



مطالعه تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود برای تعیین پنجره شکل دهی لوله‌های آلومینیومی ۰-۶۰۶۳ در فرآیند هیدروفرمینگ گرم

علی طاهری آهنگر، محمد بخشی*، سید جمال حسینی پور، حمید گرجی

دانشکده مکانیک، مرکز پژوهشی فرآیندهای نوین شکل دهی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۲۶
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۰۴
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۸-۲۹

کلمات کلیدی:
هیدروفرمینگ لوله
هیدروفرمینگ گرم
آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳
پنجره شکل دهی

خلاصه: در سال‌های اخیر آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به دلیل نسبت استحکام به وزن بیشتر در مقایسه با فولادها، مورد توجه قرار گرفته است. محدودیت اصلی آلیاژهای یادشده، شکل پذیری پایین در دمای محیط می‌باشد. با این حال، محققان نشان داده‌اند که شکل پذیری آلیاژهای آلومینیوم در دماهای بالا افزایش می‌یابد. در این پژوهش، شکل پذیری لوله آلومینیومی آنیل شده ۶۰۶۳ در فرآیند هیدروفرمینگ گرم بررسی شده است. تأثیر فشار و تغذیه محوری در دماهای مختلف بر روی توزیع ضخامت، فشار پارگی و ارتفاع بالچ مربوطه به صورت تجربی و عددی مطالعه شده است. به منظور پیش‌بینی عددی لحظه شکست در فرآیند، از سه معیار شتاب (مشتق دوم) کرنش پلاستیک معادل، شتاب کرنش اصلی بزرگ و شتاب کرنش در راستای ضخامت استفاده شد. علاوه بر آن، از روش هندسی برای تعیین چروک در شبیه‌سازی استفاده گردید. با مقایسه نتایج بدست آمده، تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی بدست آمد. با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی، پنجره‌های شکل دهی لوله آلومینیوم آلیاژ در دو دمای 25°C و 250°C به دست آمد. با توجه به پنجره شکل دهی در دمای 25°C نسبت به دمای 250°C ، بازه اعمال فشار در محدوده ایمن تقریباً دو برابر می‌باشد اما میزان تغذیه محوری در این بازه تقریباً نصف می‌باشد.

۱- مقدمه

سفتی پایین در قطعات بعد از شکل دهی، انرژی زیاد برای رساندن نمونه به دمای سوپرپلاستیک و کنترل دقیق دما برای ایجاد حالت یکنواخت می‌باشد. به منظور رفع این محدودیت‌ها، محققان شکل دهی در دماهای پایین تر را پیشنهاد نموده‌اند ($0.12 Tm < Tw < 0.5 Tm$) که شکل دهی گرم نامیده می‌شود [۴]. در سال‌های اخیر، فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله به دلیل فراهم نمودن امکان تولید قطعات پیچیده در یک مرحله، کاهش هزینه‌ها و افزایش صلبیت در محصول به خاطر حذف اتصالات مونتاژی، با استقبال مواجه شده است [۵]. استفاده از هیدروفرمینگ گرم لوله، علاوه بر کاهش انرژی مورد نیاز برای شکل دهی قطعات پیچیده، به خاطر کاهش استحکام ماده در دماهای بالاتر نسبت به دمای محیط، نیازمند تجهیزات شکل دهی کوچک تر و ارزان تر نیز می‌باشد [۶]. از این رو، در سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی فرآیند هیدروفرمینگ لوله در دماهای بالاتر انجام شده است [۷]. از نظر شرایط دمایی، هیدروفرمینگ گرم به

یکی از روش‌های شکل دهی فلزات که امروزه به طور وسیعی برای شکل دهی اجزای لوله‌ای شکل استفاده می‌شود، فرآیند هیدروفرمینگ است. در این فرآیند، لوله با اعمال هم‌زمان فشار داخلی سیال و نیروی محوری، به شکل‌های متنوع در داخل محفظه قالب درمی‌آید [۱]. استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به جای فولادها، یکی از روش‌های کاهش وزن و مصرف سوخت در صنایع اتومبیل‌سازی و هوافضا می‌باشد. امروزه، این آلیاژها به خاطر نسبت استحکام به وزن بیشتر از فولادها، مورد توجه ویژه محققان و صنعت‌گران قرار گرفته‌اند [۲]. از سوی دیگر، مشکل اصلی این آلیاژها، شکل پذیری پایین در دمای محیط می‌باشد. برای برطرف نمودن این نقص، پژوهشگران شکل دهی در دماهای بالاتر را پیشنهاد نموده‌اند [۳]. فرآیندهای سوپرپلاستیک که در دماهای بالاتر از تبلور مجدد انجام می‌شود، دارای مشکلاتی مانند نرخ شکل دهی پایین (نرخ کرنش در محدوده 10^{-4} تا 10^{-2})،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bakhshi@nit.ac.ir



جدول ۱: خواص مکانیکی و فیزیکی لوله AA6063-O در دمای محیط

Table 1. Mechanical and physical properties of AA 6063-O tube

مقدار	خاصیت
۲۷۰۰	چگالی، ρ , [7] kg/m ³
۷۰	مدول یانگ، E , [7] GPa
۰/۳	ضریب پواسون، ν , [7]
۴۵	تنش تسلیم، σ_y , MPa
۹۹	استحکام کششی نهایی، UTS , MPa

در فرآیند هیدروفرمینگ گرم، هاشمی و همکاران [۱۵،۱۴] نشان دادند که با افزایش دما توزیع ضخامت در بالچ آزاد در مقایسه با بالچ مقید، بهتر می‌شود. آن‌ها هم‌چنین تأثیر دما را بر شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۳ بررسی کردند و برای پیش‌بینی ترکیدگی لوله و ارتفاع بالچ در فرآیند هیدروفرمینگ گرم از معیارهای شکست نرم اصلاح شده به همراه پارامتر زنر - هولومون^۳ در شبیه‌سازی فرآیند استفاده کردند. نتایج نشان داد که معیارهای شکست نرم به‌خوبی پدیده ترکیدگی را در فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله‌های آلومینیومی پیش‌بینی می‌کند. یوان و همکاران [۱۷،۱۶] رفتار چروکیدگی و نحوه کنترل و استفاده از چروک‌ها را در هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی بررسی کردند. آن‌ها خاطر نشان کردند که همه چروک‌ها عیب محسوب نمی‌شود و در بعضی از موارد، قطعه پس از چروکیدگی هم‌چنان می‌تواند تغییر شکل دهد و به شکل مورد نظر برسد. آن‌ها این چروک‌ها را چروک مفید نامیدند و توزیع ضخامت و شکل‌پذیری را با استفاده از این نوع چروک بهبود بخشیدند. آنان برای یک نمونه آلومینیومی، نسبت انبساط را از ۱۰٪ در حالت بالچ آزاد به ۳۵/۴٪ با استفاده از چروک رساندند. پژوهشگران یاد شده چروک‌ها را به سه دسته چروک مفید، چروک مرده و چروک پارگی تقسیم بندی کردند. چروک‌های مفید درحالی که شرایط بارگذاری مناسب باشد ایجاد می‌شود و در مرحله بعدی با افزایش فشار قابل رفع می‌باشد. در صورتی که شرایط تنش ارضا نشود، چروک پارگی حاصل خواهد شد. چروک مرده نیز به‌علت ارضا نشدن شرایط هندسی ایجاد می‌شود. آن‌ها هم‌چنین بیان کردند که پنجره فرآیند هیدروفرمینگ لوله دارای دو قسمت ایمن می‌باشد؛ شکل‌دهی با چروکیدگی مفید و شکل‌دهی بدون چروکیدگی. لانگ و همکاران [۱۸] برای شکل‌دهی

دو دسته هیدروفرمینگ گرم هم‌دما و غیرهم‌دما دسته‌بندی می‌شود؛ یعنی می‌توان تمام تجهیزات را به یک اندازه گرم کرد یا دماهای غیر یکسانی برای اجزای فرآیند ایجاد نمود. در حالت هم‌دما بر خلاف حالت دیگر، نیازی به سرد کردن اجزای قالب در طی عملیات نبوده و تمام اجزا تا دمای مورد نظر گرم می‌شوند [۳].

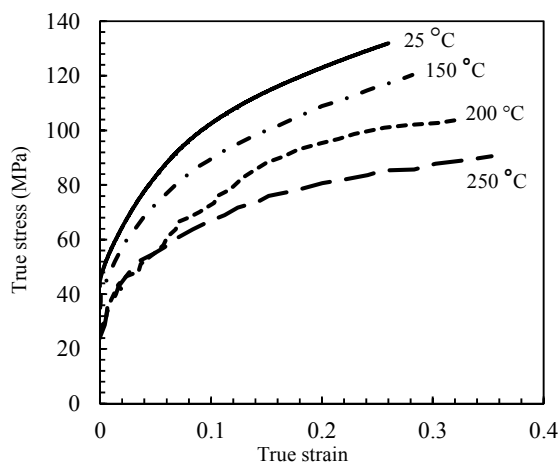
لی و همکاران [۸] تأثیر شرایط عملیات حرارتی اولیه را بر روی شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی ۷۰۷۵ در دماهای بین دمای محیط تا ۳۰۰°C بررسی نمودند و نشان دادند که با افزایش دما، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. یوان و همکاران [۹] با استفاده از آزمایش‌های کشش تک محوری و هیدروبالچ، شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیوم 5A02 را از دمای اتاق تا دمای ۳۰۰°C مورد بررسی قرار دادند و با هر دو آزمایش، به افزایش شکل‌پذیری در دماهای بالا دست یافتند. کیم و همکاران [۶] آزمایش بالچ آزاد را بر روی لوله آلیاژ AA6061 به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود با نرم‌افزار DEFORM-2D انجام دادند. آنان نشان دادند که با افزایش تغذیه محوری و فشار سیال، ارتفاع بالچ در دمای ۳۲۰°C افزایش می‌یابد. آن‌ها هم‌چنین اثر دما (دمای اتاق تا دمای ۳۰۰°C) را بر روی ضریب اصطکاک تماسی آلومینیوم با آزمایش پین بر روی دیسک^۱ اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که با افزایش دما ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. بی و همکاران [۱۰] برای گرم کردن یکنواخت لوله، از یک سیستم گرمایشی ترکیبی استفاده کردند. این سیستم، موجب افزایش یکنواختی بالچ لوله و هم‌چنین افزایش شکل‌پذیری گردید. به‌علاوه، پارامترهای فرآیند شامل فشار داخلی، تغذیه محوری و شرایط گرمایی با موفقیت از سوی این پژوهشگران بهینه شد. برای ایجاد توزیع ضخامت یکنواخت در لوله، لیو و همکاران [۱۱] از قالبی با دماهای غیر یکنواخت استفاده کردند تا بتوانند ضریب اصطکاک را در محل تغذیه کاهش دهند. آن‌ها شبیه‌سازی تلفیقی ترمومکانیکی را با هدف بررسی تأثیر تغذیه محوری بر روی توزیع ضخامت انجام دادند. سیدکاشی و همکاران [۱۳،۱۲] با بررسی عددی و آزمایشگاهی و به کمک روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده^۲، به بهینه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله پرداختند و مسیر فشار بهینه را برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت و شعاع گوشه مختلف بدست آوردند. با بررسی عددی و تجربی توزیع ضخامت لوله‌های آلومینیومی ۱۰۵۰

1 Pin-on-Disk

2 Simulated Annealing

جدول ۲: ترکیب شیمیایی لوله آلومینیومی AA6063-O
Table 2 Chemical components of AA6063-O

عنصر	Al	Mg	Cr	Si	Mn	V	Cu	Zn	Fe
درصد وزنی	پایه	۰/۴۷۹	۰/۰۰۱	۰/۳۳۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۲۶	۰/۰۱۲	۰/۲۲۸

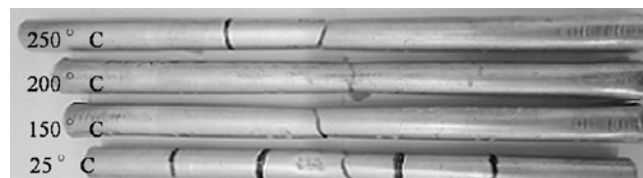


شکل ۲: منحنی تنش-کرنش حقیقی لوله AA6063-O بر حسب دما، نرخ کرنش متوسط: 0.01 s^{-1}

Fig.2. True stress-strain curves of AA6063-O versus temperature, average strain rate: 0.01 s^{-1}

حقیقی آن‌ها در دماهای مختلف به دست آمد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای انجام آزمایش‌های مربوط به بررسی شکل‌پذیری لوله مورد نظر در شرایط دمایی گرم، از آزمایش بالج آزاد^۱ لوله استفاده شد شکل ۳ شماتیک مجموعه قالب و در شکل ۴ اجزای آن را در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش نشان می‌دهد. این مجموعه قالب از دو سنبه و قالب تشکیل شده است. روند شکل‌دهی گرم لوله در این مجموعه قالب این‌گونه است که پس از قرارگیری لوله در داخل قالب‌ها، لوله توسط سنبه‌ها از دو طرف آب‌بندی می‌شود تا بعد از جریان یافتن سیال از طریق راه‌گاه ایجاد شده در سنبه بالایی به درون لوله، از هرگونه نشتی جلوگیری شود و فشار داخل آن افزایش یابد. جهت گرم کردن سیال، لوله و مجموعه قالب، از یک گرم‌کن کارتریجی (المنت) 560 W نشان داده شده در شکل ۵ (الف) استفاده شده است، به طوری که گرم‌کن کارتریجی در داخل سنبه پایینی و در راستای طولی قرار داده شد. با افزایش فشار، در لوله تغییر شکل پلاستیک به وجود می‌آید. به علاوه، با قرار دادن یک روکش مسی بر روی گرم‌کن، از تماس آن با



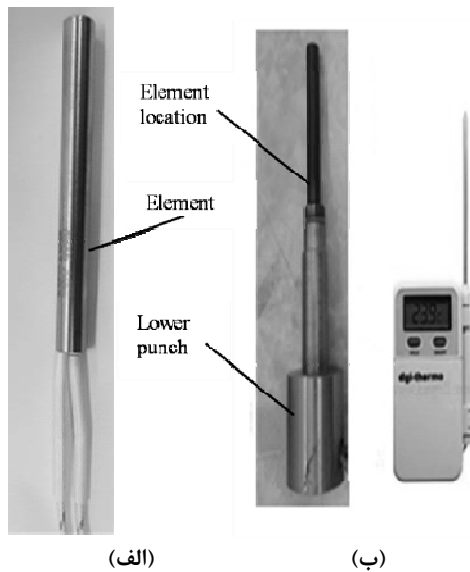
شکل ۱: نمونه‌های بدست آمده از آزمایش کشش
Fig.1 The samples obtained from the tensile test

یک لوله آلومینیومی از چروک‌ها به عنوان پیش‌فرم استفاده نموده و در قالب‌های ثابت با هندسه‌های متفاوت از هندسه نهایی مورد نیاز، به بررسی پارامترهای قالب پیش‌فرم به منظور ایجاد چروک پرداختند تا در مرحله بعد و قالب نهایی بتوان آن را از بین برد و قابلیت شکل‌دهی را افزایش داد.

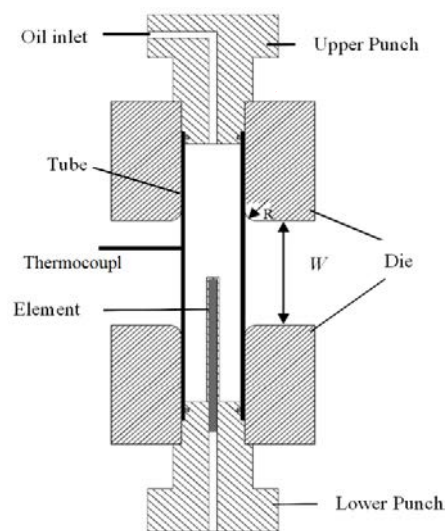
در این پژوهش، اثر دما و تغذیه محوری بر شکل‌پذیری لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ آنیل شده در فرآیند هیدروفرمینگ گرم مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها با آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شد. بدین منظور، قالب هیدروبالج گرم طراحی و ساخته شد. با توجه به اهمیت منطقه ایمن برای شکل‌دهی قطعات و تأثیر زیاد پارامترهای دما، فشار و تغذیه محوری، یکی از مهم‌ترین کارهایی که در این پژوهش انجام شد تعیین پنجره شکل‌دهی جنس مذکور در دماهای مختلف، یعنی محدوده تولید قطعه سالم و نیز محدوده معیوب شدن قطعه، بوده است.

۲- مراحل آزمایشگاهی

در این پژوهش، از لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ آنیل شده با قطر خارجی $25/4 \text{ mm}$ و ضخامت $1/1 \text{ mm}$ استفاده شده است. جدول ۱ خواص مکانیکی و جدول ۲ خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. به منظور تعیین خواص مکانیکی لوله، آزمون کشش لوله مطابق استاندارد ASTM-E8 انجام گردید. نمونه‌ها در دماهای ۲۵، ۱۵۰، ۲۰۰، 250 °C و نرخ کرنش متوسط 0.01 s^{-1} و تا حد پارگی مطابق با شکل ۱ کشیده شدند و منحنی‌های تنش-کرنش



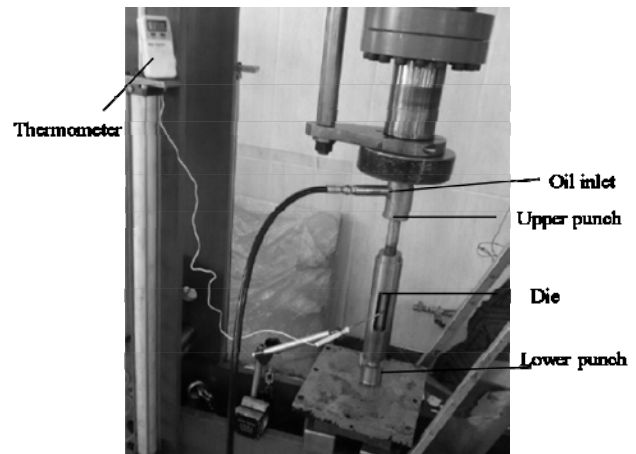
شکل ۵: الف- سیستم گرمایش قالب، ب- دماسنج دیجیتالی
 Fig.5 (a) Die heating system (b) Digital thermometer



شکل ۳: شماتیک مجموعه قالب آزمایش بالج
 Fig. 3 Schematic of the setup of the bulge test

اطمینان حاصل گردیده است. مطابق شکل ۶ از یک دستگاه آزمایش اونیورسال هیدرولیکی گروه دنیسون میس^۱ با ظرفیت ۶۰۰ kN برای انجام آزمایشها استفاده شد. این دستگاه متصل به یک واحد رایانه‌ی برای کنترل حرکات آن می‌باشد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در فرآیندهای گرم، نرخ کرنش است که دستگاه آزمایش، قابلیت تنظیم سرعت را تا مقدار ۲۰۰ mm/min دارد. با استفاده از دستگاه یاد شده می‌توان مقدار نیرو بر حسب جابجایی را در هر لحظه توسط رایانه ثبت نمود.

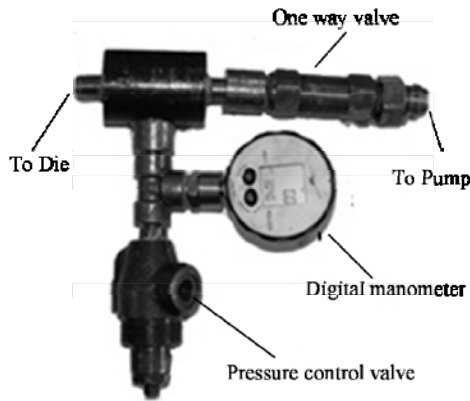
برای اعمال فشار سیال از یک پمپ هیدرولیکی با قابلیت ایجاد و اعمال فشار بیشینه ۱۲۰۰ bar استفاده شد. سیال به کمک یک شیر یک‌طرفه وارد لوله می‌شود. به منظور جلوگیری از برگشت سیال پرفشار به مدار هیدرولیکی، یک شیر یک‌طرفه مورد استفاده قرار گرفت. برای کنترل فشار بیشینه سیال در محفظه قالب، از یک شیر کنترل فشار استفاده شده است. این شیر کنترل، در لحظه رسیدن فشار به مقدار تنظیم شده، با تخلیه سیال مانع از افزایش بیشتر فشار در آن محفظه می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار، از یک فشارسنج دیجیتالی استفاده شد که در مدار اصلی قرار گرفته است. این فشارسنج قادر است تا با اتصال به واحد رایانه، مقدار فشار را در هر لحظه از زمان شکل‌دهی ثبت کند. شکل ۷ شیر کنترل فشار و فشارسنج را نشان می‌دهد. سیال به کار رفته در آزمایشها، روغن سیلیکونی



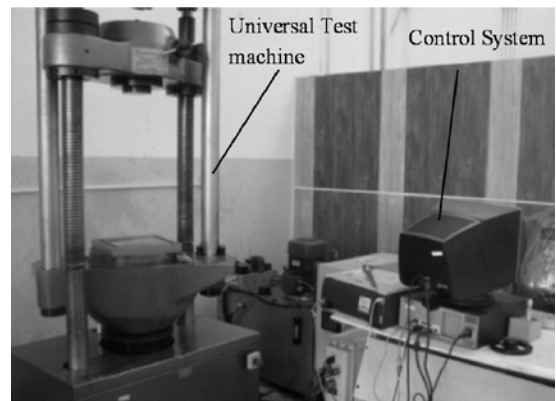
شکل ۴: اجزای مجموعه قالب بالج در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش
 Fig.4. Components of the bulge die set, assembled on the testing machine

روغن جلوگیری شد. این روکش مسی، جهت جلوگیری از نشت روغن به بیرون، به سنبه جوش داده شد. برای کنترل دما از یک دماسنج دیجیتالی نشان داده شده در شکل ۵ (ب) استفاده شد. با رسیدن دما به مقدار مورد نظر، گرمکن کارتریجی قطع می‌شود و آن‌گاه جهت انجام آزمایش، فشار سیال اعمال می‌گردد.

از آنجایی که جنس مورد مطالعه، لوله آلومینیومی با ضخامت کم و در نتیجه، دارای انتقال حرارت بالا است، انتقال حرارت در آن سریع انجام می‌شود. به علاوه، زمان حرارت‌دهی در آزمایش‌های تجربی به نسبت بالا بوده است. از این رو، از یکنواختی دما در سرتاسر لوله



شکل ۷: اجزای سیستم هیدرولیک
Fig.7. Elements of the hydraulic system



شکل ۶: دستگاه آزمایش اونیورسال DMG
Fig.6 The DMG Universal testing machine

جدول ۳ ضرایب مدل کار سختی بر حسب دما

Table 3. Work hardening model coefficients versus temperature

m	n	K , MPa	دما (°C)
۰	۰/۲۸	۱۹۰	۲۵
۰/۰۱	۰/۲۷۶	۱۷۶/۱	۱۵۰
۰/۰۱۶	۰/۲۵	۱۷۰/۲	۲۰۰
۰/۰۳	۰/۲	۱۶۵	۲۵۰

[۲۰]، مطابق رابطه (۱) تبعیت می‌کند. در این رابطه، σ تنش سیلان، K ضریب استحکام ماده، ϵ کرنش، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، n نمای کرنش سختی و m حساسیت به نرخ کرنش می‌باشد. مقادیر به دست آمده در دماهای مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$\sigma = K \epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

در مدل سازی، به دلیل آنیل بودن لوله، از ناهمسانگردی آن چشم‌پوشی شد. به علاوه، فرض شده که لوله دارای خواص حرارتی همگن است و به دلیل ضخامت کم، دارای دمای ثابتی است. در این پژوهش، انجام شبیه‌سازی فرآیند در یک گام^۴، به صورت کوپل جابجایی-حرارتی^۵ و در حالت دینامیکی مدل شد. نوع حل نیز صریح^۶ بوده است. در مدول برهم‌کنش^۷، شرایط تماسی بین سطوح مختلف تعریف شد. با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد و مقایسه آن با نتایج تجربی، مقدار ضریب اصطکاک در سطح تماس لوله و قالب برای

SF 350 می‌باشد. این روغن بر اساس اعلام شرکت تولید کننده، مقاومت حرارتی تا دمای ۳۲۰ °C را دارد.

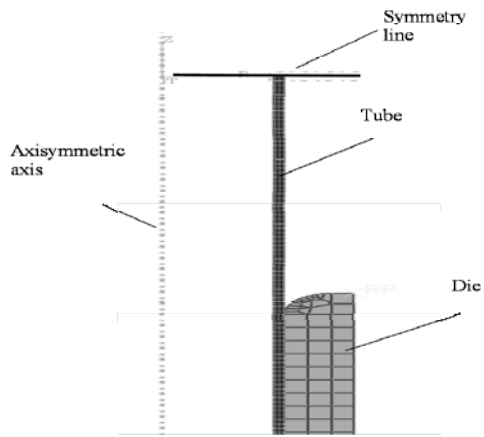
۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه‌سازی، از نرم افزار اجزای محدود آباکوس نسخه ۱۰-۶ استفاده شده است. با توجه به تقارن مجموعه قالب و لوله، از یک مدل متقارن محوری استفاده گردید و نصف مقطع مجموعه قالب مدل شد. در شبیه‌سازی‌های فرآیند بالچ، لوله به صورت شکل پذیر^۱ و پوسته‌ای^۲ و اجزای قالب نیز برای اعمال شرایط دمایی به صورت شکل پذیر مدل شد. از آنجایی که اجزای قالب نباید دچار تغییر شکل گردد، قید صلب به آن اعمال شد.

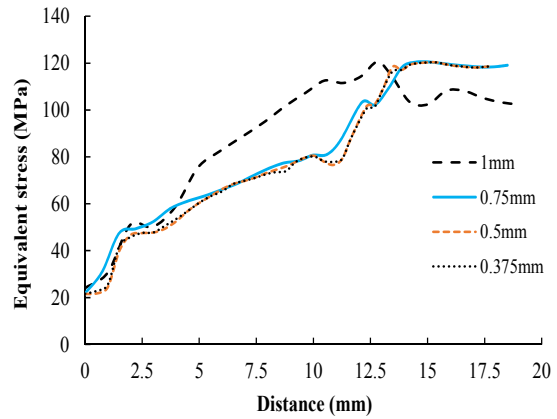
در قسمت خواص^۳، نمودار تنش-کرنش حقیقی به دست آمده از آزمایش تجربی به صورتی جدولی تعریف گردید. ماده مدل شده، دارای خاصیت الاستیک - پلاستیک بوده و از قانون رامبرگ-اسگود

4 Step
5 Temp-disp
6 Explicit
7 Interaction

1 Deformable
2 Shell
3 Property



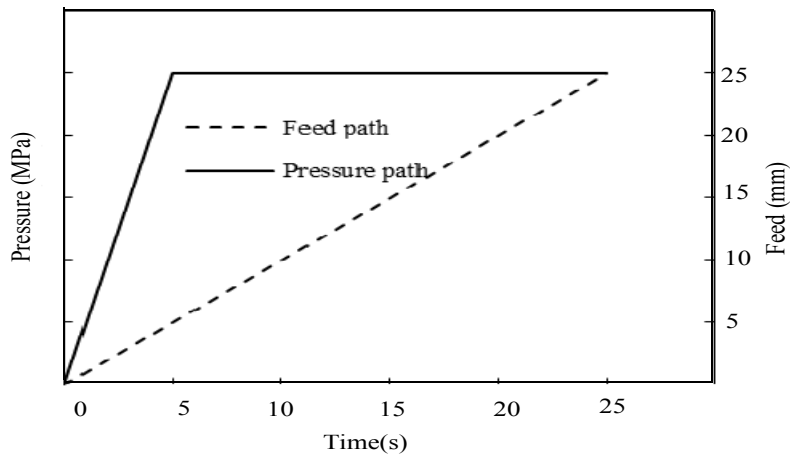
(ب)



(الف)

شکل ۸: الف- تأثیر اندازه المان بر روی توزیع تنش معادل ب- مجموعه قالب و لوله مدل شده

Fig.8 (a) Effect of mesh size on equivalent stress distribution (b) The modeled die set and tube



شکل ۹: مسیرهای نمونه فشار و تغذیه محوری بر حسب زمان

Fig.9. Pressure and axial feed path versus time

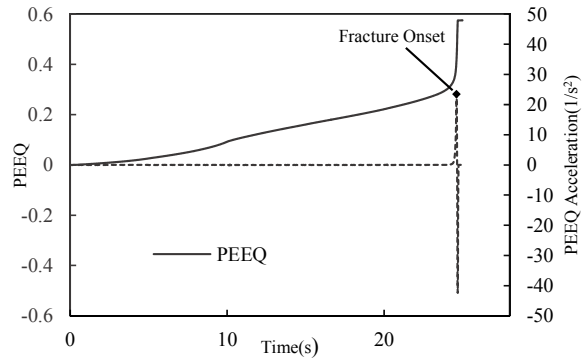
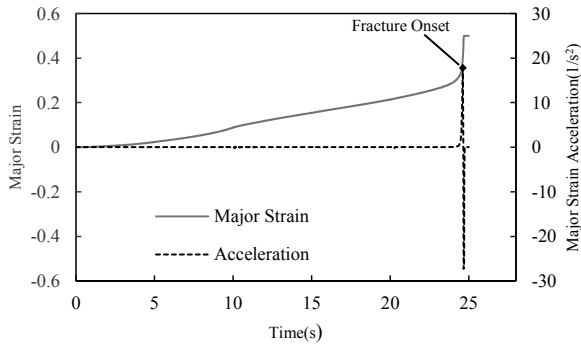
دمای محیط، ۰/۰۶ و با افزایش دما مقدار ضریب اصطکاک بالاتری قرار داده شده، به طوری که در دمای 250°C مقدار ۰/۱ در نظر گرفته شد. در واحد بار^۱، یک باردهی به صورت فشار سیال به سطح داخلی لوله اعمال گردید. سپس قیدهای حرکتی و دمایی تعریف شده‌اند. برای المان‌بندی لوله، از المان‌متقارن محوری چهارگانه‌ای^۲ که دارای درجه آزادی جابجایی و دما است، استفاده شده است.

برای مدل‌سازی اثرات خمش لوله، در راستای ضخامت چهار المان در نظر گرفته شد. همچنین بر اساس همگرایی مش، اندازه المان 0.5 mm (تعداد ۲۰۰ المان) در راستای طول، مقداری مناسب بدست آمد. برای بررسی همگرایی مش، اثر اندازه مش‌های ۱، ۰/۷۵، ۰/۵ و 0.375 mm بر روی توزیع تنش معادل روی مسیری از نودهای وسط لوله بررسی شد (شکل ۸ (الف)). در شکل ۸ (ب) مدل شبیه‌سازی مجموعه قالب و لوله مشاهده می‌شود. مسیرهای نمونه فشار و تغذیه محوری بر حسب زمان، که در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت، در شکل ۹ نشان داده شده است.

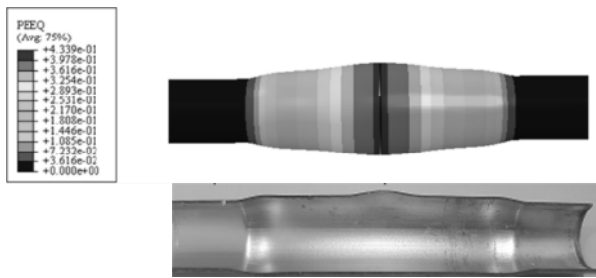
سیتو [۲۰] با استفاده از معیار مشتق دوم کرنش بزرگ جهت پیش‌بینی لحظه شروع گلویی شدن، نمودارهای حد شکل‌دهی^۳ را استخراج کرد. ماموسی و همکاران [۲۱] از سه معیار مشتق دوم کرنش معادل پلاستیک، مشتق دوم کرنش بزرگ و مشتق دوم کرنش در راستای ضخامت جهت پیش‌بینی گلویی شدن در ورق‌های ترکیبی و استخراج نمودارهای حد شکل‌دهی استفاده کردند. افشار و همکاران

۱ Load
۲ CAX4RT

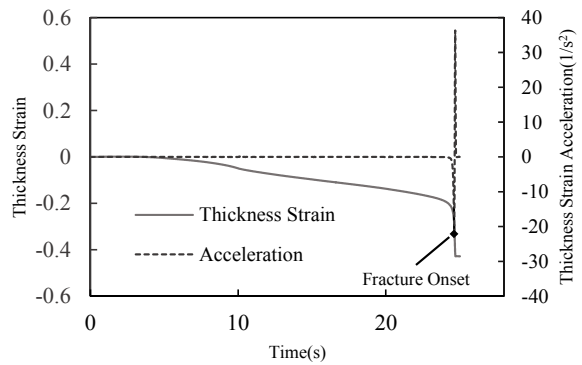
3 Forming Limit Diagram (FLD)



(الف)



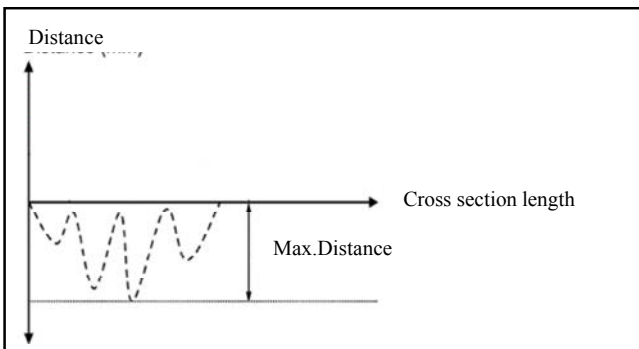
(د)



(ج)

شکل ۱۰: الف- کرنش پلاستیک معادل و شتاب (مشتق دوم) آن ب- کرنش اصلی بزرگ و شتاب آن ج- کرنش در راستای ضخامت و شتاب آن د- نمونه شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، فشار $P=7 \text{ MPa}$ ، تغذیه محوری $\text{Feed}=10 \text{ mm}$ ، $T=150^\circ \text{C}$

Fig.10 (a)- Equivalent plastic strain (PEEQ) and its acceleration (Second derivation), (b) Major strain and its acceleration, (c) Thickness strain and its acceleration, (d) Simulation & Experimental Sample $P=7 \text{ MPa}$, $\text{feed}=10$



شکل ۱۱: معیار چروکیدگی (بر پایه هندسی)
Fig. 11 Wrinkling criterion (Geometry base)

می‌یابد. در صورتی که این فاصله در بعضی نقاط کمتر از نقاط قبلی باشد (حداقل 0.5 mm)، چروک در نظر گرفته شد (شکل ۱۱). جهت تعیین تاخوردگی و برگشت، در صورتی که مختصات هر گره از گره قبلی در شبیه‌سازی عبور کند، تاخوردگی و برگشت تشخیص داده شده است.

[۲۲] با استفاده از معیار شتاب کرنش معادل پلاستیک در فرآیند هیدروفرمینگ لوله 7020-T6 گلوبی شدن موضعی را پیش‌بینی نمودند. در چیدمان تجربی پژوهش اخیر فشار داخلی و تغذیه محوری وجود دارد. در مقاله حاضر، به منظور پیش‌بینی عددی لحظه شکست در فرآیند از سه معیار شتاب (مشتق دوم) کرنش پلاستیک معادل، شتاب کرنش اصلی بزرگ و شتاب کرنش در راستای ضخامت استفاده شده است. به عبارتی دیگر، همان‌گونه که در شکل ۱۰ آورده شده است، هنگامی که هر کدام از این مقادیر به حداکثر خود برسند، شکست رخ می‌دهد.

در این مطالعه برای تشخیص چروکیدگی در شبیه‌سازی از معیار هندسی استفاده شد [۲۴،۲۳]. بالج شدگی در لوله به این صورت می‌باشد که با نزدیک شدن به مرکز لوله با بیشترین بالج شدگی، مقدار فاصله عمودی محور مرکزی (محور تقارن) لوله با محیط لوله افزایش

جدول ۴: مقایسه فشار و ارتفاع بالج در لحظه پارگی، به دست آمده از نتایج تجربی و شبیه سازی در دمای 150°C ، $R=5\text{ mm}$ و $w=100\text{ mm}$

Table 4. Comparison of experimental and simulation bursting pressure and bulge height at 150°C ; $R=5\text{ mm}$, and $w=100\text{ mm}$

ارتفاع بالج، mm	فشار پارگی، MPa	
۳/۷	۶/۹۴	تجربی
۳/۹	۷/۲	شبیه سازی
۵/۱	۳/۶	خطا (%)

نتایج وجود دارد.

۴-۲- بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر فشار پارگی و ارتفاع بالج

یکی از بررسی های انجام شده در این پژوهش، مطالعه تأثیر دمای شکل دهی بر روی فشار و ارتفاع بالج می باشد. بررسی ها در دماهای ۲۵، ۱۵۰، ۲۰۰ و 250°C انجام شد. شکل ۱۴ تأثیر دما را بر روی فشار پارگی نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش دما، فشار پارگی به دلیل نرم شدن ماده برای کشیدگی و راحت تر شکل گرفتن آن، کاهش می یابد. این نتایج را می توان با توجه به نمودار تنش- کرنش شکل ۲ تحلیل کرد که با بالا رفتن دما تنش تسلیم فلز کاهش می یابد. به علاوه، نتایج با رابطه (۲) [۱۴] نیز مطابقت دارد، که در آن با افزایش دما، تنش تسلیم و در نتیجه فشار پارگی کم می شود.

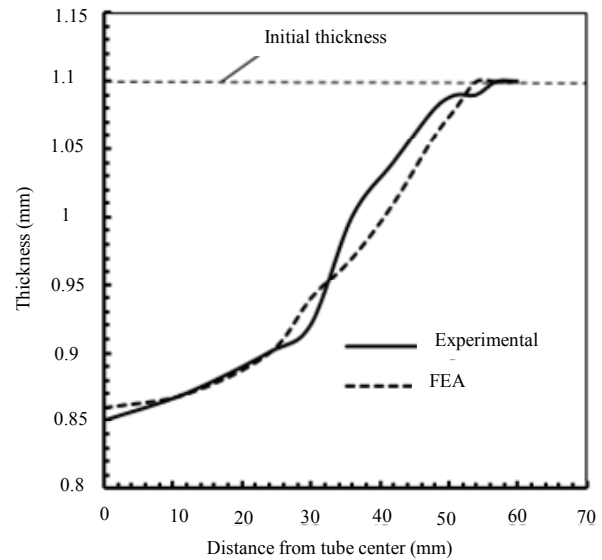
$$P_{yield} = \sigma_y \frac{2t_0}{D_0 - t_0} \quad (2)$$

در رابطه بالا، P_{yield} فشار تسلیم، σ_y تنش تسلیم، t_0 ضخامت اولیه و D_0 قطر اولیه خارجی لوله می باشد.

پارامتر دیگر مورد بررسی، ارتفاع بالج می باشد که با توجه به شکل ۱۵، با بالا رفتن دمای شکل دهی، به دلیل افزایش کشیدگی در ماده، افزایش یافته است. برای اندازه گیری ارتفاع بالج از رابطه (۳) استفاده شد که در آن D و D_0 به ترتیب قطر لوله بالج شده و قطر اولیه آن می باشد. در شکل ۱۶ قطعات شکل داده در دماهای مختلف نشان داده شده است.

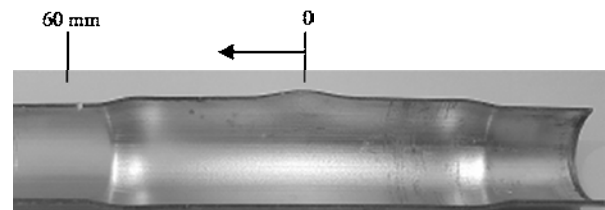
$$h = \frac{(D - D_0)}{2} \quad (3)$$

تأثیر همزمان دما و فشار بر روی ارتفاع بالج تا لحظه پارگی، در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل می توان دریافت



شکل ۱۲: منحنی های تجربی و شبیه سازی توزیع ضخامت لوله در دمای 150°C

Fig.12 Experimental and simulation thickness distribution curves of the tube at 150°C



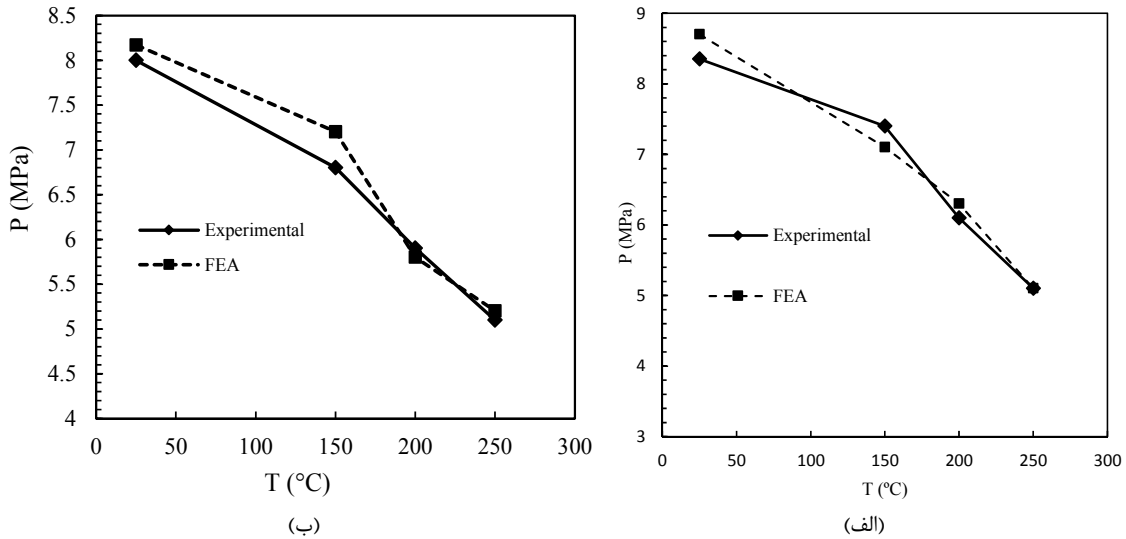
شکل ۱۳: مسیر تعیین شده برای اندازه گیری ضخامت

Fig.13 The specified path for thickness measurement

۴- نتایج و بحث

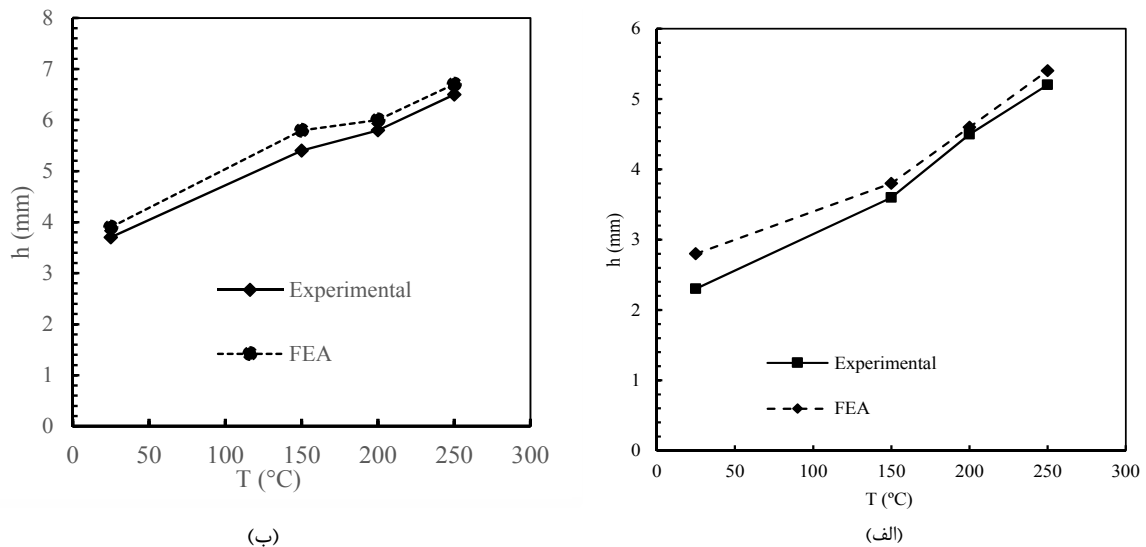
۴-۱- درست آزمایی نتایج شبیه سازی

جهت درست آزمایی نتایج شبیه سازی، منحنی های شبیه سازی توزیع ضخامت در یک قطعه بالج شده در دمای 150°C ، با نتایج تجربی متناظر مورد مقایسه قرار گرفتند. برای اندازه گیری ضخامت، به دلیل متقارن بودن فرآیند و قطعه مورد مطالعه، یک چهارم آن مورد ارزیابی قرار گرفته و منحنی شکل ۱۲ حاصل شد. در شکل، محور عمودی، بیانگر ضخامت لوله و محور افقی، فاصله از مرکز قطعه کار، مطابق با شکل ۱۳ می باشد. با توجه به شکل ۱۲، بیشترین اختلاف بین نتایج تقریباً ۳ درصد می باشد که تطابق بالایی را نشان می دهد. در جدول ۴ نتایج تجربی و شبیه سازی فشار پارگی و ارتفاع بالج مربوط به لحظه پارگی مورد مقایسه قرار گرفته اند. همان گونه که ملاحظه می شود، اختلاف ناچیزی بین



شکل ۱۴: تأثیر دما بر فشار پارگی الف- حالت بالج آزاد ب- تغذیه محوری ۱۰ mm

Fig.14. Effect of temperature on bursting pressure, (a) Free bulge, (b) Axial feed=10 mm



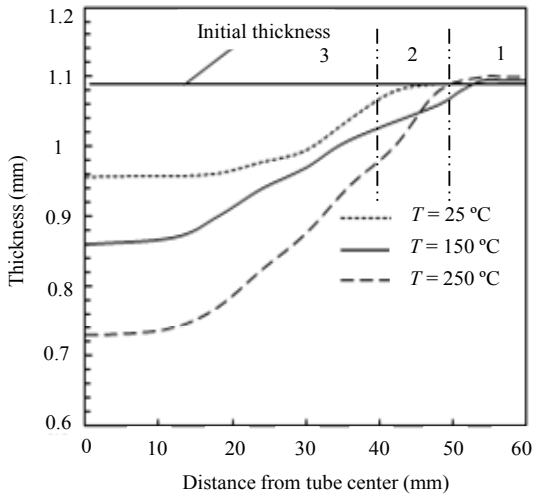
شکل ۱۵: تأثیر دما بر مقدار بالج الف- حالت بالج آزاد ب- تغذیه محوری ۱۰ mm

Fig.15 Effect of temperature on bulge height, (a) Free bulge, (b) Axial feed=10 mm

۳-۴- بررسی اثر دما و تغذیه محوری بر توزیع ضخامت

برای بررسی توزیع ضخامت در شرایط دمایی و حالت‌های بارگذاری مختلف، شکل‌دهی در دماهای ۲۵، ۱۵۰ و ۲۵۰ °C و در حالت‌های بالج آزاد و با تغذیه محوری ۱۰ mm انجام شد و شکل‌های ۱۸ و ۱۹ به دست آمدند. در این شکل‌ها ناحیه انتهایی لوله با شماره ۱، ناحیه گذر از قالب به منطقه بالج با شماره ۲ و ناحیه میانی لوله با شماره ۳ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۱۸، با افزایش دما کاهش ضخامت در ناحیه میانی لوله

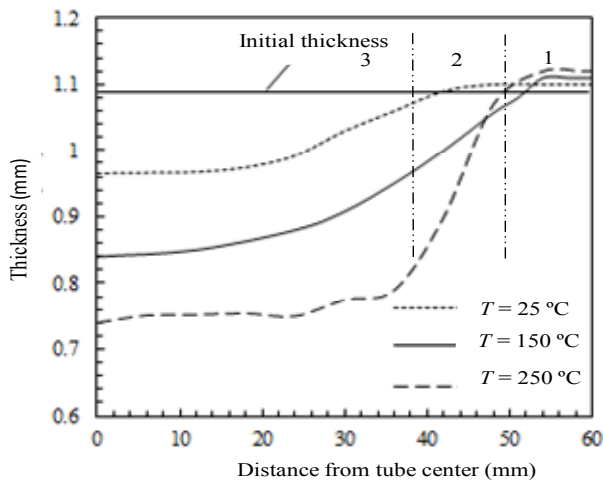
که با افزایش دمای شکل‌دهی، ارتفاع شکل‌دهی افزایش می‌یابد، اگر چه قطعه کار فشار کمتری را تحمل می‌کند. نمودارها همچنین نشان می‌دهد که قطعه مورد نظر برای رسیدن به یک ارتفاع خاص به چه فشار و دمایی نیاز دارد. به علاوه، این نتیجه حاصل شد که در هر دما با افزایش فشار شکل‌دهی می‌توان به ارتفاع بالج بیشتری رسید. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، هر چه دما افزایش می‌یابد شیب منحنی افزایش یافته و با تغییر فشار کمتر می‌توان به ارتفاع بالج بیشتری دست یافت.



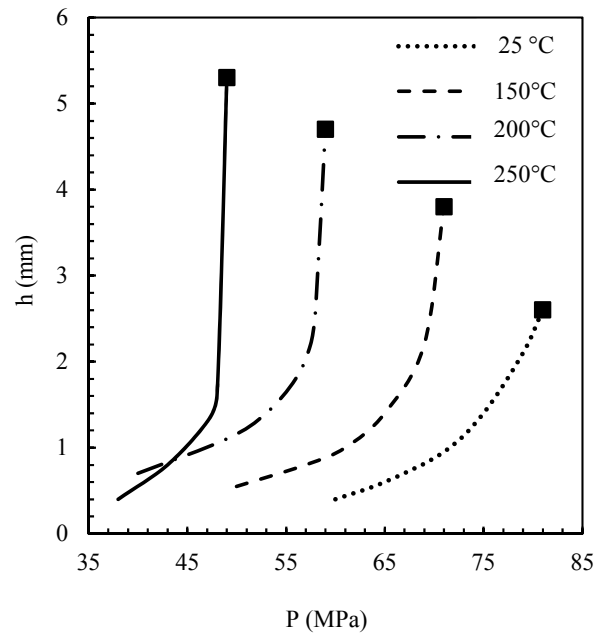
شکل ۱۸: تغییرات ضخامت لوله بر حسب دما در حالت بالج آزاد
 Fig.18 Variation of tube thickness with respect to temperature in free bulge



شکل ۱۶: قطعات بالج شده در دماهای مختلف در حالت بالج آزاد
 Fig.16 Bulged parts at different temperatures in free bulge



شکل ۱۹: تغییر ضخامت لوله بر حسب دما برای تغذیه محوری ۱۰ mm
 Fig.19 Variation of tube thickness with respect to temperature corresponding to axial feed of 10mm



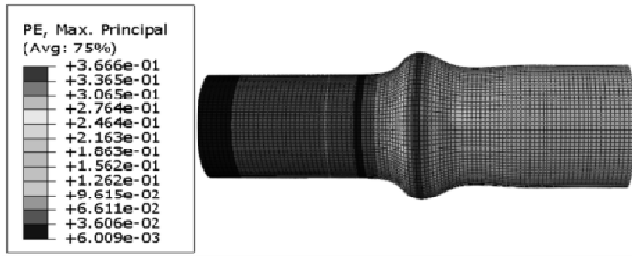
شکل ۱۷: تأثیر هم‌زمان فشار و دما بر ارتفاع بالج در بالج آزاد، به‌دست آمده از شبیه‌سازی

Fig.17 Simultaneous effects of pressure and temperature on bulge height in free bulge, obtained from simulation

که با قالب در تماس می‌باشد، با افزایش دما به دلیل بالا رفتن اصطکاک و چسبندگی، کشیدگی کمتر بوده و در پی آن کاهش ضخامت کمتری مشاهده می‌شود. از آنجایی که حجم لوله ثابت است، با افزایش دما، از یک سو نازک‌شدگی افزایش یافته و از سوی دیگر ارتفاع بالج بیشتر می‌شود.

با مقایسه شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ملاحظه می‌شود که با اعمال تغذیه محوری، به‌خاطر جریان مواد به منطقه بالج (W) در شکل ۳، توزیع

افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در دمای ۲۵۰ °C بیشترین کاهش ضخامت مشاهده می‌شود. به‌دلیل این‌که بیشترین بالج‌شدگی در ناحیه میانی لوله می‌باشد، به دلیل کشیدگی حاصل از بالج شدن، بیشترین نازک‌شدگی مربوط به این ناحیه می‌باشد. در ناحیه ۱

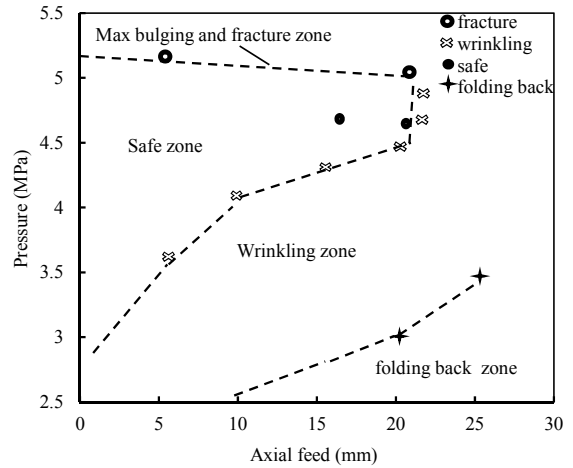


شکل ۲۲: نتیجه حاصل از شبیه‌سازی برای فشار ۴/۴ MPa، تغذیه محوری ۲۰ mm و دمای ۲۵۰°C

Fig.22 Simulation result corresponding to pressure of 4.4 MPa, axial feed of 20 mm, and at temperature of 250°C

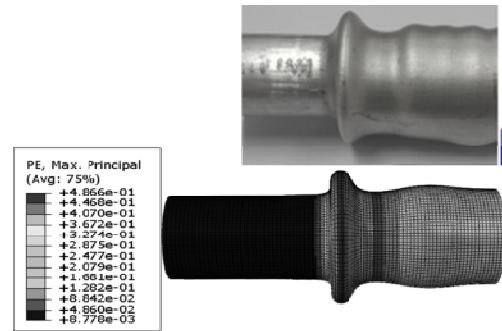
۲۱ قطعات تجربی و شبیه‌سازی مربوط به این بررسی نشان داده شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود قطعات دچار چروکیدگی شده‌اند. حداقل فشار لازم برای شروع تغییر شکل با توجه به رابطه (۲)، ۲/۸ MPa می‌باشد که در شکل ۲۰ مشخص شد. با اعمال فشار ۳/۸ MPa و در حالت بدون اعمال تغذیه محوری، تغییر شکل لوله با ارتفاع بالج ۰/۵ mm اتفاق می‌افتد و با افزایش فشار، مقدار بالج افزایش می‌یابد اما با اعمال تغذیه محوری قطعه دچار چروک می‌گردد. شکل ۲۲ قطعه چروک شده در فشار ۴/۴ MPa و تغذیه محوری ۲۰ mm را در دمای ۲۵۰°C نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فشار در حالی که تغذیه محوری ثابت است، میزان چروکیدگی کاهش یافته‌است. افزایش فشار از ۴/۶ تا ۵/۱۵ MPa و اعمال همان تغذیه محوری، باعث افزایش شکل‌پذیری در یک فشار معین می‌گردد. در این ناحیه نیز اعمال تغذیه محوری بیشتر از ۲۰ mm باعث چروک می‌گردد. در فشار ۵/۱۵ MPa و با اعمال تغذیه محوری ۲۰ mm، بیشترین مقدار بالج‌شدگی با ارتفاع ۶/۵ mm بدست آمد. شکل ۲۳، قطعات بالج شده در دو فشار مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار، قطعه با تغذیه محوری مناسب، به صورت یکنواخت بالج می‌شود.

در شکل ۲۳ پنجره شکل‌دهی مربوط به دمای ۲۵۰°C نشان داده شده است. برای درست آزمایی پنجره شکل‌دهی، آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود در دمای ۲۵۰°C، تغذیه ۱۰ mm و فشار ۶/۶ MPa انجام شد. با توجه به نمودار شکل ۲۴ قطعه تولیدی با شرایط ذکر شده در ناحیه چروک قرار می‌گیرد. در شکل ۲۵ قطعه‌های تجربی و شبیه‌سازی مربوط به این بررسی نشان داده شده است که صحت نمودار را می‌رساند. حداقل فشار لازم برای شروع



شکل ۲۰: پنجره شکل‌دهی لوله آلومینیومی AA6063-O در دمای ۲۵۰°C

Fig. 20 Process forming window for AA6063-O at 250°C



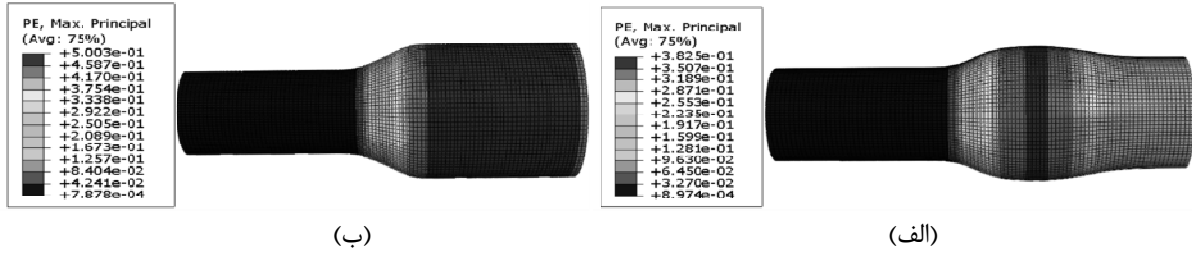
شکل ۲۱: قطعات بالج شده در دمای ۲۵۰°C، تغذیه محوری ۲۵ mm و فشار ۴/۶ MPa

Fig. 21 Bulged part at 250°C, axial feed of 25 mm and 4.6 MPa pressure

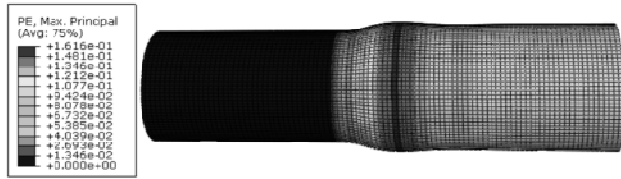
ضخامت در منطقه تغییر شکل، بهبود یافته و منحنی‌های توزیع ضخامت یکنواخت‌تر شده است.

۴-۴- پنجره شکل‌دهی

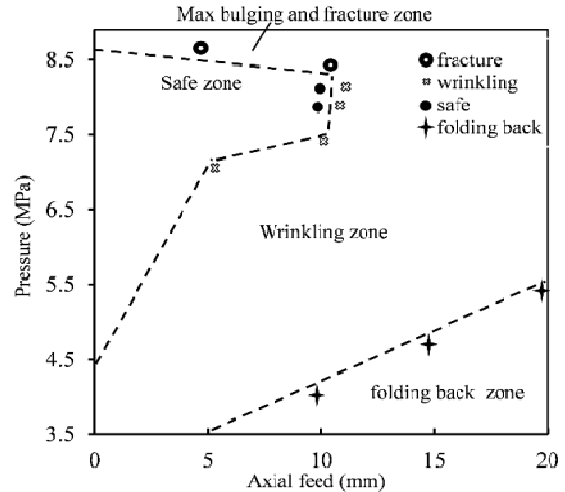
برای نشان دادن تأثیر مسیرهای بارگذاری مختلف بر روی شکل‌دهی قطعه، با انجام بیش از یک‌صد شبیه‌سازی، پنجره شکل‌دهی برای لوله آلومینیومی 6063-O در دماهای ۲۵°C و ۲۵۰°C به‌دست آمد. در شکل ۲۰ پنجره شکل‌دهی مربوط به دمای ۲۵۰°C نشان داده شده است. برای درست آزمایی پنجره شکل‌دهی، آزمایش تجربی در دمای ۲۵۰°C، تغذیه محوری ۲۵ mm و فشار شکل‌دهی ۴/۶ MPa انجام شد. با توجه به پنجره شکل‌دهی بدست آمده و استفاده از معیار هندسی برای تشخیص چروکیدگی [۲۵،۲۴] قطعه تولیدی با شرایط ذکر شده، در ناحیه چروک قرار می‌گیرد. در شکل



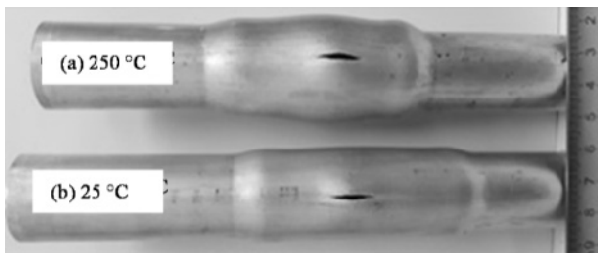
شکل ۲۳: نتایج حاصل از شبیه‌سازی در تغذیه محوری ۲۰ mm و دمای ۲۵۰ °C، الف- فشار ۶/۴ MPa (نامناسب) ب- فشار ۱۵/۵ MPa (مناسب)
Fig. 23 Simulation result corresponding to axial feed of 20 mm and at 250°C a) pressure of 4.6 MPa, b) pressure of 5.15 MPa



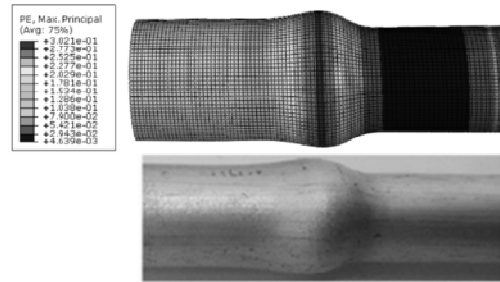
شکل ۲۶: نتیجه شبیه‌سازی با فشار ۶/۷ MPa و تغذیه محوری ۵ mm در دمای ۲۵ °C
Fig. 26 Simulation result with pressure of 6.7 MPa and axial feed of 5 mm at 25°C



شکل ۲۴: پنجره شکل‌دهی آلومینیوم ۶۰۶۳-O در دمای ۲۵ °C
Fig. 24 Process forming window for al 6063-O alloy at 25°C



شکل ۲۷: قطعات شکل داده شده در شرایط دمایی الف- ۲۵۰ °C، فشار ۵/۱ MPa و تغذیه محوری ۲۰ mm ب- مربوط به دمای ۲۵ °C در فشار ۱۷/۸ MPa و تغذیه محوری ۸ mm
Fig. 27. Forming part obtain at (a) temperature of 250 °C, pressure 5.1 MPa and axial feed of 20 mm (b) temperature of 25 °C, pressure 8.17 MPa and axial feed of 8 mm



شکل ۲۵: قطعات بالج شده در دمای ۲۵ °C، تغذیه محوری ۱۰ mm و فشار ۶/۶ MPa
Fig. 25 Bulged part at 25°C, axial feed of 10 mm and pressure of 6.6 MPa

۶/۷ و تغذیه محوری ۵ mm را در دمای ۲۵ °C نشان می‌دهد. با بررسی‌های انجام شده در محدوده فشار ۶/۸ تا ۸ MPa، با بالا رفتن مقدار تغذیه محوری تا ۱۰ mm در یک فشار معین، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. در این ناحیه نیز اعمال تغذیه محوری بیشتر از ۱۰ mm باعث چروک در قطعه می‌گردد.

برای درست‌آزمایی نواحی پارگی دو پنجره شکل‌دهی بدست آمده، آزمایش‌های تجربی در شرایط مربوط به این نواحی (آزمایش مربوط به دمای ۲۵۰ °C در فشار ۵/۱ MPa و تغذیه محوری ۲۰ mm و آزمایش مربوط به دمای ۲۵ °C در فشار ۸/۱۷ MPa و تغذیه محوری ۸ mm) انجام شد که قطعات بالج شده در شکل ۲۷ نشان داده شده‌اند.

تغییر شکل لوله با توجه به رابطه (۲) حدود ۴/۱ MPa می‌باشد که این نتیجه در پنجره شکل‌دهی بدست آمده برای دمای ۲۵ °C نشان داده شده است. با اعمال فشار ۶ MPa تغییر شکل لوله با ارتفاع بالج ۰/۵ mm شروع می‌شود و با افزایش فشار و در حالت بدون تغذیه محوری ارتفاع بالج افزایش می‌یابد، اما با اعمال تغذیه محوری قطعه دچار چروک می‌گردد. شکل ۲۶ قطعه چروک شده در فشار ۱۷/۸ MPa

۲۰ وجود دارد. در صورتی با این تغذیه محوری چروک مشاهده نمی‌شود که مقدار فشار کمتر از $4/6 \text{ MPa}$ نباشد. عیب دیگری که مشاهده شد، تا خوردگی بود. در صورتی که مقدار تغذیه محوری در دمای 250°C بیشتر از 10 mm و فشار شکل‌دهی کمتر از $2/5 \text{ MPa}$ و در دمای محیط تغذیه محوری بیشتر از 5 mm فشار شکل‌دهی کمتر از $3/5 \text{ MPa}$ باشد، این عیب روی می‌دهد، به طوری که در تغذیه محوری 20 mm برای دمای محیط و 250°C ، در صورتی که مقدار فشار شکل‌دهی به ترتیب کمتر از $5/2 \text{ MPa}$ و 3 MPa باشد، این عیب روی می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

جهت بررسی شکل‌پذیری لوله آلیاژی آلومینیوم 6063-O ابتدا آزمایش کشش در دماهای مختلف انجام شد و نتایج آن در شبیه‌سازی استفاده شد. جهت انجام آزمایش‌های تجربی، یک قالب هیدروبالج گرم لوله طراحی و ساخته شد. با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و همچنین به کمک سه معیار شتاب (مشتق دوم) کرنش پلاستیک معادل، شتاب کرنش بزرگ و همچنین شتاب کرنش در راستای ضخامت، جهت پیش‌بینی شکست، پنجره شکل‌دهی در دماهای 250°C و 250°C بدست آمد و آزمایش‌های تجربی در شرایط دمایی و تغذیه محوری مختلف جهت درست آزمایی انجام شد و نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، درستی پنجره‌های شکل‌دهی بدست آمده را نشان داد.

با بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نتایج زیر به دست آمد:

- در مقاله حاضر، برای لوله آلیاژ آلومینیوم 6063-O و در حالت گرم، مطالعه بالج آزاد انجام شد و پارامترهای شکل‌دهی، مورد بررسی قرار گرفت. به‌علاوه، پنجره شکل‌دهی برای ماده مورد نظر و محدوده ایمن برای بارگذاری در هیدروفرمینگ گرم لوله به‌دست آمد.
- با توجه به پنجره شکل‌دهی در دمای 250°C نسبت به دمای 250°C ، بازه اعمال فشار در محدوده ایمن تقریباً دو برابر می‌باشد اما میزان تغذیه محوری تقریباً نصف می‌باشد. بدین ترتیب حساسیت در دمای بالا در اعمال فشار مشخص برای تغییر شکل معین در لوله بیشتر می‌باشد.
- با افزایش دما از ۲۵ به 250°C فشار لازم برای شکل‌دهی ۳۷ درصد کاهش یافت.

بسته به فشار و تغذیه محوری، محل پارگی لوله آلومینیومی در پنجره شکل‌دهی متفاوت خواهد بود. به همین خاطر، در پنجره‌های شکل‌دهی به‌دست آمده این نواحی به‌صورت خط‌چین مشخص شده است. با توجه به شکل ۲۷ مشاهده می‌شود که در آزمایش‌های تجربی نیز قطعه دچار پارگی شد و درستی مناطق تعریف شده مربوط به پارگی در پنجره‌های شکل‌دهی به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

با توجه به پنجره شکل‌دهی، در دمای 250°C نسبت به دمای 250°C بازه اعمال فشار در محدوده ایمن تقریباً دو برابر می‌باشد اما میزان تغذیه محوری در حدود نصف می‌باشد. بدین ترتیب حساسیت در دمای بالا در اعمال فشار مشخص برای تغییر شکل معین در لوله بیشتر می‌باشد.

با مقایسه پنجره‌های شکل‌دهی به‌دست آمده در دماهای مختلف، مشاهده می‌شود که با بالا رفتن دمای شکل‌دهی، قطعه قابلیت پذیرش تغذیه محوری بیشتری را دارد، بطوری که در دمای 250°C ، حداکثر می‌توان 10 mm تغذیه محوری اعمال کرد، در صورتی که طبق پنجره شکل‌دهی بدست آمده برای دمای 250°C ، قطعه قابلیت تحمل حدود 20 mm تغذیه را دارد. دلیل عدم چروک با تغذیه محوری بیشتر در دماهای بالا، افزایش قابلیت کشش با بالا رفتن دما و در پی آن افزایش بالج شدگی و در نتیجه پذیرا بودن تغذیه بیشتر می‌باشد.

با توجه به پنجره‌های شکل‌دهی به‌دست آمده، مشخص شد که در دمای محیط، شروع بالج شدن در حالت بدون تغذیه محوری، در فشار $4/4 \text{ MPa}$ بوده، در حالی که در دمای 250°C ، $2/8$ بوده است. با افزایش فشار، ارتفاع بالج افزایش یافت. به‌علاوه، فشار پارگی در حالت بدون تغذیه محوری، در دماهای محیط و 250°C به ترتیب، $8/7 \text{ MPa}$ و $5/2 \text{ MPa}$ می‌باشد. با افزایش تغذیه محوری در هر دو دما، در فشارهای شکل‌دهی کم، چروک در قطعه ایجاد می‌شود، به طوری که در دماهای محیط و 250°C و با تغذیه محوری 5 mm ، به‌ترتیب در فشارهای $6/8 \text{ MPa}$ و $3/6 \text{ MPa}$ چروک ایجاد می‌شود. همچنین، در تغذیه محوری 10 mm و در دماهای یاد شده، به‌ترتیب در فشارهای $7/2 \text{ MPa}$ و $4/2 \text{ MPa}$ چروک مشاهده می‌شود. در دمای محیط با افزایش تغذیه محوری به بیش از 10 mm ، در هر فشاری، چروک مشاهده می‌شود، در حالی که در دمای 250°C ، قابلیت اعمال تغذیه محوری تا 10 mm

- Materials Processing Technology, 155 (2004) 1337-1343.
- [9] S. Yuan, J. Qi, Z. He, An experimental investigation into the formability of hydroforming 5A02 Al-tubes at elevated temperature, Journal of Materials Processing Technology, 177(1-3) (2006) 680-683.
- [10] H. Yi, E. Pavlina, C. Van Tyne, Y. Moon, Application of a combined heating system for the warm hydroforming of lightweight alloy tubes, Journal of materials processing technology, 203(1-3) (2008) 532-536.
- [11] L. Gang, Z.-J. Tang, Z.-B. He, S.-J. Yuan, Warm hydroforming of magnesium alloy tube with large expansion ratio, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20(11) (2010) 2071-2075.
- [12] S.H. Seyedkashi, H. Moslemi Naeini, G. Liaghat, M. Mosavi Mashadi, K. Shojaee G, M. Mirzaali, Y.H. Moon, Experimental and numerical investigation of an adaptive simulated annealing technique in optimization of warm tube hydroforming, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 226(11) (2012) 1869-1879.
- [13] S. Seyedkashi, Y.H. Moon, Numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming of aluminum tubes, Modares Mechanical Engineering, 12(5) (2013) 122-131. (in persian).
- [14] S.J. Hashemi, H.M. Naeini, G. Liaghat, J.S. Karami, A.H. Roohi, Prediction of Bursting in Warm Tube Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria, Modares Mechanical Engineering, 14(16) (2015).
- [15] S. Hashemi, H.M. Naeini, G. Liaghat, R.A. Tafti, Prediction of bulge height in warm hydroforming of aluminum tubes using ductile fracture criteria, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15(1) (2015) 19-29.
- [16] S. Yuan, X. Wang, G. Liu, Z. Wang, Control and use of wrinkles in tube hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, 182(1-3) (2007) 6-11.
- شکل پذیری قطعه با بالا رفتن دما افزایش یافت، به طوریکه ارتفاع بالج در آزمایش بالج در شرایط بارگذاری آزاد، از ۲/۶ mm در دمای محیط به ۵/۲ mm در دمای ۲۵۰°C رسید.

مراجع

- [1] L. Lang, Z. Wang, D. Kang, S. Yuan, S.-H. Zhang, J. Danckert, K.B. Nielsen, Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, 151(1-3) (2004) 165-177.
- [2] Z. He, S. Yuan, G. Liu, J. Wu, W. Cha, Formability testing of AZ31B magnesium alloy tube at elevated temperature, Journal of Materials Processing Technology, 210(6-7) (2010) 877-884.
- [3] M. Hosseinpour, A. Gorji, M. Bakhshi, On the experimental and numerical study of formability of Aluminum sheet in warm hydroforming process, Modares Mechanical Engineering, 15(2) (2015) 159-168. (in Persian)
- [4] W.F. Hosford, R.M. Caddell, Metal forming: mechanics and metallurgy, Cambridge University Press, 2011.
- [5] Y. Aue-u-lan, Hydroforming of tubular materials at various temperatures, The Ohio State University, 2007.
- [6] B. Kim, C. Van Tyne, M. Lee, Y. Moon, Finite element analysis and experimental confirmation of warm hydroforming process for aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology, 187 (2007) 296-299.
- [7] S.J. Hashemi, H.M. Naeini, G. Liaghat, R.A. Tafti, F. Rahmani, Numerical and experimental investigation of temperature effect on thickness distribution in warm hydroforming of aluminum tubes, Journal of Materials Engineering and Performance, 22(1) (2013) 57-63.
- [8] M.-Y. Lee, S.-M. Sohn, C.-Y. Kang, D.-W. Suh, S.-Y. Lee, Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes, Journal of

- 22(11) (2013) 3210-3221.
- [22] A. Afshar, R. Hashemi, R. Madoliat, D. Rahmatabadi, B. Hadiyan, Numerical and experimental study of bursting prediction in tube hydroforming of Al 7020-T6, *Mechanics & Industry*, 18(4) (2017) 411.
- [23] M. Khademi, M. Bakhshi Jooybari, M. Sadegh Yazdi, Investigation of Wrinkling in Hydrodynamic Deep Drawing assisted by Radial Pressure with Inward Flowing Liquid Based on a Geometric Method, *Modares Mechanical Engineering*, 17(5) (2017) 276-286. (In Persian)
- [24] T. Intarakumthornchai, Y. Aue-U-Lan, R. Kesvarakul, S. Jirathearanat, Feasible pressure and axial feed path determination for fuel filler tube hydroforming by genetic algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(4) (2015) 623-630.
- [17] S. Yuan, W. Yuan, X. Wang, Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3) (2006) 668-671.
- [18] L. Lang, H. Li, S. Yuan, J. Danckert, K.B. Nielsen, Investigation into the pre-forming's effect during multi-stages of tube hydroforming of aluminum alloy tube by using useful wrinkles, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5) (2009) 2553-2563.
- [19]] B.J. Mac Donald, *Practical stress analysis with finite elements*, Glasnevin publishing, 2007.
- [20] Q. Situ, *A new approach to obtain forming limits of sheet materials*, McMaster university, 2008..
- [21] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, R. Mahdavinejad, A novel approach to the determination of forming limit diagrams for tailor-welded blanks, *Journal of Materials Engineering and Performance*,

