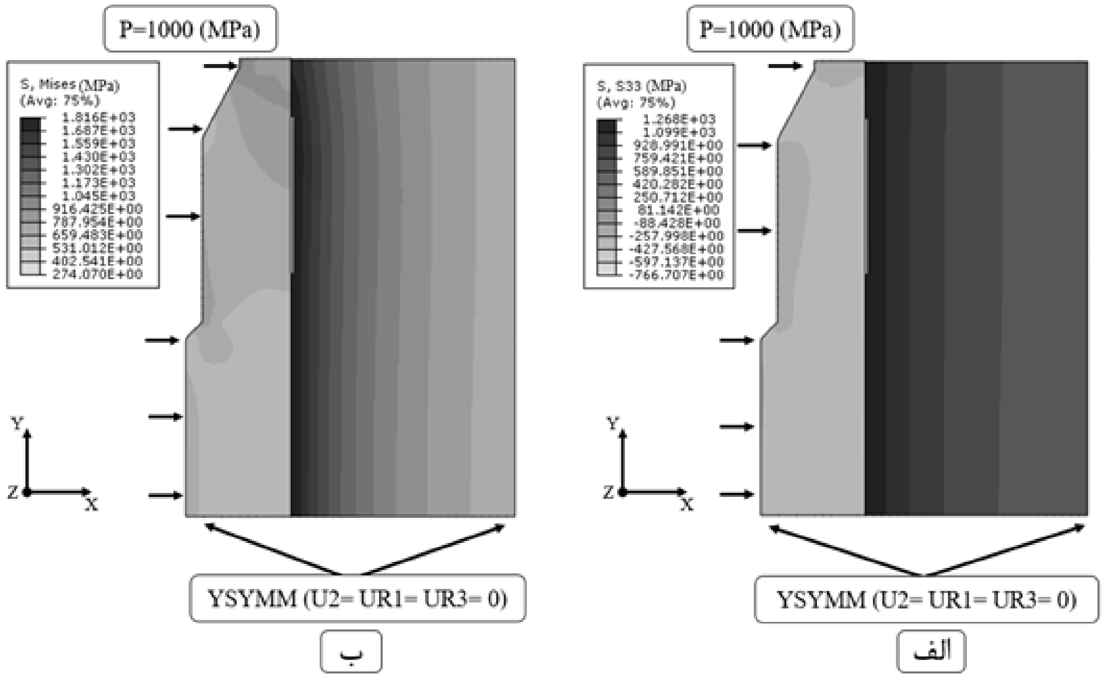
یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در عمر قالب‌ها، میزان تنش به وجود آمده در آنها حین فرآیند می‌باشد. گرچه قالب در فرآیند شکل‌دهی دچار تغییر شکل پلاستیک نشده و تنش بوجود آمده در آن از تنش سیلان کمتر است، اما هر قدر میزان تنش قالب کمتر باشد، عمر قالب بیشتر شده و کمتر دچار واماندگی خستگی یا سایش می‌شود. بر همین اساس در این قسمت برای فشارهای مختلف، حداکثر تنش قالب به دست آمد. فرآیند مونتاژ هسته‌ی قالب در حلقه‌ی فشاری و بارگذاری آن به کمک نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس استاندارد تحلیل شد. از شکل ۴-۱ تا شکل ۴-۵ تصاویر حاصل از تحلیل توزیع تنش حلقوی و تنش فون میسز در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. همچنین از شکل ۴-۶ تا شکل ۴-۸ تصاویر حاصل از تحلیل توزیع تنش فشاری را نشان می‌دهد.



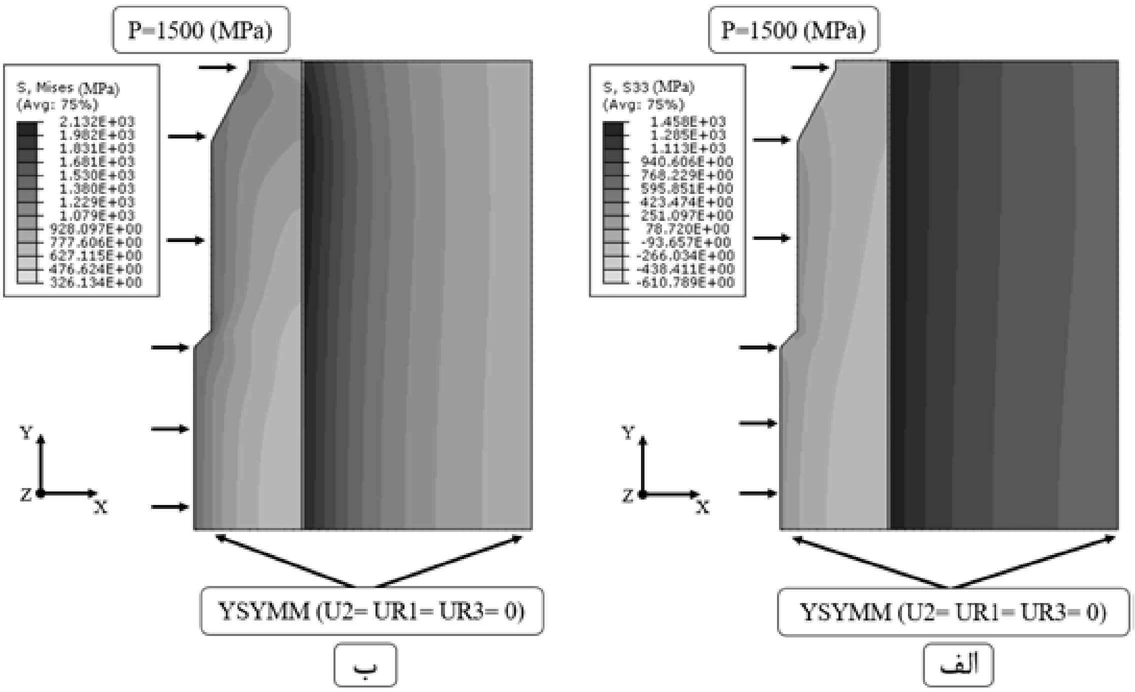
شکل ۴-۱: توزیع تنش با P=0 در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز



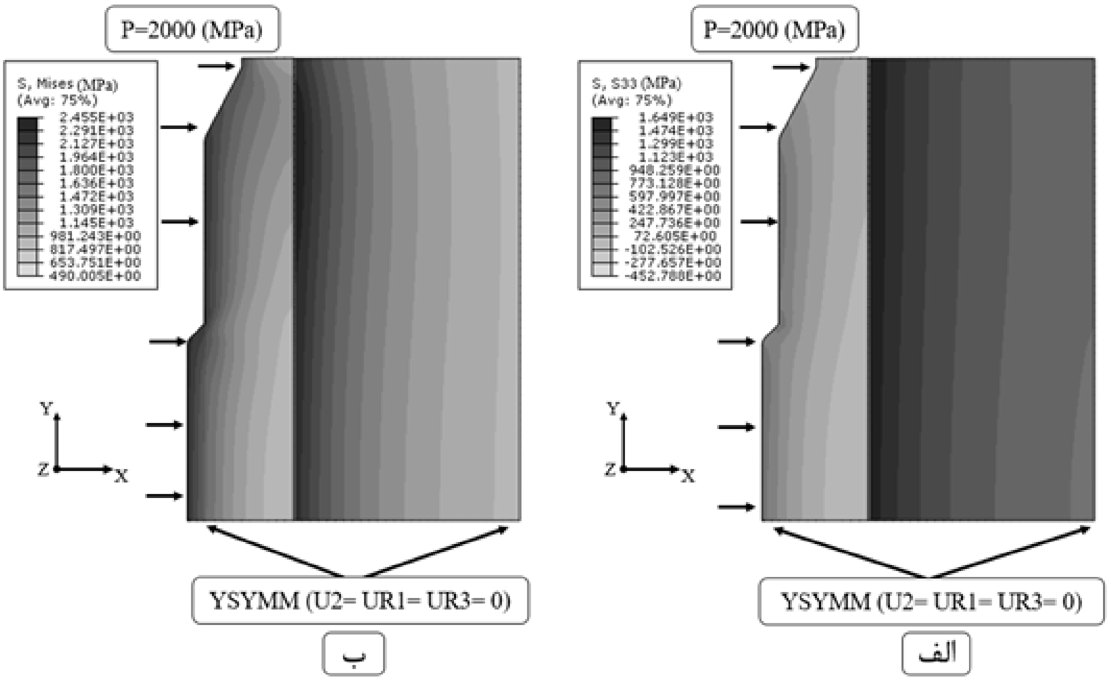
شکل ۴-۲: توزیع تنش با P=500 MPa در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز



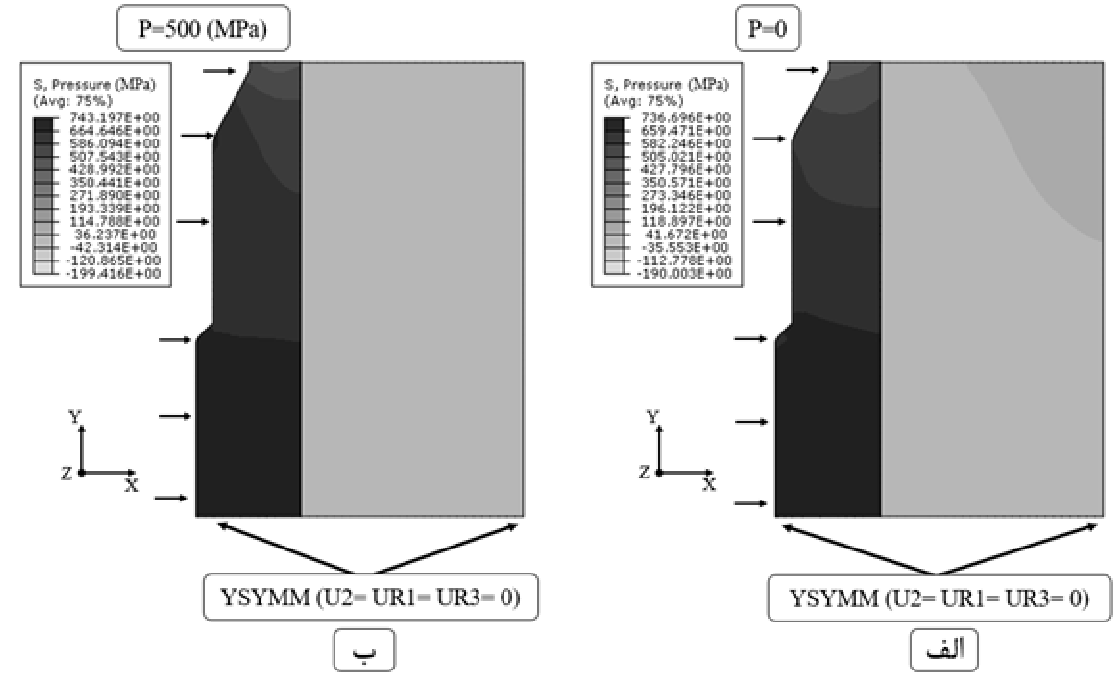
شکل ۴-۳: توزیع تنش با P=1000 MPa در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز



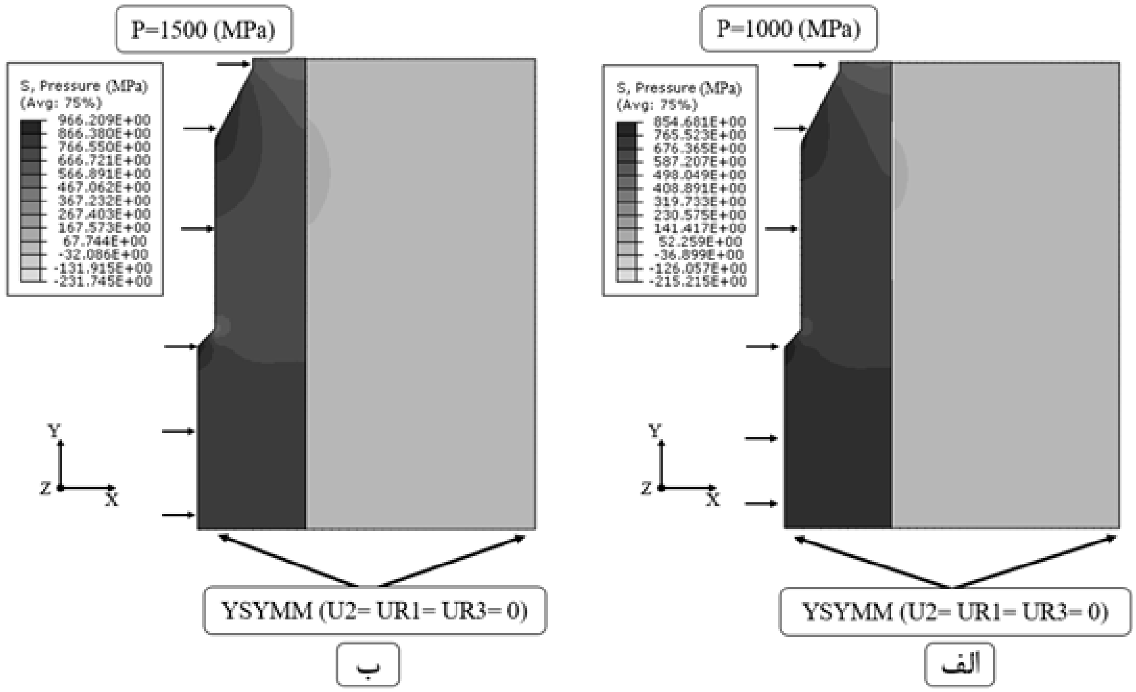
شکل ۴-۴: توزیع تنش با P=1500 MPa در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز



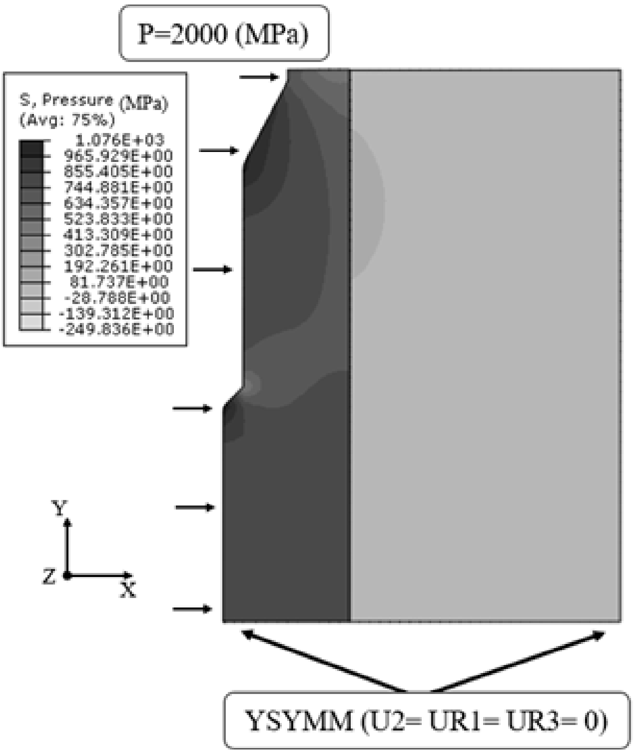
شکل ۴-۵: توزیع تنش با P=2000 MPa در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) تنش حلقوی و (ب) تنش فون میسز



شکل ۴-۶: توزیع تنش فشاری در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) P=0 (MPa) و (ب) P=500 (MPa)

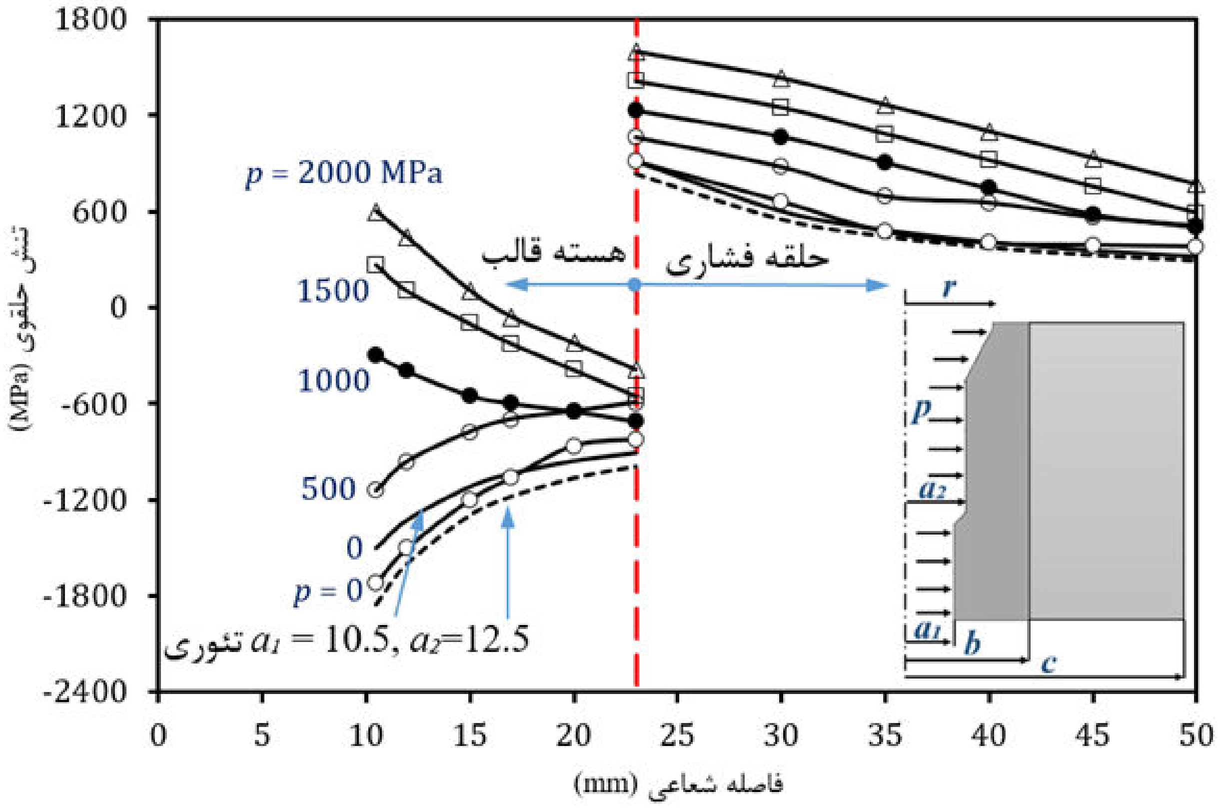


شکل ۴-۷: توزیع تنش فشاری در هسته قالب و حلقه فشاری (الف) P=1000 (MPa) و (ب) P=1500 (MPa)



شکل ۴-۸: توزیع تنش فشاری در هسته قالب و حلقه فشاری، P=2000 (MPa)

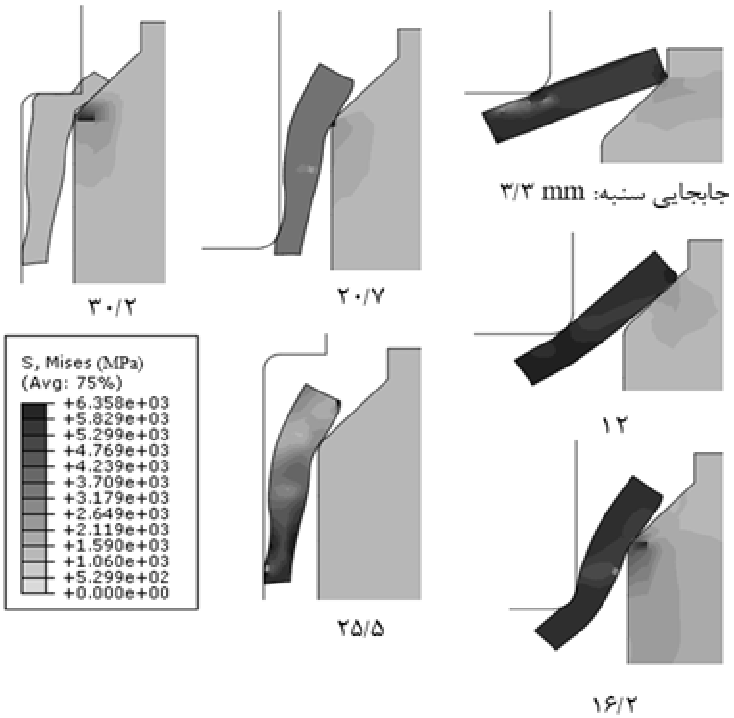
شکل ۴-۹ نیز نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای توزیع تنش حلقوی در قالب را نشان می‌دهد. برای مقایسه، منحنی حاصل از رابطه‌های (۲-۱) و (۲-۲) نیز برای مجموعه مونتاژ شده (بدون فشار داخلی) نشان داده شده است. به دلیل انطباق پرسی در نظر گرفته شده، تنش فشاری MPa ۱۷۸۰ = σ_θ روی سطح داخلی قالب ایجاد می‌شود. اثر فشار داخلی بر توزیع تنش حلقوی با اعمال فشار داخلی p شبیه‌سازی شده است. این فشار بسته به جنس ماده‌ی شکل‌دهی و پارامترهای قالب تغییر می‌کنند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با اعمال فشار MPa ۱۰۰۰ و ۵۰۰ = p، تنش روی سطح همچنان فشاری باقی می‌ماند. با افزایش فشار به MPa ۱۵۰۰ = p تنش روی سطح داخلی قالب کششی با مقدار MPa ۲۵۰ = σ_θ می‌شود. همچنین با افزایش فشار به MPa ۲۰۰۰ = p تنش روی سطح داخلی قالب کششی به مقدار MPa ۶۰۰ = σ_θ می‌رسد و در ادامه، با افزایش فشار p، تنش در حلقه‌ی فشاری تغییر قابل توجهی ندارد.



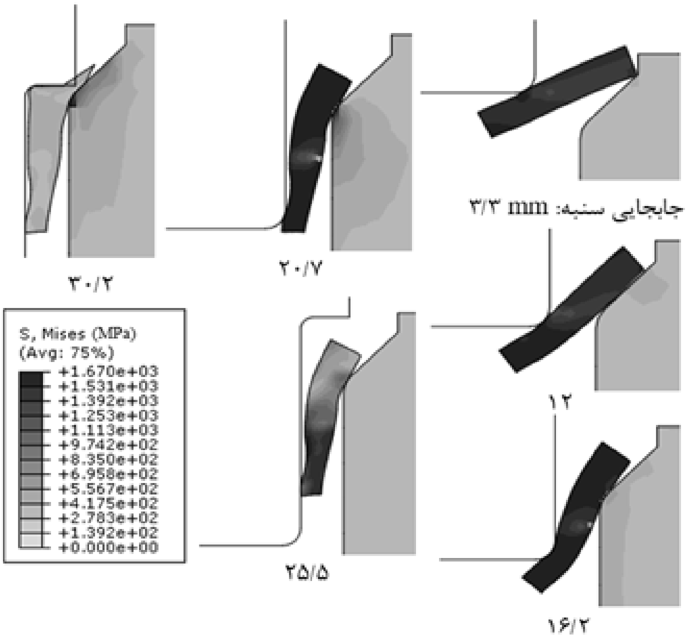
شکل ۴-۹: توزیع تنش حلقوی در قالب

۴-۱-۲ بررسی زوایای Φ، Ψ و شعاع‌های R_1 و R_2

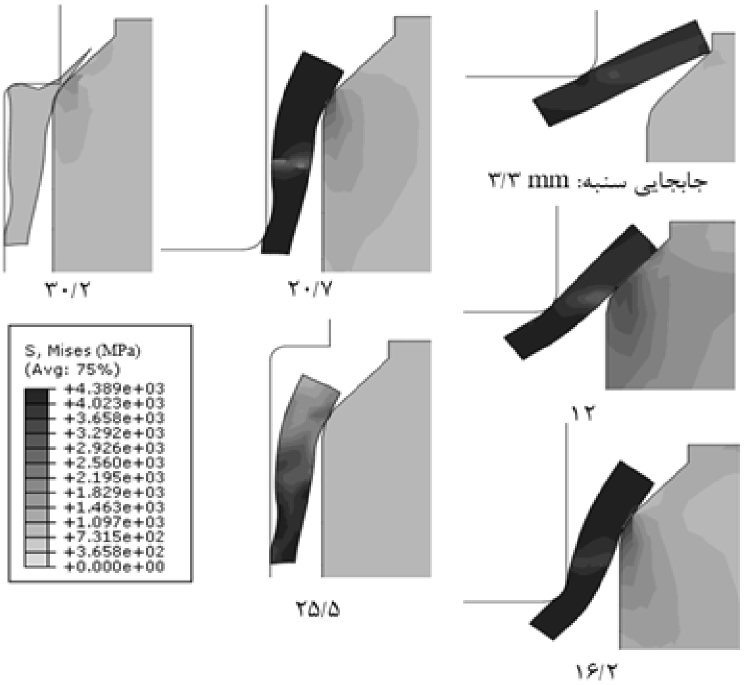
یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در شکل‌گرفتن نهایی بوش فلنجدار، زوایای Φ، Ψ و شعاع‌های R_1 و R_2 هسته‌ی قالب می‌باشد. در طراحی پروفیل هسته قالب، با در نظر گرفتن زوایا و شعاع‌های مختلف، سعی در انتخاب بهترین زوایا و شعاع‌ها شده است. برای انتخاب زاویه Ψ در ناحیه (ب) قالب، این زاویه از ۴۵ درجه شروع شده و در زاویه ۶۲ درجه مناسب انتخاب شده است. همچنین در شعاع‌های (R_2) مختلف نیز آزمون عددی انجام گرفته است. از شکل ۴-۱۰ تا شکل ۴-۱۸ نتایج حاصل از زوایای Ψ و شعاع‌های (R_2) مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه (ب)، در زوایا و شعاع‌های مختلف، به دلیل اصطکاک زیاد، قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه، در ابتدای فرآیند جدا شده و این یک عیب محسوب می‌شود.



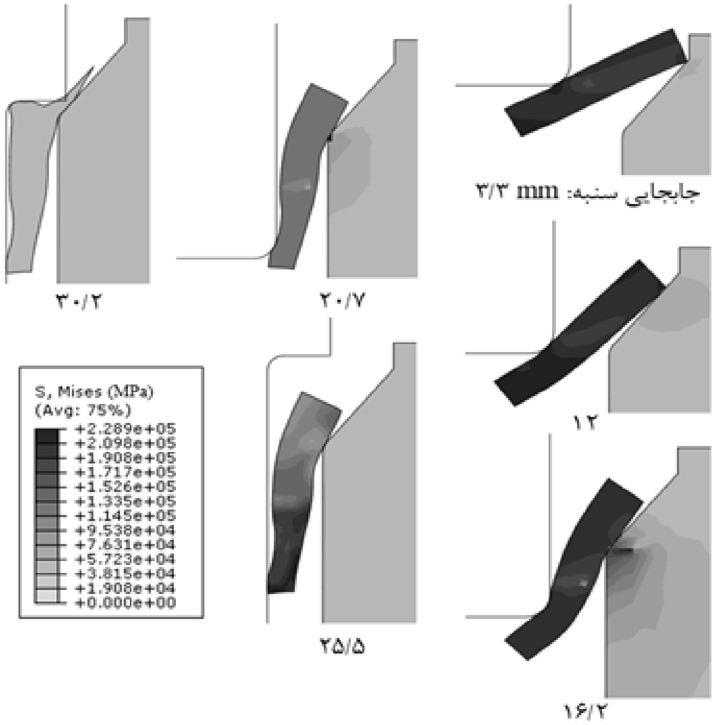
شکل ۴-۱۰: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۴۵° و R_2 =۱ mm



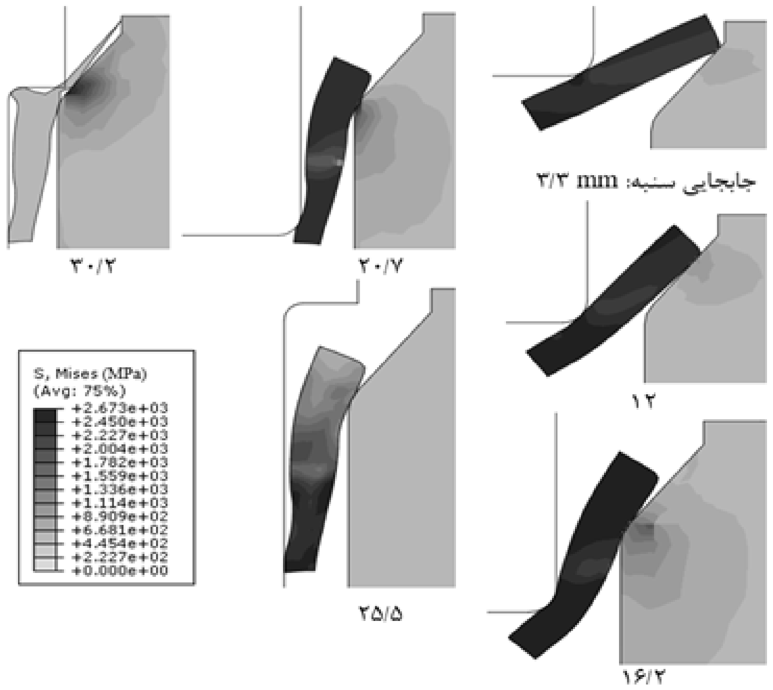
شکل ۴-۱۱: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۴۵° و R_2 =۲ mm



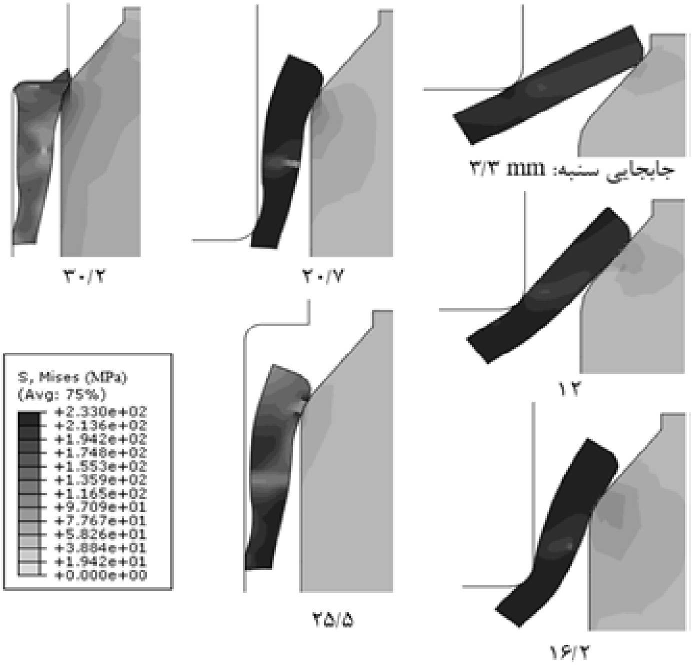
شکل ۴-۱۲: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گردهٔ اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیهٔ (ب). $\Psi = 45°$ و $R_2 = 3$ mm



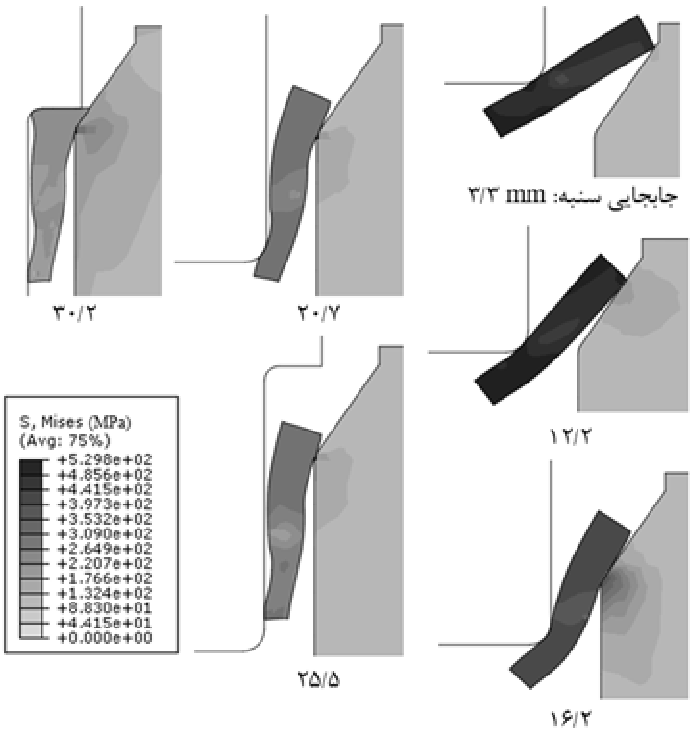
شکل ۴-۱۳: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گردهٔ اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیهٔ (ب). $\Psi = 50°$ و $R_2 = 1$ mm



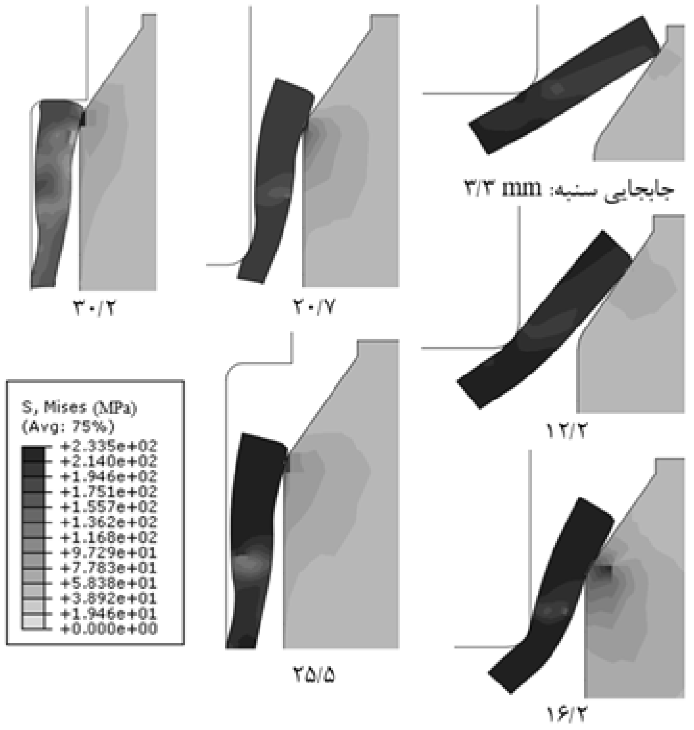
شکل ۴-۱۴: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۵۰° و R_2 =۲ mm



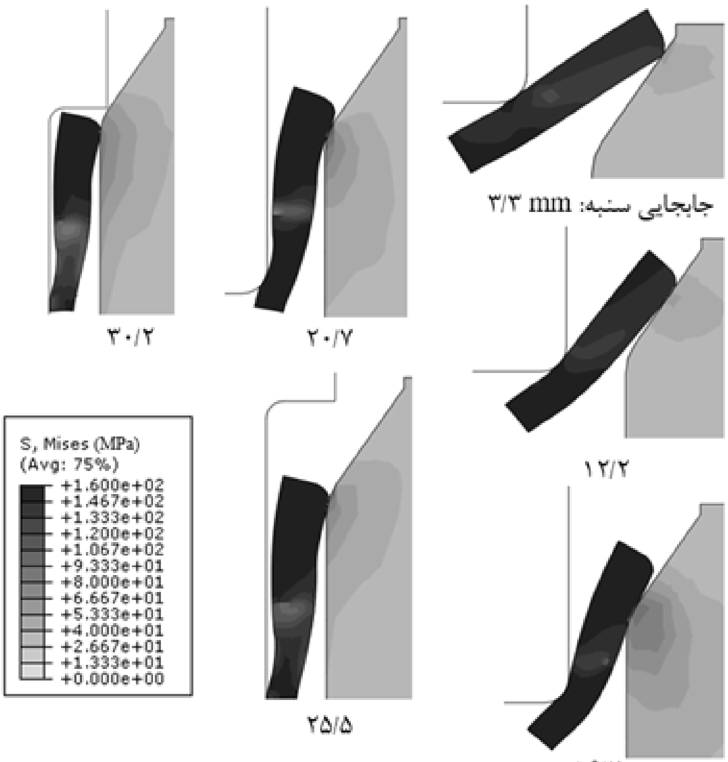
شکل ۴-۱۵: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =۵۰° و R_2 =۳ mm



شکل ۴-۱۶: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =°۵۵ و R_2 =۱ mm

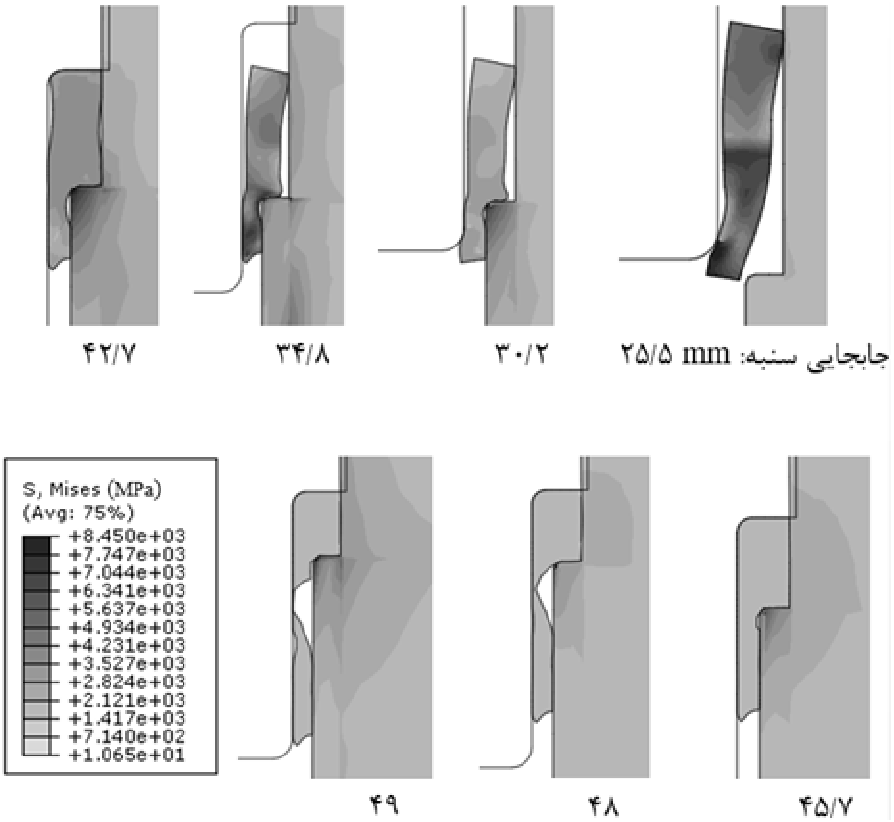


شکل ۴-۱۷: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیه‌ی (ب). Ψ =°۵۵ و R_2 =۲ mm

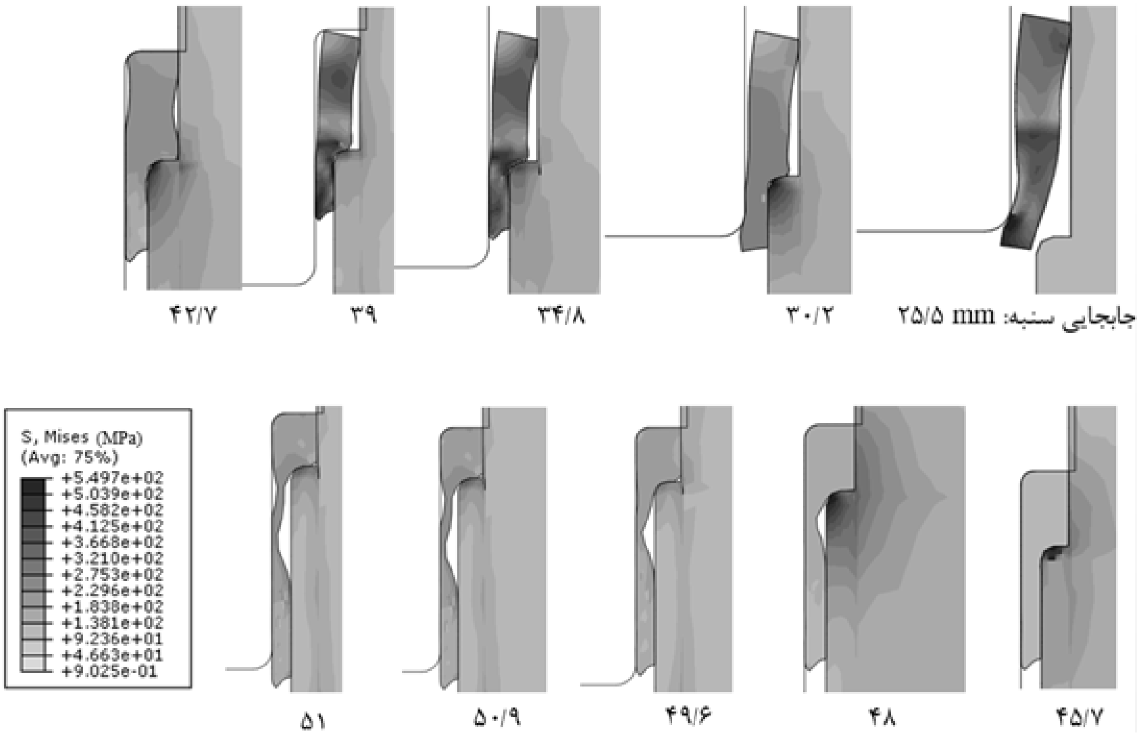


شکل ۴-۱۸: جدا شدن قطر کوچک سنبه (D_{3p}) از قطر داخلی گردەی اولیه (d_s) به دلیل اصطکاک زیاد در ناحیەی (ب). Ψ =°۵۵ و R_2 =۳ mm

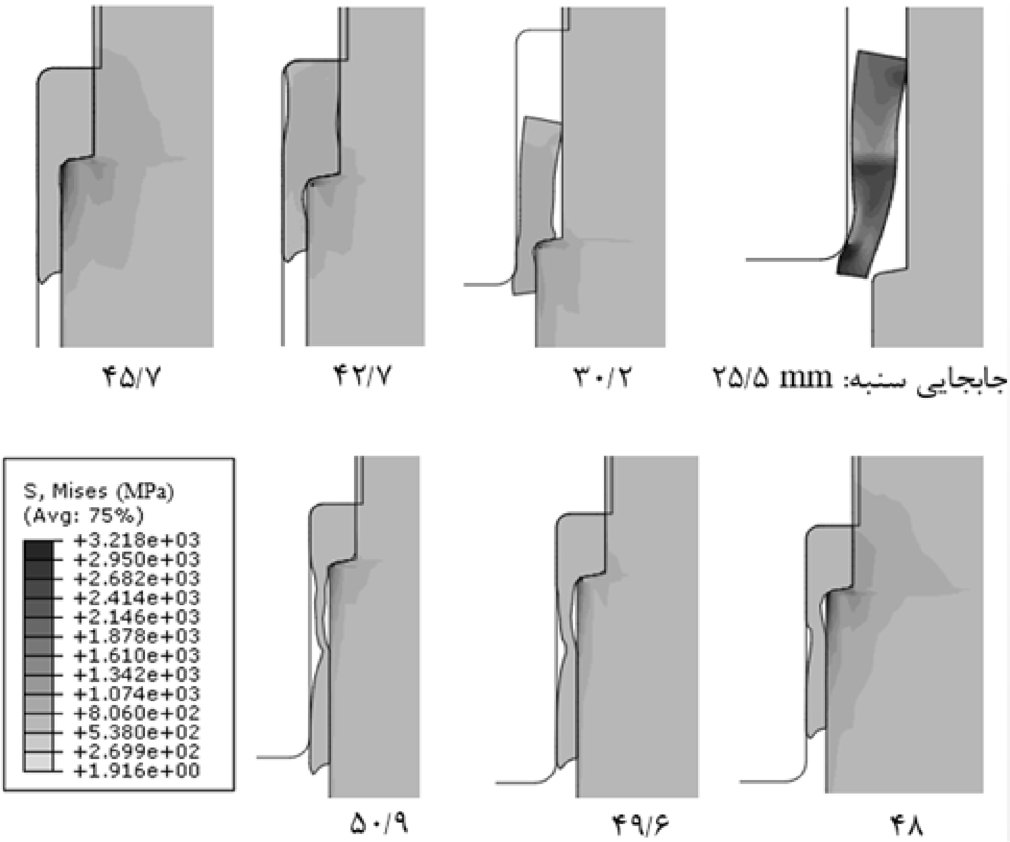
همچنین از شکل ۴-۱۹تا شکل ۴-۲۶ نتایج حاصل از زوایای Φ و شعاع‌های (R_1) مختلف را نشان می‌دهد. در شکل ۴-۱۹ شکل‌دهی بوش در زاویەی صفر درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نمایان است، شکل‌دهی بوش در زاویەی صفر درجه به درستی شکل نگرفته است. همچنین در شکل ۴-۲۰ شکل‌دهی بوش در همین زاویه و با شعاع ۰/۵ mm انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در این شکل، شکل‌دهی بوش به درستی انجام نگرفته است. در شکل‌های ۴-۲۱ و ۴-۲۲ نیز شکل‌دهی بوش به درستی انجام نگرفته است. در شکل‌های ۴-۲۳ تا ۴-۲۶ نشان می‌دهد، شکل‌دهی بوش به نسبت خوب انجام گرفته است، اما در این زوایا تنش در قالب بسیار بالا می‌باشد. بنابراین برای کم شدن تنش قالب، زاویەی ۴۵ درجه مناسب انتخاب شده است.



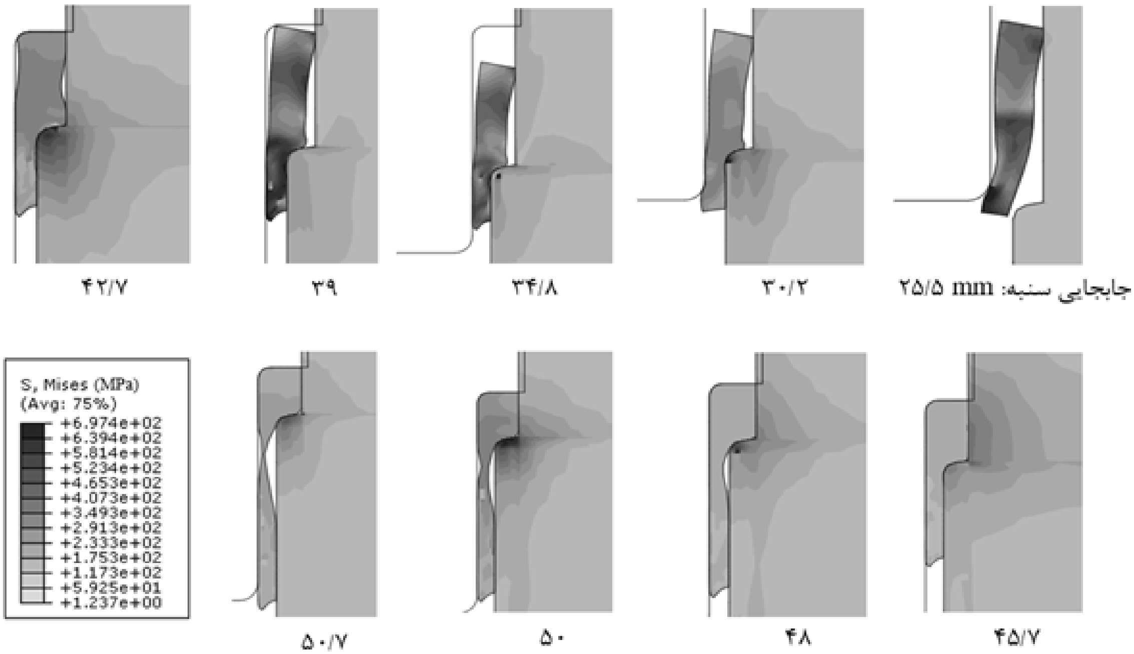
شکل ۴-۱۹: شکل‌دهی نادرست بوش در ناحیه‌ی (ج). $\Phi =$ ۰° و $R_1 =$ ۰/۵ mm



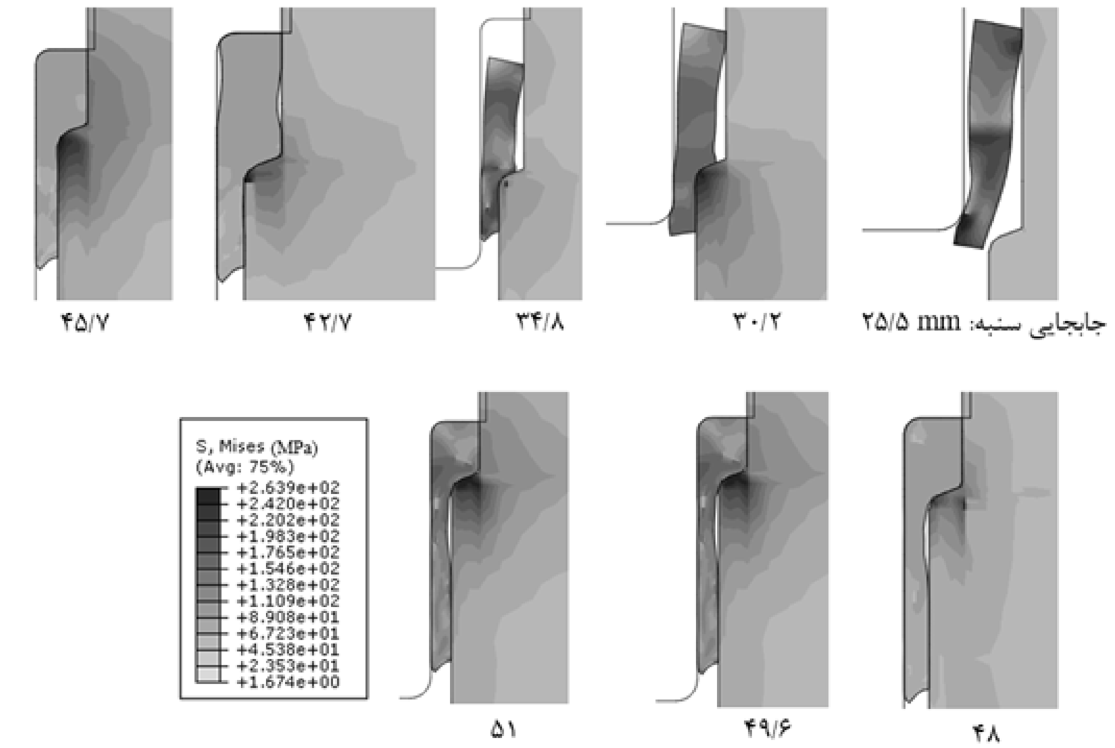
شکل ۴-۲۰: شکل‌دهی نادرست بوش در ناحیه‌ی (ج). $\Phi =$ ۰° و $R_1 =$ ۱ mm



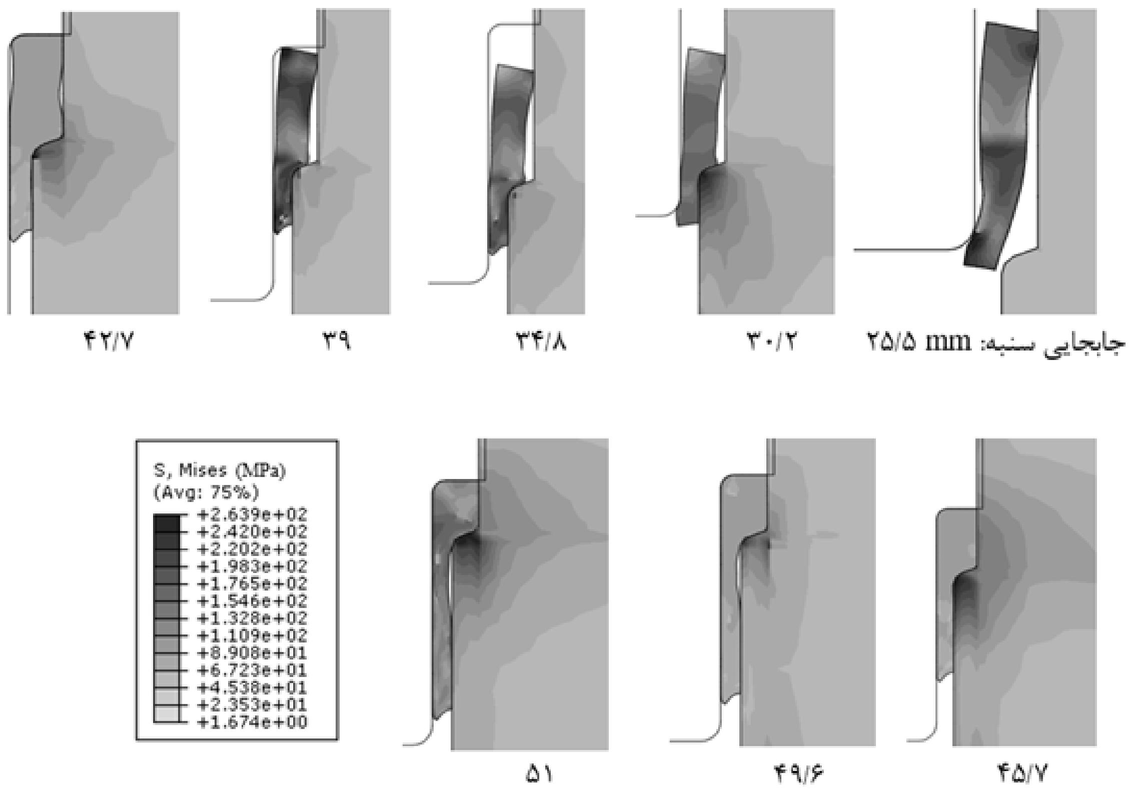
شکل ۴-۲۱: شکل‌دهی نادرست بوش در ناحیه‌ی (ج). $\Phi = 10^{\circ}$ و $R_1 = 0/5$ mm



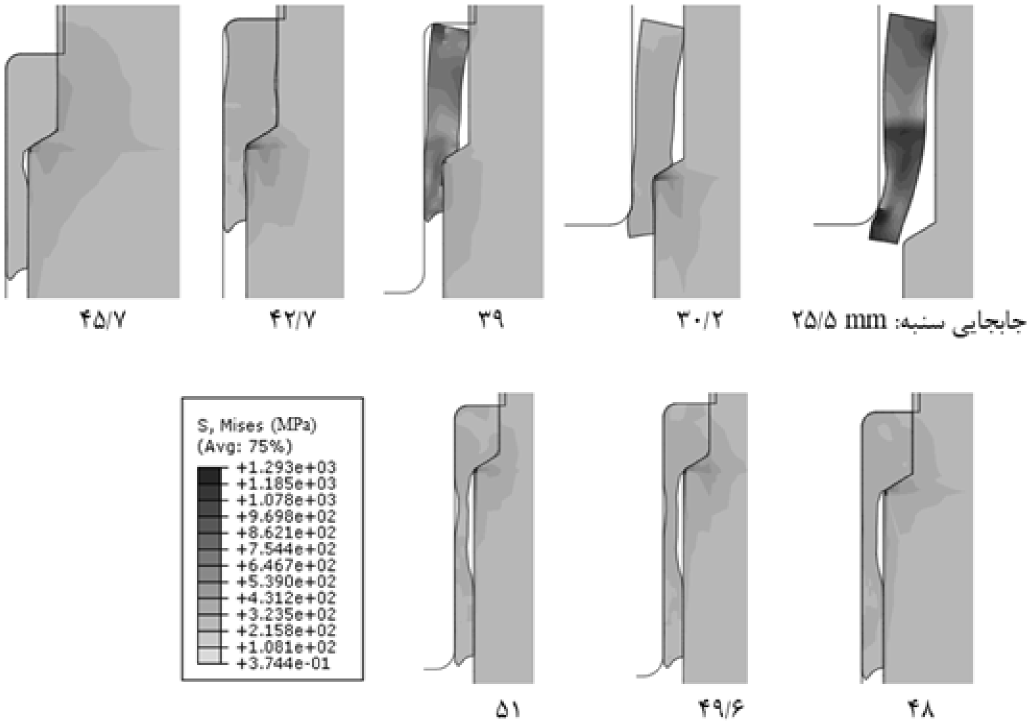
شکل ۴-۲۲: شکل‌دهی نادرست بوش در ناحیه‌ی (ج). $\Phi = 10^{\circ}$ و $R_1 = 1$ mm



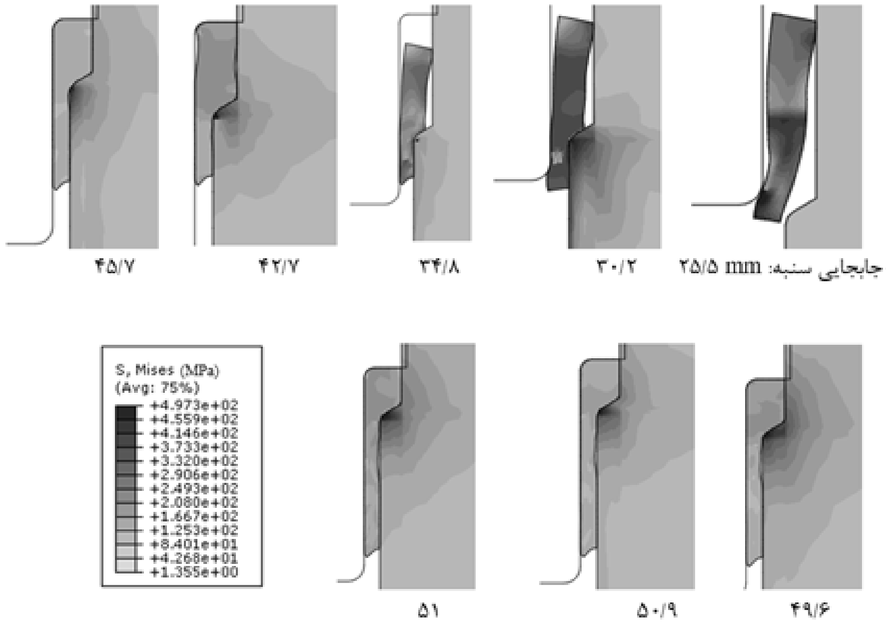
شکل ۴-۲۳: نحوه‌ی شکل‌گیری بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =°۲۰ و R_1 =۰/۵ mm



شکل ۴-۲۴: نحوه‌ی شکل‌گیری بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =°۲۰ و R_1 =۱ mm



شکل ۴-۲۵: نحوه‌ی شکل‌گیری بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۳۰° و R_1 =۰/۵ mm

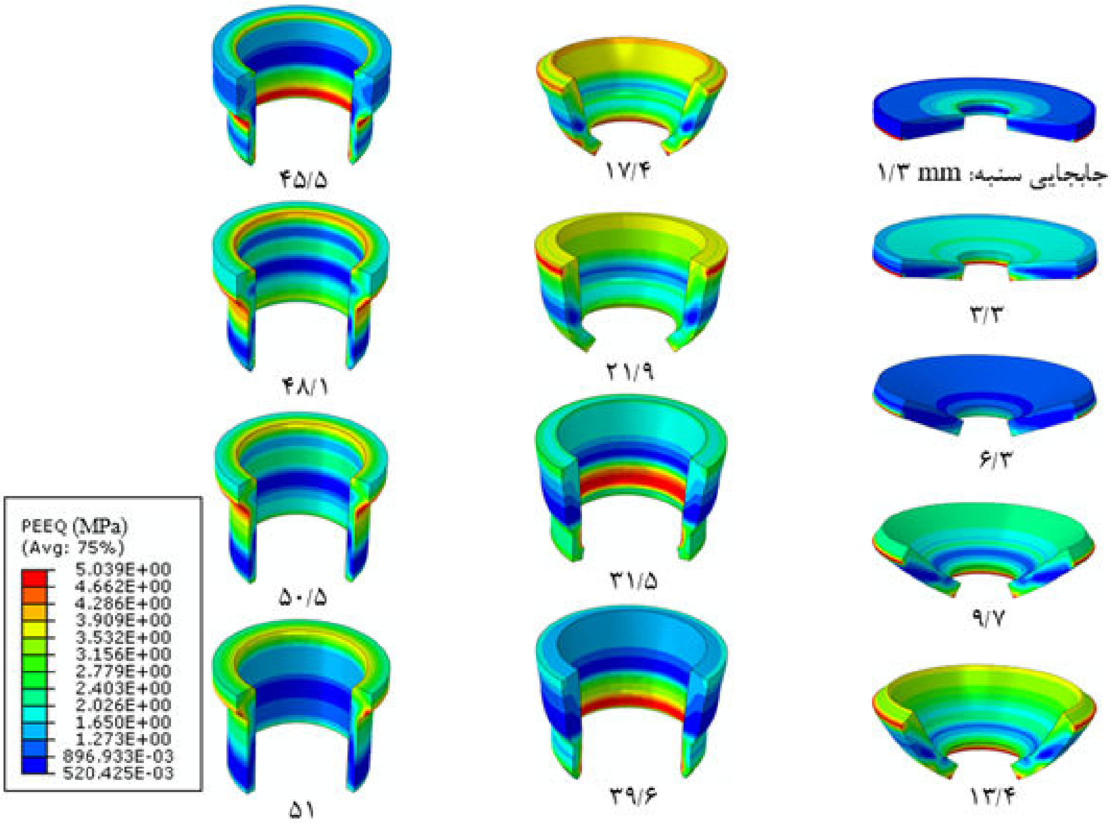


شکل ۴-۲۶: نحوه‌ی شکل‌گیری بوش در ناحیه‌ی (ج). Φ =۳۰° و R_1 =۱ mm

نتایج نشان می‌دهد که زاویه‌ی Φ در ناحیه‌ی (ج) بر نیروی ماکزیمم سنبه، انرژی مورد نیاز فرآیند، تنش در قالب، کرنش‌های پلاستیک و تنش‌های پسماند تأثیرگذار می‌باشد. بیشترین نیروی مورد نیاز

سنبه از پارامترهایی است که با تغییر هندسه‌ی قالب به طور چشمگیری تغییر می‌کند. اصولاً در ضرایب اصطکاک پایین، هر چه زاویه‌ی قالب بیشتر باشد، به دلیل کمتر بودن کار اضافی، نیروی کمتری برای انجام فرآیند مورد نیاز است. از پارامترهای دیگری که در که در کار مهم است، انرژی لازم برای انجام فرآیند است. با توجه به نتایج، کمترین انرژی مصرف شده در زوایای زیاد اتفاق می‌افتد. یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در عمر قالب‌ها، میزان تنشهای به وجود آمده در آنها حین فرآیند می‌باشد. گرچه قالب در ،فرآیند شکل‌دهی دچار تغییر شکل پلاستیک نشده و تنش به وجود آمده در آن از تنش سیلان کمتر است، اما هر قدر میزان تنش قالب کمتر باشد، عمر قالب بیشتر شده و کمتر دچار واماندگی خستگی یا سایش می‌شود. رفتار تنش به وجود آمده در قالب متناظر با رفتار نیروی سنبه می‌باشد. چرا که با افزایش نیرو، تنش نیز افزایش می‌یابد. البته باید توجه داشت با کاهش زاویه، اندازه قالب کوچک می‌شود که این مسئله نیز خود عاملی برای افزایش تنش خواهد بود [۴۶].

در شکل ۴-۲۷، مراحل شکل‌گیری مناسب بوش فلنجدار و توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در جابجایی مختلف سنبه را برای آلیاژ AA3003 نشان می‌دهد. در این شکل نشان می‌دهد که بیشترین مقدار توزیع کرنش پلاستیک مؤثر ۵ می‌باشد، در صورتی که در آزمون کشش، نمونه در ۰/۰۱۱ گسیخته می‌شود. در این قسمت فرض می‌شود که رفتار ماده در کشش و فشار یکسان است، با این تفاوت که در فشار، ترک در ماده ایجاد نمی‌شود و تحت یک کرنش ثابت سیلان می‌کند.



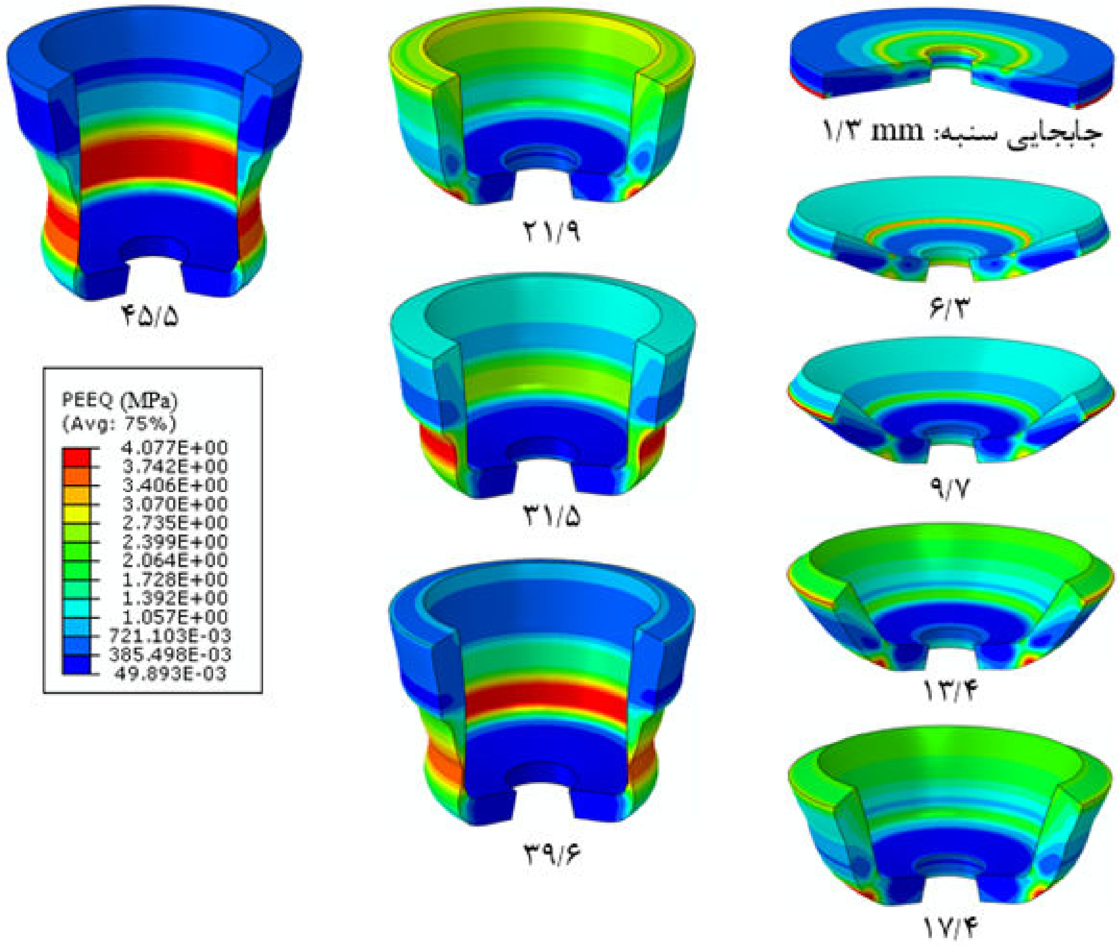
شکل ۴-۲۷: توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در جابجایی مختلف سنبه (برش ۲۷۰ درجه از مقطع).

Ψ =۶۲°، R_2 =۲ mm، Φ =۴۵° و R_1 =۱ mm

در شبیه‌سازی سه بعدی از این فرآیند نیز نشان می‌دهد کمانش و یا تا خوردگی[1] در قطعه اتفاق نمی‌افتد.

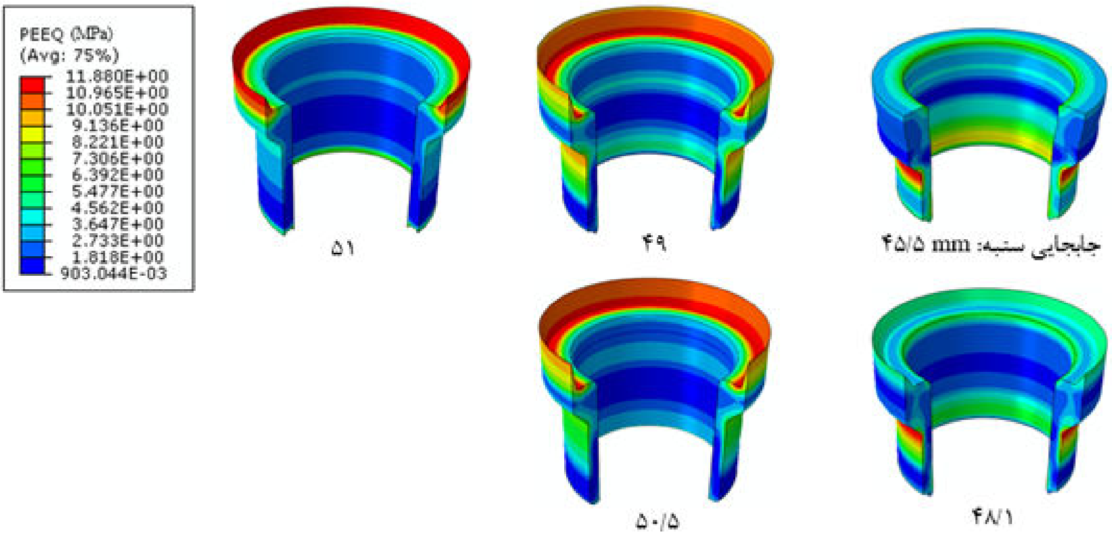
شکل ۴-۲۸، مراحل نحوه‌ی شکل‌گیری بوش فلنجدار و توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در جابجایی مختلف سنبه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نمایان است، قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) کمتر از اندازه‌ی تعیین شده، شبیه‌سازی شده است. در انتهای مراحل، قطعه دچار شکست می‌شود که در شبیه‌سازی، شکست قطعه مدل نشده است. اصطکاک زیاد بین سطح گرده‌ی اولیه و سنبه، دلیل این نوع از توزیع کرنش پلاستیک است.

[1] Folding

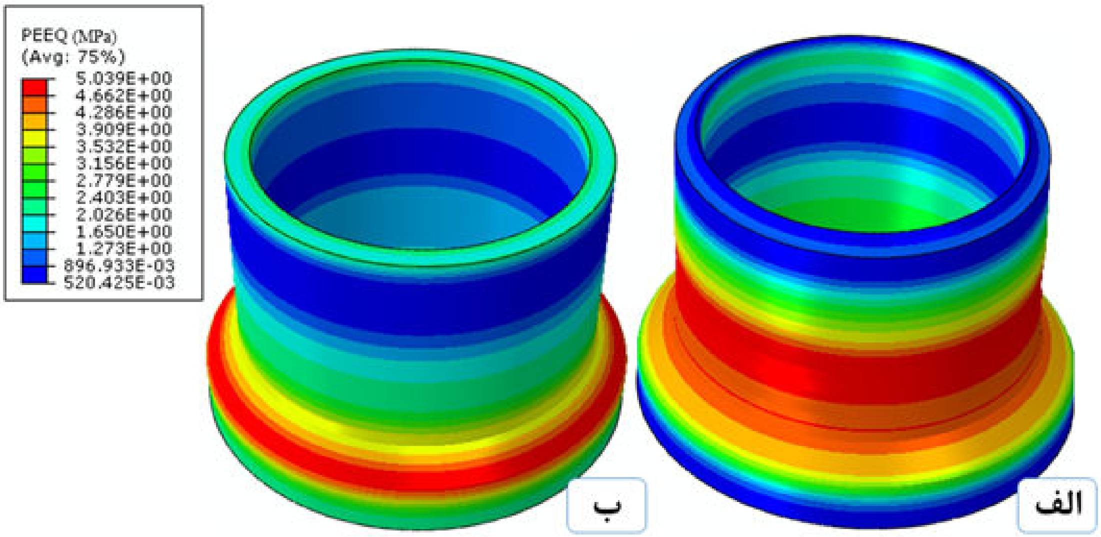


شکل ۴-۲۸: توزیع کرنش پلاستیک آلیاژ AA3003 با d_s= ۸/۵ mm در جابجایی مختلف سنبه (برش ۲۷۰ درجه از مقطع)

همچنین در شکل ۴-۲۹، مراحل نحوه‌ی شکل‌گیری بوش فلنجدار و توزیع کرنش پلاستیک مؤثر در جابجایی مختلف سنبه و با لقی ۰/۰۵ mm بین سنبه و هسته قالب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نمایان است، لقی ایجاد شده در شبیه‌سازی، باعث می‌شود مواد در کناره‌های سنبه جریان داشته باشد و این یک عیب در شکل‌گیری بوش محسوب می‌شود. همچنین در شکل ۴-۳۰، مقایسه‌ی بین توزیع کرنش پلاستیک مؤثر با بودن استوپر و نبودن آن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۹: توزیع کرنش پلاستیک آلیاژ AA3003 در جابجایی مختلف سنبه (برش ۲۷۰ درجه از مقطع) و با لقی ۰/۰۵ mm بین سنبه و هسته قالب



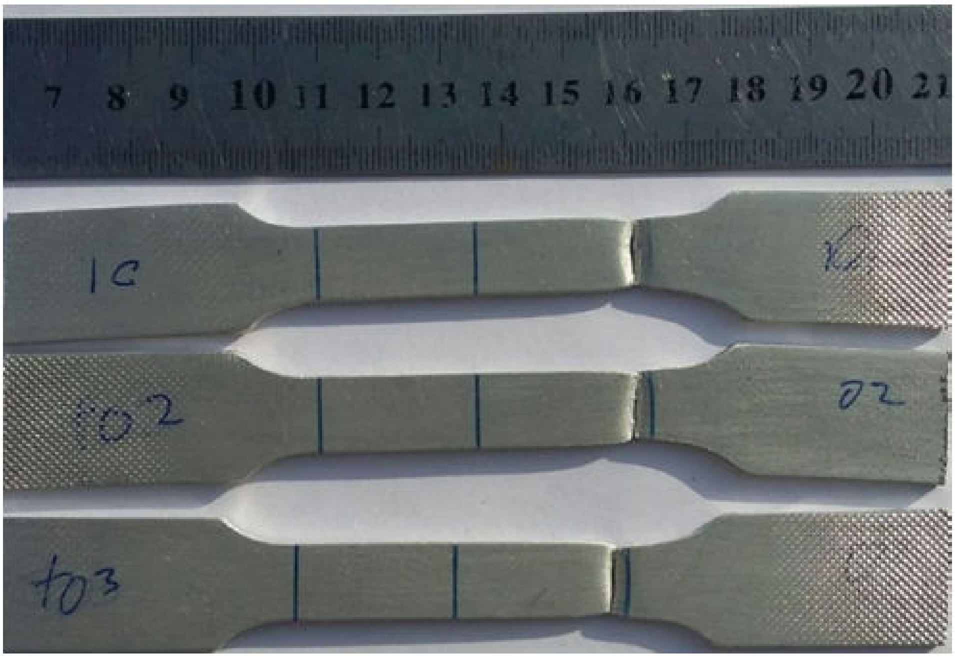
شکل ۴-۳۰: توزیع کرنش پلاستیک آلیاژ AA3003 (الف) بدون استوپر (ب) با استوپر

۴-۲- نتایج تجربی و صحت سنجی با نتایج عددی

در این بخش، نتایج آزمون کشش بررسی می‌شود. در ادامه، نتایج آزمون‌های شکل‌دهی بوش فلنجدار ارائه خواهد شد. سپس سختی بدست آمده از آزمون شکل‌دهی بوش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

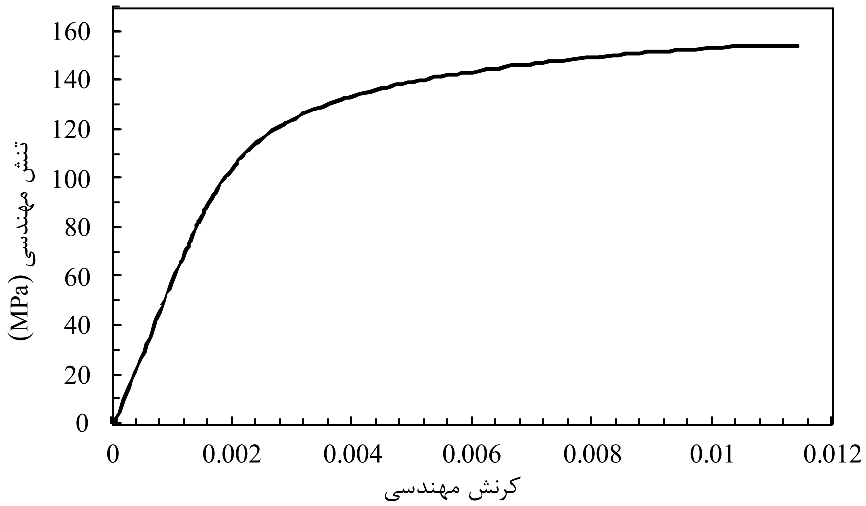
۴-۲-۱ آزمون کشش

برای محاسبه‌ی تنش تسلیم و استحکام نهایی، سه نمونه تا لحظه‌ی شکست کشیده شدند. تصویر این نمونه‌ها در شکل ۴-۳۱ ارائه شده است. به دلیل مشاهده نشدن نقطه‌ی دقیق شروع تسلیم، تشخیص دقیق حد تسلیم در این آلیاژ مشکل است. بنابراین، بر روی منحنی تنش- کرنش حقیقی خطی موازی با ناحیه‌ی کشسان از کرنش ۰/۲ درصد رسم شد. محل برخورد این خط با منحنی، تنش تسلیم تک-محوره، در نظر گرفته شده است.

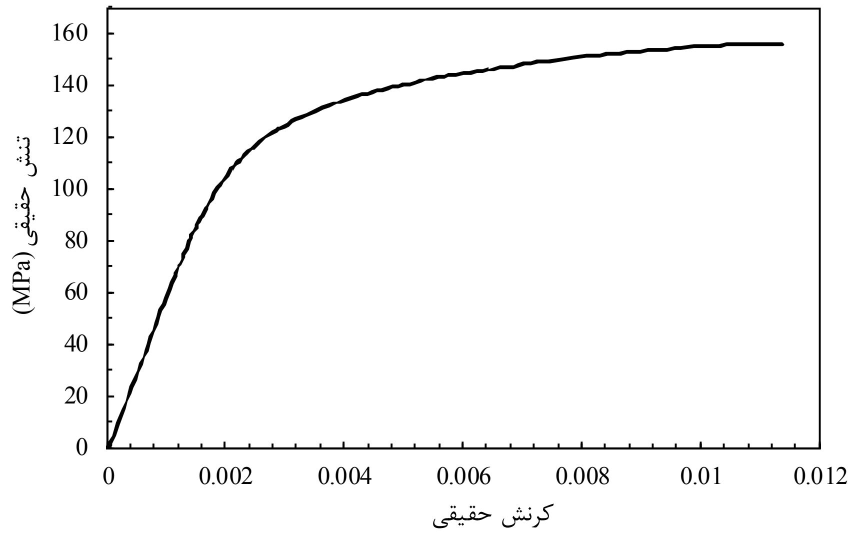


شکل ۴-۳۱: نمونه‌ی کشیده شده تا شکست از آلیاژ AA3003 با نرخ کرنش اولیه $0/001\ s^{-1}$ جهت تعیین نمودار تنش-کرنش

نمودارهای تنش-کرنش مهندسی و حقیقی برای آلیاژ AA3003 به‌ترتیب در شکل ۴-۳۲ و شکل ۴-۳۳ آمده است.



شکل ۴-۳۲: نمودار تنش_کرنش مهندسی برای آلیاژ AA3003



شکل ۴-۳۳: نمودار تنش-کرنش حقیقی برای آلیاژ AA3003

در نهایت استحکام نهایی و تنش تسلیم، در جدول ۴-۱ گزارش شده است.

جدول ۴-۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA3003

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
۱	۱۳۲/۳	۱۵۴/۷
۲	۱۳۳/۶	۱۵۵/۳
۳	۱۳۲/۵	۱۵۴/۵۴

۴-۲-۲ آزمون شکل‌دهی بوش فلنجدار

تصویر نمونه‌های نهایی شکل‌داده شده در شکل ۴-۳۴، شکل ۴-۳۵، شکل ۴-۳۶، شکل ۴-۳۷ و شکل ۴-۳۸ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۳۴ نشان داده شده است، خرابی نمونه‌های مسی با قطر داخلی ۸/۵ mm به دلیل اینکه نسبت قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به قطر سنبه (D_{3p}) بزرگتر بوده است، اتفاق افتاده است. همچنین زیاد بودن اصطکاک بین قطر داخلی گرده‌ی اولیه با قطر سنبه، باعث شده است قطر داخلی گرده‌ی اولیه از سر سنبه در ناحیه‌ی (ج) جدا نشده و شکسته شود.

شکل ۴-۳۴: نمونه‌های شکل داده شده از جنس مس با قطر داخلی ۸/۵ mm به روش تجربی، (الف) ضخامت ۲ mm (ب) ضخامت ۳ mm

شکل ۴-۳۵، نمونه‌های بوش فلنجدار مسی با قطر داخلی ۹ و ۱۰ mm و با ضخامت‌های ۲ و ۳ mm را نشان می‌دهد. دلیل اینکه نمونه‌ها به خوبی شکل گرفته است، این است که نسبت قطر داخلی گرده‌ی اولیه (d_s) به قطر سنبه (D_{3p}) برقرار بوده است. همانطور که در شکل ۴-۳۵ نمایان است، فلنج بوش به درستی شکل نگرفته است. علت آن هم به دلیل شکل‌پذیری بالای فلز مس می‌توان گفت. همچنین

در دیواره‌ها و انتهای بوش، جریان مواد در یک طرف زیاد شده است. این زیاد شدن جریان مواد در یک طرف بوش، به دلیل لقی ایجاد شده در استوپر و زیاد بودن نیروی شکل‌دهی است.

شکل ۴-۳۵: نمونه‌های شکل داده شده از جنس مس با قطر داخلی ۹ و ۱۰ mm به روش تجربی، (الف) ضخامت ۲ mm (ب) ضخامت ۳ mm

شکل ۴-۳۶، نمونه شکل داده شده از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴- ۳۶ نمایان است، شکل‌دهی بوش به صورت نیمه تمام انجام گرفته است. علت درست شکل نگرفتن بوش این است که جریان مواد در فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، به درستی انجام نگرفته است. همچنین برای ادامه جریان مواد در قسمت دیواره بوش و فلنج، مستلزم آن بود که نیرو فرآیند افزایش یابد. در شکل‌دهی این بوش، نیروی فرآیند تا ۶۰ تن افزایش یافته است که منجر به شکسته سنبه قالب شده و ادامه‌ی فرآیند انجام نگرفته است.

شکل ۴-۳۶: نمونه شکل داده شده از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به روش تجربی

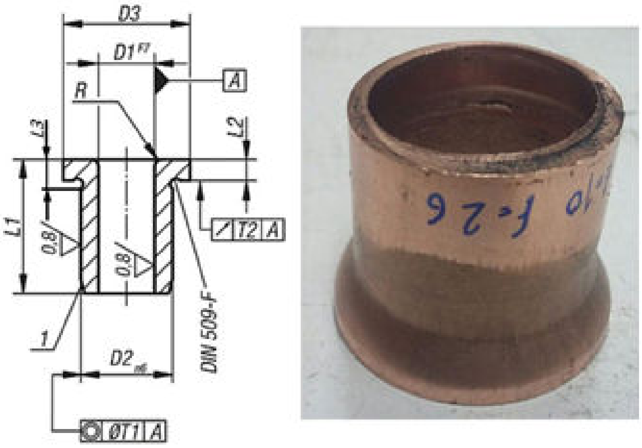
در شکل ۴-۳۷، نمونه‌های شکل داده شده از جنس آلومینیوم ۳۰۰۳ به را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نمایان است، جریان مواد در فلنج بوش به درستی انجام نگرفته است. علت درست شکل نگرفتن فلنج بوش این است که نیروی شکل‌دهی در این فرآیندها زیاد بوده است. مقدار نیروها در این فرایند بین ۲۰ تا ۳۰ تن متغیر بوده است.

شکل ۴-۳۷: نمونه‌های درست شکل نگرفته شده از جنس آلومینیوم ۳۰۰۳ به روش تجربی

شکل ۴-۳۸ نیز، نمونه‌های شکل داده شده از جنس آلومینیوم ۳۰۰۳ به را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نمایان است، جریان مواد به درستی انجام گرفته است. نیروی شکل‌دهی در این فرآیند، ۱۱/۲ تن بوده است. استفاده از استوپر در این فرآیند باعث شده است جریان مواد در دیواره‌ها به خوبی انجام گرفته و باعث پر شدن کامل مواد در دیواره‌ها شود.

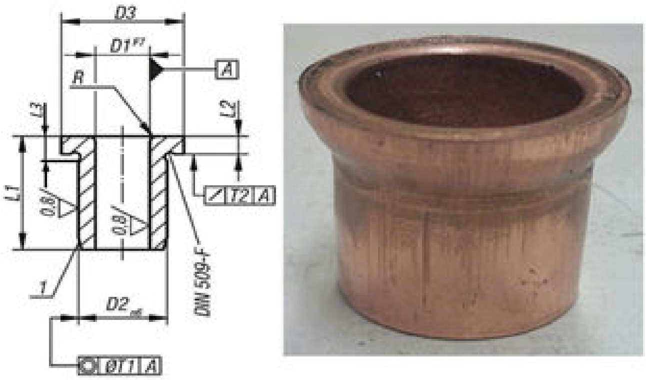
شکل ۴-۳۸: نمونه شکل داده شده از جنس آلومینیوم ۳۰۰۳ به روش تجربی

در شکل ۴-۳۹، ابعاد بوش مسی شکل داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه mm ۱۰ و ضخامت mm ۳ را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری شده است. همچنین در شکل ۴-۴۰، ابعاد بوش مسی شکل داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه mm ۹ و ضخامت mm ۳ را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری شده است.



D_{1b}	D_{2b}	D_{3b}	L_{1b}	L_{2b}	L_{3b}
۱۷/۹۱	۲۱/۱۳	۲۵/۰۶	۲۱/۱۵	۲/۰۵	۵/۲۴

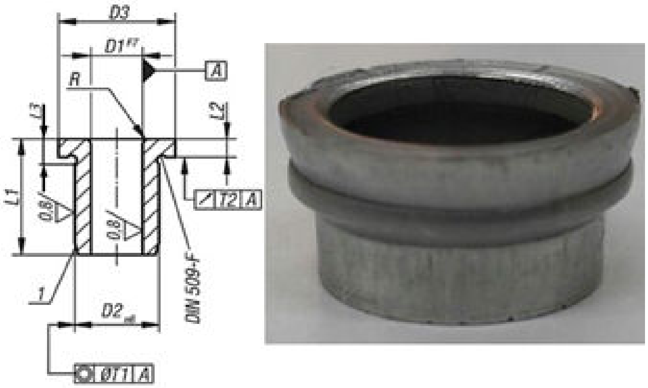
شکل ۴-۳۹: ابعاد بوش مسی شکل داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه mm ۱۰ و ضخامت mm ۳



D_{1b}	D_{2b}	D_{3b}	L_{1b}	L_{2b}	L_{3b}
۱۸/۰۱	۲۱/۱۳	۲۵/۰۷	۲۰/۳۴	۲/۱۴	۵/۲۶

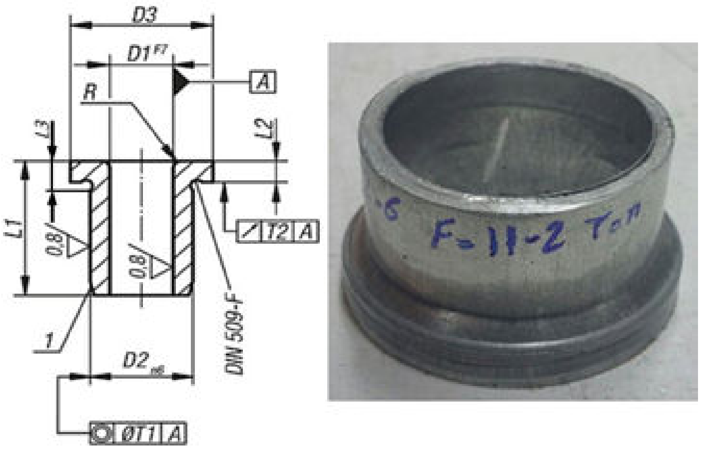
شکل ۴-۴۰: ابعاد بوش مسی شکل داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه ۹ mm و ضخامت ۳ mm

در شکل ۴-۴۱، ابعاد بوش ضدزنگ ۳۰۴ شکل‌داده شده را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری شده است. همچنین در شکل ۴-۴۲، ابعاد بوش آلومینیوم شکل‌داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه ۱۰ mm را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری شده است.



D_{1b}	D_{2b}	D_{3b}	L_{1b}	L_{2b}	L_{3b}
۱۸/۰۵	۲۱/۰۳	۲۵/۰۵	۱۳/۱۴	۵/۹۱	۷/۲۳

شکل ۴-۴۱: ابعاد بوش ضدزنگ ۳۰۴ شکل‌داده شده



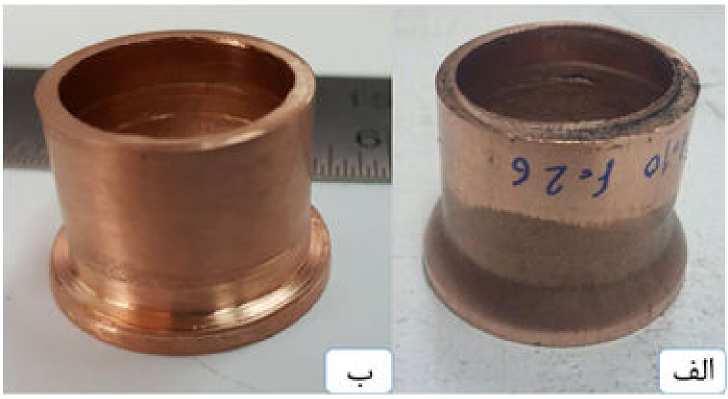
D_{1b}	D_{2b}	D_{3b}	L_{1b}	L_{2b}	L_{3b}
۱۸	۲۱/۱	۲۵/۰۵	۴	۱۵	۵/۳۰

شکل ۴-۴۲: ابعاد بوش آلومینیوم شکل‌داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه ۱۰ mm

همچنین در شکل ۴-۴۳، ابعاد بوش ضدزنگ ۳۰۴ شکل‌داده شده را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری شده است. در شکل ۴-۴۴ و شکل ۴-۴۵، بوش مسی شکل داده شده را نشان می‌دهد که همین بوش، ماشینکاری شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

D_{1b}	D_{2b}	D_{3b}	L_{1b}	L_{2b}	L_{3b}
۱۸	۲۱/۱۱	۲۵/۰۴	۱۵/۳۱	۳/۸۲	۵/۱۰

شکل ۴-۴۳: ابعاد بوش آلومینیوم شکل‌داده شده با قطر داخلی گرده‌ی اولیه ۹ mm



شکل ۴-۴۴: بوش مسی شکل داده شده، (الف) قبل از ماشینکاری (ب) بعد از ماشینکاری

شکل ۴-۴۵: بوش مسی شکل داده شده، (الف) قبل از ماشینکاری (ب) بعد از ماشینکاری

در شکل ۴-۴۶، بوش آلومینیومی شکل داده شده را نشان می‌دهد که همین بوش، ماشینکاری شده و با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین در شکل ۴-۴۷، بوش فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ شکل داده شده را نشان می‌دهد که همین بوش، ماشینکاری شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

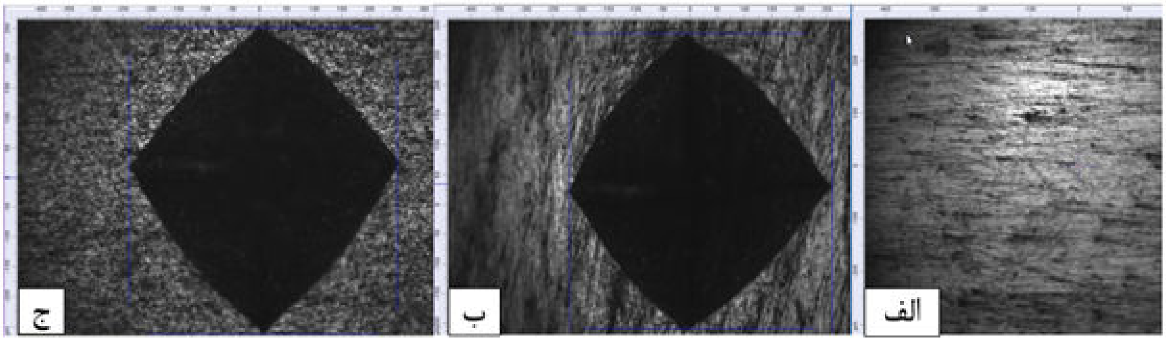
شکل ۴-۴۶: بوش آلومینیومی شکل داده شده، (الف) قبل از ماشینکاری (ب) بعد از ماشینکاری

شکل ۴-۴۷: بوش فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ شکل داده شده، (الف) قبل از ماشینکاری (ب) بعد از ماشینکاری

۴-۲-۳ نتایج و بررسی ریز سختی‌سنجی ویکرز

برای به دست آوردن سختی نمونه‌های آماده‌سازی شده، سه نمونه (آلومینیوم ۳۰۰۳، مس و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴) هر کدام به صورت جداگانه تحت آزمون قرار گرفته‌اند و اثر فرورونده و سختی آن‌ها در شکل ۴-۴۸ تا شکل ۴-۵۷ نشان داده شده است. جهت بالا بردن دقت در اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها، آزمون سختی در راستای شعاعی و در ارتفاع‌های مختلف از نمونه‌ها و در قسمت‌هایی که تغییر شکل زیادی رخ داده است، گرفته شده است.

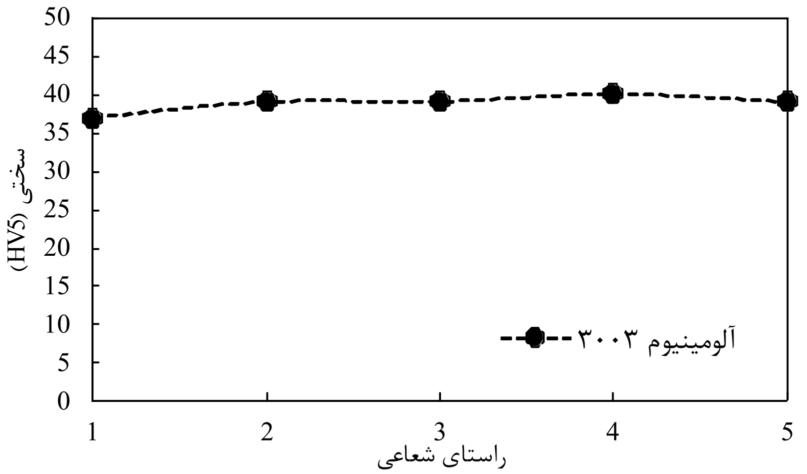
شکل ۴-۴۸: نمایش نقاط سختی بر روی نمونه‌ها



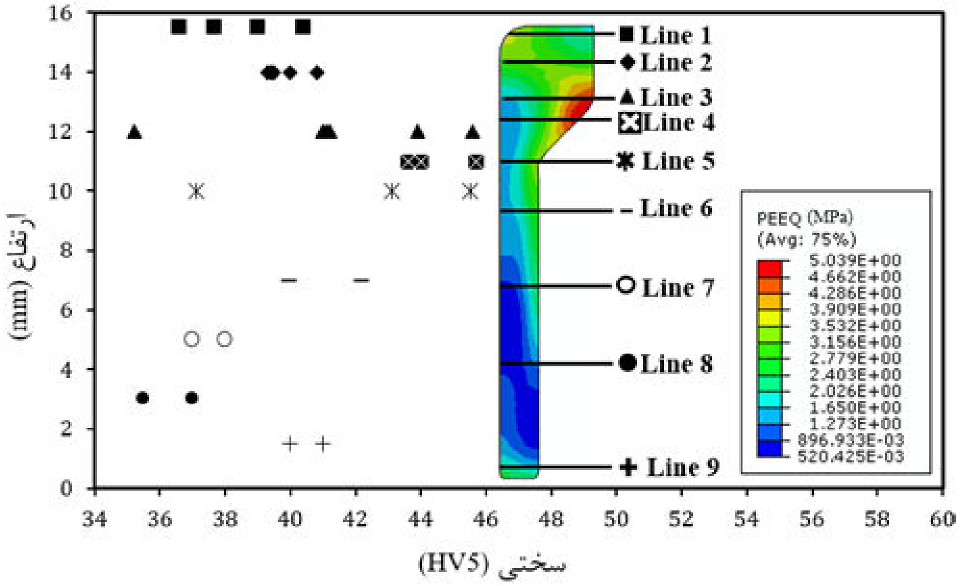
شکل ۴-۴۹: آزمون سختی بر روی آلومینیوم ۳۰۰۳ (الف) نمونه قبل از آزمون (ب) نمونه قبل از تغییر شکل (ج) نمونه بعد از تغییر شکل

همان‌طور که در شکل ۴-۵۰ نیز نمایان است، سختی نمونه‌ی آلومینیومی قبل از تغییر شکل در محدوده‌ی ۳۷ تا ۴۰ ویکرز است. در شکل ۴-۵۱ سختی نمونه بعد از تغییر شکل، در خط‌های[1] ۳، ۴ و ۵ که تحت نیروی فشاری زیاد قرار داشته است، زیاد شده است. سختی در دیواره‌ها به دلیل اینکه تحت فشار زیادی قرار نگرفته است، تغییر چندانی نداشته است.

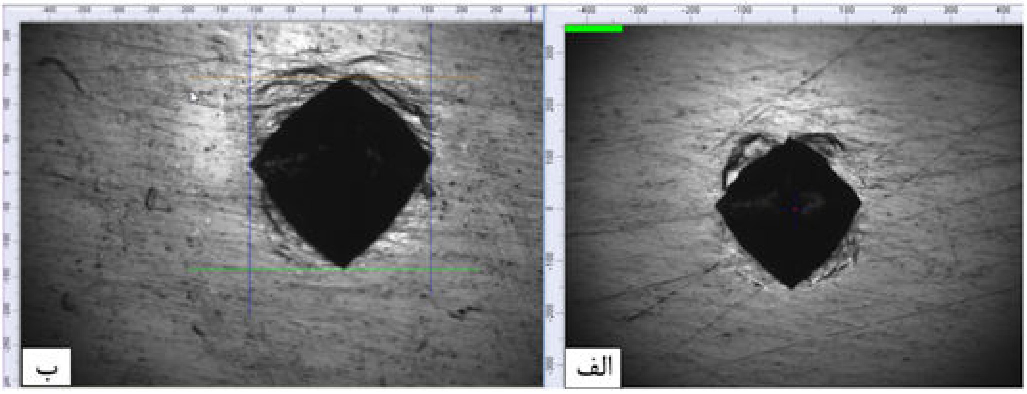
[1] Line



شکل ۴-۵۰: نمودار سختی آلومینیوم ۳۰۰۳ قبل از تغییر شکل

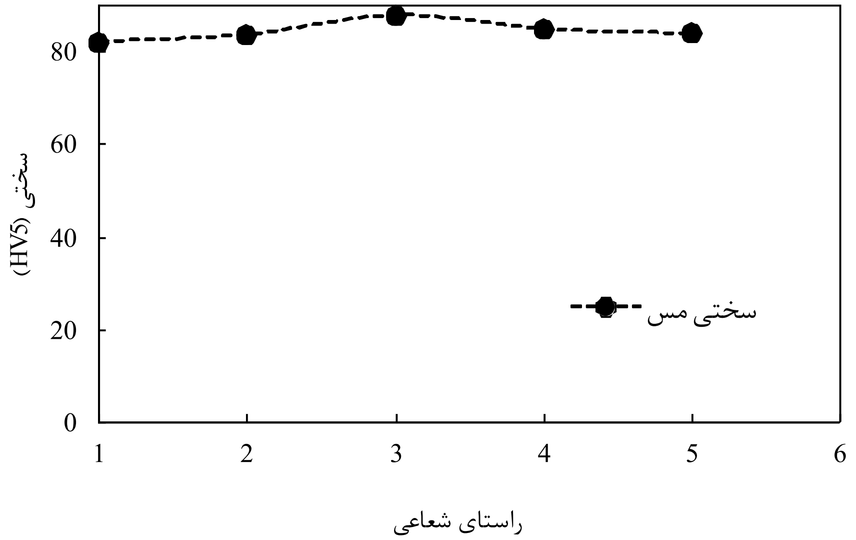


شکل ۴-۵۱: نمودار سختی آلومینیوم ۳۰۰۳ بعد از تغییر شکل

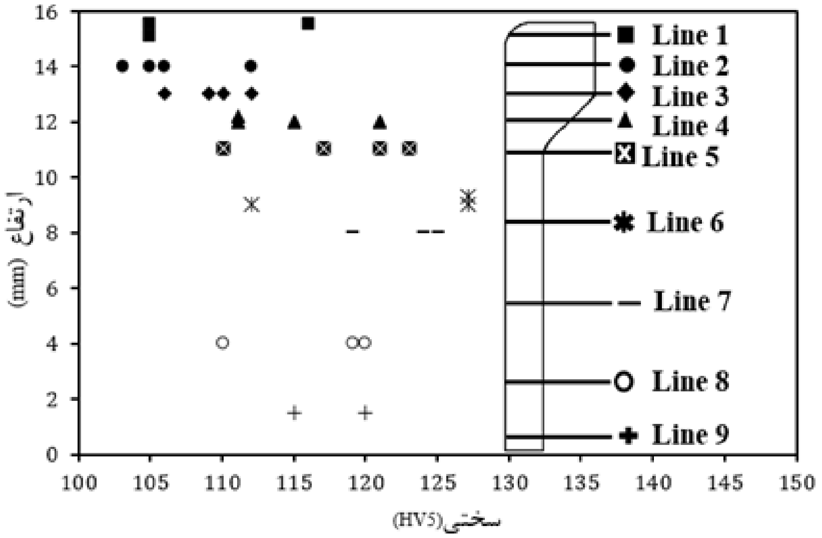


شکل ۴-۵۲: آزمون سختی بر روی مس (الف) نمونه قبل از تغییر شکل (ب) نمونه بعد از تغییر شکل

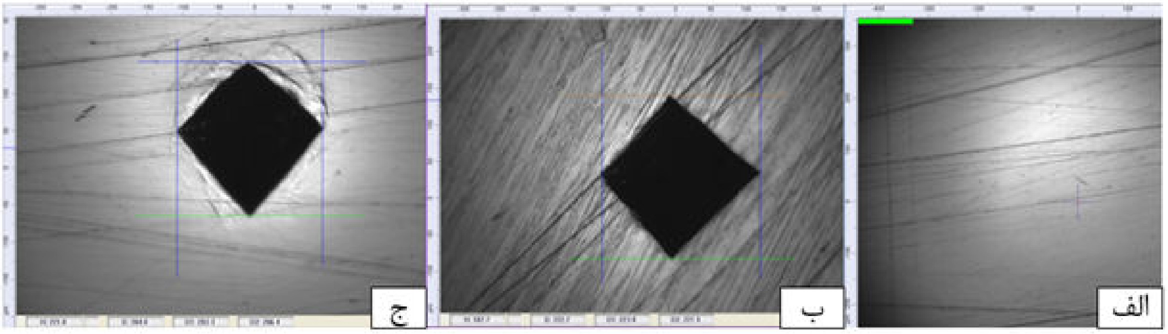
در شکل ۴-۵۳ نیز سختی نمونه قبل از تغییر شکل در محدوده‌ی ۸۲ تا ۹۰ ویکرز است. در شکل ۴-۵۴ سختی در خطهای ۶ و۷ بالاتر از خطوط دیگر می‌باشد. سختی نمونه بعد از تغییر شکل، نشان می‌دهد که افزایش یافته و محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۱۲۷ ویکرز می‌باشد. دلیل افزایش نیافتن سختی در قسمت فلنج بوش، این است که فلنج بوش مورد نظر به درستی شکل نگرفته است. علت آن هم این است که چون جریان مواد فلز مس بالاست، مواد در ناحیه (ج) انباشته نمی‌شود و بیشتر جریان مواد، سعی در پر شدن دیواره بوش داشته است.



شکل ۴-۵۳: نمودار سختی مس قبل از تغییر شکل

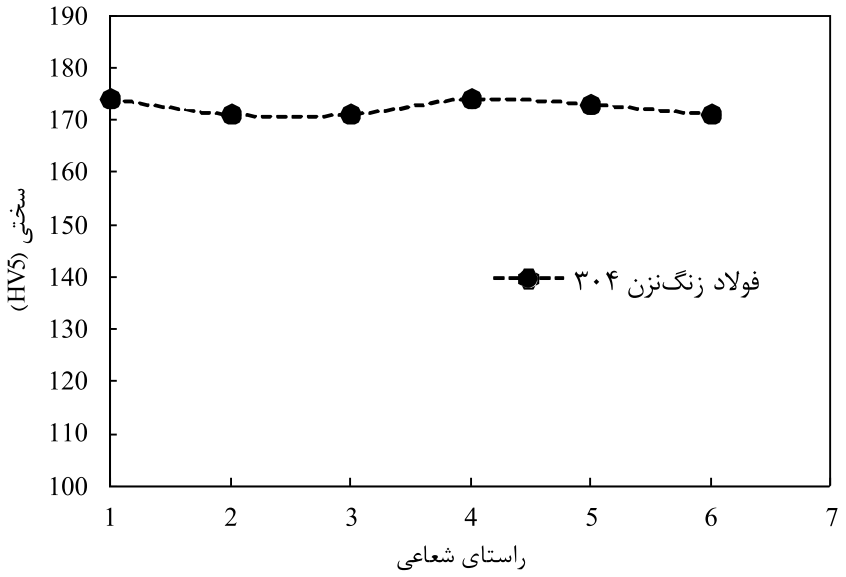


شکل ۴-۵۴: نمودار سختی مس بعد از تغییر شکل

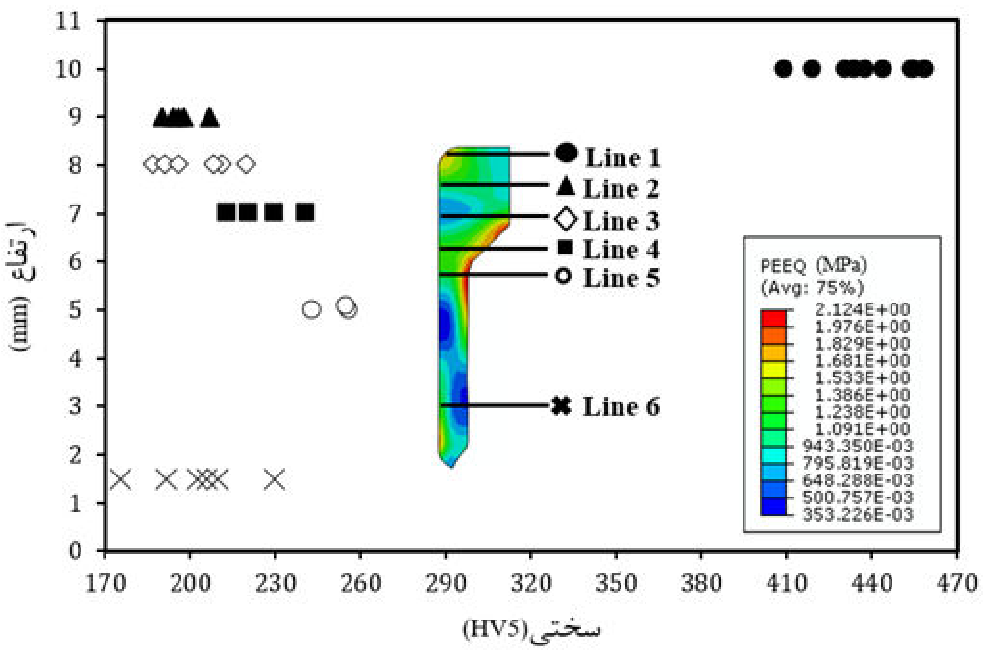


شکل ۴-۵۵: آزمون سختی بر روی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (الف) نمونه قبل از آزمون (ب) نمونه قبل از تغییر شکل (ج) نمونه بعد از تغییر شکل

در شکل ۴-۵۶ نیز سختی نمونه فولادی ۳۰۴ قبل از تغییر شکل در محدوده‌ی ۱۷۰ تا ۱۷۵ ویکرز است. در شکل ۴-۵۷ سختی نمونه بعد از تغییر شکل، در خط ۱ افزایش چشم‌گیری داشته و به سختی ۴۶۰ ویکرز رسیده است. علت این سختی زیاد، به دلیل آن است که سنبه، نیروی زیادی در این قسمت وارد کرده است. علت این نیروی زیاد سنبه نیز به دلیل آن است که جریان مواد در ناحیه‌ی (ج) هسته‌ی قالب به دلیل افزایش اصطکاک، کم بوده است. در خطهای دیگر نیز سختی بین ۱۸۰ تا ۲۶۰ متغیر بوده است.



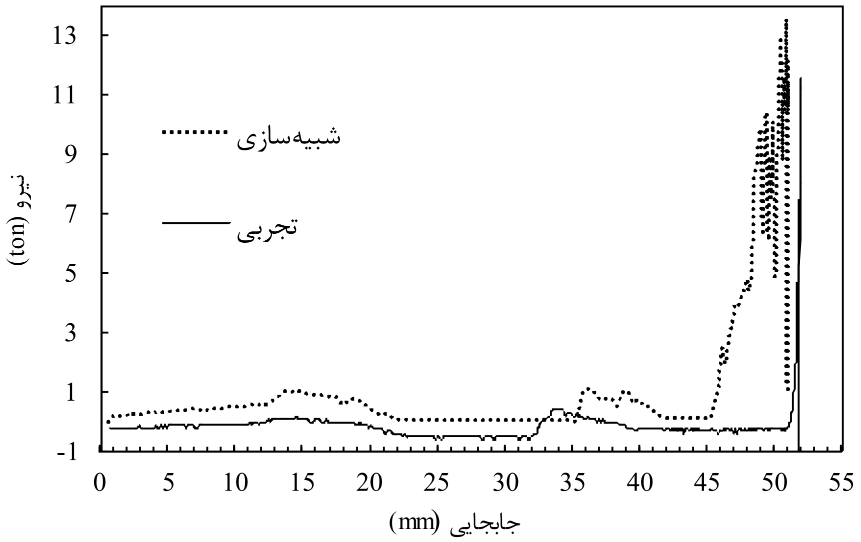
شکل ۴-۵۶: نمودار سختی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ قبل از تغییر شکل



شکل ۴-۵۷: نمودار سختی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بعد از تغییر شکل

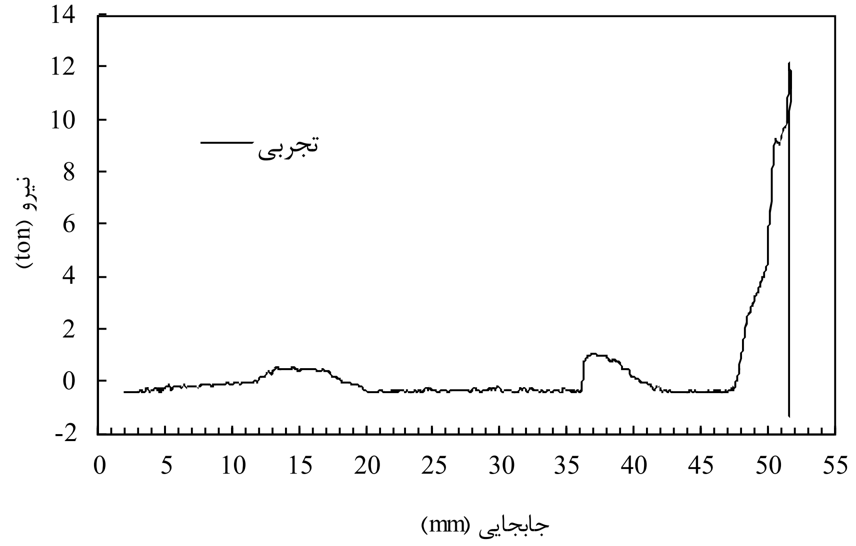
۴-۲-۴ نمودار نیرو–جابجایی

در شکل ۴-۵۸ منحنی نیرو–جابجایی تجربی با شبیه‌سازی آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۳ مقایسه شده است. در این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که قبل از رسیدن نمودار به نقطه‌ی ماکزیمم، گرچه تغییرات نیروی سنبه افزایشی است اما این افزایش در ابتدا با شیب کمتری و بعد با شیب تند انجام می‌شود. چون قطعه‌کار در حال عبور از زاویه Φ قالب است و تغییر شکل مومسان آغاز می‌شود و همچنین تماس اصطکاکی در این ناحیه زیاد است، افزایش نیرو با نرخ بالایی صورت می‌پذیرد که این عامل باعث تغییر در شیب نمودار می‌شود. حداکثر نیرو در قسمت شبیه‌سازی ۱۳ تن و در نمودار تجربی ۱۱/۲ تن می‌باشد.



شکل ۴-۵۸: مقایسه منحنی نیرو- جابجایی آلومینیوم۳۰۰۳، شبیه‌سازی با تجربی

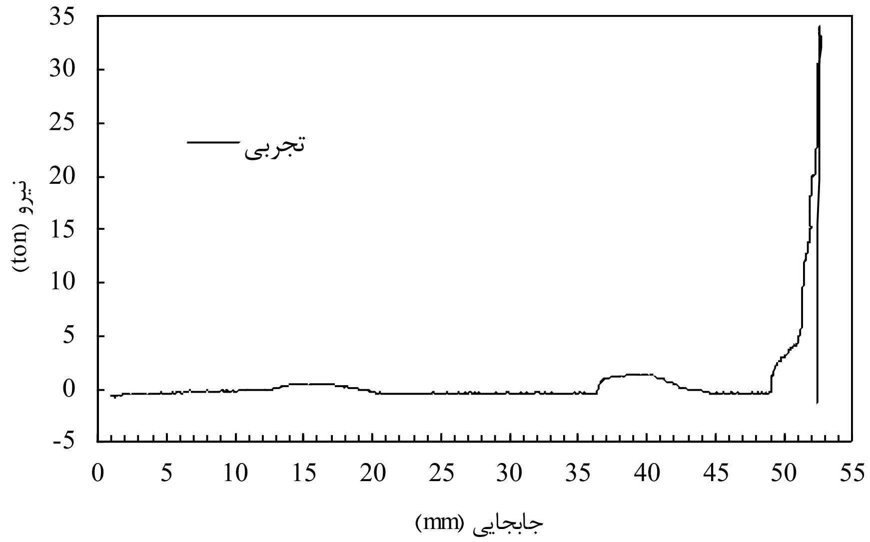
در شکل ۴-۵۹ منحنی نیرو–جابجایی تجربی مس با ضخامت ۲ mm را نشان می‌دهد. این منحنی، با استفاده از داده‌های خروجی دستگاه پرس در هنگام شکل‌دهی قطعه، رسم شده است.



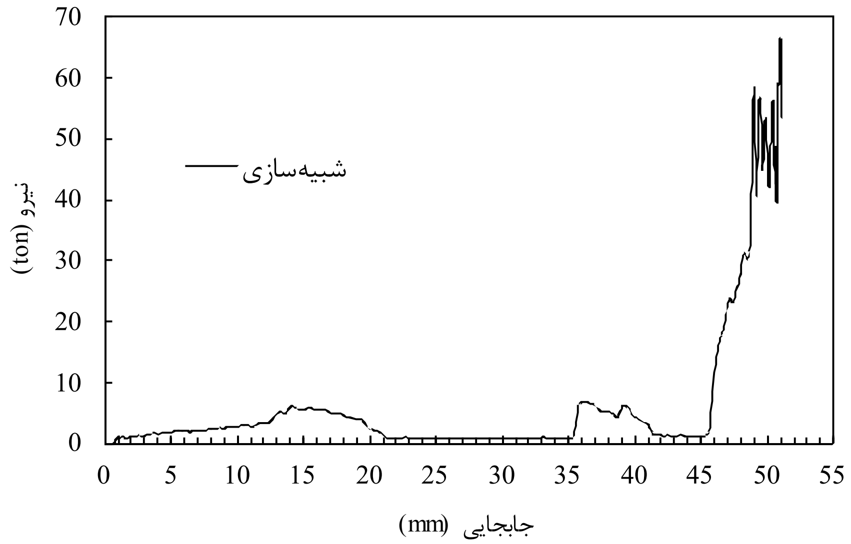
شکل ۴-۵۹: منحنی نیرو- جابجایی تجربی مس با ضخامت ۲ mm

در شکل ۴-۶۰ منحنی نیرو–جابجایی تجربی مس با ضخامت ۳ mm را نشان می‌دهد. در این نمودار افزایش نیرو به دلیل آن است که قالب بر اساس ضخامت ۲/۵ mm طراحی شده است و با انتخاب مس با ضخامت ۳ mm، دلیل افزایش نیرو بوده است. شبیه‌سازی برای مس صورت نگرفته است، پس فقط

مقدار تجربی منحنی نیرو–جابجایی مس ارائه شده است. همچنین در شکل ۴-۶۱ منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶۰: منحنی نیرو- جابجایی مس با ضخامت ۳ mm

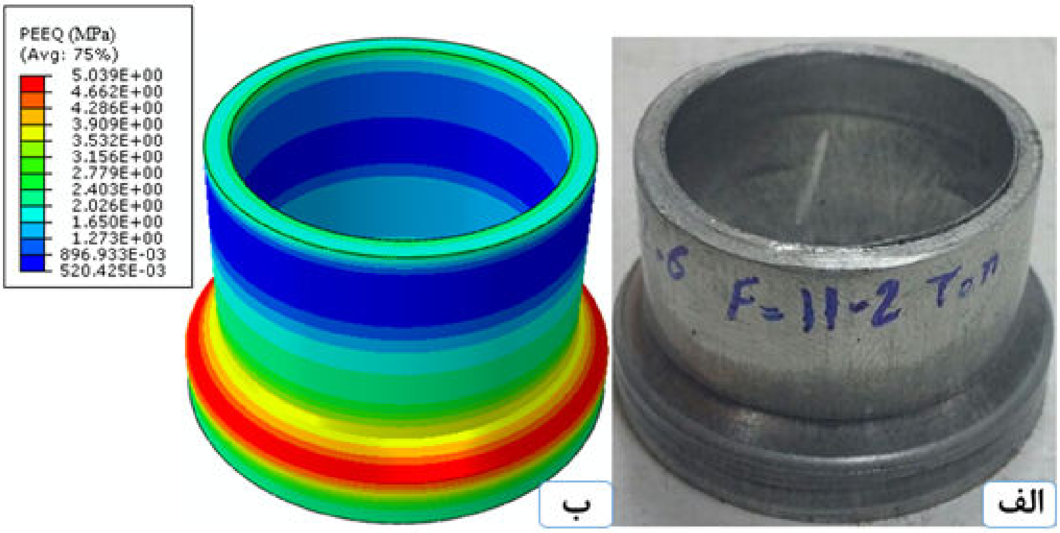


شکل ۴-۶۱: منحنی نیرو- جابجایی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

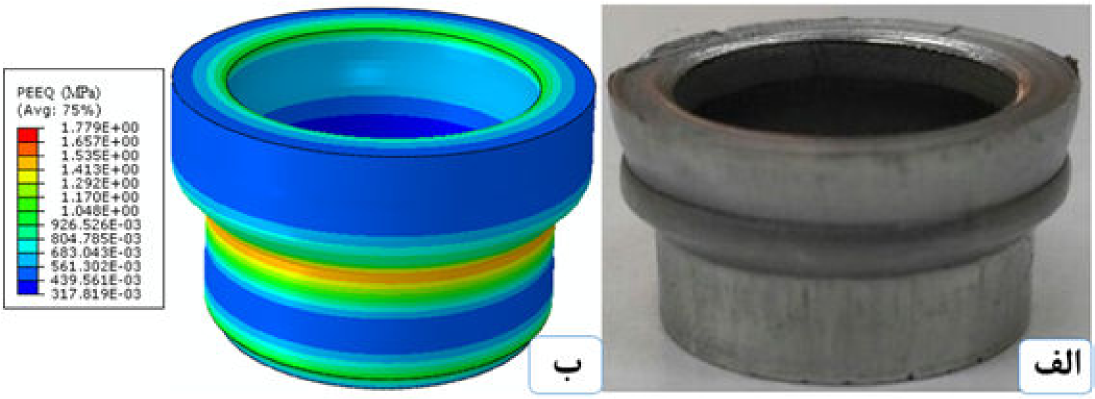
۴-۲-۵ مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی

به علت وجود عوامل متعدد خطا ساز (نویز) در پاسخ مسأله المان محدود، اعتبار سنجی نتایج عددی امری ضروری است. در این تحقیق با مقایسه هندسه محصول شبیه‌سازی با آزمون تجربی، این امر محقق شده است. شکل ۴-۶۲، نتیجه‌ی مقایسه شبیه‌سازی شکل‌دهی بوش فلنجدار با تجربی، از آلیاژ

AA3003، را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴-۶۳، نتیجه‌ی مقایسه شبیه‌سازی شکل‌دهی بوش فلنجدار با تجربی، از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶۲: مقایسه هندسه بوش فلنجدار شکل داده شده از آلیاژ AA3003 (الف) تجربی و (ب) شبیه‌سازی



شکل ۴-۶۳: مقایسه هندسه بوش فلنجدار شکل داده شده از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (الف) تجربی و (ب) شبیه‌سازی

از جمله پارامترهایی که در شکل‌دهی حجمی بوش فلنجدار دارای اهمیت می‌باشد، یکنواختی جریان مواد و به بیان دیگر دقت ابعادی بالای نمونه‌ها، پس از اتمام فرآیند شکل‌دهی است. بر اساس این پژوهش پارامترهایی شامل نیروی شکل‌دهی، مقدار جابه‌جایی سنبه، روانکاری، لقی میان سنبه و

هسته قالب، ضخامت ورق و بودن استوپر در حین فرآیند بر میزان دقت ابعادی نمونه‌های بدست آمده از فرآیند شکل‌دهی مؤثر است.

شکل‌دهی با اعمال جابجایی متفاوت سنبه و در شرایط استفاده از روانکار در کل فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت، پس از قرار دادن ورق در داخل قالب، سنبه با اعمال فشار بر روی ورق باعث جریان شعاعی و محوری ورق در ناحیه‌ی مورد نظر قالب می‌شود. با توجه به اصطکاک بالا، اگر از روانکار استفاده نشود، سنبه نمونه را در راستای حرکت خود پیش رانده و باعث می‌شود در انتهای فرآیند، کرنش پلاستیک زیاد شده و همچنین خراش در سطح دیواره قالب ایجاد گردد.

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، مطالعه عددی و تجربی شکل‌دهی حجمی ورق فلزی برای ساخت بوش فلنجدار، انجام شد. در این راستا، ابتدا دو گروه آزمون شبیه‌سازی شامل پروفیل هسته قالب جهت تولید بوش فلنجدار بر اساس جدول استاندارد و قرار دادن هسته‌ی قالب درون حلقه فشاری، طراحی و اجرا شد. در آزمون شبیه‌سازی پروفیل هسته قالب، ابعاد بوش فلنجدار تولیدی با توجه به بوش‌های فلنجدار در جداول استاندارد بررسی و طراحی سنبه و هسته‌ی قالب بر اساس همین ابعاد انجام گرفته است. پس از تغییرات زیاد در ابعاد قالب از جمله در شعاع‌ها و زوایای هسته‌ی قالب، دستیابی به یک پروفیل بهینه انجام شد. بر همین اساس، جهت ایجاد خنثی شدن تنش‌های فشاری و حلقوی زیاد در هسته قالب، از سیستم حلقه فشاری در این آزمون شبیه‌سازی، انجام گرفته است. در طراحی حلقه‌ی فشاری، بر اساس روابط تئوری و آزمون شبیه‌سازی با قرار دادن فشارهای مختلف انجام و ابعاد حلقه فشاری محاسبه شد.

در آزمون تجربی از سه نوع ورق شامل مس با ضخامت ۲ و ۳ mm، فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۳ با ضخامت ۲/۵ mm استفاده شد. از ورق آلومینیومی آزمون کشش تک‌محوره، طراحی و اجرا شد. در آزمون کشش تک‌محوره، از نمونه‌های دمبلی شکل طبق استاندارد ASTM-E8، سه عدد تهیه شد. از سه نمونه برای استخراج تنش تسلیم تک‌محوره استفاده شد و تا لحظه‌ی شکست کشیده شدند. سپس آزمایش تجربی فرآیند شکل‌دهی بوش فلنجدار انجام شد. در این آزمون استفاده از روانکار باعث کاهش اصطکاک می‌گردد. همچنین جهت یکنواخت ماندن جریان مواد، از استوپر استفاده شد. ارتفاع این استوپر با توجه به قطرهای داخلی ورق، ضخامت ورق و جهت جریان مواد در انتهای مواد شکل‌داده شده مختلف است. در انتها نمونه‌های شکل داده شده، برش خورده و مانت و پولیش شده و برای آزمون سختی‌سنجی آماده گردید. سپس آزمون سختی‌سنجی بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است که نشان می‌دهد در قسمت‌های فلنج بوش، سختی به نسبت زیاد شده و در دیواره-ها سختی کمی ایجاد شده است. در انتها برای تعیین دقت و صحت، نتایج تجربی با شبیه‌سازی مقایسه شد.

۵-۲- پیشنهادها

به منظور ادامه‌ی پژوهش در این زمینه، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

۱- دلیل ساخت بوش فلنجدار در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی ورق فلزی، کم‌هزینه بودن ساخت قالب آن، بوده است. پیشنهاد می‌شود، از روش‌های دیگر و با کارهای متفاوت‌تر مثل ساخت چرخدنده، استفاده شود.

۲- در این روش، از یک سنبه با قطرهای ثابت استفاده شد. پیشنهاد می‌شود، از انواع سنبه‌ها با قطرهای متفاوت استفاده گردد و بوش‌هایی با قطرهای متفاوت تولید گردد.

۳- در ساخت قالب، جهت خروج قطعه از داخل قالب به صورت دستی طراحی گردیده است. پیشنهاد می‌شود، برای افزایش سرعت و راحتی کار، از سیستم‌های بیرون انداز برای خروج قطعه‌کار، استفاده شود.

۴- در این پژوهش از سه نوع از نمونه‌های مس، آلومینیوم ۳۰۰۳ و فولاد ضدزنگ ۳۰۴ استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود، در پژوهش‌های آتی بر روی آلیاژها و یا فولادهای دیگر، کار شود.

۵- در این پژوهش از ضخامت ۲/۵ mm استفاده شده است. بهتر است در پژوهش‌های آتی، از ضخامت‌های مختلف استفاده گردد. لازم به ذکر است که در استفاده از ضخامت‌های مختلف، قطرهای سنبه نیز باید تغییر کند.

منبع‌ها

[1] M. Merklein, J. M. Allwood, B.-A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A. E. Tekkaya, and A. Weckenmann, "Bulk forming of sheet metal," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 725–745, Jan. 2012.

[2] "Handbook of die design," *J. Manuf. Syst.*, vol. 17, no. 3, p. 235, Jan. 1998.

[3] K. Isik, G. Gerstein, T. Schneider, R. Schulte, D. Rosenbusch, T. Clausmeyer, F. Nürnberger, M. Vucetic, S. Koch, S. Hübner, B.-A. Behrens, A. E. Tekkaya, and M. Merklein, "Investigations of ductile damage during the process chains of toothed functional components manufactured by sheet-bulk metal forming," *Prod. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 5–15, Feb. 2016.

[4] M. Merklein, D. Gröbel, M. Löffler, T. Schneider, and P. Hildenbrand, "Sheet-bulk metal forming – forming of functional components from sheet metals," *MATEC Web Conf.*, vol. 21, p. 1001, Aug. 2015.

[5] A. Maeda and K. Araki, "Plate gear," *Japanese Pat.*, pp. 9–222158, 1996.

[6] K. Mori, Y. Abe, K. Osakada, and S. Hiramatsu, "Plate forging of tailored blanks having local thickening for deep drawing of square cups," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 10, pp. 1569–1574, Oct. 2011.

[7] C. J. Tan, K. Mori, and Y. Abe, "Forming of tailor blanks having local thickening for control of wall thickness of stamped products," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 202, no. 1–3, pp. 443–449, Jun. 2008.

[8] T. Nakano, K. Ashihara, N. Ishinaga, T. Imura, and Y. Toyama, "Development of combined forming of cold forging and thick sheet metal forming," *JOURNAL-JAPAN Soc. Technol. Plast.*, vol. 47, no. 12, p. 1146, 2006.

[9] T. Suzumura, K. Mine, I. Hirayama, and S. Ishihara, "An experimental study of new redrawing method utilizing axial compressive force and frictional force," in *Proceedings of the 7th International Conference on Technology for Plasticity*, 2002, vol. 2, pp. 1093–1098.

[10] T. Altan and G. Ngaile, "Cold and Hot Forging". 2005.

[11] T. Nakano, "Compound technology of sheet metal forming and cold forging," *JOURNAL-JAPAN Soc. Technol. Plast.*, vol. 42, no. 5; ISSU 484, pp. 388–392, 2001.

[12] K. Mori, T. Maeno, and Y. Fukui, "Spline forming of ultra-high strength gear drum using resistance heating of side wall of cup," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 299–302, 2011.

[13] ر. مسن آبادی، "آهنگری"، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، چاپ اول پاییز، ۱۳۸۷.

[14] T. Nakano, "Introduction of flow control forming (FCF) for sheet forging and new presses," in *Proceedings of the International Seminar on Precision Forging, Kyoto*, 2009, pp. 35–40.

[15] T. Altan, G. Ngaile, and G. Shen, *Cold and hot forging: fundamentals and applications*, vol. 1, no. 440. ASM international, 2005.

[16] G. Ray, D. Yilmaz, and L. M. Company, "Flow Forming," vol. 14, pp. 516–521, 2005.

[17] T. Altan and A. E. Tekkaya, *Sheet metal forming: processes and applications*. ASM International, 2012.

[18] د. نیایش, اولین هندبوک فارسی فرایندهای شکل‌دهی چرخشی اسپینینگ، شیر فرمینگ، فلوفرمینگ. انتشارات یا مهدی (عج), ۱۳۸۴.

[19] http://design-wildfire.blogfa.com/post-6458.aspx

[20] http://iran-mavad.com/?p=14621

[21] R. Shivpuri, "Past developments and future trends in the rotary or orbital forging process," *J. Mater. Shap. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 55–71, 1988.

[22] http:// "(شکل دهی فلزات) مقاله فورجینگ." .ir

[23] http://iran-mavad.com/?p=5572

[24] V. A. Goldade, L. S. Pinchuk, A. V Makarevich, and V. N. Kestelman, "Structural Inhibited Plastics," *Plast. Corros. Inhib.*, pp. 255–336, 2005.

[25] N. Bay, "The state of the art in cold forging lubrication," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 46, no. 1–2, pp. 19–40, 1994.

[26] H. Czichos and W. O. Winer, "Tribology: A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear (Tribology Series, 1)." American Society of Mechanical Engineers, 1978.

[27] M. M. M. Mohammad Amin Ranaei, Ahmad Afsari, Seyed You sef Ahmadi BrooghanNi, "Investigation on performance of ultra fine grained pure co pper as electrode during electrical discharge machining," *Modares Mech. Eng*", vol. 14, no. 1, pp. 97–105, 2014.

[28] J. G. Kaufman, Introduction to Aluminium Alloys and Tempers. 2000.

[29] M. Shabgard and R. R. Heshmatabad, "Experimental investigation of the electrolyte type effect on the specifications of electrochemical machining (ECM) of the 304 stainless steel," vol. 16, no. 3, pp. 43–54, 2016.

[30] K. Mori, "Plate Forging For Controlling Wall Thickness Distribution Of Products," *J. Japan Soc. Technol. Plast.*, 2011.

[31] C. Soyarslan, D. P. F. Fassmann, B. Plugge, K. Isik, L. Kwiatkowski, M. Schaper, A. Brosius, and a. E. Tekkaya, "An Experimental and Numerical Assessment of Sheet-Bulk Formability of Mild Steel DC04," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 133, no. 6, p.

61008, 2011.

[32] M. Merklein, S. Opel, F. Chinesta, Y. Chastel, and M. El Mansori, "Investigation Of Tailored Blank Production By The Process Class Sheet-Bulk Metal Forming," in *Proceedings in Manufacturing Systems*, 2011, vol. 6, no. 2, pp. 395–400.

[33] M. Schaper, Y. Lizunkova, M. Vucetic, T. Cahyono, H. Hetzner, S. Opel, J. Schneider, T. Koch, and B. Plugge, 'Sheet-bulk metal forming a new process for the production of sheet metal parts with functional components," *Metall. Min. Ind.*, vol. 3, no. 7, pp. 53–58, 2011.

[34] T. Schneider and M. Merklein, "Sheet-Bulk Metal Forming of Preformed Sheet Metal Parts," *Key Eng. Mater.*, vol. 473, no. C, pp. 83–90, Mar. 2011.

[35] V. Salfeld, R. Krimm, T. Matthias, and B. Behrens, "Investigation On The Process-Machine Interaction By Forming Parts With Sheet-Bulk Metal Forming," vol. 6, no. 2, pp. 4–7, 2011.

[36] M. Wieland and M. Merklein, "Wear behavior of uncoated and coated tools under complex loading conditions," *Tribol. Ind.*, vol. 34, no. 1, pp. 11–17, 2012.

[37] M. Löffler, D. Groebel, U. Engel, K. Andreas, and M. Merklein, "Analysis of Effectiveness of Locally Adapted Tribological Conditions for Improving Product Quality in Sheet-Bulk Metal Forming," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 794, pp. 81–88, Oct. 2015.

[38] P. Kersting, D. Gröbel, M. Merklein, P. Sieczkarek, S. Wernicke, A. E. Tekkaya, E. Krebs, D. Freiburg, D. Biermann, T. Weikert, S. Tremmel, D. Stangier, W. Tillmann, S. Matthias, E. Reithmeier, M. Löffler, F. Beyer, and K. Willner, "Experimental and numerical analysis of tribological effective surfaces for forming tools in Sheet-Bulk Metal Forming," *Prod. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 37–50, Feb. 2016.

[39] H.-B. Besserer, A. Dalinger, D. Rodman, F. Nürnberger, P. Hildenbrand, M. Merklein, and H. J. Maier, "Induction Heat Treatment of Sheet-Bulk Metal-Formed Parts Assisted by Water-Air Spray Cooling," *steel Res. Int.*, vol. 86, no. 9999, p. n/a-n/a, Jan. 2016.

[40] L. E. Malvern, Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, no. Monograph. 1969.

[41] خلخالی،ابوالفضل, تحلیل اجزای محدود با کمک ABAQUS , ویرایش اول. تهران: مؤسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران, ۱۳۸۶.

[42] P. Pedersen, "On Shrink Fit Analysis and Design," *Comput. Mech.*, vol. 37, no. 2, pp. 121–130, Jan. 2006.

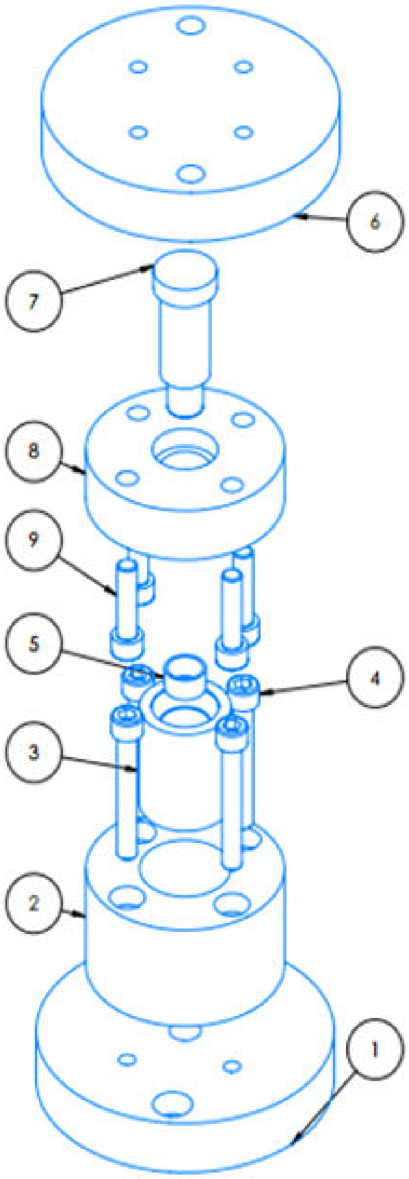
[43] M. Heinzler, R. Gomeringer, and U. Fischer, *Mechanical and Metal Trades Handbook*. 2010.

[44] http://www.makeitfrom.com/material-properties/3003-Aluminum.

[45] http://www.molyslip.co.uk

[46] بطالبلویی، رضا "مدل‌سازی و بهبود قالب در فرآیند اکستروژن مستقیم و سرد لوله"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بهمن ۱۳۹۳.

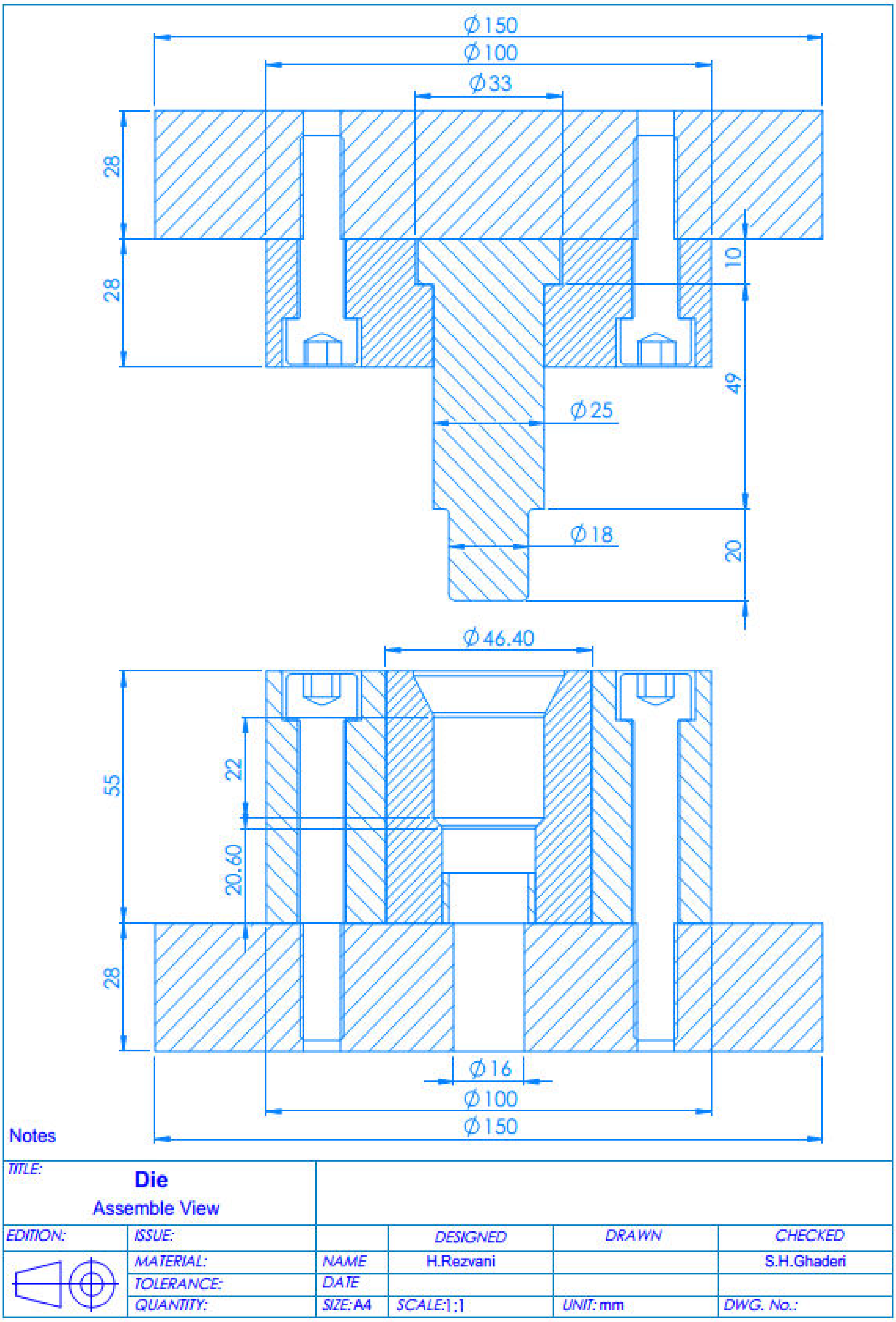
پیوست الف



Isometric View

نمای انفجاری قالب شکل‌دهی بوش

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Bottom Shoe	VCN150 (1.6582)	1
2	Pressure Ring	VCN150 (1.6582)	1
3	Die Core	DF2 (1.2510)	1
5	Bush	VCN150 (1.6582)	1
6	Punch Backing Plate	VCN150 (1.6582)	6
7	Punch	SPK (1.2080)	6
8	Punch Holder	VCN150 (1.6582)	6
4	socket head cap screw_din	M10	1
9	socket head cap screw_din	M10	6


Ø150
Ø100
Ø33
28
28
10
49
Ø25
Ø18
20
Ø46.40
55
22
20.60
28
Ø16
Ø100
Ø150
Notes
TITLE:
Die
Assemble View
EDITION:
ISSUE:
DESIGNED
DRAWN
CHECKED
MATERIAL:
NAME
H.Rezvani
S.H.Ghaderi
TOLERANCE:
DATE
QUANTITY:
SIZE: A4
SCALE: 1:1
UNIT: mm
DWG. No.:

Abstract

Bulk forming of sheet metal, often a combination of bulk forming and sheet metal forming process in which the material flow is performed in three dimensions. Process for manufacturing flanged bush traditionally by use machining carried out. This process was not only time consuming, it produces a lot of waste. Recycling process is often associated with cost. An alternative to this method can be used in combination with methods for forming sheet metal is Bulk forming. The combination of these methods, advantages such as being accurate dimensions of the final piece, reducing the final machining, speed up production, better product properties due to the difficult material. In this thesis study on the construction of the bush flanged on the sheet of aluminum alloy AA3003, using bulk forming of sheet metal is considered. Initially, one of the most important issues that need to be taken into consideration, the design of the die. In mechanical and geometric form must be designed so that in addition to proper flow of materials, the forces forming is not tolerated and failure. In this regard, the bush flange profiles for the production of standard punch and the mold cavity and the mold core into a pressure ring, was designed and implemented. The pressure ring design, simulation test was conducted with relations theory in the design, dimensions pressure ring was calculated by putting different pressure forces. In the next step, tensile test and experiment bush flange forming process was conducted. Then, the samples were given shape and hardness test. Hardness test on the samples shows in the flanged bush, the relatively high hardness and little difficulty is created in the wall. Finally, to determine the accuracy A the experimental results were compared with simulations.

Keywords: Bulk forming of sheet metal, Flanged bush, Plastic deformation, Material flow, Tribology, Aluminum alloy 3003, Stainless steel 304

Shahrood University of Technology
Department of Mechanical Engineering

MSc Thesis in Mechnical Engineering- Manufacturing

Title:

Experimental and numerical study on bulk forming of sheet metal for manufacturing flanged bush

By:

Hossein Rezvani Valookolaei

Supervisor:

Dr. Seyed Hadi Ghaderi

February 2017