

بررسی تاثیر پارامترهای شکل دهی به روش فشار گاز بر روی پرشدگی قالب و توزیع ضخامت ورق

در این تحقیق، شکل دهی ورق آلیاژ Al-A356 در قالب مخروط ناقص با فرآیند فشار گاز به صورت شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر پارامترهایی از قبیل نسبت قطر دهانه به ارتفاع قالب، زاویه، درجه حرارت و فشار بر پرشدگی گوشه قالب و توزیع ضخامت قطعات می باشد. نتایج نشان می دهد که با افزایش فشار از ۱ بار به ۸ بار، پرشدگی قالب حدود ۱۵٪ بهتر خواهد شد. البته این در حالی است که ضخامت بحرانی ورق کاسته شده و به کمتر از ۰/۵ میلیمتر خواهد رسید. با کاهش نسبت قطر به ارتفاع، افزایش پرشدگی قالب مشاهده شد اما این امر کاهش به اندازه ۱۴٪ در میزان نازک شدن قسمت بحرانی ورق داشت. با کاهش زاویه مخروط از ۳۰ به صفر درجه نیز مشخص شد که لازم است مقدار فشار حدود ۲۵٪ افزایش یابد تا قالب به طور مناسبی توسط ورق پر شود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۳۵۰°C به ۵۵۰°C، فشار لازم برای پرشدگی قالب از ۸ بار به ۲ بار کاهش می یابد.

امین کلاه دوز^۱
استادیار

ساسان امینیان دهکردی^۲
کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: شکل دهی با فشار گاز، آلیاژ Al-A356، شبیه سازی اجزای محدود، مخروط ناقص

۱- مقدمه

یکی از روش های مورد توجه محققین استفاده از روش های مختلف تولید قطعات توخالی و پیچیده است [۱]. به دلیل نیاز روز افزون به صرفه جویی در انرژی و کاهش اتلاف ماده های اولیه، کاهش تعداد عملیات مختلف در تولید یک قطعه و در نتیجه کاهش هزینه ها، بایستی اصول نظری و صنعتی فرآیندهای شکل دهی فلزات گسترش یابد [۲]. از این رو محققان و صنعتگران در تلاش هستند تا از فرآیندهای تولید پیشرفته و سیستم های انعطاف پذیر بیشتر در صنعت استفاده نمایند [۳].

^۱ نویسنده مسؤل، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. دانشکده مهندسی و توسعه پایدار، دانشگاه دمونت فورت، لستر، انگلستان

amin.kolahdooz@dmu.ac.uk ، aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

sasanaminian@iaukhsh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸

شکل‌دهی با فشار گاز^۱، فرآیندی است که می‌تواند به این امر کمک شایانی نماید. با توجه به اهمیت قطعات مخروطی و کاربرد آن در صنعت نظامی و هوافضا در ادامه سعی شده به پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه تولید قطعات مخروطی توسط فرآیند شکل‌دهی با فشار گاز پرداخته شود.

لی و همکاران [۴] به بررسی اثر ریز ساختار آلیاژ منیزیم AZ31 بر خواص مکانیکی، قابلیت شکل‌پذیری در دمای بالا با استفاده از آزمایش تجربی مانند تست کشش تک محوره در دمای اتاق و دمای ۴۰۰°C و شکل‌دهی دمشی دو محوره پرداختند. آن‌ها با سه نوع از آلیاژ با اندازه دانه‌های متفاوت آلیاژ به بررسی آزمایش‌های تجربی پرداختند. در نهایت متوجه شدند که اندازه دانه بر شکل‌پذیری تاثیر دارد. نتایج ایشان نشان می‌دهد که بالاترین ارتفاع در دمای ۴۰۰°C برای ورقه‌هایی با اندازه دانه ریزتر حاصل می‌شود.

هوانگ و همکاران [۵] فرآیند دمش مواد ابرمومسان را در یک قالب استوانه‌ای به صورت تئوری بررسی کردند. در این پژوهش، غیریکنواخت بودن ضخامت ورق در منطقه بالچ آزاد و شرایط تماس ورق و قالب به صورت اصطکاک چسبنده و لغزنده در نظر گرفته شده است و اثر پارامترهای مختلف شکل‌دهی مانند شعاع دهانه قالب، ضریب اصطکاک، ابعاد قالب و غیره بر روی مسیر فشار بهینه، زمان شکل‌دهی و توزیع ضخامت قطعه نهایی بررسی شده است. علاوه بر آن آزمایش‌هایی با ورق‌هایی از جنس آلومینیم 8090 برای بررسی صحت نتایج تئوری انجام شده است. معادله ورق بکار رفته به صورت $\bar{\sigma} = 268\bar{\epsilon}^{0.48} MPa$ بوده است. نتایج ایشان نشان می‌دهد که در مرحله بالچ منحنی فشار در ابتدا حالت صعودی و سپس نزولی دارد. اگر در مرحله دوم تماس با دیواره رخ دهد، منحنی همچنان سیر نزولی خود را حفظ می‌کند، اما اگر تماس اولیه با کف قالب باشد، منحنی سیر صعودی پیدا می‌کند. در مرحله سوم با توجه به کاهش شدید مقدار شعاع قطعه، مقدار فشار به شدت افزایش می‌یابد. آقاجانلو و همکاران [۶] به بررسی نحوه ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به کمک فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز پرداختند. در کار ایشان، شکل‌دهی صفحات با ضخامت ۰/۱۲ میلیمتر و با الگوی شیار مارپیچ به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. ایشان اثر عمق شیارها، دماها، فشارها و زمان‌های مختلف را بر روی درصد نازک شدگی ورق، توزیع ضخامت و عمق پرشدگی قالب مورد بررسی قرار دادند و اعلام نمودند که شیار با عمق ۲ میلیمتر دارای درصد نازک شدگی کمتری را داراست. همچنین بیشترین درصد پرشدگی شیار قالب را حدود ۸۸ درصد عنوان نمودند که در شرایطی که دما ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، فشار ۴۰ بار و در مدت زمان ۳۰ دقیقه فرآیند اتفاق بیفتد، حاصل می‌شود. یو وو و همکاران [۷] تست کشش و شکل‌دهی دمشی گازی بر روی آلیاژ ریز دانه منیزیم AZ31B، را مورد بررسی قرار دادند. هدف این پژوهش کاهش زمان در شکل‌دهی دمشی گازی آلیاژ منیزیم می‌باشد. ورق‌های آلیاژی با استفاده از تابه مستطیلی شکل و با استفاده از فشار ثابت انجام و نتایج آن را ثبت کردند. در نتیجه کاهش چشم‌گیر در شکل‌دهی بدست آمد به این گونه که تابه مستطیلی شکل در دمای ۴۲۰°C و با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر در کمتر از ۱۰۵ ثانیه ایجاد شد. هوانگ و همکاران [۸] پژوهش خود را منوط به تولید قطعات مخروطی کردند. پارامتر مورد بررسی ایشان، زاویه قالب بود و برای تعیین وضعیت تماس در مرحله دوم، پارامتر بی‌بعد هندسی AR به صورت زیر تعریف شد:

¹ Gas forming

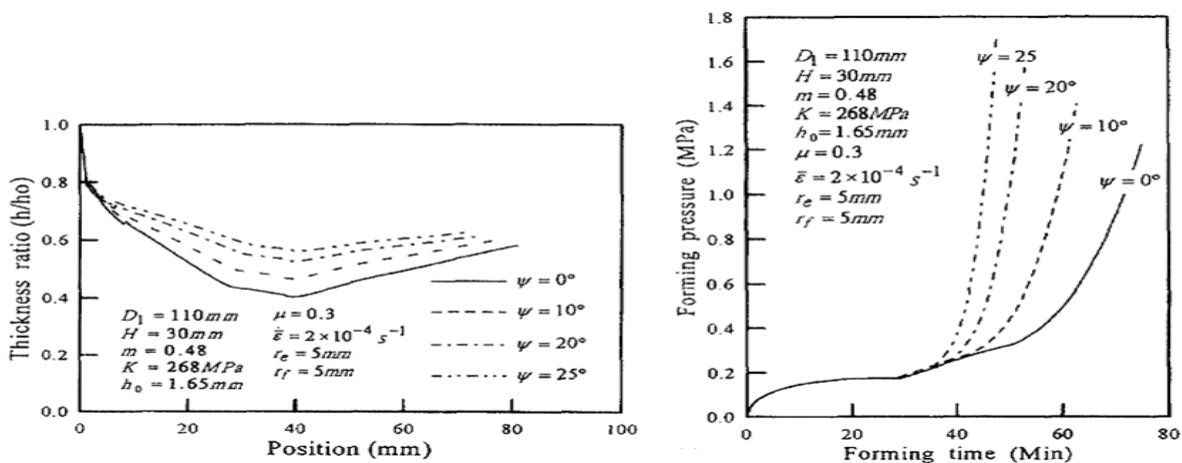
$$AR = \frac{D_1(1 - \sin\psi)}{2H\cos\psi} \quad (1)$$

در این رابطه D_1 ، H و ψ به ترتیب قطر بزرگ، عمق و زاویه مخروط است، در شکل (۱) تأثیر تغییرات زاویه قالب بر منحنی فشار و توزیع ضخامت نشان داده شده است. نتایج ایشان نشان می‌دهد که منحنی‌های توزیع ضخامت حاصل از تئوری، در حالتی که ضریب اصطکاک متفاوت برای قسمت‌های مختلف قالب در نظر گرفته شود، تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد. همچنین با در نظر گرفتن یک ضریب اصطکاک بسیار زیاد برای کف قالب، در مرکز قطعه اختلاف منحنی‌های تئوری و تجربی بسیار زیاد است.

آکسنو و سورجنه [۹] به بررسی رفتار تنش و کرنش ورق با استفاده از تست بالچ آزاد شدند. آن‌ها تکنیک جدیدی برای بررسی تجربی و عددی جهت رفتار ورق در شرایط شکل‌دهی سوپر پلاستیک به کار بردند. آن‌ها افزودند که مقدار کرنش و مشتقات زمان را نمی‌توان به طور مستقیم در طول تست بالچ آزاد کنترل نمود اما این مقدار بوسیله تست‌های میکروسکوپی قابل محاسبه است. در نهایت نتایج تجربی و عددی آن‌ها یکدیگر را تایید کردند. سورجنه و همکاران [۱۰] به بررسی عددی و تجربی آلیاژ منیزیم AZ31 با استفاده از شکل‌دهی دمشی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که شعاع لبه ایجاد شده در شکل‌دهی و در مدت زمان می‌تواند بسیار کوچک باشد. ایشان بیان کردند که انتخاب دما و نرخ کرنش به شدت تحت اثر رشد دانه و پدیده خلزایی می‌باشد. همچنین ایشان اشاره کردند که حتی اگر آلیاژ متمایل به رشد دانه استاتیکی و دینامیکی شدیدی باشد، با توجه به زمان کم شکل‌دهی می‌توان به متوسط اندازه دانه نیز دست پیدا کرد.

هوانگ و لای [۱۱] پژوهشی مشابه آنچه در مورد قالب‌های بیضی شکل انجام دادند، بر روی قالب‌های مستطیلی تکرار کردند. روش کار و نتایج کلی حاصل از این پژوهش مشابه قالب‌های بیضی است.

حجتی و همکاران [۱۲] به کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس و الگوریتم لگاریتمی، پارامترهای مختلف را در قالب‌های مخروطی کامل بررسی کردند. فلز استفاده شده در این پژوهش آلومینیم 5083 بوده و با معادله $\bar{\sigma} = 591\bar{\epsilon}^{0.6} MPa$ در نرم‌افزار مربوطه مدل‌سازی شده است. ایشان عنوان نمودند که الگوریتم لگاریتمی نتایج نزدیکتری به نتایج تئوری ارائه می‌دهد. همچنین شبیه‌سازی‌ها در فشارهای ثابت را انجام داده و در ادامه نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از دو الگوریتم مقایسه کردند.



شکل ۱- تغییرات منحنی فشار (راست) و توزیع ضخامت (چپ) بر حسب زاویه داخلی قالب [۸].

مقایسه تغییرات تنش مایز در نوک گنبد نسبت به زمان نشان داد که منحنی تغییرات تنش در الگوریتم لگاریتمی نسبت به حالت‌های دیگر یکنواخت‌تر است. همچنین زمان فرآیند و مقدار تنش ماکزیمم الگوریتم‌های کنترلی نسبت به حالت‌های فشار ثابت کمتر است. مقایسه توزیع ضخامت نیز نشان دادند که در نمونه‌های کنترل شده، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر وجود دارد. در ادامه پژوهش اثر اصطکاک در قالب‌های مخروطی بررسی شده است. نتایج این قسمت نشان می‌دهد که تغییرات ضریب اصطکاک بر تغییرات تنش مایز و کرنش خزشی در نوک گنبد اثری نداشته اما ضریب اصطکاک بر زمان فرآیند، توزیع ضخامت و منحنی فشار اثر دارد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک مقدار زمان افزایش یافته ولی مقدار فشار ماکزیمم کاهش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش اصطکاک باعث غیریکنواخت‌تر شدن توزیع ضخامت می‌شود.

یو وو و همکاران [۱۳] در پژوهشی دیگر و با روش نسبتاً جدیدی به اصلاح سنبه در فرآیند شکل‌دهی به روش دمشی پرداختند و ویژگی‌های تغییر شکل در این روش را مورد بحث قرار دادند. آلیاژ مورد استفاده در پژوهش آلیاژ منیزیم AZ31B بوده است. با استفاده از این روش جدید جهت شکل‌دهی ورقه آلیاژ و با استفاده از تابه مستطیلی شکل، فشار به صورت گام به گام اعمال شد. نتایج نشان داده است که فرآیند پیشنهاد شده به طور چشم‌گیری در کاهش زمان تحت نرخ کرنش بالا موثر بوده است. آن‌ها با اشاره به اینکه یکی از پارامترهای کلیدی که بر سرعت زمان در شکل‌دهی دمشی تاثیر می‌گذارد شعاع فیلت می‌باشد و رشد دانه و خللازی را در طول شکل‌دهی سریع دمشی را مشکل جدی ندانستند.

همبلی و همکاران [۱۴] فرآیند شکل‌دهی دمشی را به کمک شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس به دو صورت سه‌بعدی با در نظر گرفتن المان‌های پوسته‌ای^۱ و به صورت نصف مدل و همچنین به صورت دوبعدی با المان‌های زنجیره‌ای^۲ و به صورت متقارن محوری صورت پذیرفته است. فلز استفاده شده آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ و با فرض معادله $\bar{\sigma} = 158\bar{\epsilon}^{0.39} MPa$ بوده است. نتایج تطابق خوب دو روش را نشان می‌دهد. تنها مشکل روش سه بعدی زمان بالای تحلیل آن ذکر شده است.

طاهری آهنگر و همکاران [۱۵] به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی در فرآیند هیدروفورمینگ گرم پرداختند. آلیاژ مورد بررسی ایشان لوله‌های آنیل شده ۶۰۶۳ بود. ایشان به بررسی تاثیر فشار و تغذیه محوری در دماهای مختلف پرداختند و میزان توزیع ضخامت، فشار پارگی و ارتفاع بالچ را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در پژوهش خود توانستند پنجره شکل‌دهی مناسب را برای ماده مورد نظر و در محدوده ایمن بارگذاری به دست آورند. ایشان بیان نمودند که بازه اعمال فشار در محدوده ایمن و میزان تغذیه محوری در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد به ترتیب تقریباً دو برابر و نصف دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد است. در واقع فشار لازم در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد حدود ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. ایشان اعلام نمودند که شکل‌پذیری ماده با بالا رفتن دما افزایش یافته، به طوری که ارتفاع بالچ تقریباً دو برابر می‌شود.

چن [۱۶] شبیه‌سازی در قالب‌های استوانه‌ای را با فلز Ti-6Al-4V انجام داد. معادله مشخصه ماده به صورت توانی ساده فرض شده است. در ابتدا سه شبیه‌سازی به صورت متقارن محوری و با سه المان مختلف انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ضریب اصطکاک زمان شکل‌دهی افزایش و فشار ماکزیمم کاهش

¹ Shell

² Continuum

می‌یابد. همچنین با افزایش اصطکاک توزیع ضخامت غیریکنواخت‌تر می‌شود. در انتها تاثیر تغییرات مقدار نرخ کرنش بهینه و حساسیت نرخ کرنش با هم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر کمتر توان نرخ کرنش، منحنی فشار را بالاتر می‌برد و با کاهش نرخ کرنش زمان فرآیند افزایش می‌یابد. مقدار توان نرخ کرنش بیشتر باعث یکنواخت‌تر شدن ضخامت می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده در بالا از آنجایی که در زمینه شکل‌دهی قطعات مخروطی ناقص به روش شکل‌دهی به روش فشار گاز تحقیقات اندکی صورت گرفته، از این رو، بررسی تاثیر پارامترهای فرآیندی و هندسی قالب بر پرشدگی گوشه قالب و توزیع ضخامت قطعات در این فرآیند اهمیت پیدا می‌کند. پارامترهای فرآیندی شامل مسیر فشار، مقدار فشار و درجه حرارت و پارامترهای هندسی قالب شامل زاویه و نسبت قطر دهانه به ارتفاع قالب می‌باشد که بر پرشدگی گوشه قالب و توزیع ضخامت قطعات تولید شده با استفاده از فرآیند شکل‌دهی به روش فشار گاز اثرگذار هستند. با استفاده از روش شبیه‌سازی اجزای محدود و به صورت عددی تاثیر پارامترها بر پرشدگی گوشه قالب و توزیع ضخامت قطعات قابل بررسی می‌باشد. همچنین جهت اعتبارسنجی آزمایش‌های انجام شده بوسیله نرم‌افزار، آزمایش‌های عملی نیز صورت گرفته و نتایج حاصل با نتایج مربوطه مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مراحل و روش انجام کار

۲-۱- مواد و خواص آن

جنس ورق به کار رفته در شبیه‌سازی و تجربی از نوع آلیاژ آلومینیم A356 است. ورق مورد نظر با توجه به جنس انتخابی و موجود در بازار ایران به ضخامت $0/8$ میلیمتر و با تolerانس در حدود $\pm 0/02$ خریداری شد. میزان درصد عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ مورد استفاده که با استفاده از آزمون کوانتومتری به دست آمد در جدول (۱) آورده شده است. همچنین خواص فیزیکی و ترموفیزیکی آلیاژ مورد نظر که برگرفته از مراجع [۱۷] و [۱۸] است، در جدول (۲) ذکر شده است.

جدول ۱- درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ A356

Al	Si	Mg	Fe	Ti	Other
۹۲/۱۴	۷/۱۰	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۱۰	<۰/۰۸

جدول ۲- خواص فیزیکی و ترموفیزیکی آلیاژ A356 [۱۷] و [۱۸]

مشخصه	واحد	مقدار
چگالی	Kgm^{-3}	۲۴۹۵
ویسکوزیته	$\text{Kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$	$1/13 * 10^{-3}$
مدول یانگ	GPa	۷۰
ضریب پواسون	---	۰/۳۲
ظرفیت گرمایی ویژه	$\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$	۱۰۸۲
هدایت حرارتی در حالت جامد	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	۶۰

با توجه به اینکه فرآیند در حالت گرم بایستی صورت گیرد لذا خواص مکانیکی ماده در این حالت بایستی مورد بررسی قرار گیرد. در حالت کلی تنش سیلان مواد در حالت پلاستیک تابع رابطه زیر است [۱۲ و ۱۳]:

$$\sigma = K' \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (2)$$

اما وقتی دما به نزدیکی دمای تبلور مجدد می‌رسد، با توجه به اینکه دیگر شرایط کار سختی اثری را بر روی تنش سیلان ندارد، می‌توان رابطه را به صورت رابطه زیر ساده سازی نمود:

$$\sigma = k \dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

بر اساس این رابطه، فقط با دانستن مقادیر نرخ کرنش ($\dot{\varepsilon}$)، تنش (σ)، توان نرخ کرنش (m) و ضریب نرخ کرنش (k) می‌توان رابطه تنش سیلان و خواص متالورژیکی آلیاژ مورد نظر را محاسبه نمود. برای به دست آوردن خواص آلیاژ مورد نظر بایستی آزمون بالج آزاد ورق دایره‌ای شکل انجام شد. دماهای 350°C ، 450°C و 550°C که همان دماهای انتخاب شده برای شبیه سازی بودند برای این کار در نظر گرفته شدند. در ادامه و برای هر یک از دماها از منحنی فشار به صورت ثابت استفاده شده و در طول زمان شکل‌دهی، مقادیر تغییرات ارتفاع رأس قطعه با استفاده از یک سنسور ارتفاع سنج ثبت گردیدند [۱۴]. بحرانی‌ترین نقطه در تست بالج آزاد ورق و از حیث مقدار تنش، رأس گنبد آن است. لذا محاسبات تنش بر اساس این نقطه بایستی صورت گیرد [۱۶ و ۱۹]. با توجه به مقدار ضخامت ورق بالج شده در رأس گنبد در هر ارتفاع و زمان سپری شده برای رسیدن به آن، مقادیر کرنش و نرخ کرنش در ارتفاع و زمان مشخص قابل محاسبه می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر تنش، نرخ کرنش و توان نرخ کرنش، با بهره‌گیری از رابطه (۳) و با فرض بدون اثر کار سختی در دماهای بالا مقدار ضریب نرخ کرنش برای هر دما قابل محاسبه است. این مقادیر برای آلیاژ مورد نظر در دماهای مورد نظر در جدول (۳) آورده شده است.

۲-۲- مدل سازی اجزای محدود فرآیند

روش اجزای محدود اولین بار در دهه (۱۹۵۰) معرفی شد و از آن موقع تاکنون به طور پیوسته، گسترش و بهبود یافته است. در حال حاضر، این روش یک ابزار مناسب برای حل بسیاری از مسایل مهندسی است و توانسته که در شاخه‌های مختلف صنعت عملکرد مناسب خود را نشان دهد. در این مقاله، برای شبیه‌سازی تاثیر پارامترها بر پرشدگی قالب و توزیع ضخامت از نرم‌افزار آباکوس با ورژن ۶/۹ استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، به دلیل تقارن مجموعه و برای صرفه‌جویی در زمان محاسبه، شبیه‌سازی به صورت متقارن محوری انجام گرفته است. برای مدل سازی ورق و از بین موارد موجود ورق را از نوع جامد^۱ تغییر شکل پذیر^۲ انتخاب شد. همچنین مدل قطعات قالب، پوسته‌ای و از نوع صلب گسسته^۳ در نظر گرفته شد. برای هر قطعه صلب یک نقطه مرجع^۴ (RP) تعریف شده که تمام پارامترها و شرایط مرزی به آن اضافه می‌گردید. نوع گام به مورد استفاده برای این فرآیند VISCO می‌باشد که دلیل این امر این است که ماده‌ای ابرمومسان به روش شکل‌دهی خزشی فرم داده می‌شود.

¹ Solid

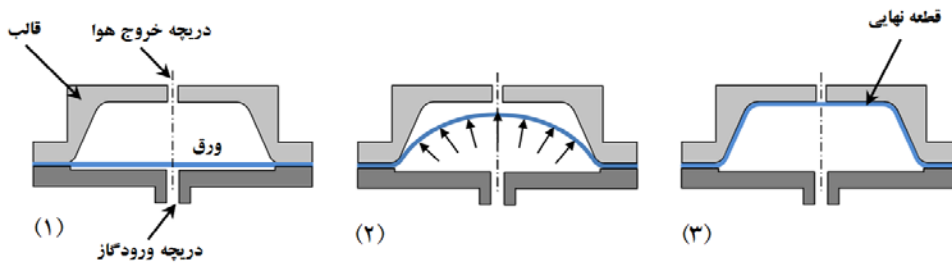
² Deformable

³ Discrete rigid

⁴ Reference Point

جدول ۳- خواص مکانیکی و فیزیکی ورق آلومینیوم آلیاژی A۳۵۶.

دما	۳۵۰	۴۵۰	۵۵۰
m	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۳۴
k	۱۳۵	۱۳۹/۴۸	۱۲۰/۳۲

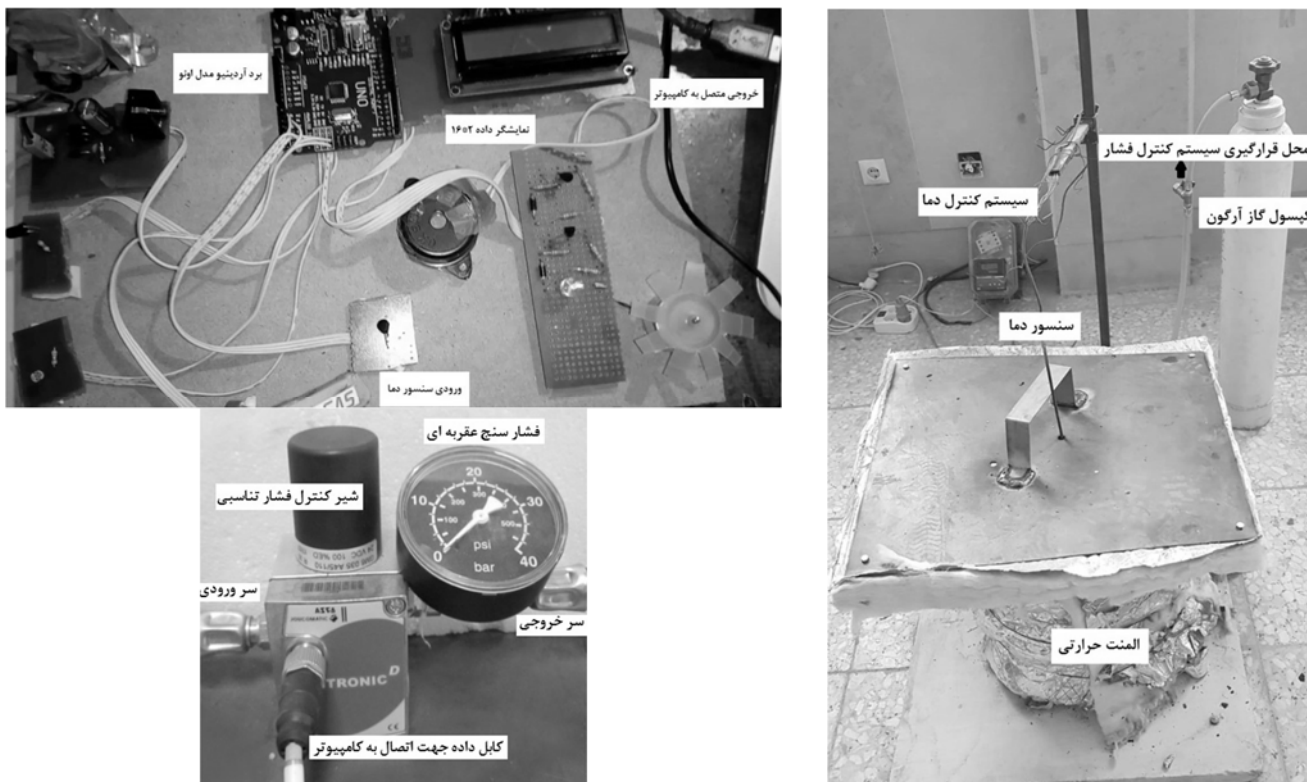


شکل ۲- تصویر شماتیک قالب فرآیند

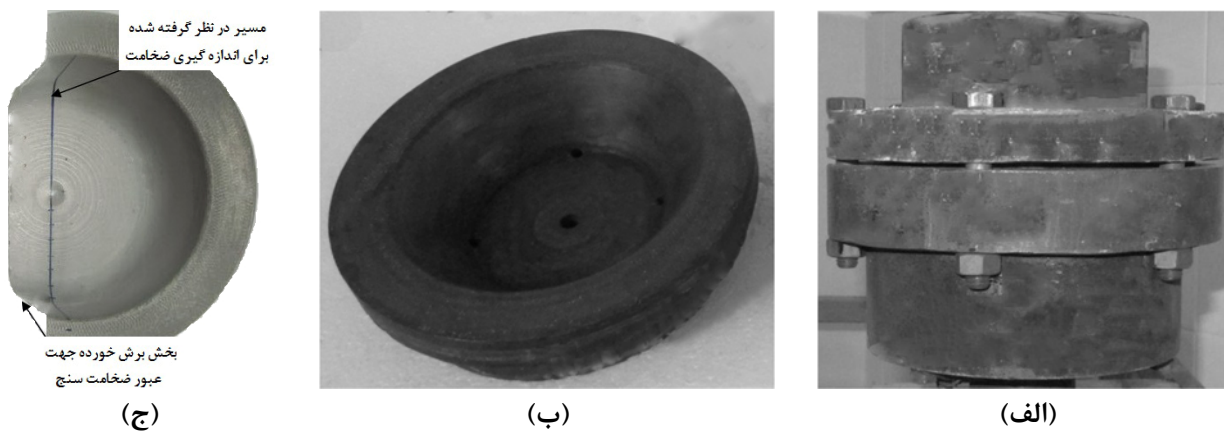
خصوصیات مورد نظر شامل ضریب نرخ کرنش (k)، ضریب پواسون، مدول الاستیکی و توان نرخ کرنش (m) است. این خصوصیات مطابق جداول (۲ و ۳) اعمال می‌شوند. در این مدل‌سازی به دلیل آنیل بودن ورق، ماده مورد نظر همسانگرد و با $R=1$ در نظر گرفته شد. در بخش خواص و برای اعمال خصوصیات ماده که در معادلات ساختاری به صورت توانی ساده در نظر گرفته شود بایستی از دستور CREEP استفاده نمود. مهم‌ترین قسمت اجزا محدود مربوط به نتایج آن است که در این پژوهش جابه‌جایی هر گره به صورت خروجی میدانی تعیین شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده در سه دسته قیود اعمال گردید. نوع اول قیود جابه‌جایی بود که برای محدود کردن حرکت قالب و لبه ورق اعمال شد. نوع دوم قید مربوط به تقارن بود که به مرکز ورق اعمال گردید. نوع سوم قید فشار که برای اعمال فشار سیال بر ورق و به صورت یک بار گسترده یکنواخت فشاری بر سطوح زیر ورق اعمال شد. برای بررسی تاثیر فشار نیز دو مسیر فشار متفاوت (ثابت و خطی) برای شکل‌دهی قطعه در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. به منظور مقایسه توزیع ضخامت حاصل از اعمال دو مسیر فشار باید پروفیل قطعه بدست آمده از این مسیرهای فشار یکسان باشد. بنابراین زمان اعمال فشار در دو مسیر (ثابت و خطی) با هم متفاوت است. همچنین بیشینه فشار اعمالی در شبیه‌سازی به ورق برابر ۲ بار در نظر گرفته شد.

۳-۲- دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده در آزمون‌های اعتبارسنجی

شکل (۳) بخش‌های مختلف تجهیزات استفاده شده و شکل (۴) تصویری از قالب و یک نمونه تهیه شده را نشان می‌دهد. فشار لازم برای شکل‌دهی توسط مخزن گاز تامین می‌شود. با توجه به اینکه مخازن موجود در صنعت تا فشار حدود ۱۲۰ بار پر می‌شوند، فشار لازم برای شکل‌دهی بدست می‌آید. در این پژوهش به دلیل در دسترس بودن، عدم اشتعال در درجه حرارت بالای فرآیند و همچنین در جهت کاهش اکسیداسیون و تخریب سطوح از گاز آرگون استفاده شده است. دستگاه به نحوی طراحی و ساخته شده است که بدنه به صورت ثابت در دستگاه قرار گرفته و ماتریس‌های مختلف می‌تواند بر روی آن قرار گیرد لذا برای شکل‌دهی قطعات مخروطی ناقص بایستی از ماتریس با شکل مربوط به آن استفاده شود. جنس بدنه از فولاد St-37 انتخاب شده تا بتوان به راحتی آن را تراشکاری نمود. جهت اتصال ورق گیر هم شش سوراخ روی محفظه ایجاد شده است.



شکل ۳- بخش‌های مختلف تجهیزات استفاده شده شامل سیستم حرارت‌دهی، سیستم پردازش داده و سیستم کنترل فشار



شکل ۴- (الف) قالب در حالت مونتاژ (ب) ماتریس با ارتفاع ۳۵ میلی‌متر (ج) نمونه قطعه تولید شده

جدول ۳- اندازه‌های قالب مورد استفاده در این پژوهش

۱۰۰	D1، قطر حفره ماتریس
۱۳۰	D2، قطر گرده
۵	r _e ، شعاع لبه ماتریس
۳۰	ϕ، نصف زاویه رأس مخروط ناقص
۳۵	H، ارتفاع مخروط ناقص

المنت‌های حرارتی نیز در اطراف و زیر بدنه قرار داده شده‌اند تا درجه حرارت مورد نظر به وجود آید. با اعمال گاز، ورق به داخل حفره ماتریس کشیده شده و فرم آن را به دست می‌آورد. جنس این قطعه را نیز فولاد St-37 انتخاب شده که بتوان به راحتی با عملیات تراشکاری آن را ایجاد نمود. ابعاد اصلی قالب فرآیند شکل‌دهی مورد استفاده در آزمایش‌های اعتبارسنجی استفاده شده در جدول (۳) آورده شده است.

۲-۴- وسایل اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات از دستگاه ضخامت سنج Kroeplin ساخت کشور آلمان استفاده شده است. فک‌های اندازه‌گیر این ضخامت سنج دارای نوک کرومی می‌باشد. برای اندازه‌گیری شعاع گوشه قطعات از دستگاه پروفایل پروژکتور استفاده شده است. برای اندازه‌گیری سایر ابعاد قطعه از کولیس دیجیتالی و ارتفاع سنج استفاده شده است.

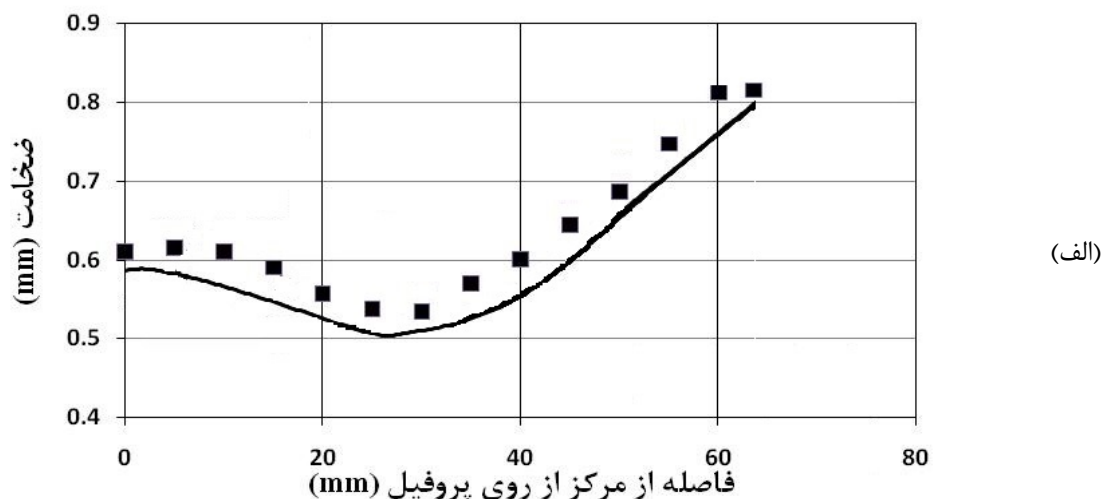
۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی فرآیند

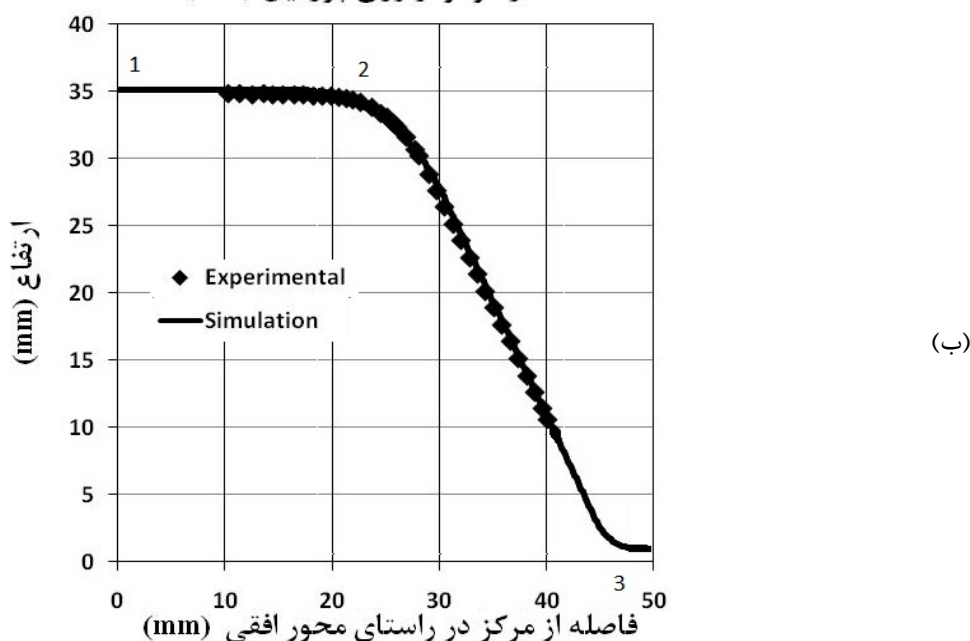
جهت بررسی صحت نتایج تجربی و شبیه‌سازی، آزمایش تجربی در فشار ثابت ۲ بار و درجه حرارت 550°C در قالب مخروطی ناقص با قطر دهانه ۱۰۰ mm، نصف زاویه راس مخروط 30° و ارتفاع ۳۵ mm انجام شد. با توجه به مجهول بودن ضریب اصطکاک بین قالب و ورق، شبیه‌سازی با ضریب اصطکاک ۰/۵ انجام شده است. نتیجه شبیه‌سازی و آزمون تجربی در شکل (۵) و برای توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز و پروفیل قطعه نشان داده شده است. مطابق شکل منحنی توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی از نظر رفتاری شباهت بسیاری دارند. با توجه به اینکه در آزمایش‌های تجربی از هیچ‌گونه روانکاری استفاده نشده و فرآیند در دمای بالا انجام می‌شود لذا شرایط به حالت اصطکاک چسبان نزدیک است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر مورد منحنی شبیه‌سازی و تجربی تطابق خوبی با هم دارند که نشان می‌دهد شبیه‌سازی از صحت لازم برخوردار است. در ضمن در لبه ورق که با شماره ۳ در شکل (۵-ب) نشان داده شده است، به علت اعمال قید، ضخامت ورق ثابت است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در گوشه قطعه (مشخص شده با شماره ۲ در شکل ۵-ب) بیشترین مقدار نازک‌شدگی رخ داده است. این منطقه آخرین قسمت از ورق می‌باشد که با قالب تماس می‌یابد. تماس با قالب و نیروی اصطکاک ناشی از آن، کرنش اعمالی به المان را کاهش می‌دهد و باعث نازک‌شدگی آن المان می‌شود. در نتیجه هرچه المان دیرتر با قالب تماس بگیرد، بیشتر دچار نازک‌شدگی می‌شود.

۳-۲- بررسی اثر مسیر فشار

دو مسیر فشار متفاوت (ثابت و خطی) برای شکل‌دهی قطعه در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. به منظور مقایسه توزیع ضخامت حاصل از اعمال دو مسیر فشار باید پروفیل قطعه بدست آمده از این مسیرهای فشار یکسان باشد. بنابراین زمان اعمال فشار در دو مسیر (ثابت و خطی) با هم متفاوت است. شکل (۶) منحنی مسیرهای فشار اعمال شده به ورق را نشان می‌دهد.



(الف)

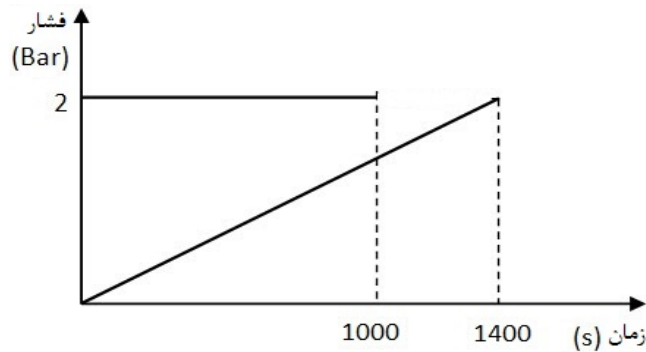


(ب)

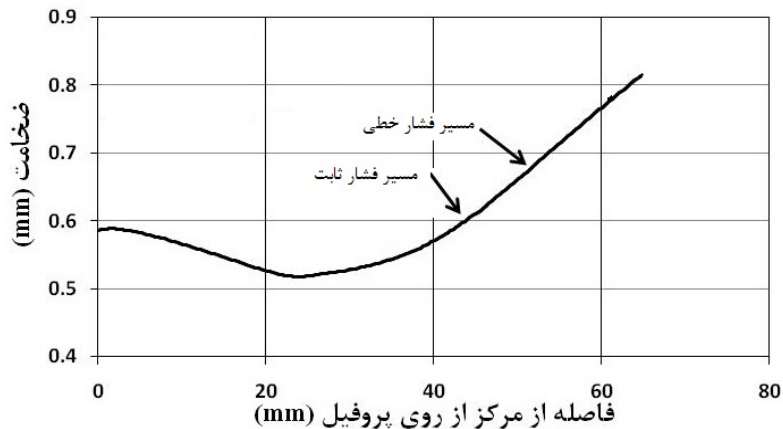
شکل ۵- (الف) منحنی توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز قطعه

(ب) منحنی پروفیل قطعه در فشار ثابت ۲ بار و درجه حرارت 55°C

همچنین بیشینه فشار اعمالی در شبیه‌سازی به ورق برابر ۲ بار در نظر گرفته شد. در شکل (۷) منحنی توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز قطعات حاصل از دو مسیر فشار نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، توزیع ضخامت قطعات شبیه به هم بوده و یکسان هستند. با توجه به اینکه توزیع ضخامت در این فرآیند به پروفیل قالب بستگی دارد و تقریباً همان توزیع ضخامت به دست می‌آید باید به این نکته توجه نمود که زمان شکل‌دهی با انتخاب صحیح مسیر فشار کاهش یابد. لی و همکارانش [۲۰] نیز این مطلب را بررسی نموده و صحت آن را تایید نموده‌اند که مسیرهای فشار اعمالی به ورق هیچگونه تاثیر بر توزیع ضخامت قطعه ندارند و مسیر فشار تنها بر نرخ کرنش و زمان شکل‌دهی تاثیرگذار هستند. بنابراین در ادامه‌ی آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی به جهت سهولت در کنترل فشار از مسیر فشار ثابت برای اعمال فشار به ورق استفاده شده است.



شکل ۶- منحنی مسیره‌های فشار اعمال شده به ورق



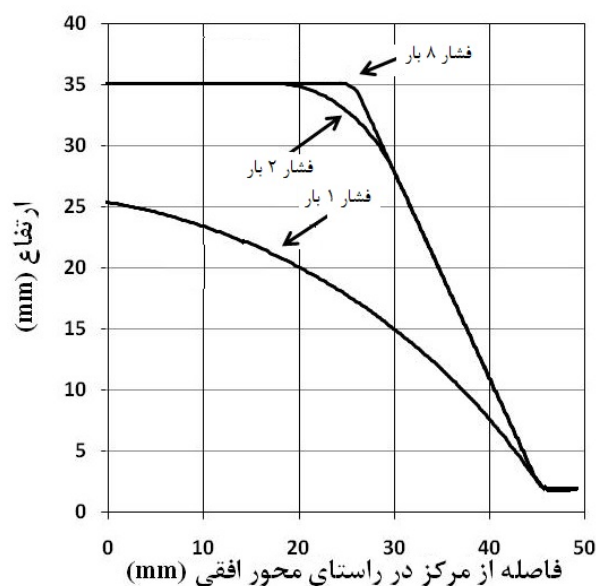
شکل ۷- منحنی توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز قطعات حاصل از شبیه‌سازی طی دو مسیر فشار ثابت و خطی

۳-۳- بررسی اثر مقدار فشار

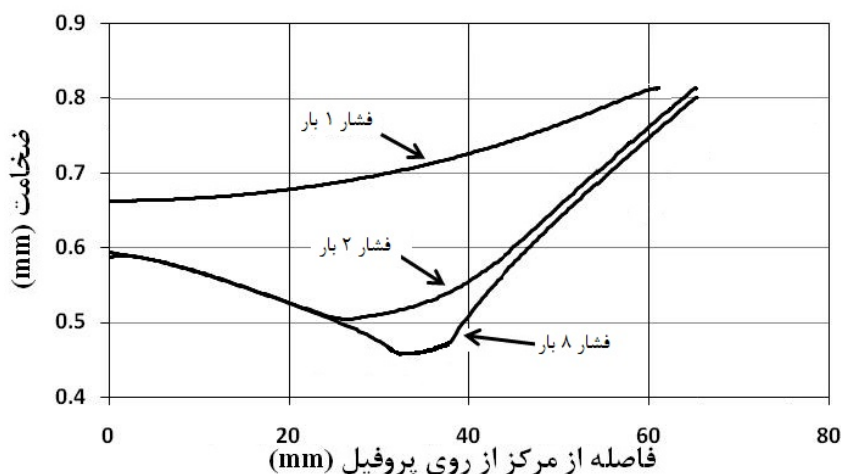
منحنی پروفیل قطعه و همچنین منحنی توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز را برای ۳ فشار مختلف و در دمای 550°C در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، پروفیل قطعه نسبت به فاصله از مرکز با افزایش فشار بزرگتر شده و سطح تماس ورق با کف و دیواره قالب افزایش یافته است. آخرین قسمت از ورق که با قالب تماس می‌یابد، گوشه قطعه است و در نتیجه بیشترین نازک‌شدگی در آنجا اتفاق خواهد افتاد. در واقع با افزایش فشار ورق کشیده‌تر می‌شود و چون حجم ورق ثابت است ضخامت گوشه قطعه، کاهش یافته و در نتیجه شعاع انحنای گوشه قطعه کاهش می‌یابد و گوشه قالب بیشتر پر می‌شود. شکل (۹) اثر مقدار فشار بر ضخامت گوشه قطعه و میزان پرشدگی قالب را در دمای 550°C نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش فشار، شکل‌دهی ورق افزایش یافته و ورق بیشتر شکل می‌گیرد.

۳-۴- بررسی اثر دما

از آنجایی که نگهداشتن ورق در دماهای بالا باعث درشت‌تر شدن ریز ساختار می‌شود لذا زمان فرآیند ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. سه درجه حرارت 350°C ، 450°C و 550°C درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفته شد. شکل (۱۰) نتیجه حاصله را برای فشار ۲ بار نشان می‌دهد. با افزایش دما، استحکام تسلیم ماده کاهش می‌یابد و در نتیجه قطعه به شکل مورد نظر نزدیک‌تر می‌شود. این در حالی است که فشار کمتری نیز برای شکل‌دهی لازم است.



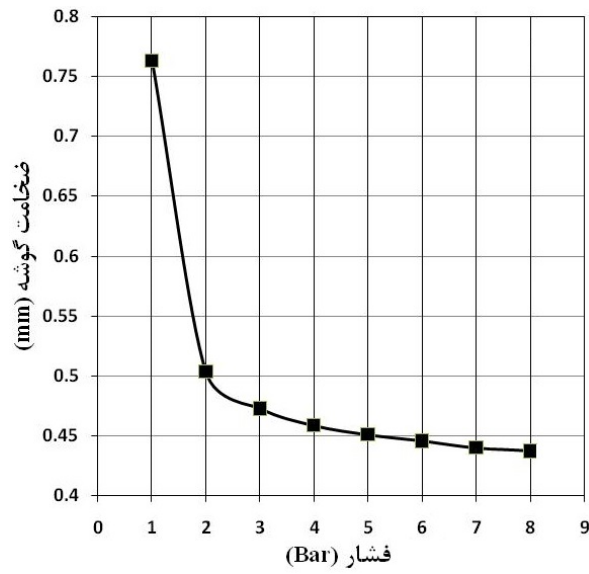
(الف)



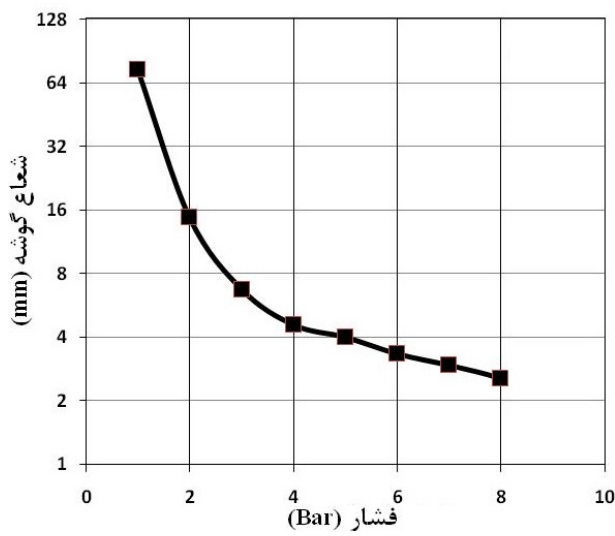
(ب)

شکل ۸- (الف) منحنی توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز (ب) منحنی پروفیل قطعه

در شکل (۱۱) منحنی توزیع ضخامت قطعه نسبت به فاصله از مرکز قطعه را در این درجه حرارت‌ها نشان می‌دهد. با توجه به ثابت بودن حجم ورق، با افزایش عمق قطعه، توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز قطعه کاهش می‌یابد. بیشترین نازک شدگی را هم گوشه قطعه که در مراحل انتهایی فرآیند شکل می‌گیرد دارد. در نتیجه می‌توان گفت که با افزایش دما، میزان پرشدگی و شکل‌دهی ورق در قالب افزایش می‌یابد. در شکل (۱۲) اثر تغییرات درجه حرارت بر میزان پرشدگی قالب در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود شعاع انحنای گوشه قطعه با افزایش درجه حرارت کاهش یافته و قالب بیشتر پر شده است. در واقع می‌توان گفت با افزایش درجه حرارت، فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

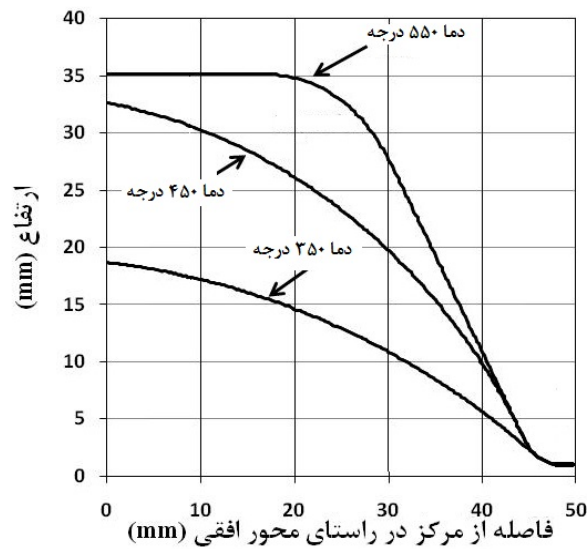


(الف)

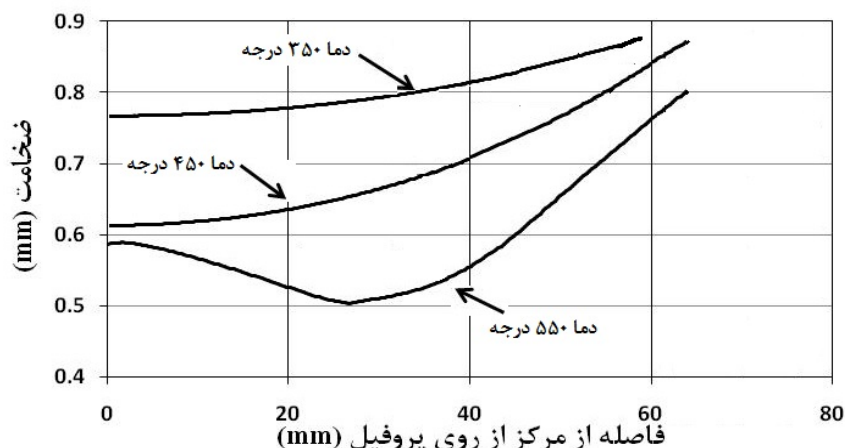


(ب)

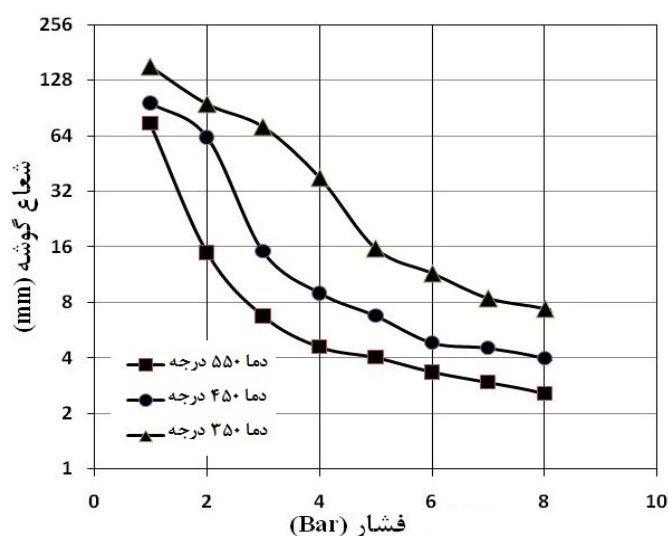
شکل ۹- اثر مقدار فشار بر (الف) ضخامت گوشه قطعه (ب) میزان پرشدگی قالب



شکل ۱۰- منحنی پروفیل قطعه در درجه حرارت‌های مختلف (فشار ۲ بار)



شکل ۱۱- منحنی توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز قطعه در فشار ۲ بار و درجه حرارت‌های مختلف

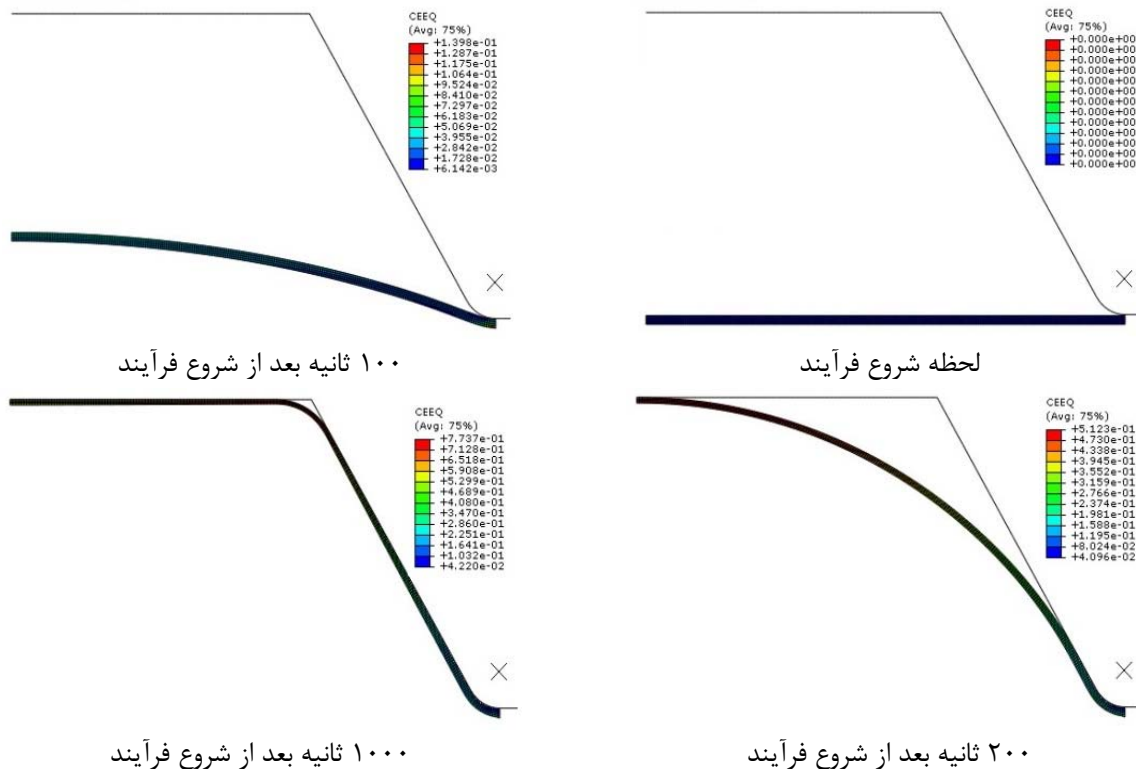


شکل ۱۲- اثر تغییرات درجه حرارت بر میزان پرشدگی قالب در فشارها و درجه حرارت‌های مختلف

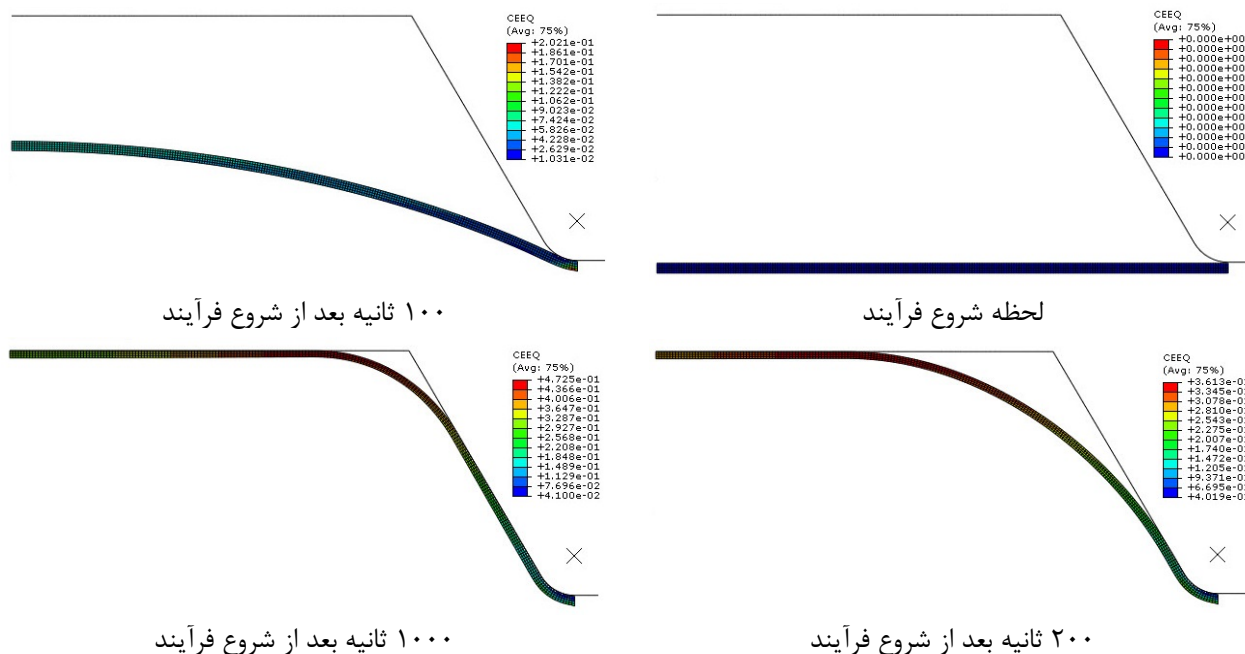
۳-۵- بررسی اثر پارامترهای قالب

۳-۵-۱- بررسی اثر وضعیت قطعه

یکی از شرایطی که بایستی مورد بررسی قرار بگیرد وضعیت قطعه در طول فرآیند در قالب است. همانطور که در فصل دوم اشاره شد هوانگ و همکاران [۸] به بررسی این وضعیت پرداخته و پارامتری را به نام AR و مطابق رابطه (۱) به دست آوردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که اگر $AR > 1$ باشد، در این صورت در این مرحله تماس با کف قالب رخ می‌دهد و در صورتی که $AR < 1$ باشد، تماس با دیواره رخ می‌دهد. شکل (۱۳) شبیه‌سازی انجام گرفته در این پژوهش را برای قالب $AR < 1$ نشان می‌دهد. انبساط ورق تا زمان تماس ورق با دیواره در دهانه ورودی قالب ادامه دارد. پس از تماس ورق با دیواره قالب، سطح تماس در راستای دیواره رشد می‌کند. با گذشت زمان، نوک گنبد با کف قالب تماس می‌یابد. پس از تماس نوک گنبد با کف قالب، سطح تماس در جهت شعاعی رشد می‌کند و با گذشت زمان، انبساط به سمت گوشه‌های قالب رشد می‌کند و در نهایت قطعه شکل می‌گیرد. شکل (۱۴) وضعیت قطعه را در طول فرآیند در قالب $AR > 1$ نشان می‌دهد. در این قالب در مرحله دوم تماس بر عکس قالب $AR < 1$ ، ورق ابتدا با کف قالب و سپس با دیواره تماس می‌یابد.



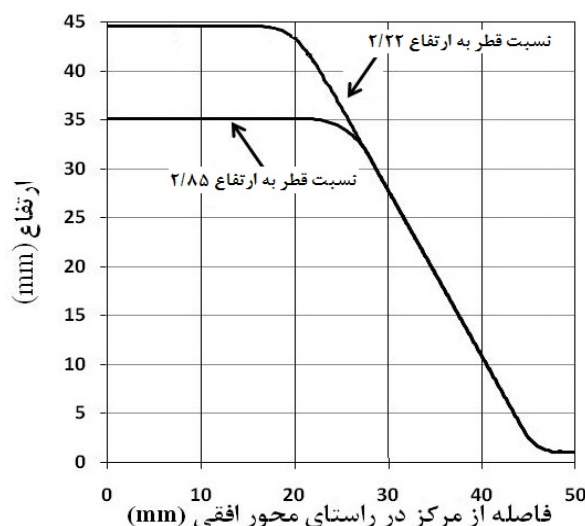
شکل ۱۳- وضعیت قطعه در طول فرآیند در قالب $AR < 1$



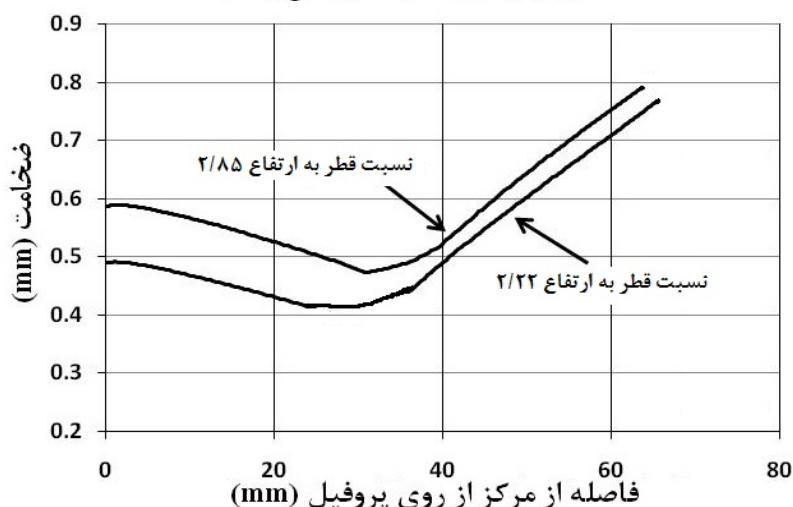
شکل ۱۴- وضعیت قطعه در طول فرآیند در قالب $AR > 1$

۳-۵-۲- بررسی اثر ارتفاع و قطر دهانه مخروط ناقص

یکی از پارامترهای هندسی موثر بر پرشدگی قالب نسبت ارتفاع و قطر دهانه مخروط است. این نسبت به صورت، نسبت D/H در نظر گرفته شده و در شبیه‌سازی با توجه به مقدار ۱۰۰ میلی‌متر برای قطر دهانه قالب و ارتفاع‌های ۳۵ و ۴۵ میلی‌متر مخروط، نسبت‌های $2/85$ و $2/22$ محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین زاویه مخروط ۳۰ درجه و دمای 550°C در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۵) منحنی پروفیل قطعه و توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز قطعه را برای فشار ۴ بار نشان می‌دهد. با افزایش ارتفاع مخروط، ارتفاع بالج آزاد ورق افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع، مجموع طول کمان در راستای سطح قالب افزایش یافته و پروفیل قطعه نسبت به فاصله از مرکز در دما و فشار ثابت، بزرگتر می‌شود. مطابق شکل با افزایش ارتفاع مخروط، ضخامت نسبت به فاصله از مرکز قطعه کاهش می‌یابد. با توجه به ثابت بودن حجم ورق با افزایش ارتفاع مخروط ناقص، ارتفاع بالج آزاد ورق افزایش یافته و نازک‌شدگی در کف و گوشه قطعه افزایش می‌یابد و نیز با بزرگتر شدن پروفیل قطعه، ضخامت قطعه کاهش می‌یابد و بیشترین نازک‌شدگی در گوشه قطعه اتفاق می‌افتد. بنابراین با افزایش ارتفاع مخروط در فشار و دمای ثابت، شعاع انحنای گوشه قطعه کاهش یافته و پرشدگی قالب افزایش می‌یابد.



(الف)



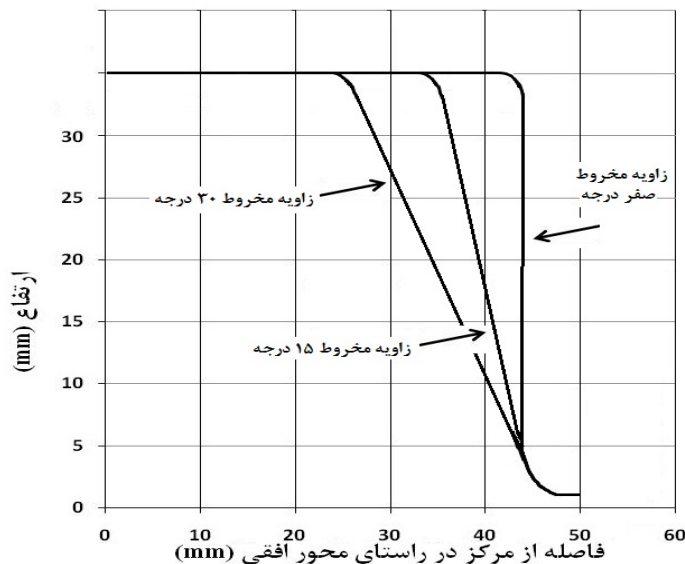
(ب)

شکل ۱۵- (الف) منحنی توزیع ضخامت نسبت به فاصله از مرکز قطعه (ب) منحنی پروفیل قطعه

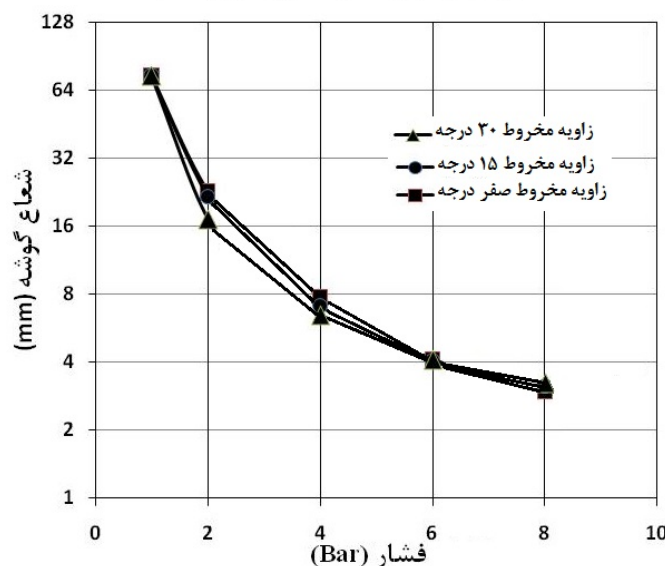
(فشار ثابت ۴ بار و درجه حرارت 550°C).

۳-۵-۳- بررسی اثر زاویه

جهت بررسی تاثیر زاویه مخروط بر پرشدگی قالب زوایای صفر، ۱۵ و ۳۰ درجه در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در واقع تماس ورق و قالب در فشارهای مختلف و بر اساس تغییر زاویه می‌تواند بر پرشدگی قالب تاثیر داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که در صورتیکه فشار اعمالی کم باشد، با کاهش زاویه مخروط از 30° به صفر و در نتیجه کاهش تماس ورق با قالب، مقدار تماس ورق و قالب کمتر شده و در نتیجه منطقه بالج آزاد افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود که شعاع انحنای گوشه افزایش یابد. در شکل (۱۶) منحنی پروفیل قطعه در دمای 550°C و فشار ۸ بار و منحنی شعاع انحنای گوشه قطعه در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل می‌توان مشاهده نمود، تماس ورق و قالب در فشارهای بالاتر بیشتر می‌شود. همچنین به دلیل اینکه حجم ورق یکسان در نظر گرفته می‌شود، در صورت کاهش زاویه، شعاع گوشه نیز کاهش یافته که این امر منجر به کاهش بیشتر ضخامت ورق می‌شود. در ضمن با کاهش زاویه در فشارهای بالاتر پرشدگی قالب بیشتر می‌شود. در واقع شکل‌دهی ورق در قالب‌هایی با زاویه کوچکتر نیازمند فشار بیشتری است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶- (الف) منحنی پروفیل قطعه در فشار ثابت ۸ بار (ب) منحنی شعاع انحنای گوشه قطعه

۴- نتیجه گیری

می‌توان نتایج این تحقیق را به صورت زیر بیان نمود:

آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی تطابق خوبی را نشان دادند و لذا در مرحله بعدی صحت شبیه‌سازی‌ها را می‌توان مورد تایید قرار داد. از قالبی با ابعاد ارتفاع ۳۵ mm، قطر دهانه ۱۰۰ mm و زاویه 30° در دمای ثابت 550°C جهت بررسی اثر فشار استفاده گردید. بازه تغییرات فشار بین ۱ تا ۸ بار در نظر گرفته شد. با افزایش فشار پروفیل قطعه بزرگتر شده، به طوری که پرشدگی قالب در حدود ۱۵٪ بهبود داشته است. همچنین توزیع ضخامت قطعه در شعاع گوشه یکسان در فشارهای مختلف، یکسان به دست آمد. در ضمن بیشترین نازک‌شدگی در گوشه قطعه رخ داده که در بدترین حالت ضخامت ورق از ۰/۸ میلی‌متر به حدود ۰/۵ میلی‌متر رسیده است. مسیر فشار بر توزیع ضخامت ورق نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مسیر فشار هیچ گونه تاثیری بر آن نمی‌گذارد و در نتیجه پارامتر موثر پروفیل قالب خواهد بود.

نکته‌ای که حائز اهمیت است این است که فقط با انتخاب صحیح مسیر فشار، زمان شکل‌دهی کاهش می‌یابد. اثر دما پارامتر دیگری بود که در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که مشخص است، با افزایش دما ورق نرم‌تر شده و این امر باعث می‌شود که شکل‌دهی با سهولت بیشتری انجام گیرد. نتایج مشخص کردند که با افزایش دما از 350°C به 550°C ، فشار لازم برای پرشدگی قالب می‌تواند در حدود ۶۰٪ کاهش یابد. این امر باعث می‌شود توزیع ضخامت قطعه در شعاع گوشه یکسان در دماهای مختلف، یکسان گردد.

اثر زاویه‌های مختلف قالب پارامتر دیگر مورد بررسی بود. در این پارامتر، شکل‌دهی در فشارهای مختلف و در دمای ثابت 550°C صورت پذیرفت. با کاهش زاویه مخروط از ۳۰ به صفر درجه نیز مشخص شد که لازم است مقدار فشار حدود ۲۵٪ افزایش یابد تا قالب به طور مناسبی توسط ورق پر شود. در واقع با کاهش زاویه، تماس ورق با قالب بیشتر شده و توزیع ضخامت در قطعه غیریکنواخت می‌شود. جهت بررسی ارتفاع و قطر دهانه‌ی مخروط از نسبت قطر به ارتفاع استفاده گردید. با کاهش این نسبت و به عبارت دیگر با افزایش ارتفاع مخروط، نازک‌شدگی در کف و گوشه قطعه بیشتر مشاهده شد به طوری که ضخامت ورق در قسمت بحرانی از ۰/۴۹ به ۰/۴۳ میلی‌متر کاهش پیدا کرد. می‌توان گفت با کاهش نسبت قطر به ارتفاع، شعاع انحنا‌ی گوشه قطعه کاهش یافته و پرشدگی قالب بیشتر می‌شود. همچنین در این حالت توزیع ضخامت در قطعه غیریکنواخت خواهد بود.

سپاسگزاری

بدینوسیله اعلام می‌گردد این مقاله از طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر به کد شماره ۱۸۸۹۷۰۱۲۱۰۰۰۱ و با عنوان "شبیه‌سازی المان محدود و اعتبارسنجی آزمایشگاهی مخروط ناقص در شکل‌دهی به روش فشار گاز" استخراج شده است. نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [۱] ولی‌نژاد، ع.، "مهندسی عملی شکل دادن"، نشر طراح، (۱۳۸۱)، چاپ اول.
- [2] Kazemi, A., Nourouzi, S., Kolahdooz, A., and Gorji, A., "Experimental Investigation of Thixoforging Process on Microstructure and Mechanical Properties of the Centrifugal Pump Flange", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 7, pp. 2957-2965, (2015).
- [3] Kolahdooz, A., Towsyfyhan, H., Adnani Salehi, S.A., Ghayyem, M., and Mosaedi, F., "A Novel Optimization Approach Applied to Multi-pass Turning Process", *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Vol. 6, No. 2, pp. 5-19, (2017).
- [4] Lee, Y., Kim, J.J., Kwon, Y.N., and Yoon, E.Y., "Formability and Grain Size of AZ31 Sheet in Gas Blow Forming Process", *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 748-753, (2014).
- [5] Hwang, Y., Yang, J.S., Chen, T.R., and Huang, J.C., "Analysis of Superplastic Sheet-metal Forming in a Circular Closed-die Considering Non-uniform Thinning", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 65, No. 1-3, pp. 215-227, (1997).
- [۶] آقاجانلو، ب.، حسینی‌پور، س.ج.، جمشیدی اول، ح.، "ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به کمک فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز"، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۳، صفحه ۵۸۹ تا ۶۰۰، مرداد و شهریور (۱۳۹۷).
- [7] Wu, H. Y., Sun, P.H., Zhu, F.J., Liu, H.C., and Chiu, C.H., "Tensile Properties and Shallow Pan Rapid Gas Blow Forming of Commercial Fine-grained Mg Alloy AZ31B Thin Sheet", *Procedia Engineering*, Vol. 36, pp. 329-334, (2012).
- [8] Hwang, Y. M., Yanga, J.S., Chena, T.R., Huanga, J.C., and Wua, W.U., "Analysis of Superplastic Blow-forming in a Conical Closed Die", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 40, No. 9, pp. 867-885, (1998).
- [9] Aksenov, S.A., and Sorgente, D., "Investigation of Stress-strain Behavior of a Sheet Material using Free Bulging Test", *Procedia Engineering*, Vol. 207, pp. 1892-1897, (2017).
- [10] Sorgente, D., Palumbo G., Scintilla, L.D., and Tricarico, L., "Gas Forming of An AZ31 Magnesium Alloy at Elevated Strain Rates", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 5-8, pp. 861-872, (2016).
- [11] Hwang, Y., and Lay, H., "Study on Superplastic Blow-forming in a Rectangular Closed-die", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1-3, pp. 426-431, (2003).
- [12] Hojjati, M., Zoorabadi, M., and Hosseinipour, S., "Optimization of Superplastic Hydroforming Process of Aluminium Alloy 5083", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, No. 1-3, pp. 482-488, (2008).

- [13] Wu, H. Y., Tzou, M.D., Huang, C.C., and Tsai, H.H., "Modified Male Die Rapid Gas Blow Forming of Fine-grained Mg Alloy AZ31B Thin Sheet", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 5-8, pp. 1241-1252, (2015).
- [14] Hambli, R., and Potiron, A., "Comparison between 2D and 3D Numerical Modeling of Superplastic Forming Processes", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, No. 37-38, pp. 4871-4880, (2001).
- [۱۵] طاهری آهنگر، ع.، بخشی، م.، حسینی پور، س.ج.، گرجی، ح. "مطالعه تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود برای تعیین پنجره شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی O-۶۰۶۳ در فرآیند هیدروفرمینگ گرم"، *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر*، مقالات آماده انتشار، پذیرفته شده، انتشار آنلاین از تاریخ ۲۹ آبان (۱۳۹۷).
- [16] Chen, Y., Kibble, K., Hall, R., and Huang X., "Numerical Analysis of Superplastic Blow Forming of Ti-6Al-4V Alloys", *Materials & Design*, Vol. 22, No. 8, pp. 679-685, (2001).
- [17] Kolahdooz, A., and Aminian, S., "Effects of Important Parameters in the Production of Al-A356 Alloy by Semi-solid Forming Process", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 189-198, (2019).
- [۱۸] پورکمالی انارکی، ع.، الوندی، ا.، "تحلیل عددی-تجربی خصوصیات ماده A356 در بارگذاری خستگی کم چرخه"، *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر*، دوره ۴۸، شماره ۲، صفحه ۱۴۷ تا ۱۵۶، تابستان (۱۳۹۵).
- [19] Giuliano, G., and Franchitti, S., "The Determination of Material Parameters from Superplastic Free-bulging Tests at Constant Pressure", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 12-13, pp. 1519-1522, (2008).
- [20] Li, G.Y., Tan, M.J., Liew, and K.M., "Three-dimensional Modeling and Simulation of Superplastic Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 150, pp. 76-83, (2004).

Abstract

New forming processes should be capable of manufacturing complex and high quality components in addition to low production costs and high production speeds. The gas pressure forming process is one of the methods used in forming these parts. In this research, the formation of Al-A356 alloy sheet in incomplete cone with gas pressure process has been studied numerically and experimentally. In general, it can be said that the purpose of this study is to investigate the effect of parameters such as the ratio of diameter to height of the die, angle, temperature and pressure. In order to determine the effect of parameters, filling the corners of the die and distributing the thickness of the parts under different pressures has been investigated. Also, for simulating validation, the simulation results were first compared with experimental tests. The results show that the mold filling will improve around 15% by increasing the pressure from 1 bar to 8 bar. However, is reduced to less than 0.5 mm. Although, the mold filling increased by decreasing of the ratio of diameter to height but the critical thickness of the sheet is decreased around 14%. It was also found that for having a proper mold filling, it is necessary to increase the pressure value around 25% when the cone angle decrease from 30° to 0°. The results also showed that by increasing the temperature from 350°C to 550°C, the required pressure for filling the mold decreased from 8 to 2 bar.