



The Use of Internal Mechanical Insert to Prevent Wrinkling Defects in T-joint Hydroforming Process

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Faraji H.¹ MSc,
Khalili Kh.*¹ PhD,
Ashrafi A.¹ PhD

How to cite this article

Faraji H, Khalili Kh, Ashrafi A. The Use of Internal Mechanical Insert to Prevent Wrinkling Defects in T-joint Hydroforming Process Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):1989-2000.

ABSTRACT

In this study, the use of internal mechanical insert to prevent wrinkling defects in the process of T-shape tube hydroforming and expanding the window of the hydroforming process is presented. The study was performed both experimentally and by finite element simulation. In wrinkling limit testing, the use of internal mechanical insert for different modes prevented 100% of wrinkling and the T-joint was formed flawless, so that the wrinkles with high lengths such as 69.5 and 67.1 mm were prevented. Also, in the case of an internal pressure of 13 MPa and displacement of 33 mm, despite the high amount of axial displacement and the low internal pressure, the internal mechanical insert caused a reduction of 85.06% of the wrinkling length and the wrinkling length reduced from 74.3 to 11.1 mm. To study the conditions of the hydroforming process for both cases of with and without internal mechanical insert, the simulation of finite element was used. Experimental tests were also carried out to verify the validity of simulation results. By comparing the results of the experimental study and the simulations, an appropriate match was found between them. The results showed that the use of internal mechanical insert prevents wrinkling in the piece. Therefore, it can be used to produce a piece without defects and develop the window of the hydroforming process.

Keywords Wrinkling; T-shape Joint; Hydroforming Process; Finite element Analysis; Mechanical Insert

CITATION LINKS

[1] Improve the formability in tube hydroforming process using ultrasonic vibrations [2] Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process [3] Investigation into detection criteria for wrinkling in tube hydroforming [4] Analysis on critical conditions of sidewall wrinkling for hydroforming of thin-walled Tee-joint [5] Improvement of formability in T-shaped tube hydroforming by a three-stage punch shape [6] Hydroforming simulation and experiment of clad T-shapes [7] The multi-objective robust optimization of the loading path in the T-shape tube hydroforming based on dual response surface model [8] Studying the stress-strain curve of C12200 copper tube using hydraulic bulge test in T-shape die [9] Study on formability of tube hydroforming through elliptical die inserts [10] Investigation into wrinkling behavior of thin-walled 5A02 aluminum alloy tubes under internal and external pressure [11] Optimization of loading path in hydroforming of parallel double branched tube through response surface methodology [12] Control and use of wrinkles in tube hydroforming [13] Wrinkling behavior of magnesium alloy tube in warm hydroforming [14] Analysis and experiment on wrinkling suppression for hydroforming of curved surface shell [15] Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming [16] Modifying internal pressure and axial feeding loading paths in hydroforming process of cylindrical stepped tube to improve thickness distribution [17] Experimental and finite element investigation of formability and failures in bi-layered tube hydroforming [18] Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications, part I: Buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes [19] An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes [20] Analytical modelling of tube hydroforming [21] Buckling of bars, plates, and shells [22] Investigation on the effects of process parameters in pulsating hydroforming using Taguchi method

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran
Phone: +98 (56) 32202008
Fax: -
kkhalili@birjand.ac.ir

Article History

Received: December 01, 2018
Accepted: January 23, 2019
ePublished: August 12, 2019

استفاده از قید مکانیکی داخلی برای مهار عیب چروکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل

حسین فرجی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

خلیل خلیلی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

امیر اشرفی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در این تحقیق، استفاده از قید مکانیکی داخلی به منظور مهار عیب چروکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل و توسعه پنجره فرآیند آن ارائه شده است. مطالعه به صورت شبیه سازی اجزای محدود و انجام آزمایش های تجربی صورت پذیرفت. در آزمایش های انجام شده در محدوده چروکیدگی، استفاده از قید مکانیکی داخلی برای حالت های مختلف به صورت ۱۰۰٪ از ایجاد چروکیدگی جلوگیری به عمل آمده است و اتصال T شکل به صورت کاملاً سالم به دست آمده، به گونه ای که چروکیدگی هایی با طول های بلندی مانند ۶۹/۵ و ۶۷/۱ میلی متر را نیز مهار نموده است. همچنین در حالت فشار داخلی ۱۳ مگاپاسکال و جابه جایی ۳۳ میلی متر، با وجود مقدار بالای جابه جایی محوری و مقدار پایین فشار داخلی، قید مکانیکی سبب کاهش ۸۵/۰۶٪ از طول چروکیدگی شده است و مقدار طول چروکیدگی از ۷۴/۳ به ۱۱/۱ میلی متر کاهش یافته است. برای بررسی شرایط فرآیند هیدروفرمینگ، در دو حالت با وجود قید مکانیکی و بدون استفاده از قید مکانیکی آزمایش ها و شبیه سازی اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای بررسی درستی نتایج شبیه سازی ها، آزمایش های تجربی مطابق با آنها انجام شد. با مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعه تجربی و شبیه سازی ها، تطابق مناسبی میان آنها دیده شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده این بود که استفاده از قید مکانیکی داخلی سبب مهار چروکیدگی در قطعه می شود. بنابراین می توان برای تولید قطعه بدون عیب و همچنین توسعه پنجره فرآیند هیدروفرمینگ از آن بهره برد.

کلیدواژه ها: چروکیدگی، اتصال T شکل، فرآیند هیدروفرمینگ، تحلیل اجزای محدود، قید مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۳

*نویسنده مسئول: khalili@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه استفاده از فرآیندهای شکل دهی فلزات به منظور دستیابی به قطعات مناسب به صورت گسترده ای انجام می گیرد. فرآیند هیدروفرمینگ لوله، یک روش عالی برای ساخت قطعات صنعتی مانند قطعات خودرو با هزینه کم است و همچنین برای قطعاتی که به صورت یکپارچه هستند، راندامان بالایی دارد. در این فرآیند، قطعات با اعمال فشار یک سیال و اعمال تغذیه محوری، شکل حفره قالب را به خود می گیرند [1].

در فرآیند هیدروفرمینگ در صورت اعمال تغذیه محوری به میزان بسیار زیاد، احتمال به وجود آمدن عیوبی از قبیل چروکیدگی و کمناش در لوله وجود دارد. اگر شکل دهی به صورت ترکیبی مناسب از تغذیه محوری و فشار داخلی باشد که بتواند مقدار کافی مواد را به منطقه تغییر شکل برساند، این امر منجر به نازک شدن کمتر می شود و در نتیجه می توان از ایجاد عیوب جلوگیری کرد [2]. عیب کمناش در فرآیند هیدروفرمینگ لوله با طول بلند و زمانی که نسبت قطر به ضخامت کم باشد، اتفاق می افتد. در حالی که چروکیدگی روی لوله هایی با طول های بلند و زمانی که نسبت قطر به ضخامت بالا باشد، رخ می دهد [3].

در بیشتر موارد امکان به دست آوردن قطعه سالم در منطقه شکل دهی مورد نظر وجود ندارد. بنابراین استفاده از راهکارهایی

به منظور جلوگیری از ایجاد چروکیدگی بسیار ضروری است. همچنین بست و گسترش پنجره فرآیند هیدروفرمینگ دارای اهمیت بسیاری است.

در ادامه برخی از مرتبط ترین تحقیقات انجام شده به این پژوهش آورده شده است.

لیو و همکاران [4] یک مدل تحلیلی برای بررسی عیب چروکیدگی در اتصال T شکل ارائه نمودند. در این تحقیق مشخص شد که بخش میانی اتصال T شکل دارای بیشترین احتمال رخ دادن چروکیدگی است. نتایج آزمایش های تجربی، تایید کننده مدل تحلیلی برای تنش بحرانی چروکیدگی بود.

مینگنائو و همکاران [5] تاثیر استفاده از سنبه سه پله ای را روی میزان شکل پذیری فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل بررسی نمودند. نتایج این مطالعه نشان دهنده این بود که استفاده از سنبه سه پله ای در مقایسه با سنبه معمولی، سبب افزایش ارتفاع برآمدگی و کاهش حداکثر میزان نازک شدن آن شده است. همچنین سبب بهبود دانه بندی و افزایش ۱۵ درصدی میزان سختی آن شده است.

گوآ و همکاران [6] فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل را برای لوله دو لایه به روش اجزای محدود شبیه سازی نمودند. در این مطالعه، فرآیند با استفاده از پارامترهای فشار داخلی، تغذیه محوری و ضریب اصطکاک بهینه سازی شد. نتایج شبیه سازی ها با دقت مناسبی با واقعیت مطابقت داشت.

هوانگ و همکاران [7] بهینه سازی چند هدفه مسیر بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل را براساس مدل سطح پاسخ مورد بررسی قرار دادند. بهینه سازی مسیر بارگذاری فرآیند با استفاده از روش سطح پاسخ در شبیه سازی اجزای محدود و با هدف بیشینه سازی ارتفاع برآمدگی و همچنین بیشینه سازی نرخ نازک شدن انجام گرفت.

اشرفی و خلیلی [8] شبیه سازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله مس C12200 را با استفاده از خواص مکانیکی به دست آمده از آزمون بالچ در قالب T شکل انجام دادند و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ضرایب ناهمسان گردی باعث افزایش دقت خواص به دست آمده از آزمون بالچ و کشش می شود. همچنین منحنی به دست آمده از آزمون بالچ در شبیه سازی ها دارای خطای کمتری نسبت به منحنی آزمون کشش است.

لی و همکاران [9] در فرآیند هیدروفرمینگ لوله دو پله با قراردادن قید مکانیکی داخلی به بررسی نمودار حد شکل دهی لوله پرداختند. در این مطالعه، یک مدل تحلیلی برای بررسی شرایط آزمون بالچ بیضی شکل در فرآیند هیدروفرمینگ ارائه شد. نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده با نتایج آزمایش های تجربی، تطابق مناسبی را نشان داد.

یوان و همکاران [10] پدیده چروکیدگی را در فرآیند هیدروفرمینگ لوله های جدار نازک به صورت تجربی و اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از لوله هایی با جنس آلومینیوم استفاده شد. از نتایج به دست آمده مشخص شد که با اعمال فشار خارجی بالاتر می توان از وقوع چروکیدگی در ناحیه میانی لوله جلوگیری کرد.

چن و همکاران [11] با استفاده از روش سطح پاسخ، مسیر بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ اتصال چهارراهی با دو برآمدگی موازی را بهینه سازی نمودند. در این تحقیق، ارتفاع برآمدگی و نسبت نازک شدن لوله براساس پارامترهای فرآیند به صورت معادله ریاضی استخراج شد. آنها مشاهده کردند که نتایج حاصل از بهینه سازی با

هیدروفرمینگ که بیشتر با استفاده از روش‌های مبتنی بر منطق فازی یا روش‌های دیگر به اعمال جابه‌جایی محوری در رابطه با میزان فشار داخلی پرداخته‌اند، با به‌کارگیری قید مکانیکی داخلی در منطقه چروکیدگی می‌توان قطعه بدون عیب را تولید نمود.

در ادامه این مقاله، نخست شرایط ایجاد چروکیدگی شرح داده شده است. پس از آن با انجام آزمایش‌های لازم، ناحیه چروکیدگی در پنجره فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل مشخص شده است. سپس در محدوده چروکیدگی، به‌منظور سنجش میزان تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی روی پدیده چروکیدگی آزمایش‌هایی انجام گرفت. بعد از آن با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج به‌دست‌آمده از آن تاثیر به‌کارگیری قید مکانیکی داخلی بررسی شده است.

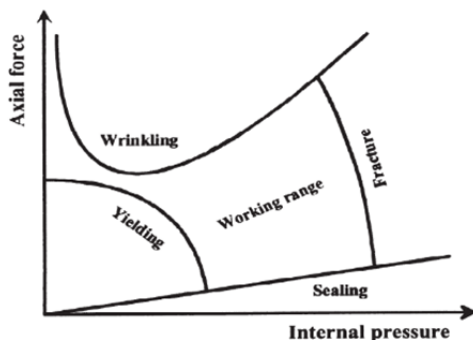
۲- شرح مساله و روش حل

۲-۱- شرایط ایجاد چروکیدگی

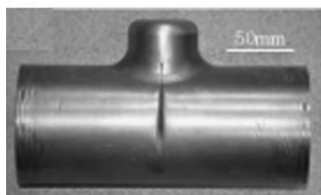
در شکل ۱، پنجره فرآیند هیدروفرمینگ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان دریافت که پدیده چروکیدگی با اعمال تغذیه محوری زیاد و فشار داخلی کم بر لوله حاصل می‌شود [20].

در شکل ۲ چروکیدگی ایجاد شده در قسمت میانی بدنه لوله نشان داده شده است. این نوع از چروکیدگی، چروکیدگی کناره دیواره نامیده می‌شود. این نوع چروکیدگی تنها در وسط دیواره لوله رخ می‌دهد، اما وقوع آن در مناطق دیگر نیز امکان‌پذیر است. لازم به ذکر است که شرایط لازم برای آغاز چروکیدگی به پارامترهای هندسی لوله و تنش‌های اعمال شده به آن بستگی دارد [4].

برای بررسی نیروی لازم برای ایجاد چروکیدگی کناره دیواره، سطح اتصال T شکل از دو ناحیه روبه‌رو و جانب، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نمای روبه‌رو بررسی پدیده چروکیدگی مشابه حالت ایجاد چروکیدگی و در منطقه اتصال T شکل مشابه کشش عمیق در ناحیه ورق گیر است [4].



شکل (۱) پنجره فرآیند هیدروفرمینگ [20]



شکل (۲) چروکیدگی کناره دیواره در اتصال T شکل [4]

۲-۲- تغییر طول موثر چروکیدگی

با توجه به شکل ۳ می‌توان لوله را در منطقه چروکیدگی مشابه یک سازه دوسرگیردار در نظر گرفت. کمانش موضعی در سازه

نتایج حاصل از آزمایش تجربی دارای تطابق مناسبی است.

یوان و همکاران [12] رفتار چروکیدگی و همچنین نحوه کنترل و استفاده مفید از آن را در فرآیند هیدروفرمینگ لوله مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، تاثیر مسیر بارگذاری و همچنین نسبت ارتفاع به قطر لوله، روی تعداد چروک‌های ایجاد شده و هندسه آنها بررسی شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های تئوری با نتایج آزمایش‌های تجربی، دارای تطابق مناسبی بود.

تانگ و همکاران [13] رفتار پدیده چروکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که استفاده از مسیر بارگذاری با میزان تغذیه محوری بالاتر سبب نامتقارن شدن چروک‌ها در راستای محیطی و همچنین موج‌شدن آنها در راستای محوری لوله می‌شود. چن و همکاران [14] به بررسی رفتار چروکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ کشش عمیق ورق فلزی پرداختند. در این تحقیق، تحلیل‌های صورت‌گرفته با هدف جلوگیری از ایجاد چروک با استفاده از مدل‌سازی تنش‌های فرآیند و همچنین مدل‌سازی هندسی آن ارائه شد. آنها برای صحت‌سنجی مدل خود، یک آزمایش تجربی و همچنین شبیه‌سازی مرتبط با آن ارائه نمودند. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که میزان اندازه مناطق محافظت‌نشده ورق، تاثیر بسیار زیادی بر ایجاد چروکیدگی دارد.

یوان و همکاران [15] رفتار چروکیدگی و نحوه کنترل آنها را در هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که وجود برخی از چروک‌ها در قطعه، عیب محسوب نمی‌شود و در بعضی موارد، قطعه پس از چروکیدگی می‌تواند تغییر شکل دهد و به شکل مورد نظر تبدیل شود. آنها با بهره‌گیری از این مفاهیم، پنجره شکل‌دهی را در فرآیند هیدروفرمینگ لوله گسترش دادند.

محمدعلی‌زاده و همکاران [16] چروک‌های ایجاد شده در سطوح لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای را با تغییر جهت اعمال تغذیه محوری رفع کردند. همچنین مشاهده نمودند که توزیع ضخامت در قطعه نهایی بهبود یافته است.

ولابی و لاسود [17] فرآیند هیدروفرمینگ تبدیل لوله چندلایه به اتصال چهارراهی را با روش اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه ذکر شده از دو ملاک میزان چروکیدگی و وقوع ترکیدگی، برای بررسی فرآیند استفاده شد. در نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که به‌کارگیری مسیرهای بارگذاری با فشار داخلی پیش‌رونده، مناسب‌تر از حالات دیگر بودند.

چو و ژو [18] قوانین کرنش سختی و معیارهای تسلیم را با یکدیگر ترکیب کردند و به‌کمک آن اثر تغییر شکل پلاستیک بر ناپایداری هندسی را به‌صورت دقیق توسط تانسور تنش صفحه‌ای تحلیل نمودند. آنها همچنین اثر پارامترهای هندسی و خواص مواد را بر ایجاد عیوب چروکیدگی و کمانش بررسی نمودند.

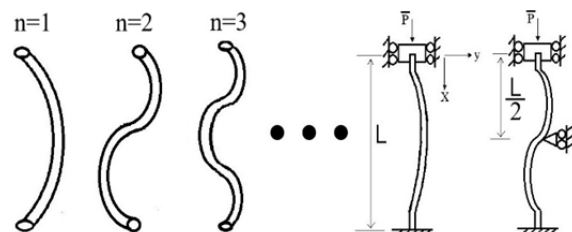
یدمیر و همکاران [19] با استفاده از یک پارامتر پیش‌بینی‌کننده چروکیدگی و همچنین به‌کارگیری یک پارامتر دیگر به‌منظور پیش‌بینی پدیده ترکیدگی و کنترل فازی، به شرایط بارگذاری مطلوب دست پیدا کردند. در ابتدای فرآیند، فشار داخلی و نیروی محوری با شیب‌های ثابتی اعمال شدند و در صورت ایجاد چروکیدگی در قطعه، در مرحله بعد از آن، شیب فشار داخلی، افزایش و شیب نیروی محوری کاهش می‌یافت.

در این تحقیق برای نخستین بار برای مهار عیب چروکیدگی از قید مکانیکی داخلی در فرآیند هیدروفرمینگ استفاده شده است. برخلاف سایر تحقیقات انجام شده در زمینه فرآیندهای

دوسرگیردار، براساس مد کمانش، تابع طول موثر آن است [21]. فرمول ۱ تاثیر طول موثر سازه را در ایجاد کمانش موضعی نشان می‌دهد [21].

$$\bar{P} = P_E = n^2 \pi^2 \frac{EI}{L^2} \quad (1)$$

با اعمال یک قید مناسب در منطقه ایجاد کمانش موضعی، طول موثر سازه کاهش می‌یابد و برای ایجاد شرایط منجر به چروکیدگی، نیازمند اعمال نیروی جانبی بیشتری خواهد بود. همچنین از شکل ۳ می‌توان دریافت که مقیدکردن ناحیه داخلی لوله در منطقه بحرانی چروکیدگی سبب افزایش مقاومت آن در برابر نیروهای جانبی می‌شود. علت این افزایش مقاومت، تغییر مد موثر بر سازه است. در وضعیت مد ابتدایی ($n=1$)، سازه تنها در ابتدا و انتها مقید است و بنابراین طول موثر کمانش به اندازه طول سازه خواهد بود. زمانی که سازه در قسمت میانی آن مقید شود، طول موثر برای کمانش آن نصف می‌شود. بنابراین با توجه به فرمول شماره ۲، با نصف شدن اندازه طول موثر کمانش سازه، نیروی لازم برای کمانش کردن آن ۴ برابر خواهد شد. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که با مقیدسازی ناحیه وسط لوله، منطقه بحرانی تحت کمانش موضعی تقویت خواهد شد و طول موثر کمانش موضعی کاهش شدیدی خواهد یافت. در اثر کاهش طول موثر کمانش موضعی در لوله، مقدار نیروی محوری لازم برای ایجاد چروکیدگی افزایش خواهد یافت. بنابراین می‌توان در فشار داخلی کمتر و جابه‌جایی محوری زیادتر از وقوع چروکیدگی جلوگیری نمود و پنجره فرآیند را در منطقه چروکیدگی افزایش داد.



شکل ۳) کمانش موضعی در سازه دوسرگیردار [21]

در این پژوهش با مقیدسازی منطقه بحرانی چروکیدگی در لوله، طول موثر بحرانی چروکیدگی کاهش یافته است. با کاهش طول موثر بحرانی چروکیدگی، نیروی لازم برای ایجاد چروک در لوله افزایش یافته است. بنابراین با استفاده از قید مکانیکی داخلی در فضای داخلی لوله، مانع از کمانش اولیه آن در منطقه بحرانی می‌شود و در ادامه فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل نیز از ایجاد عیب چروکیدگی جلوگیری خواهد شد.

۳- مواد و تجهیزات آزمایشگاهی

در این تحقیق لوله‌هایی از جنس مس C12200 استفاده شد. طول لوله مورد استفاده ۱۵۰ میلی‌متر، قطر خارجی آن ۲۸/۲ و ضخامت دیواره آن ۱/۱۴ میلی‌متر است. قالب مورد استفاده از جنس فولاد است. لوله‌ها برای کلیه آزمایش‌ها در دمای ۵۵۰°C و به مدت یک ساعت و نیم آنیل شده‌اند. در ابتدا آزمایش‌های تجربی با مقادیر مختلف فشار داخلی و به صورت فشار ثابت با هدف تعیین منطقه چروکیدگی لوله‌ها در پنجره فرآیند انجام گرفت. با انجام آزمایش‌ها به صورت فشار ثابت، تاثیر میزان فشار داخلی روی پدیده چروکیدگی دقیق‌تر مشخص می‌شود [16]. پس از یافتن محدوده چروکیدگی در نمودار پنجره فرآیند، شبیه‌سازی‌های اجزای محدود

نیز به منظور بررسی تاثیر استفاده از قید مکانیکی بر چروکیدگی اتصال T شکل صورت پذیرفت. برای شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از روش اجزای محدود، خواص مکانیکی لوله باید تعیین شود. بدین منظور روی نمونه‌های مورد نظر آزمایش کشش تک‌محوره صورت گرفت.

۳-۱- آزمایش کشش تک‌محوره

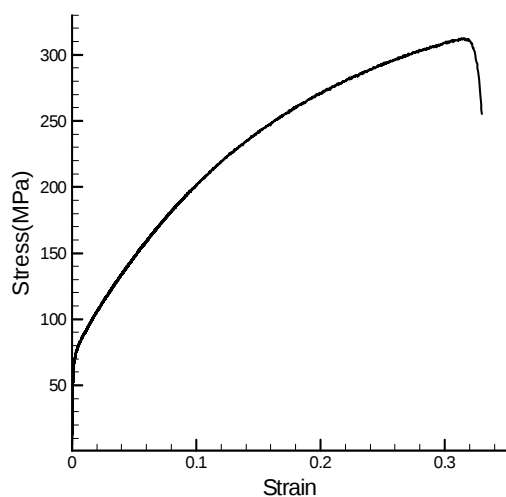
یکی از روش‌های به دست آوردن منحنی تنش موثر- کرنش موثر ماده لوله، استفاده از آزمون کشش تک‌محوره روی نمونه‌هایی است که مطابق استاندارد از درون لوله تهیه شده‌اند. در این تحقیق خواص مکانیکی لوله توسط آزمون کشش روی نمونه‌هایی که در راستای طولی تهیه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. این نمونه‌ها مطابق ابعاد استاندارد ASTM E8 توسط دستگاه وایرکات برش خورده و تحت عملیات حرارتی آنیلینگ مشابه با نمونه‌های لوله‌های مورد استفاده در آزمون بالچ قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی، توسط دستگاه کشش ژئیک تحت کشش تک‌محوره قرار گرفته‌اند.

۴ نمونه مطابق استاندارد ASTM E8 برای آزمایش کشش تک‌محوره ساخته شد. شکل ۴ نشان‌دهنده ابعاد نمونه‌ها است. نمونه‌های مورد نظر در دستگاه کشش قرار داده شدند و با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت کشش قرار گرفتند.

نمودار ۱ نشان‌دهنده خواص ماده لوله به دست آمده از آزمایش کشش است. جدول ۱ خواص مکانیکی لوله مسی را نشان می‌دهد. از نتایج آزمایش کشش می‌توان در شبیه‌سازی اجزای محدود برای تعیین خواص ماده مورد نظر استفاده نمود.



شکل ۴) نمونه‌های ساخته شده برای انجام تست کشش

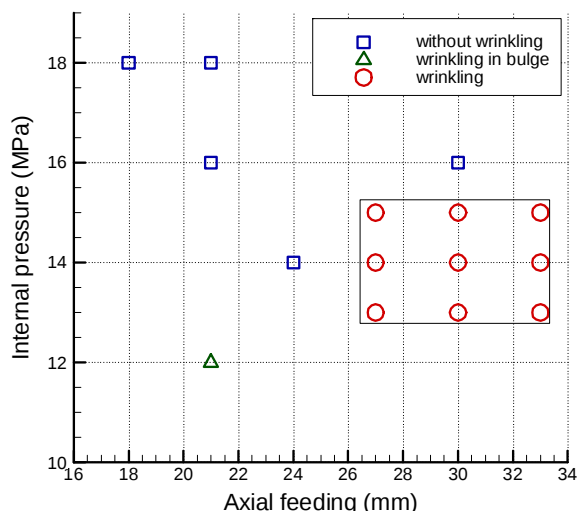


نمودار ۱) منحنی تنش-کرنش به دست آمده از آزمون کشش

نرخ کرنش (1/s)	۰/۰۰۱۲
توان کارسختی (n)	۰/۳۸۲
ضریب استحکام (K؛ مگاپاسکال)	۴۹۰
مدول یانگ (گیگاپاسکال)	۹۷/۸۲۲
تنش تسلیم (%۰/۱؛ مگاپاسکال)	۶۶/۸
تنش تسلیم (%۰/۲؛ مگاپاسکال)	۷۳/۳

استفاده از قید مکانیکی داخلی برای مهار عیب چروکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل ۱۹۹۳

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته ناحیه چروکیدگی مطابق نمودار ۲ به دست آمد. همان‌طور که در نمودار ۲ مشاهده می‌شود، ناحیه چروکیدگی در محدوده‌ای که جابه‌جایی محوری زیاد بوده و فشار داخلی کم است، قرار دارد. اگر جابه‌جایی محوری، کم و فشار داخلی نیز کمتر از مقدار مورد نظر باشد، نوع دیگری از چروکیدگی در منطقه برآمدگی به وجود می‌آید. نقاط دایره‌ای در نمودار ۲ نشان‌دهنده محدوده چروکیدگی در نمودار فشار داخلی- جابه‌جایی محوری هیدروفرمینگ اتصال T شکل است.



نمودار ۲) محدوده چروکیدگی به دست آمده در پنجره فرآیند برای اتصال T شکل

برای بررسی میزان تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی بر پدیده چروکیدگی در محدوده فشار و جابه‌جایی محوری مختلف، انجام آزمایش‌های تجربی لازم است. در نمودار ۲ برای هر دایره مشخص شده در محدوده چروکیدگی، دو آزمایش تجربی در نظر گرفته شد. در حالت اول از قید مکانیکی داخلی استفاده نشده است تا میزان چروکیدگی در آن فشار داخلی و جابه‌جایی محوری مشخص شود. در حالت بعدی آزمایش‌ها با استفاده از قید مکانیکی داخلی انجام شدند تا تاثیر حضور قید مکانیکی داخلی در مهار عیب چروکیدگی در شرایط یکسان تعیین شود. بنابراین در محدوده چروکیدگی، ۱۸ آزمایش تجربی در نظر گرفته شد.

برای هر یک از این ۱۸ آزمایش، یک مسیر بارگذاری مشابه نمودار ۳ در نظر گرفته شد. مسیر بارگذاری فشار ثابت برای هر کدام از این آزمایش‌ها متناظر با یکی از نقاط محدوده مورد مطالعه هستند. نمودار ۳ نشان‌دهنده نحوه بارگذاری فشار ثابت در حالت فشار داخلی ۱۵ مگاپاسکال و جابه‌جایی محوری ۳۳ میلی‌متر است. با اندازه‌گیری طول چروکیدگی ایجاد شده در اتصال T شکل می‌توان معیاری برای سنجش و مقایسه آنها در نظر گرفت [22]. شکل ۶ نشان‌دهنده نحوه اندازه‌گیری طول چروکیدگی در اتصال T شکل است.

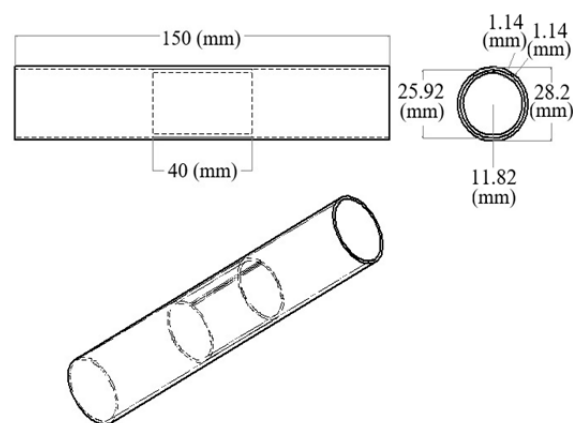
آزمایش‌ها براساس جدول ۲ انجام شد. طول چروکیدگی‌های ایجاد شده در اتصالات با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد و در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، نتایج حاصل از ۹ آزمایش در حالت بدون استفاده از قید مکانیکی داخلی نشان‌دهنده وقوع چروکیدگی در تمام آنها بود. با توجه به نمودار ۴ می‌توان مشاهده نمود که در محدوده چروکیدگی، استفاده از قید مکانیکی داخلی در فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل سبب جلوگیری کامل از ایجاد چروکیدگی شده است. بنابراین با استفاده از این روش،

۳-۲- تهیه و ساخت قید مکانیکی داخلی

هندسده قید مکانیکی داخلی باید به‌صورتی باشد که محدوده بحرانی چروکیدگی در اتصال T شکل را به‌صورت کامل مقید سازد. در این صورت کمانش موضعی در ناحیه بحرانی چروکیدگی اتصال T شکل مهار شده و قطعه تولید شده سالم خواهد بود. استفاده از قید مکانیکی داخلی کرووی شکل به دلیل تماس نقطه‌ای محدود میان قید مکانیکی و بدنه لوله و همچنین حرکت انتقالی آن به سبب حرکت سیال چندان مناسب نخواهد بود. استفاده از قید مکانیکی با هندسه حلقه‌ای (هندسده لوله‌ای شکل)، به دلیل وجود سطح تماس کامل با جداره داخلی اتصال T شکل در ناحیه بحرانی چروکیدگی مناسب است.

جنس قید مکانیکی داخلی حلقه‌ای شکل با جنس لوله‌های مسی یکسان انتخاب شدند. بدین صورت که تعدادی حلقه به طول ۴۰ میلی‌متر از لوله مسی برش داده شدند. سپس در جهت طولی در آنها شکاف ایجاد شد و در داخل لوله‌های مسی قرار داده شدند. ضخامت و خواص مکانیکی قید مکانیکی حلقه‌ای شکل کاملاً مشابه لوله‌های مسی است. شکل ۵ نقشه ساخت و ابعاد قید مکانیکی داخلی و همچنین محل قرارگیری آنها را در لوله‌های مسی نشان می‌دهد.

پس از تهیه تعداد لازم لوله برای انجام آزمایش‌ها، کلیه لوله‌های دارای قید مکانیکی داخلی و لوله‌های بدون قید مکانیکی داخلی در شرایط یکسان آنیل شدند. سپس لوله‌ها در داخل کوره خاموش، به آرامی در طی یک روز خنک شدند.

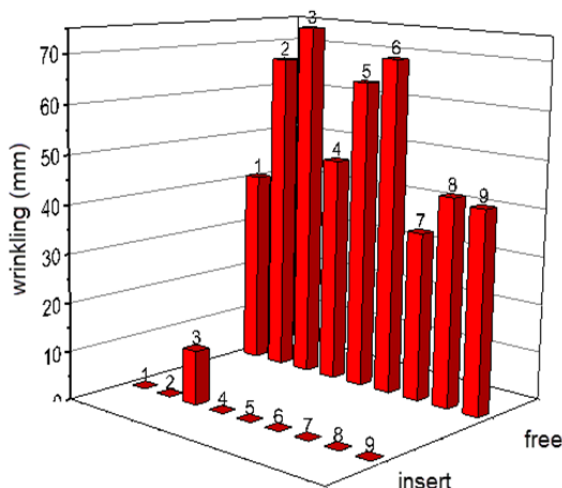


شکل ۵) ابعاد و موقعیت قید مکانیکی داخلی در لوله مسی

۴- بررسی‌های تجربی

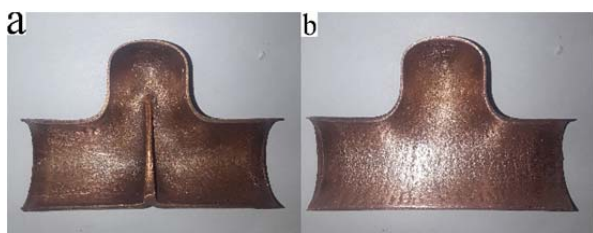
تعیین محدوده چروکیدگی در نمودار فشار داخلی- جابه‌جایی محوری، نیازمند انجام آزمایش‌های تجربی و بررسی رفتار چروکیدگی در لوله است. بنابراین در این تحقیق ابتدا آزمایش‌هایی برای یافتن منطقه چروکیدگی انجام گرفت. نحوه بارگذاری کلیه آزمایش‌ها به‌صورت فشار ثابت در نظر گرفته شدند. با این روش، تاثیر دقیق فشار داخلی و جابه‌جایی محوری به‌صورت مستقل بر چروکیدگی فرآیند مشخص می‌شود [16].

ناحیه چروکیدگی کاهش خواهد یافت و پنجره فرآیند توسعه می‌یابد.



نمودار ۴) تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی بر طول چروکیدگی اتصال T شکل

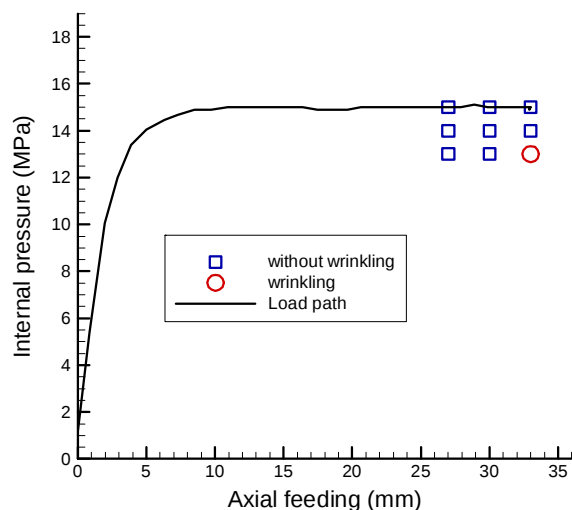
شکل ۷ نشان‌دهنده قطعه‌های تولیدشده در فشار داخلی ۱۵ مگاپاسکال و جابه‌جایی ۳۳ میلی‌متر است. قطعه‌ها توسط فرآیند وایرکات در جهت طولی برش داده شده‌اند. قطعه تولیدشده در حالت بدون استفاده از قید مکانیکی در شکل ۷-a و قطعه تولیدشده با استفاده از قید مکانیکی داخلی در شکل ۷-b نشان داده شده است. در داخل قطعه‌ای که فاقد قید مکانیکی داخلی بوده، پدیده چروکیدگی در وسط رخ داده است. همان گونه که از تحلیل‌های صورت‌گرفته در تیر دوسرگردار پیش‌بینی شده بود، مشاهده می‌شود که با به‌کارگیری قید مکانیکی داخلی، مقاومت لوله در برابر وقوع عیب چروکیدگی افزایش یافته است. بنابراین در همان مقادیر جابه‌جایی محوری و فشار داخلی، از ایجاد چروکیدگی جلوگیری به عمل آمده است. از شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که تنها با مقیدسازی منطقه بحرانی چروکیدگی و کماتش موضعی می‌توان انتظار داشت که قطعه سالم به دست آید.



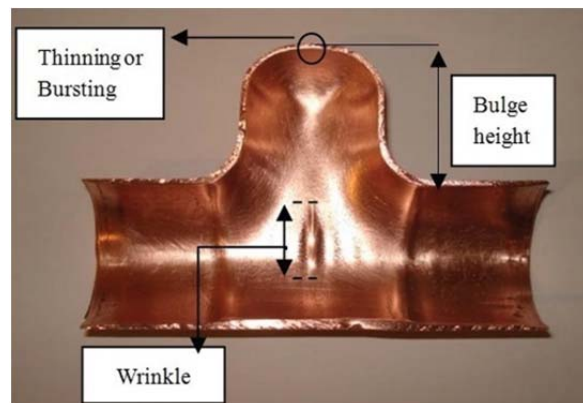
شکل ۷) مقایسه چروکیدگی در اتصال T شکل در فشار داخلی ۱۵ مگاپاسکال و جابه‌جایی محوری ۳۳ میلی‌متر: (a) بدون استفاده از قید مکانیکی داخلی، (b) استفاده از قید مکانیکی داخلی

۵- شبیه‌سازی اجزای محدود

با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود می‌توان به یک حل مجازی برای فرآیند شکل‌دهی دست یافت و از هزینه‌های انجام آزمایش‌های عملی مکرر جلوگیری کرد. شبیه‌سازی فرآیند مورد نظر به کمک نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus به صورت صریح انجام گرفت. با توجه به قرینه بودن فرآیند، قالب، لوله و سنبه‌ها به صورت نیمه مدل شدند. خواص ماده در شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش کشش تعیین شد. در محدوده چروکیدگی، شبیه‌سازی اجزای محدود برای مقادیر مختلف



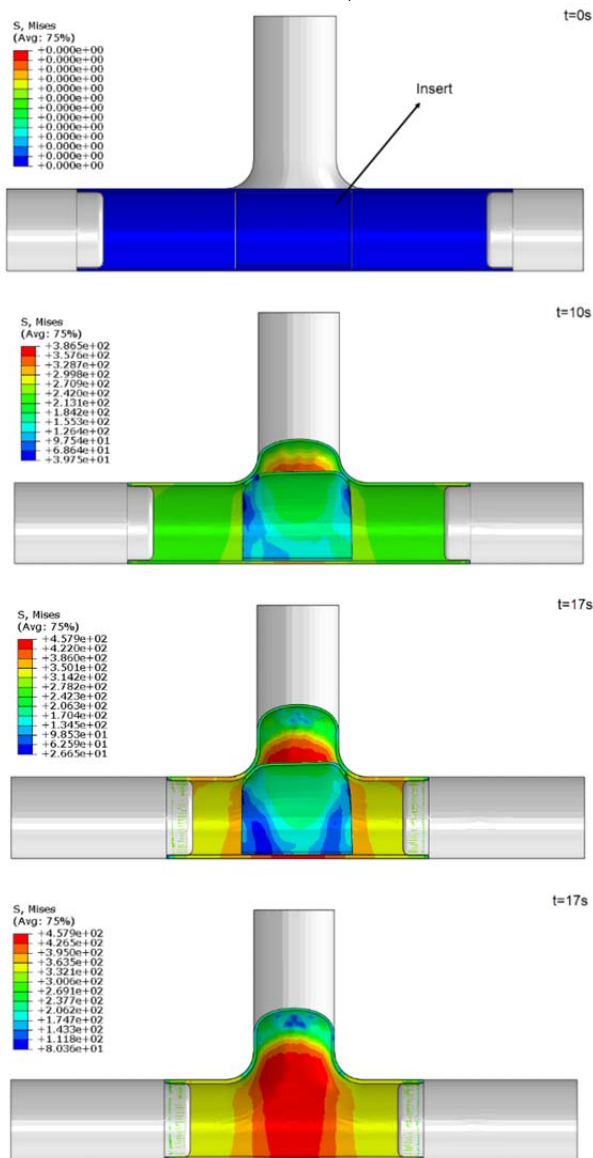
نمودار ۳) نمودار مسیر بارگذاری متناظر با محدوده چروکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل



شکل ۶) اندازه‌گیری طول چروکیدگی در اتصال T شکل [22]

جدول ۲) نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی

شماره آزمایش	فشار داخلی (مگاپاسکال)	جابه‌جایی محوری (میلی‌متر)	قید مکانیکی	میزان چروکیدگی (میلی‌متر)
۱	۱۳	۲۷	استفاده نشده	۴۰/۶
۲	۱۳	۲۷	استفاده شده	۰
۳	۱۳	۳۰	استفاده نشده	۶۷/۱
۴	۱۳	۳۰	استفاده شده	۰
۵	۱۳	۳۳	استفاده نشده	۷۴/۳
۶	۱۳	۳۳	استفاده شده	۱۱/۱
۷	۱۴	۲۷	استفاده نشده	۴۶/۹
۸	۱۴	۲۷	استفاده شده	۰
۹	۱۴	۳۰	استفاده نشده	۶۴/۱
۱۰	۱۴	۳۰	استفاده شده	۰
۱۱	۱۴	۳۳	استفاده نشده	۶۹/۵
۱۲	۱۴	۳۳	استفاده شده	۰
۱۳	۱۵	۲۷	استفاده نشده	۳۴/۹
۱۴	۱۵	۲۷	استفاده شده	۰
۱۵	۱۵	۳۰	استفاده نشده	۴۳/۴
۱۶	۱۵	۳۰	استفاده شده	۰
۱۷	۱۵	۳۳	استفاده نشده	۴۲/۱
۱۸	۱۵	۳۳	استفاده شده	۰

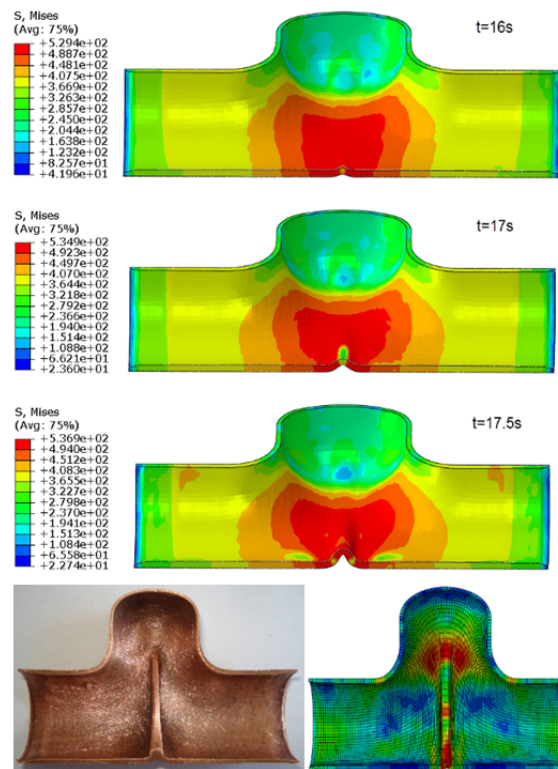


شکل ۹) قطعه شبیه‌سازی شده دارای قید مکانیکی داخلی با روش اجزای محدود (فشار داخلی ۱ مگاپاسکال و جابه‌جایی ۳۳ میلی‌متر)

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که نحوه شکل‌گیری و همچنین شکل نهایی چروکیدگی کناره ایجاد شده در شبیه‌سازی اجزای محدود کاملاً مطابق با نمونه تجربی آن است. شکل ۹ نشان‌دهنده شبیه‌سازی اجزای محدود تأثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی روی فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل است. این شبیه‌سازی مشابه حالت قبل در فشار داخلی ۱۵ مگاپاسکال و جابه‌جایی محوری ۳۳ میلی‌متر انجام گرفت. در این شبیه‌سازی، استفاده از قید مکانیکی داخلی سبب کاهش طول موثر کمناش موضعی شده، بنابراین نیروی مورد نیاز برای ایجاد چروکیدگی کافی نبوده است. در شکل ۹ مشاهده می‌شود که قید مکانیکی داخلی کاملاً از ایجاد چروکیدگی در اتصال T شکل جلوگیری نموده است. صحت شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با آزمایش‌ها تأیید شد. جدول ۳ نشان‌دهنده میزان انطباق آنها است. درصد خطای شبیه‌سازی برای میزان ارتفاع برآمدگی در حالت بدون حضور قید مکانیکی حدود ۳/۰۹ است. همچنین درصد خطای آن برای حالت استفاده از قید مکانیکی حدود ۴/۴ است.

فشار و جابه‌جایی محوری انجام شد. در آزمایش‌ها امکان بررسی نحوه ایجاد و شروع چروکیدگی و همچنین تغییرات جریان ماده و رشد چروکیدگی به سبب وجود قطعه درون قالب تا انتهای فرآیند وجود ندارد. اما با استفاده از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود می‌توان متغیرهای مورد نظر را در هر محدوده زمانی فرآیند مورد مطالعه قرار داد.

با توجه به اینکه در حین فرآیند هیدروفرمینگ، قالب و سنبه‌های محوری بدون تغییر شکل باقی می‌مانند. در مدل اجزای محدود به عنوان اجسام پوسته‌ای و صلب در نظر گرفته شدند و برای آنها نقاط مرجع تعریف شدند. برای لوله و قید مکانیکی، مدل سه‌بعدی با خواص شکل‌پذیر به کار رفت و توسط المان شش‌وجهی و هشت‌گره‌ای مش‌بندی شدند. اندازه المان‌های لوله به این ترتیب انتخاب شد که ابتدا از المان درشت برای مش‌بندی و سپس المان‌های ریزتر استفاده شد تا با توجه به نتایج و زمان حل اندازه مناسب انتخاب شود. شرایط مرزی به صورت تماس عمومی در نظر گرفته شد. نقطه مرجع قالب به صورت کامل مقید شد. سنبه‌های محوری فقط در جهت محور لوله آزاد بودند و در بقیه جهات چرخشی و طولی مقید شدند. ضریب اصطکاک در تمام سطوح ۰/۰۴ در نظر گرفته شد. برای بارگذاری، نقاط مرجع سنبه‌های محوری به اندازه مقادیر محور افقی نمودار مسیر بارگذاری در راستای محور لوله و در جهت مخالف یکدیگر به سمت مرکز قالب حرکت کردند و فشار داخلی نیز مطابق با نمودار مسیر بارگذاری و متناسب با حرکت سنبه‌های محوری به سطوح داخلی لوله و قید مکانیکی اعمال شد. شکل‌های ۸ و ۹ نشان‌دهنده شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ برای مقادیر مسیر بارگذاری فشار داخلی ۱۵ مگاپاسکال و جابه‌جایی محوری ۳۳ میلی‌متر است. در شکل ۸ از قید مکانیکی داخلی استفاده نشده و بنابراین در دیواره آن عیب چروکیدگی ایجاد شده است.



شکل ۸) مقایسه شبیه‌سازی اجزای محدود و قطعه تجربی

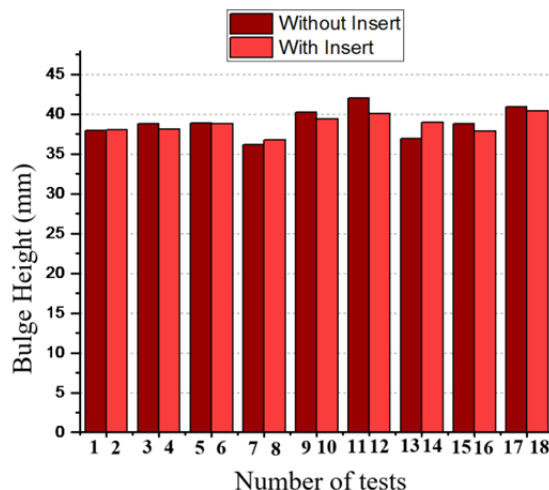
نوع نتیجه	بیشینه ارتفاع برآمدگی بدون حضور قید مکانیکی (میلی متر)	بیشینه ارتفاع برآمدگی با حضور قید مکانیکی (میلی متر)
تجربی	۴۱/۱	۴۰/۵
شبیه سازی	۴۲/۳۷	۴۲/۵
درصد خطا	۳/۰۹	۴/۴

۶- نتایج

در نتایج حاصل از آزمایش های فاقد قید مکانیکی، چروکیدگی مشاهده شد. اما با استفاده از قید مکانیکی، چروکیدگی کناره مهار شد. همچنین نتایج آزمایش ها نشان دهنده این بود که استفاده از قید مکانیکی داخلی سبب کاهش ناحیه چروکیدگی در منحنی بارگذاری و افزایش محدوده پنجره فرآیند می شود.

۶-۱- بررسی ارتفاع برآمدگی و توزیع ضخامت

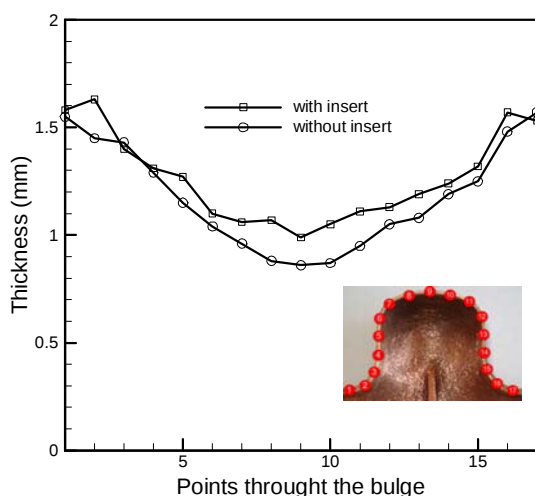
نمودار ۵، مقایسه ارتفاع برآمدگی در قطعه های تولید شده بر اساس آزمایش های جدول ۲ را نشان می دهد. در کلیه آزمایش ها با جابه جایی محوری ۲۷ میلی متر، ارتفاع برآمدگی اتصال های T شکل دارای قید مکانیکی از حالت مشابه آنها در حالت بدون قید مکانیکی بلندتر هستند. این اتفاق به این دلیل رخ داده است که به علت ایجاد چروکیدگی در بدنه اتصال های بدون قید مکانیکی، مواد کمتری به ناحیه شکل دهی فرآیند وارد شده و سبب کاهش ارتفاع برآمدگی آنها شده است. اما در مقادیر جابه جایی محوری ۳۰ و ۳۳ میلی متر، به سبب افزایش مقدار جریان فلز به منطقه شکل دهی، ارتفاع برآمدگی اتصال ها در حالت بدون قید مکانیکی بیشتر از حالت دیگر (استفاده از قید) مشاهده می شود. با توجه به نمودار ۵ می توان دریافت که استفاده از قید مکانیکی بر میزان ارتفاع برآمدگی اتصال های T شکل تاثیر قابل ملاحظه ای نداشته و در برخی موارد سبب افزایش آن نیز شده است.



نمودار ۵) مقایسه نتایج تجربی ارتفاع برآمدگی ایجاد شده در اتصال های T شکل

برای بررسی تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی بر نحوه توزیع ضخامت در لوله ها، مقایسه ای میان میزان ضخامت لبه منطقه شکل دهی دو اتصال در حالت با استفاده از قید مکانیکی و بدون استفاده از آن (در شرایط یکسان فشار داخلی و جابه جایی محوری) صورت پذیرفت. بدین منظور ۱۷ نقطه در لبه منطقه شکل دهی قطعه های تولید شده در فشار داخلی ۱۵ مگاپاسکال و جابه جایی

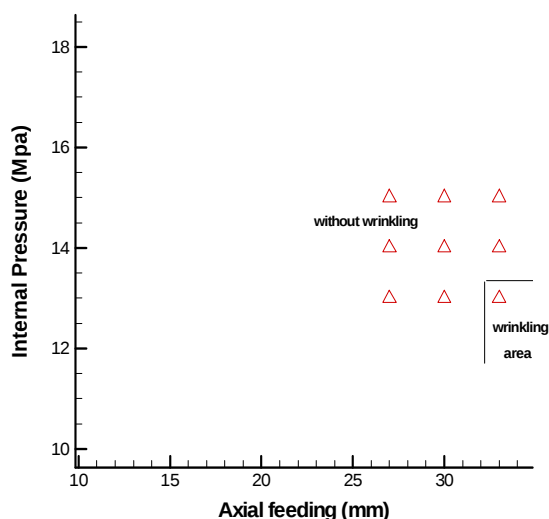
محوری ۳۳ میلی متر در نظر گرفته شد. میزان ضخامت در نقاط یاد شده با کولیس دیجیتال اندازه گیری شد. نمودار ۶ مقادیر به دست آمده برای ضخامت در منطقه برآمدگی لوله ها را نشان می دهد.



نمودار ۶) تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی بر توزیع ضخامت در منطقه بال اتصال های T شکل

۶-۲- بررسی تاثیر استفاده از قید مکانیکی بر محدوده چروکیدگی

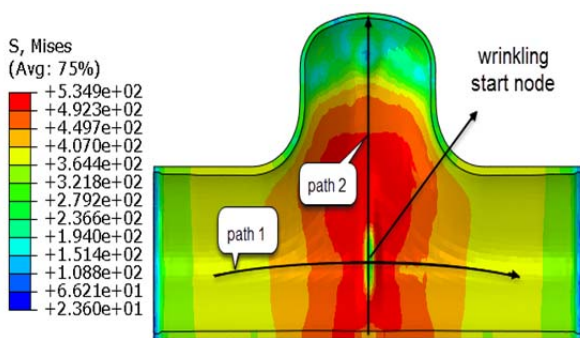
نمودار ۷ نشان دهنده نتایج به دست آمده برای ۹ آزمایش در حالت استفاده از قید مکانیکی داخلی در محدوده چروکیدگی است. با توجه به جدول ۲ و نمودار ۷ مشخص شد که استفاده از قید مکانیکی داخلی برای ۸ حالت به صورت ۱۰۰٪ از ایجاد چروکیدگی جلوگیری به عمل آورده است و اتصال T شکل به صورت کاملاً سالم به دست آمده است. تنها در نقطه آزمایش حالت فشار داخلی ۱۳ مگاپاسکال و جابه جایی ۳۳ میلی متر، به سبب مقدار جابه جایی بالا و فشار داخلی پایین چروکیدگی مشاهده می شود. در این حالت نیز استفاده از قید مکانیکی داخلی سبب کاهش ۸۵/۰۶٪ از طول چروکیدگی شده است. بنابراین از نمودار ۷ نتیجه گرفته می شود که با استفاده از قید مکانیکی داخلی پنجره فرآیند توسعه یافته است و توانایی تولید قطعه های بدون عیب در محدوده چروکیدگی فراهم می شود.



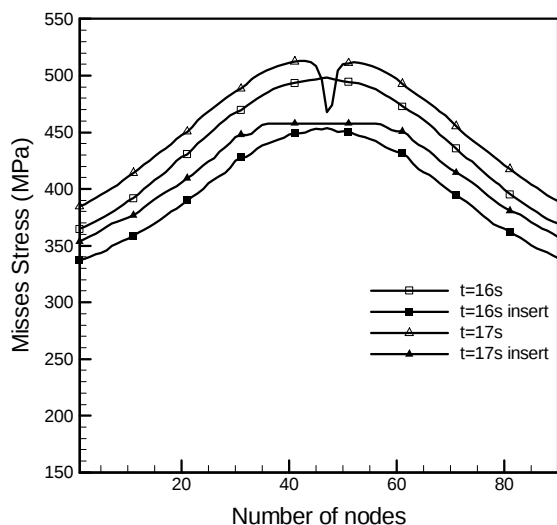
نمودار ۷) تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی بر توسعه پنجره فرآیند

کرنش محوری در طول زمان فرآیند نشان می‌دهد. گره مورد مطالعه در نمودار ۱۲، گره شماره ۵۰۷۷ در شبیه‌سازی‌ها بوده که محل آستانه چروکیدگی است. در ثانیه ۱۷ فرآیند با رسیدن مقدار تنش به آستانه چروکیدگی، کرنش محوری در حالت بدون اعمال قید مکانیکی، دیگر افزایش نمی‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که بعد از شروع چروکیدگی، مقدار آن کاهش می‌یابد و دچار نوسان می‌شود. اما با اعمال قید مکانیکی، مقدار کرنش محوری افزایش بیشتری پیدا کرده است.

نمودار ۱۳ تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی را روی تغییرات تنش محوری در محل آستانه چروکیدگی (گره شماره ۵۰۷۷ شبیه‌سازی) نشان می‌دهد. همان گونه که در نمودار ۱۳ مشاهده می‌شود، تنش محوری تا زمان رسیدن به آستانه چروکیدگی به صورت فشاری افزایش یافته است. در حالت بدون استفاده از قید مکانیکی، در زمان رسیدن به تنش محوری بحرانی چروکیدگی رخ داده است. بعد از آن تغییرات تنش به صورت نوسانی ادامه یافته است. در نمودار ۱۳ مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از قید مکانیکی نیز میزان تنش محوری در زمان یکسان با حالت بدون قید به حد بحرانی چروکیدگی رسیده است. یعنی در حالت استفاده از قید مکانیکی نیز شرایط برای ایجاد چروک فراهم شده است. اما استفاده از قید مکانیکی داخلی سبب شده است که در اتصال T شکل آستانه چروکیدگی رخ ندهد. بنابراین در سراسر فرآیند نیز قطعه بدون عیب شکل‌دهی می‌شود.



شکل ۱۰) مسیر گره‌های مورد بررسی در اتصال T شکل



نمودار ۸) تغییرات تنش ون- میز در مسیر گره‌های افقی در اثر شروع چروکیدگی

از نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود می‌توان برای بررسی نحوه تغییرات تنش و کرنش در ناحیه بحرانی کماتش موضعی در زمان شروع چروکیدگی و همچنین بعد از شکل‌گیری آن استفاده نمود. بدین منظور دو مسیر روی گره‌های شبیه‌سازی اجزای محدود در نظر گرفته شده است. مسیر اول در جهت طولی اتصال T شکل (در جهت افقی) و مسیر دوم در جهت امتداد چروکیدگی ایجاد شده (در جهت عمودی) انتخاب شده است. شکل ۱۰ محل گره‌های مورد بررسی نمودار تنش و کرنش در اتصال T شکل را نشان می‌دهد.

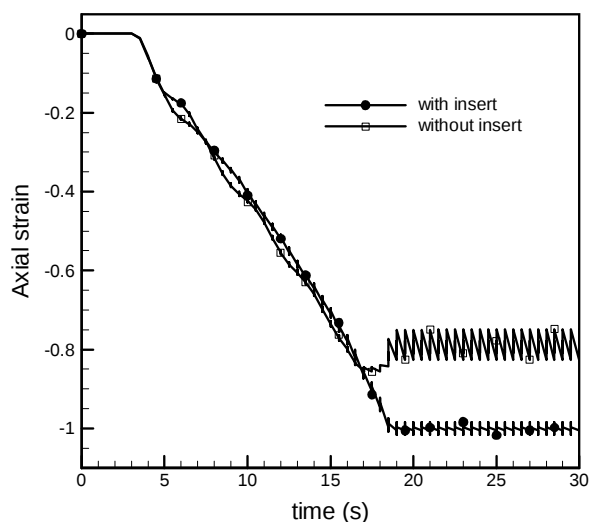
در شبیه‌سازی فرآیند با فشار داخلی ۱۵ مگاپاسکال و جابه‌جایی محوری ۳۳ میلی‌متر، آستانه چروکیدگی در ثانیه ۱۷ فرآیند مشاهده شد. نمودار ۸ نشان‌دهنده میزان تنش در اتصال T شکل در مسیر گره‌های افقی در آستانه ایجاد چروکیدگی است. دو ثانیه مختلف فرآیند در بازه زمانی قبل از ایجاد چروکیدگی تا بعد از شروع چروک در اتصال T در نظر گرفته شده است. در جهت طولی اتصال T شکل، ۹۰ گره مورد بررسی قرار گرفته است. از نمودار ۸ می‌توان دریافت که در ثانیه ۱۶ فرآیند (قبل از ایجاد چروکیدگی)، مجموع تنش در ناحیه مورد انتظار برای ایجاد چروکیدگی بالاتر از قسمت‌های دیگر لوله شده است. در ثانیه ۱۷ فرآیند، در آستانه ایجاد چروکیدگی تنش ون- میز در گره وسط لوله، کاهش ناگهانی را نشان می‌دهد. اما با استفاده از قید مکانیکی داخلی تنش ون- میز در مسیر طولی لوله کمتر از حالت بدون قید مکانیکی بوده و در ثانیه ۱۷ در نواحی گره‌های وسط لوله مقدار تنش ثابت مانده و به مرز تنش‌های بحرانی نرسیده است.

نمودار ۹ نشان‌دهنده میزان کرنش معادل در محدوده زمانی شروع چروکیدگی و در مسیر افقی اتصال T شکل است. با توجه به نمودار مشخص می‌شود که در شبیه‌سازی قطعه بدون قید مکانیکی قبل از شروع چروکیدگی، میزان کرنش در گره‌های محل چروکیدگی افزایش می‌یابد. در ثانیه ۱۷ با رسیدن میزان کرنش به حد بحرانی با توجه به شکل ۸، گره وسط از مسیر مستقیم خارج می‌شود و کرنش‌های فشاری کاهش می‌یابد و بنابراین کرنش معادل در وسط لوله افت پیدا کرده است. اما با استفاده از قید مکانیکی داخلی، کرنش‌ها در گره وسط افزایش می‌یابند.

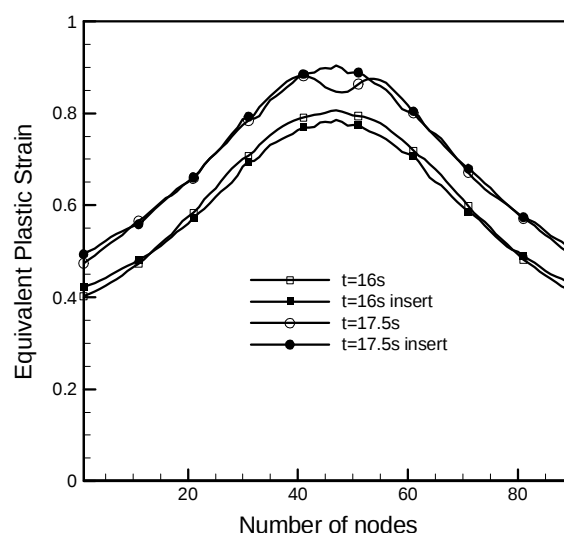
نمودار ۱۰ تغییرات تنش ون- میز در محدوده زمانی شروع چروکیدگی و در مسیر عمودی را نشان می‌دهد. گره‌های سمت چپ نمودار ۱۰، گره‌های پایین قطعه T شکل هستند. گره‌های سمت راست نمودار نیز گره‌های منطقه برآمدگی را در شبیه‌سازی اجزای محدود نشان می‌دهند. در ثانیه ۱۶ فرآیند، میزان تنش در گره‌های مسیر عمودی در پایین قطعه (سمت راست منحنی) بیشتر از نواحی بالای قطعه (سمت چپ منحنی) است. در ثانیه ۱۷ در گره شماره ۱۰، افت تنش ناگهانی به دلیل شروع چروکیدگی مشاهده می‌شود. اما با استفاده از قید مکانیکی تنش‌ها در ثانیه ۱۶ و ۱۷ در ناحیه پایین قطعه تقریباً ثابت است و از منطقه بحرانی دور هستند.

نمودار ۱۱ نشان‌دهنده میزان تغییرات کرنش در گره‌های مسیر عمودی است. میزان کرنش معادل در سمت چپ نمودار (گره‌های پایین اتصال T شکل) در آستانه وقوع چروکیدگی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود برای گره‌های پایین قطعه، کرنش‌های موثر در شبیه‌سازی با قید مکانیکی افزایش بیشتری در بازه ۱۶ تا ۱۷ ثانیه را نشان می‌دهد، اما چروکیدگی اتفاق نیفتاده است.

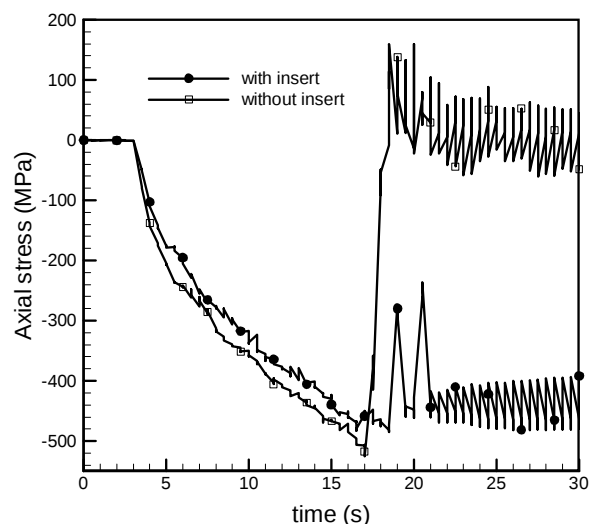
نمودار ۱۲ تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی را روی تغییرات



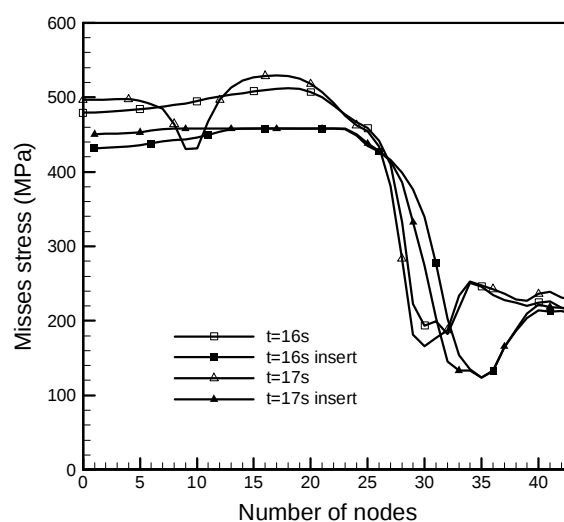
نمودار ۱۲) تاثیر استفاده از قید مکانیکی روی میزان کرنش محوری در طول فرآیند



نمودار ۹) تغییرات کرنش معادل ناشی از شروع چروکیدگی در مسیر گره‌های افقی اتصال T شکل



نمودار ۱۳) تاثیر استفاده از قید مکانیکی روی میزان تنش محوری در طول فرآیند



نمودار ۱۰) تغییرات تنش ون-میز در مسیر گره‌های عمودی در اثر شروع چروکیدگی

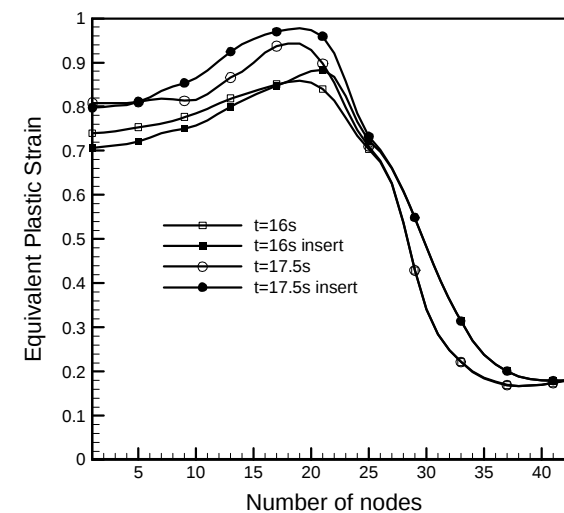
۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در فرآیند هیدروفرمینگ اتصال T شکل، تاثیر استفاده از قید مکانیکی داخلی برای مهار عیب چروکیدگی با استفاده از روش اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی بررسی شده است. از نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی، نتایج زیر حاصل می‌شود.

۱- با استفاده از قید مکانیکی داخلی می‌توان در محدوده چروکیدگی، قطعه‌های سالم تولید کرد و بنابراین محدودیت‌های موجود در شکل‌دهی با فشار داخلی پایین‌تر و جابه‌جایی بالاتر از میان برداشته می‌شود.

۲- مبنای اصلی روش‌های دیگر به‌منظور جلوگیری از ایجاد چروکیدگی کنترل فرآیند در مرحله ابتدایی آن است. در روش ارائه‌شده در این تحقیق، مقاومت لوله در سراسر زمان فرآیند افزایش می‌یابد و می‌توان آزمایش‌ها را به‌صورت فشار ثابت نیز انجام داد.

۳- استفاده از قید مکانیکی تولیدشده از جنس لوله مسی، می‌تواند گزینه مناسبی برای مهار عیب چروکیدگی در لوله‌های مسی باشد.



نمودار ۱۱) تغییرات کرنش معادل ناشی از شروع چروکیدگی در مسیر گره‌های عمودی

2002;42(1):123-138.

3- Navabi Nezhad S, Jaamialahmadi A. Investigation into detection criteria for wrinkling in tube hydroforming. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2018;49(4):829-838. [Persian]

4- Liu G, Peng J, Yuan Sh, Teng B, Li K. Analysis on critical conditions of sidewall wrinkling for hydroforming of thin-walled Tee-joint. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015;97:42-49.

5- Mingtao C, Xiaoting X, Jianghuai T, Heng G, Jianping W. Improvement of formability in T-shaped tube hydroforming by a three-stage punch shape. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;95(5-8):2931-2941.

6- Guo X, Liu Z, Wang H, Wang L, Ma F, Sun X, et al. Hydroforming simulation and experiment of clad T-shapes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;83(1-4):381-387.

7- Huang T, Song X, Liu X. The multi-objective robust optimization of the loading path in the T-shape tube hydroforming based on dual response surface model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;82(9-12):1595-1605.

8- Ashrafi A, Khalili Kh. Studying the stress-strain curve of C12200 copper tube using hydraulic bulge test in T-shape die. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(13):95-106. [Persian]

9- Li Sh, Chen X, Kong Q, Yu Z, Lin Z. Study on formability of tube hydroforming through elliptical die inserts. Journal of Materials Processing Technology. 2012;212(9):1916-1924.

10- Yuan SJ, Cui XL, Wang XS. Investigation into wrinkling behavior of thin-walled 5A02 aluminum alloy tubes under internal and external pressure. International Journal of Mechanical Sciences. 2015;92:245-258.

11- Chen M, Xiao X, Tong J, Guo H, Wen J. Optimization of loading path in hydroforming of parallel double branched tube through response surface methodology. Advances in Engineering Software. 2018;115:429-438.

12- Yuan Sh, Wang X, Liu G, Wang ZR. Control and use of wrinkles in tube hydroforming. Journal of Materials Processing Technology. 2007;182(1-3):6-11.

13- Tang ZJ, Liu G, He ZB, Yuan SJ. Wrinkling behavior of magnesium alloy tube in warm hydroforming. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010;20(7):1288-1293.

14- Chen YZ, Liu W, Xu YC, Yuan SJ. Analysis and experiment on wrinkling suppression for hydroforming of curved surface shell. International Journal of Mechanical Sciences. 2015;104:112-125.

15- Yuan Sh, Yuan W, Wang X. Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming. Journal of Materials Processing Technology. 2006;177(1-3):668-671.

16- Mohammadalazade F, Gorji AH, Bakhshi M, Elyasi M. Modifying internal pressure and axial feeding loading paths in hydroforming process of cylindrical stepped tube to improve thickness distribution. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2017;48(4):389-400. [Persian]

17- Olabi AG, Alaswad A. Experimental and finite element investigation of formability and failures in bi-layered tube hydroforming. Advances in Engineering Software. 2011;42(10):815-820.

18- Chu E, Xu Y. Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications, part I: Buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes.

زیرا سبب افزایش مقاومت لوله و در نتیجه افزایش نیروی لازم برای ایجاد عیب چروکیدگی خواهد شد. همچنین دارای انعطاف پذیری مناسبی در طول فرآیند شکل دهی است.

۴- در آزمایش‌های محدوده چروکیدگی، استفاده از قید مکانیکی داخلی برای ۸ حالت به صورت ۱۰۰٪ از ایجاد چروکیدگی جلوگیری به عمل آورده و اتصال T شکل به صورت کاملاً سالم به دست آمده است. به صورتی که چروکیدگی‌هایی با طول‌های بلندی مانند ۶۹/۵ و ۶۷/۱ میلی‌متر را نیز مهار نموده است.

۵- در فشار داخلی ۱۳ مگاپاسکال و جابه‌جایی ۳۳ میلی‌متر، به سبب مقدار جابه‌جایی بالا و فشار داخلی پایین، چروکیدگی شدید وجود دارد. در این حالت نیز استفاده از قید مکانیکی داخلی سبب کاهش ۸۵/۰۶٪ از طول چروکیدگی شده و طول چروکیدگی از ۷۴/۳ به ۱۱/۱ میلی‌متر کاهش یافته است.

۶- وجود قید مکانیکی بر میزان ارتفاع برآمدگی اتصال‌های T شکل تاثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته و در برخی موارد سبب افزایش آن نیز شده است.

۷- استفاده از قید مکانیکی داخلی با مهار کامل عیب چروکیدگی، سبب توسعه پنجره فرآیند هیدروفرمینگ می‌شود.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند که امکان انجام این پژوهش را فراهم نمود، تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی و چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتوای علمی و ادبی مقاله حاضر، مستخرج از فعالیت علمی نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل پژوهشی مستقل بوده و هیچ‌گونه تضاد منافی با اشخاص یا سازمان‌های دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: حسین فرجی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده مقدمه/نگارنده بحث/تحلیلگر داده‌ها (۴۰٪)؛ خلیل خلیلی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/روش‌شناس (۳۰٪)؛ امیر اشرفی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث/تحلیلگر داده‌ها (۳۰٪)

منابع مالی: بخشی از هزینه‌های منتج به این پژوهش از حمایت مالی دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند تامین شده و بخشی از آن شخصی بوده است.

۸- پی‌نوشت

علامت

P	نیرو (نیوتون)
E	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
I	گشتاور دوم سطح (mm ⁴)
L	طول موثر کمانش (میلی‌متر)
n	مد کمانش

منابع

1- Eftekhari Shahri SE, Ahmadi Brooghani SY, Khalili Kh, Mohammadi A. Improve the formability in tube hydroforming process using ultrasonic vibrations. Modares Mechanical Engineering. 2014;14(5):63-72. [Persian]

2- Koç M, Altan T. Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process. International Journal of Machine Tools and Manufacture.

Thin Walled Structures. 1999;34(4):295-330.

21- Jones RM. Buckling of bars, plates, and shells. Blacksburg: Bull Ridge Publishing; 2006.

22- Ashrafi A, Khalili Kh. Investigation on the effects of process parameters in pulsating hydroforming using Taguchi method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture. 2016;230(7):1203-1212.

International Journal of Mechanical Sciences. 2004;46(2):263-283.

19- Aydemir A, De Vree JHP, Brekelmans WAM, Geers MGD, Sillekens WH, Werkhoven RJ. An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes. Journal of Materials Processing Technology. 2005;159(3):303-310.

20- Asnafi N. Analytical modelling of tube hydroforming.