



بررسی پارامترهای تاثیر گذار در فرآیند بشکه ای شدن و بدست آوردن منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ‌نزن با معیار GTN

مریم گران قراخیلی¹، حمید گرجی^{2*}، محمد بخشی جویباری³، محمد جواد میرنیا⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* بابل، صندوق پستی 47148-71167، hamidgorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 بهمن 1395

پذیرش: 15 فروردین 1396

ارائه در سایت: 08 تیر 1396

کلید واژگان:

منحنی حد شکل دهی

معیار شکست نرم GTN

لوله فولادی زنگ نزن

آزمون بالچ آزاد

چکیده

هیدروفرمینگ لوله فرآیندی است که در سال‌های اخیر برای تولید قطعه‌های یکپارچه و بدون درز جوش مورد توجه قرار گرفته است. پیش‌بینی عددی پارگی در این فرآیند به منظور طراحی مناسب ابزارآلات امری مهم می‌باشد. در این پژوهش، شکل‌پذیری لوله فولادی زنگ نزن 304 توسط آزمون بالچ آزاد بصورت تجربی و عددی به منظور تعیین منحنی حد شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. مدل گارسون- نیولمن (GTN) یک مدل میکرومکانیکی برای پیش‌بینی شکست نرم فلزات می‌باشد. به منظور تعیین پارامترهای تعریف کننده مدل آسیب GTN، ابتدا تست کشش تجربی از نمونه استاندارد و نیز شبیه سازی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شد. با بکارگیری این معیار در نرم‌افزار آباکوس و مقایسه نمودار نیرو - جابجایی تست کشش تجربی و حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود، پارامترهای مدل GTN توسط روش معکوس به‌دست آورده شد. سپس با استفاده از معیار شکست نرم GTN، پارامترهای هندسی قالب در هیدروفرمینگ بالچ آزاد بررسی گردید و نمودار حد شکل‌دهی لوله فولادی 304 بصورت عددی به‌دست آمد. برای صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، آزمایش‌های تجربی نیز انجام شد که تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. در نهایت بکارگیری مدل مذکور در هیدروفرمینگ قطعه T شکل بصورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت.

Investigation of the effective parameters in the bulging process and obtaining Forming limit curve of the stainless steel tube by the GTN criterion

Maryam Geran Gharakheyli, Hamid Gorji*, Mohammad Bakhshi, Mohammad Javad Mirnia

Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

*47656-63391, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 14 February 2017

Accepted 04 April 2017

Available Online 29 June 2017

Keywords:

Forming limit curve

GTN ductile fracture criterion

Stainless steel tube

Free bulge test

ABSTRACT

Tube hydroforming is a process that has been considered to produce integrated and seamless parts in recent years. The numerical prediction of tearing to design the right equipment in this process is important. In this study, the formability of 304 stainless steel tube by free bulge test was experimentally and numerically evaluated to determine the forming limit diagram. The Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) is a micromechanical model to predict ductile fracture of metals. In order to determine the defining parameters of the GTN damage model, the experimental tensile test of the standard sample and the finite element simulation using ABAQUS software was performed. Using this criterion in the ABAQUS software and comparing the force-displacement diagram obtained from the experimental tensile test and the finite element simulation, the parameters of the GTN model were obtained by the inverse method. Then, the geometrical parameters of the die in the free bulge hydroforming process were investigated by the GTN ductile fracture criterion and the forming limit diagram of the 304 stainless steel tube was numerically obtained. The experimental tests were also carried out to verify the results of the finite element simulation. Acceptable agreement is shown.

بیان کرد [1].

1- مقدمه

منحنی حد شکل‌دهی (FLD)¹، محدوده کرنش‌هایی است که یک ورق یا لوله می‌تواند تحمل کند و نشان‌دهنده ارتباط بین کرنش‌های صفحه‌ای

شکل‌پذیری ورق یا لوله فلزی، توانایی آن به تغییر شکل پلاستیک است، بدون آن‌که در آن عیبی مانند گلوپی شدن، پارگی و چروکیدگی بروز کند. این عیب‌ها را می‌توان به عنوان معیارهایی به‌منظور توصیف شکل‌پذیری ماده

¹ Forming Limit Diagram

Please cite this article using:

M. Geran Gharakheyli, H. Gorji, M. Bakhshi, M. J. Mirnia, Investigation of the effective parameters in the bulging process and obtaining Forming limit curve of the stainless steel tube by the GTN criterion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 365-376, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بالج غیرخطی بوده و پیچیده تر از مسیر کرنش های ورق حاصل از فرآیند استمپینگ می باشد.

برونت و همکاران [9] منحنی های حد شکل دهی سه ورق فلزی آلومینیومی به همراه یک ورق فلزی فولاد نرم را با استفاده از مدل آسیب GTN مورد بررسی قرار دادند و پارامترهای مدل را با به کارگیری آزمون کشش تک محوره به دست آوردند. زانگ و همکاران [10] اثر ضریب اصطکاک را بر شکل گیری زاویه های موجود در هیدروفرمینگ لوله هایی از جنس آلایژ آلومینیوم 5052 را براساس مدل شکست نرم GTN مورد بررسی قرار دادند. آنان نتایج حاصل از شبیه سازی را با انجام آزمایش تجربی تایید کردند و مشاهده کردند که مدل شکست نرم GTN می تواند پیش بینی قابل اطمینانی برای پارگی ارائه دهد. آن ها مشاهده کردند که با کاهش ضریب اصطکاک پارگی حذف می گردد (حداکثر نازک شدگی کاهش می یابد).

فلاحی و همکاران [11] منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ نزن 304 را با استفاده از معیار حداکثر نازک شدگی به دست آوردند. همچنین به بررسی عددی اثر نحوه بارگذاری و هندسه قالب (شعاع گوشه و طول ناحیه تغییر شکل) بر مسیر کرنش و ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در لوله پرداختند.

مسلمی نائینی و همکاران [12] استفاده از معیارهای ناپایداری پلاستیک (هیل، سوئیفت برای لوله ها و سوئیفت برای ورق ها) برای پیش بینی گلوپی شدن و منحنی حد شکل دهی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از این معیارهای کرنش های حدی به دست آمد. ناهمسانگردی لوله ها در نظر گرفته شد و از معیار تسلیم درجه 2 بارلات استفاده شده است. برای صحت سنجی نتایج تحلیلی، آزمایش بالج در مسیرهای بارگذاری مختلف انجام و منحنی حد شکل دهی تجربی به دست آمد. با بررسی های انجام شده مشخص شد که معیار ناپایداری سوئیفت برای لوله ها بهترین پیش بینی را برای منحنی حد شکل دهی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله دارد.

هاشمی و همکاران [13] برای پیش بینی حد شکل دهی لوله های آلومینیومی AA6063 در دمای بالا از هفت معیار شکست نرم استفاده کردند. برای کالیبره کردن معیارهای شکست نرم، از آزمایش کشش در دماها و نرخ کرنش های مختلف استفاده شد. فرآیند هیدروفرمینگ لوله یک قطعه مربعی در نرم افزار آباکوس شبیه سازی و منحنی های بارگذاری با تغذیه محوری متفاوت بر روی لوله اعمال تا شعاع گوشه شکل گرفته به وسیله معیارها پیش بینی شود و از سوی دیگر آزمایش تجربی نیز انجام شد. نتایج نشان می دهد که معیارهای شکست نرم اصلاح شده محل رخ دادن ترکیدگی را به خوبی مشخص می کنند و معیار آیدادی اصلاح شده با خطای کمتری نسبت به دیگر معیارها شعاع گوشه قطعه مربعی را در دماهای بالا پیش بینی می کند.

محمدی و همکاران [14] منحنی حد شکل دهی لوله های دو لایه از جنس آلومینیوم و مس را با استفاده از فرآیند بالج به دست آوردند. در ادامه با صحت سنجی شبیه سازی با نرم افزار آباکوس، اثر پارامترهای فرآیند مانند طول ناحیه بالج، شعاع ورودی قالب و مسیر بارگذاری بر مسیر کرنش را بررسی نمودند. با توجه به بررسی های انجام شده و با انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترها، طراحی آزمایش مناسب برای توزیع کرنش جهت به دست آوردن منحنی حد شکل دهی انجام و منحنی حد شکل دهی لوله های دو لایه به دست آمد.

بزرگتر، ϵ_1 و کوچکتر، ϵ_2 است. در فرآیندهای شکل دهی ورق و لوله های فلزی پارامتر β که بیان کننده نسبت کرنش ϵ_2 به ϵ_1 است، متأثر از عواملی مانند هندسه قالب، ابعاد اولیه ورق، نیروی ورق گیر و مکانیزم روان کاری می باشد. کاربرد نمودارهای حد شکل دهی در طراحی قطعه، بهینه سازی قالب، آزمایش قالب و کنترل کیفیت در حین تولید است [2,3].

هیدروفرمینگ لوله فرآیندی است که در سال های اخیر برای تولید قطعه های لوله ای یک پارچه و بدون درز مورد توجه قرار گرفته است. شکل دهی قطعه های لوله ای با این فرآیند دارای مزایای متعددی است که به عنوان نمونه می توان به بهبود خواص مکانیکی، کاهش مراحل تولید، افزایش مقاومت به خوردگی به دلیل عدم استفاده از عملیات جوش کاری، کاهش وزن، کاهش هزینه قالب، افزایش دقت و افزایش بهره وری مواد اشاره نمود [4].

در فرآیند هیدروفرمینگ، لوله اولیه با اعمال همزمان فشار یک سیال به سطح داخلی لوله و نیروی محوری به دو انتهای آن به شکل قالب موردنظر تغییر شکل می یابد. کاهش وزن و یکپارچگی قطعات از مهمترین خصوصیات این فرآیند در مقایسه با روش های سنتی مانند ریخته گری است [5]. تولید محصولات پیچیده صنعتی از لوله های فلزی با هدف افزایش نسبت استحکام به وزن سازه ها، بویژه کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه، در سال های اخیر مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است. پارگی این فرآیند به عنوان یکی از اصلی ترین عوامل محدود کننده، با استفاده از منحنی های حد شکل دهی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

مکانیزم شکست نرم در فلزات به صورت تدریجی بوده و شامل مرحله جوانه زنی، رشد و بهم پیوستگی میکرو حفره ها در محل ناخالصی ها و ذرات فاز دوم در اثر تغییر شکل پلاستیک می باشد. به طور معمول با افزایش تغییر شکل پلاستیک و فعال شدن هر سه مکانیزم بالا، ماده به تدریج دچار نرم شوندگی و در نهایت دچار شکست می شود. با توجه به این موضوع مدل های مختلفی توسط محققان برای پیش بینی صحیح رفتار تسلیم و شکست یک فلز نرم ارائه شده است. یکی از مورد توجه ترین این معیارها، مدل ارائه شده توسط گارسون¹ می باشد که بعدها این مدل با اصلاحاتی که تیورگارد² و نیدلمن³ بر روی آن انجام دادند، تصحیح شد و به همین دلیل به مدل گارسون- تیورگارد- نیدلمن (GTN)⁴ شناخته شده و برای مدل نمودن عددی شکست مورد استفاده قرار گرفته است [6]. معیار GTN به دلیل در نظر گرفت تغییرات کسر حجمی حفره ها به عنوان یک مدل شکست نرم میکرومکانیکی شناخته می شود.

تاناکا و همکاران [7] اثر آنیل کردن را بر روی قابلیت شکل پذیری لوله های فولادی زنگ نزن 304 مورد بررسی قرار دادند. در ابتدا اثر دما و مدت زمان نگهداری در آنیل کردن را بر روی قابلیت شکل پذیری ماده، با استفاده از آزمون کشش بررسی کردند. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که آنیل کردن سبب بهبود شکل پذیری در لوله های فولادی می شود.

پامبهار و ناراسیمهان [8] با استفاده از آزمون بالج، نمودار حد شکل دهی لوله های از جنس فولاد DQ 0.8 و آلومینیوم 5182 را به دست آوردند. آنان مسیر کرنش مربوط به بارگذاری های مختلف را به دست آوردند تا شرایط مناسب برای شکل دهی تعیین گردد. از سوی دیگر، با استفاده از فرآیند استمپینگ، نمودار حد شکل دهی ورق های از جنس ذکر شده در بالا را نیز به دست آوردند و مشاهده کردند که مسیر کرنش های به دست آمده از آزمایش

¹ Gurson

² Tvergaard

³ Needleman

⁴ Gurson- Tvergaard- Needleman

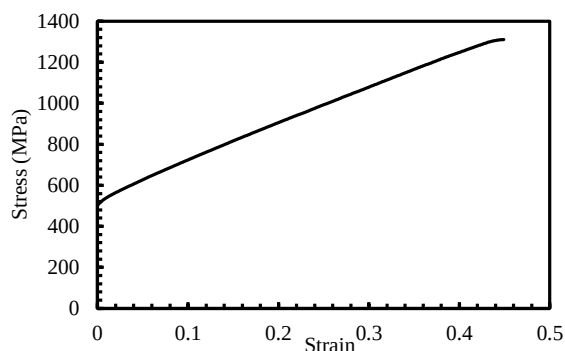


Fig. 2 True stress-strain curve of AISI 304 steel tube

شکل 2 نمودار تنش- کرنش حقیقی لوله فولادی زنگ نزن AISI 304

جدول 1 خواص مکانیکی و فیزیکی لوله فولاد زنگ نزن AISI 304

Table 1 Mechanical and physical properties of AISI 304 steel tube

مقدار	خواص
7930	چگالی (kg/m^3)
200	مدول یانگ (GPa)
0.29	ضریب پواسون
480	تنش تسلیم (MPa)
1300	تنش نهایی (MPa)

جدول 2 ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ نزن AISI 304

Table 2 Chemical components of AISI 304 steel tube

درصد وزنی	عنصر
0.08	C
19	Cr
9	Ni
2	Mn
0.045	P
1	Si
0.03	S
69	Fe

همراستا بودن قسمت بالایی و پایینی قالب تا آخر آزمایش، دو قطعه به عنوان تنظیم کننده طول بالچ در نظر گرفته شد که به بوش های بالایی و پایینی وصل می شود. در "شکل 3-ب" شماتیکی از قالب آزمایش بالچ نشان داده شده است. برای انجام آزمایش بالچ، از دستگاه کشش اونیورسال و پمپ هیدرولیکی نشان داده شده در "شکل 4" استفاده شده است. خروجی پمپ به قسمت ورودی سیال در سنبه متصل شده و روغن وارد لوله می شود. با افزایش فشار، در لوله تغییر شکل پلاستیک بوجود می آید.

ناحیه تغییر شکل لوله مطابق "شکل 5"، شبکه بندی شده است. بدین ترتیب، برای به دست آوردن مقدار تغییر شکل می توان کرنش در راستاهای مختلف را اندازه گیری نمود. شبکه بندی به روش الکتروشیمیایی انجام شده و دایره های به قطر 2.5mm بر روی لوله حک گردید.

برای به دست آوردن کرنش ها و در پی آن به دست آوردن منحنی حد شکل دهی، دو پارامتر هندسی شعاع ورودی محفظه قالب و طول بالچ در شرایط بارگذاری آزاد و با تغذیه محوری تغییر داده شده و تاثیر آن ها مورد مطالعه قرار گرفتند.

به منظور صحت سنجی نتایج مربوط به منحنی های حد شکل دهی به دست آمده، شکل دهی قطعه سه راهی انجام گردید. در "شکل 6-الف" مجموعه قالب مربوط به این بررسی نشان داده شده است. این مجموعه از دو سنبه (که نقش آب بند و همچنین ورودی سیال به لوله را دارند)، قالب بالایی

ویکتور و کیزلیک [15] با استفاده از آزمایش کشش کسر حجمی حفره ها را در لحظه شکست به دست آورد. بدین منظور سطح شکست نمونه کشیده شده را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده نمودند و با آنالیز سطح شکست، مقدار کسر حجمی حفره ها در لحظه شکست به دست آمد. با قرار دادن پارامترهای GTN در شبیه سازی آزمایش کشش و مقایسه منحنی نیرو جابجایی آن با آزمایش تجربی تطابق قابل قبولی مشاهده گردید. پنگ و همکارانش [16] نمودار حد شکل دهی ورق های فلزی با استفاده از معیارهای شکست متفاوت به دست آوردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که در ورق های مسی با سایز دانه های مختلف نمودار حد شکل دهی با افزایش اندازه دانه در مسیرهای شکل دهی متفاوت به طور چشمگیری کاهش می یابد. از دیگر نتایج آنان می توان به این نکته اشاره کرد که مدل M-K و GTN-Thomason دقت بالاتری در پیش بینی مقدار فشار و ارتفاع پارگی دارند.

هدف از پژوهش حاضر، به کارگیری معیار شکست نرم GTN برای پیش بینی عددی پارگی و به دست آوردن منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ نزن 304 با استفاده از این معیار می باشد. در این راستا، با در نظر گرفتن معیار شکست نرم GTN، تاثیر پارامترهای هندسی قالب بر مسیرکرنش ها نیز بررسی شدند. در نهایت، برای صحت سنجی نمودار حد شکل دهی به دست آمده، شکل دهی قطعه سه راهی مورد مطالعه قرار گرفت تا مشخص شود کدامیک از دو حالت وارد کردن منحنی حد شکل دهی و وارد کردن ضرایب معیار GTN (مدل آسیب GTN) می توانند پارگی را درست پیش بینی کنند.

2- مراحل آزمایشگاهی

2-1- آزمایش کشش

در این پژوهش، از لوله فولادی زنگ نزن 304 با قطر خارجی 25 mm و ضخامت 1 mm استفاده شد. به منظور تعیین خواص مکانیکی لوله، آزمون کشش لوله مطابق استاندارد ASTM-E8 انجام گردید. نمونه های آزمون کشش توسط برشکاری سیمی در جهت محوری از لوله آماده گردید. نمونه ها در دمای محیط و تا حد پارگی مطابق با "شکل 1" کشیده شدند و منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی نمونه ها به دست آمد که در "شکل 2" نشان داده شده است. خواص مکانیکی به دست آمده از آزمون کشش و ترکیب شیمیایی و به ترتیب در جدول های 1 و 2 ارائه شده است.

2-2- آزمون بالچ و شکل دهی سه راهی

برای به دست آوردن نمودار حد شکل دهی از آزمایش بالچ استفاده شد. "شکل 3-الف" مجموعه قالب مربوط به این آزمایش را نشان می دهد. این مجموعه قالب، از دو سنبه و دو نیمه قالب (بوش) تشکیل شده است. لوله از داخل سوراخ بوش ها (قطر داخلی سوراخ بوش برابر با قطر خارجی لوله می باشد به طوری که لوله به حالت جذب و روان وارد آن می شود). عبور کرده و از دو طرف توسط سنبه ها آب بندی می گردد. برای تنظیم مقدار طول بالچ و

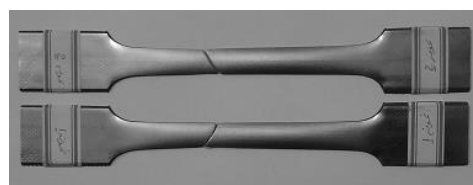


Fig. 1 The specimens obtained from tube tension test

شکل 1 نمونه های کشیده شده در آزمایش کشش

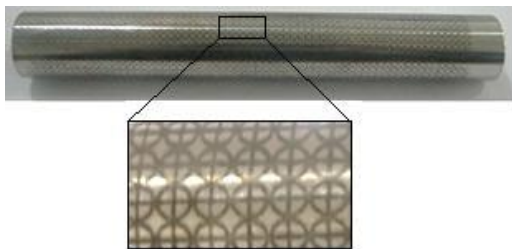


Fig. 5 Circle grid etched on the tube

شکل 5 لوله شبکه بندی شده مدور

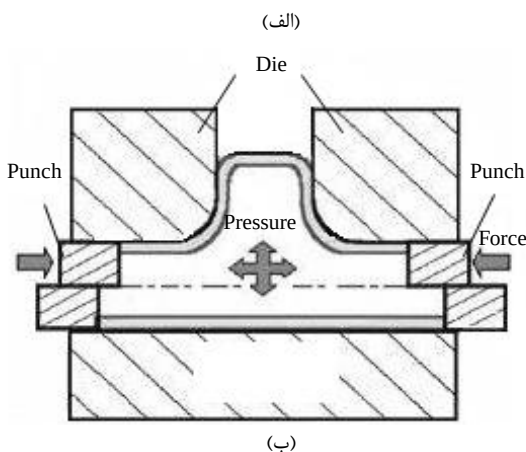
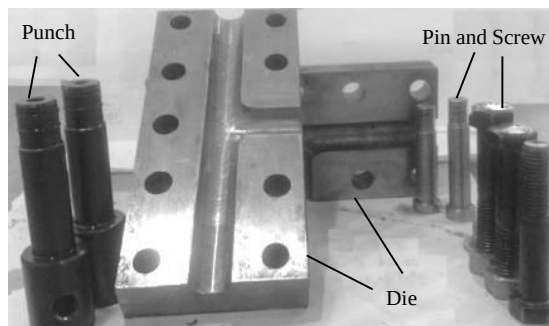


Fig.6 (a) Experimental setup of T-shape Hydroforming (b) A schematic of setup of T-shape Hydroforming

شکل 6 الف- قالب سه راهی مربوط به فرآیند هیدروفرمینگ قطعه T شکل ب-

شماتیکی از قالب سه راهی مربوط به فرآیند هیدروفرمینگ قطعه T شکل

پتانسیل تسلیم به صورت زیر تعریف می گردد که برابر با صفر می باشد:

$$w = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma}\right)^2 + 2q_1(f^*) \times \cosh\left(\frac{3}{2}q_2\frac{\sigma_h}{\sigma}\right) - (1 + q_3(f^*)^2) \quad (1)$$

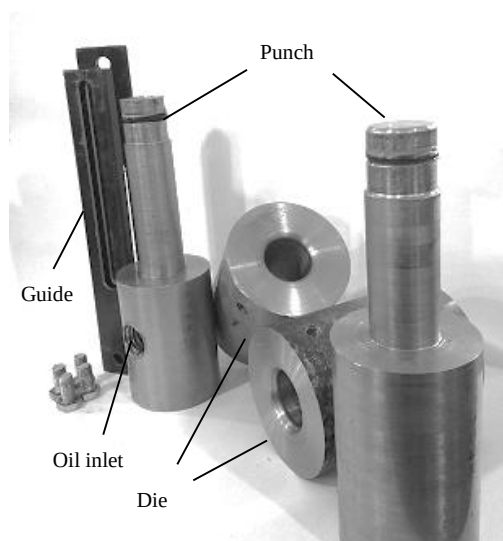
در رابطه (1)، σ_e تنش مؤثر با توجه به معیار تسلیم، σ تنش سیلان ماده، σ_h تنش میانگین (تنش هیدرواستاتیک)، f^* کسر حجمی حفره با در نظر گرفتن پدیده انقباض و q_1 ، q_2 و q_3 ثابت های مدل GTN می باشند. در شبیه سازی مکانیک شکست با مدل GTN، تابع پتانسیل تسلیم فون- میز با تابع پتانسیل تسلیم بالا جایگزین می گردد. توزیع همگنی از حفره های کروی فرض شده است.

پیشروی شکست نرم به سه فاز تقسیم می شود: تشکیل اولیه حفره ها، رشد حفره ها و به هم پیوستن حفره ها که منجر به رشد ترک می گردد. بخاطر وجود تنش های خارجی در مواد نرم، حفره های اولیه نرم تشکیل می شوند، که ریز- تخلخل نامیده می شوند. مواد و آلیاژهای کاربردی معمولاً به خاطر ساختار آلیاژی و فرآیند تولیدشان شامل فاز ثانویه هستند. تشکیل اولیه حفره ها در آخال های غیرفلزی در مدل GTN با فرض ساده یک آسیب با

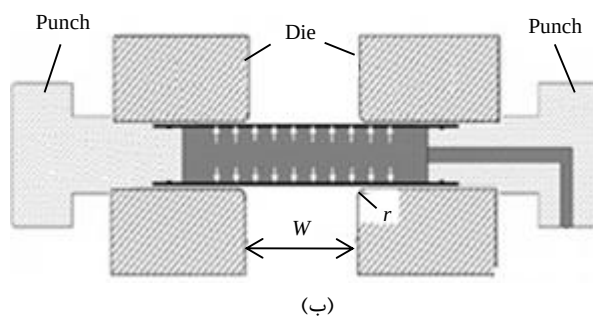
و قالب پایینی تشکیل شده است. قطر داخلی قالب به اندازه قطر خارجی لوله و قطر قسمت سه راهی نیز 25.6 mm می باشد. این آزمون در شرایط بارگذاری آزاد و با تغذیه محوری انجام گردید. شماتیکی از قالب مربوط به شکل دهی قطعه سه راهی در "شکل 6-ب" قابل مشاهده می باشد.

3- مدل آسیب GTN

این ایده اولین بار توسط گارسون، تورگاردو نیدلمن، براساس مدل آسیب آن ها ارایه گردید که به همین دلیل به مدل GTN شناخته شده است و برای مدل نمودن عددی شکست ورق مورد استفاده قرار گرفت. پارامتر اصلی مدل GTN، تابع پتانسیل تسلیم است که این تابع بیانگر اثر تکامل حفره بر روی رفتار تسلیم ماده است. برای یک حفره کروی با مدل همسانگرد ماده، تابع



(الف)



(ب)

Fig. 3 (a) Experimental setup of bulge test (b) A schematic of setup of bulge test

شکل 3 الف- قالب استفاده شده در فرآیند بالج ب- شماتیکی از قالب آزمایش بالج

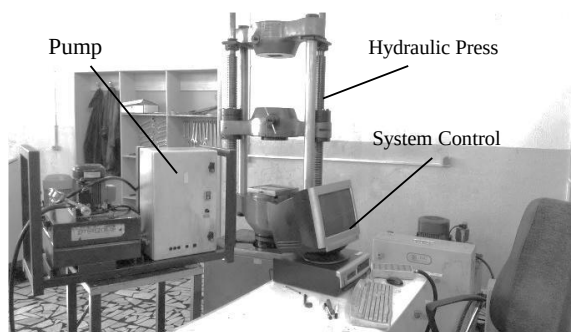


Fig. 4 Universal testing machine and hydraulic pressure unit

شکل 4 دستگاه آزمایش اونیورسال و پمپ هیدرولیک اعمال فشار

شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون کشش در بازه‌ای مشخص به نحوی تغییر داده شدند تا نمودار نیرو-جابجایی آزمون تجربی و شبیه‌سازی تا حد امکان بر یکدیگر منطبق گردند. در قسمت خواص مواد^۳ و در زیر بخش مربوط به اعمال خواص پلاستیک^۴، گزینه مربوط به خواص پلاستیک مواد متخلخل را انتخاب و مقدار سه پارامتر q_1 ، q_2 و q_3 به نرم‌افزار اعمال شد. در ادامه در همین زیر بخش، با انتخاب گزینه معیار گسیختگی متخلخل^۵ و جوانه‌زنی^۶ حفره‌ها پارامترهای دیگر به نرم‌افزار اعمال گردیدند. در "شکل ۸" منحنی نیرو-جابجایی آزمایش تجربی و شبیه‌سازی بدون معیار GTN و نیز با استفاده از معیار GTN نشان داده شده است. با توجه به شکل، انطباق قابل قبولی بین منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی به‌کار گرفته شده با معیار GTN وجود دارد، در حالی که در شبیه‌سازی بدون این معیار، ناحیه افت مشاهده نمی‌شود و اختلاف بسیار وجود دارد. در "شکل ۹" مدل تغییر شکل یافته شبیه‌سازی آزمایش کشش که دچار پارگی شده، نشان داده شده است.

4-2- شبیه‌سازی آزمون بالج لوله و هیدروفورمینگ برای شکل دادن

قطعه T شکل

در شبیه‌سازی‌های فرآیند بالج و نیز هیدروفورمینگ برای شکل‌دهی قطعه T شکل، لوله به صورت شکل‌پذیر و جامد توپر و اجزای قالب به صورت صلب و به دلیل متقارن بودن اجزای قالب و لوله، نصف مجموعه قالب مدل گردید. در قسمت خواص^۷، نمودار تنش-کرنش حقیقی به‌دست آمده از آزمایش تجربی و مقادیر به‌دست آمده برای ثابت‌های معیار شکست نرم GTN تعریف و به قطعه اعمال گردید. شبیه‌سازی شکل‌دهی قطعه T شکل به دو صورت وارد کردن ضرایب GTN و وارد کردن منحنی حد شکل‌دهی در قسمت خواص مواد در نرم‌افزار انجام گردید. هر دو فرآیند، در یک مرحله و به صورت دینامیکی و صریح مدل شدند. در "شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب" به ترتیب مدل

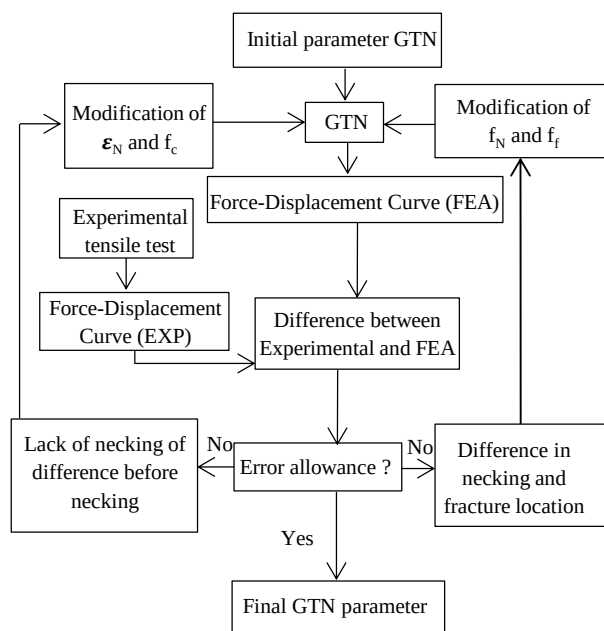


Fig. 7 Algorithm to obtain the coefficient of GTN

شکل ۷ الگوریتم به‌دست آوردن مقادیر ضرایب GTN

کسر حجمی اولیه نشان داده می‌شود. حفره‌های اولیه در ماده باعث ایجاد اثر یک شکاف^۱ محلی می‌شوند که همچنین نقش یک تمرکز تنش محلی چند محوره را نیز خواهد داشت. این حالت تنش باعث رشد آن منفذ (خلل و فرج) می‌گردد. با افزایش و ادامه باردهی، بر اثر رشد حجمی حفره، این امر در نهایت منجر به انعقاد حفره، تشکیل اولیه ترک و رشد ترک می‌گردد [6].

معیار GTN دارای ۹ ضریب است که عبارتند از: q_1 ، q_2 و q_3 (پارامترهای تعدیل کننده سطح تسلیم)، f_0 (کسر حجمی اولیه حفره‌ها)، S_N (انحراف استاندارد توزیع حفره‌ها)، f_c (مقدار بحرانی کسر حجمی حفره‌ها)، f_f (کسر حجمی حفره‌ها در لحظه نهایی شکست)، f_N (کسر حجمی حفره‌ها مربوط به ذرات در دسترس برای به هم پیوستن حفره‌ها) و ϵ_N (کرنش متوسط به هم پیوستن حفره‌ها).

4-4- شبیه‌سازی اجزای محدود

1-1- تعیین پارامترهای مدل آسیب GTN

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهای مورد مطالعه در این پژوهش از نرم‌افزار آباکوس نسخه 6-11 استفاده شد. برای آزمون کشش، نمونه به‌صورت جامد توپر^۲ و شکل‌پذیر مدل گردید. خواص مواد مطابق جدول ۱ و همچنین قسمت پلاستیک نمودار "شکل ۱" (نمودار تنش-کرنش حقیقی) به نرم‌افزار معرفی و به لوله اعمال گردید. معیار شکست نرم دارای ۹ پارامتر می‌باشد که چهار پارامتر با استفاده از شبیه‌سازی‌های مکرر و مقایسه نمودار نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، به‌دست آمدند. در شبکه‌بندی نمونه از المان C3D8R [17] استفاده گردید.

همان‌طور که بیان شد، معیار GTN دارای ۹ ضریب می‌باشد که عبارتند از: q_1 ، q_2 و q_3 ، f_0 ، S_N ، f_c ، f_f ، f_N و ϵ_N . براساس پیشنهاد تیورگارد و نیدلمن و با توجه به بررسی‌های دیگر محققان، مشاهده شد که می‌توان مقدار سه پارامتر q_1 ، q_2 و q_3 را برای هر نوع جنسی یکسان و به ترتیب برابر با ۱.۵، ۱ و ۲.۲۵ فرض نمود [18-22]. در واقع q_3 توان دوم q_1 می‌باشد. همچنین مقدار S_N معمولاً برابر با ۰.۱ بدون توجه به جنس ماده فرض می‌شود [23]. به منظور محاسبه مقدار f_0 به‌صورت مستقیم می‌بایست از میکروساختار سطح مقطع اولیه نمونه قبل از تغییر شکل تصاویر مختلفی را توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به‌دست آورد و سپس با آنالیز تصاویر بوسیله نرم‌افزارهای مرتبط یک تخمینی از کسر حجمی اولیه حفره‌ها یافت. در عوض در این پژوهش از رابطه رگرسیون (۲) ارائه شده توسط دیگران برای فولاد زنگ نزن [21-24] بهره گرفته شد. با قرار دادن درصد عناصر شیمیایی مربوطه در رابطه (۲) مقدار ۰.۰۰۱ همانند دیگر مراجع [21,20] به‌دست آمد:

$$f_0 \approx 0.054 \times (S(\%) - \frac{0.001}{Mn(\%)}) \quad (2)$$

چهار پارامتر f_c ، f_f ، f_N و ϵ_N با استفاده از شبیه‌سازی‌های مکرر و مقایسه نمودار نیرو جابجایی حاصل و آزمایش تجربی (با توجه به فلوچارت شکل ۷) به‌دست آمدند که مقادیر آن‌ها به ترتیب ۰.۰۰۱۸۵، ۰.۰۹، ۰.۰۴ و ۰.۶ می‌باشند. با توجه به "شکل ۷"، مقدار خطای مجاز ۲ درصد می‌باشد. چهار پارامتر باقیمانده مدل آسیب GTN توسط روش کالیبراسیون معکوس [23] و با استفاده از یک آزمون کشش استاندارد در راستای نورد به‌دست آورده شدند. در روش کالیبراسیون معکوس توسط شبیه‌سازی‌های مکرر و توسط یک الگوریتم جستجو ساده، مقادیر چهار پارامتر موردنظر در هر بار

³ Property

⁴ plasticity

⁵ porous Failure Criteria

⁶ Void Nucleation

⁷ Property

¹ Notch

² Solid

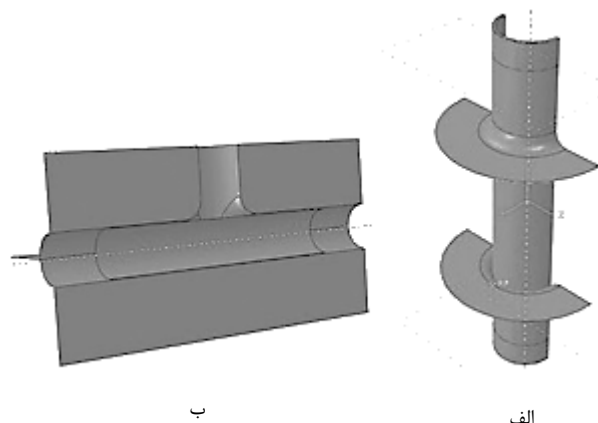


Fig. 10 (a) Assembled model of bulge test (b) Assembled model of T-shape Hydroforming

شکل 10 الف- مدل مونتاژ شده فرآیند بالج ب- مدل مونتاژ شده فرآیند هیدروفرمینگ T شکل

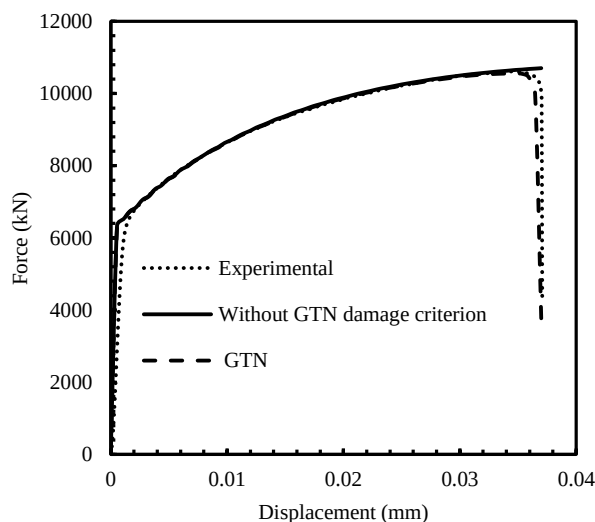


Fig. 8 Force – displacement curve of tension test specimen

شکل 8 منحنی نیرو – جابجایی نمونه آزمایش کشش



Fig. 9 The deformed finite element model of tensile test specimen

شکل 9 مدل تغییر شکل یافته اجزای محدود نمونه آزمون کشش

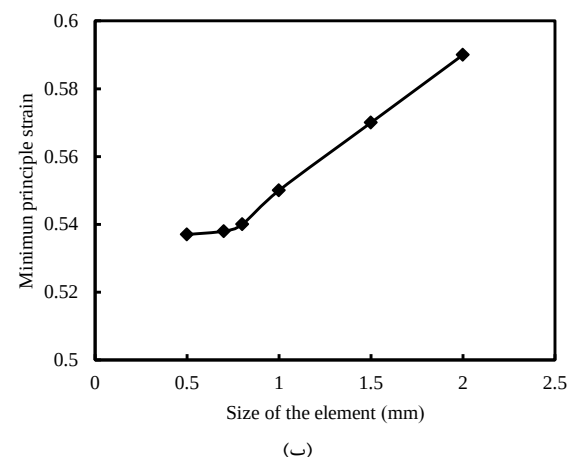
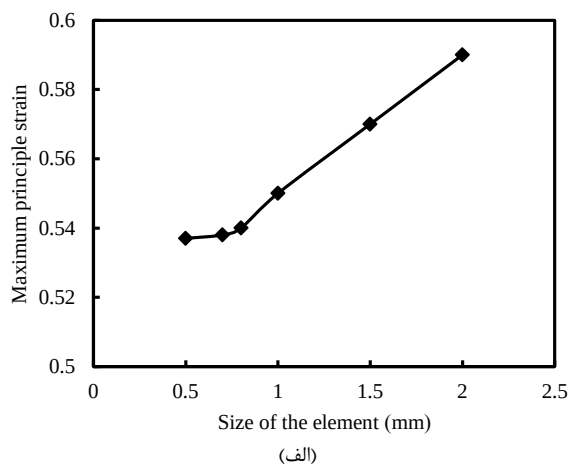


Fig. 11 The effect size of the element on the main strain (a) ϵ_1 (b) ϵ_2

شکل 11 تاثیر اندازه المان بر روی کرنش های اصلی الف- کرنش اصلی بزرگتر ب- کرنش اصلی کوچکتر

بارگذاری آزاد، با اعمال فشار داخلی به لوله و در پی آن بشکه ای شدن ناحیه تغییر شکل، کرنش های محیطی و طولی در این ناحیه، کششی (با کرنش های مثبت) می باشند، مسیرهای کرنش، در سمت راست نمودار کرنش ها قرار می گیرند. با افزایش شعاع گوشه قالب، مواد با سهولت بیشتری به ناحیه تغییر

مونتاژ شده فرآیند بالج و شکل دهی قطعه T شکل، نشان داده شده است. برای تعریف سطوح تماس، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شد و ضریب اصطکاک بین لوله و قالب با توجه به مرجع [25]، 0.06 در نظر گرفته شد. جهت المان بندی لوله در آزمون بالج، شکل دهی قطعه T شکل و اجزای قالب، به ترتیب از المان های C3D8R، S4R و R3D4 استفاده گردید. برای تعیین اندازه المان، کرنش ها به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند به طوری که با انجام بررسی ها با توجه به "شکل 11" مشاهده شد زمانی که اندازه المان از 0.8 کمتر می شود تاثیر چشمگیری بر روی خروجی (کرنش ها) نداشته است و این اندازه به عنوان اندازه المان در نظر گرفته شد.

5- نتایج و بحث

5-1- بررسی مربوط به آزمون بالج

برای صحت سنجی نتایج به دست آمده از شبیه سازی آزمایش بالج، نتایج به دست آمده از آن و آزمایش تجربی با هم مقایسه شدند. در جدول 3 کرنش های اصلی بزرگتر و کوچکتر و همچنین فشار پارگی مربوط به طول بالج 60mm و شعاع ورودی قالب 5 mm در شرایط بارگذاری آزاد نشان داده شده است. با توجه به این جدول، مشاهده می شود که اختلاف بین شبیه سازی و تجربی جزئی می باشد. از آنجایی که در این پژوهش از معیار شکست GTN استفاده شد پارگی در قطعه قابل مشاهده می باشد که در "شکل 12" قطعه پاره شده در پی بالج شدن بر اثر فشار 50 MPa، با طول بالج 50 mm و شعاع ورودی قالب 5 mm نشان داده شده است.

برای بررسی اثر شعاع ورودی قالب، دو شرایط بارگذاری آزاد و با تغذیه محوری در نظر گرفته شد. شرایط این مطالعه در جدول 4 آورده شده است. در "شکل 13" مسیرهای کرنش المان بحرانی (المانی نزدیک به پارگی که بیشترین کرنش به آن اعمال شده است)، مربوط به شعاع های گوشه مختلف در حالت بارگذاری آزاد مشاهده می شود. با توجه به این که در حالت

شکل جریان می یابند. با توجه به بررسی های انجام شده و منحنی های به دست آمده، با افزایش شعاع ورودی قالب، نسبت کرنش اصلی کوچک تر به بزرگ تر کاهش می یابد.

در "شکل 14" مسیرهای کرنش مربوط به شعاع های گوشه مختلف در حالت بارگذاری با تغذیه محوری نشان داده شده است. در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، به دلیل تغذیه مواد لوله به ناحیه تغییر شکل و اعمال نیروی فشاری طولی، لوله در جهت طول تحت کرنش فشاری قرار می گیرد. از طرفی، فشار داخلی اعمال شده به لوله در این ناحیه منجر به ایجاد کرنش کششی در محیط لوله می شود. از این رو، مسیرهای کرنش گذاری قطعه، در سمت چپ منحنی قرار گرفته است. در شکل ملاحظه می شود که افزایش شعاع ورودی قالب در این حالت از بارگذاری، تاثیری بر مسیر کرنش گذاری قطعه ندارد که این نشان دهنده تاثیر کمتر شعاع ورودی قالب نسبت به نبود تغذیه محوری در این مطالعه می باشد.

پارامتر بعدی مورد مطالعه در این قسمت از پژوهش، طول ناحیه تغییر شکل می باشد که شرایط مربوط به این مطالعه در جدول 5 آورده شده است. در "شکل 15" مسیرهای کرنش مربوط به طول های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری آزاد نشان داده شد. با توجه به شکل، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، به دلیل وجود مواد بیشتر در منطقه تغییر شکل و در پی آن کم شدن تغییرات کرنش در راستای طول در این ناحیه، شیب منحنی مسیر کرنش (نسبت کرنش اصلی بزرگ تر به کرنش اصلی کوچک تر) افزایش یافته و β کاهش می یابد. در نتیجه، مسیر کرنش قطعه به سمت چپ جابجا می شود. از طرفی، ارتفاع بشکه ای شدن لوله در ناحیه تغییر شکل، در یک فشار معین، کاهش و کرنش محیطی وارد بر لوله نیز کاهش می یابد.

در "شکل 16" مسیرهای کرنش مربوط به طول های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله نشان داده شده است. در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، نسبت کرنش اصلی بزرگ تر به کرنش اصلی کوچک تر افزایش می یابد. با اعمال تغذیه محوری به لوله، فشار وارد بر المان های لوله در ناحیه تغییر شکل، با بزرگ تر شدن طول این ناحیه، کاهش می یابد. از این رو، کرنش فشاری اعمال شده به

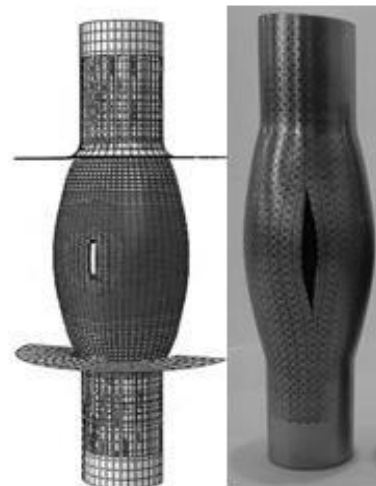


Fig. 12 Predicted fracture using FEM and Experimental (the length bulge of 60 mm and the die entrance radius of 5 mm)

شکل 12 مشاهده پارگی در شبیه سازی و آزمایش تجربی فرایند بالج (طول بالج 60 mm و شعاع ورودی قالب 5 mm)

جدول 3 مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی در آزمایش بالج آزاد (طول بالج 60 mm و شعاع ورودی قالب 5 mm)

فشار پارگی (bar)	کرنش طولی	کرنش محیطی	
508.19	0.49	0.05	تجربی
500	0.46	0.049	شبیه سازی
1.6	6.1	2	خطا (%)

جدول 4 شرایط مختلف برای بررسی اثر شعاع ورودی قالب، طول بالج: 60 mm

شرایط	مقدار تغذیه (mm)	شعاع ورودی قالب (mm)
1	0	5
2	0	10
3	0	15
4	10	5
5	10	10
6	10	15

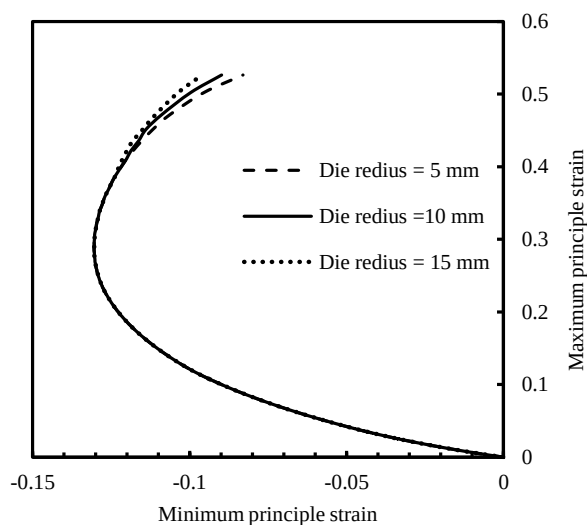


Fig. 14 Strains paths for different die radius with axial feed in bulge test (10 mm)

شکل 14 مسیرهای کرنش مربوط به اثر شعاع های ورودی قالب مختلف در حالت بارگذاری با تغذیه محوری (10 mm)

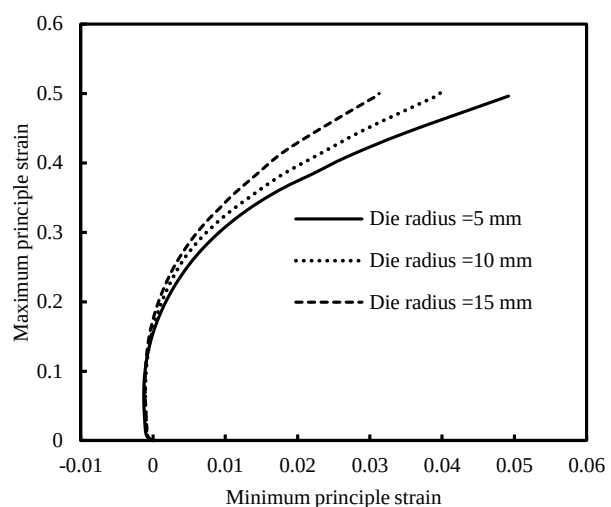


Fig. 13 Strain paths with respect to die radius in free bulge test

شکل 13 مسیرهای کرنش برحسب شعاع ورودی قالب در آزمایش بالج آزاد

در ادامه بررسی ها در این پژوهش، پارامتر مقدار تغذیه محوری در شعاع ورودی قالب 5 mm و طول ناحیه تغییر شکل 60 mm مورد مطالعه قرار گرفت. اثر مقدار تغذیه محوری لوله بر مسیر کرنش گذاری قطعه در "شکل 17" نشان داده شده است. با افزایش تغذیه محوری و جریان یافتن مواد به ناحیه تغییر شکل، فشار اعمالی در جهت طول لوله افزایش می یابد که منجر به افزایش کرنش فشاری در این جهت و کاهش نسبت کرنش خواهد شد.

هدف از انجام شبیه سازی اجزای محدود فرآیند بالچ و به دست آوردن نتایج قسمت قبل، مشخص کردن محدوده تغییرات کرنش در شرایط پارامتری و بارگذاری مختلف بوده است که باعث به دست آوردن منحنی حد شکل دهی با استفاده از شبیه سازی و همچنین طراحی آزمایش برای انجام آزمایش های تجربی جهت به دست آوردن منحنی حد شکل دهی لوله مورد نظر می شود. از آنجایی که شبیه سازی تا لحظه پارگی ادامه پیدا کرد، نقاط انتهایی مسیر کرنش های به دست آمده، حد شکل دهی در شرایط مورد بررسی می باشد. با اتصال نقاط انتهایی مسیر کرنش های به دست آمده در قسمت قبل، منحنی حد شکل دهی شبیه سازی لوله مورد نظر به دست آمد.

با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی، آزمایش تجربی برای به دست آوردن منحنی حد شکل دهی تجربی انجام شد. شرایط آزمایش با مقادیر مختلف پارامترها، در جدول 6 آورده شده است. در "شکل های 18، 19 و 20" مقاطع شکل داده شده در شرایط مختلف نشان داده شده اند. با توجه به اینکه لوله ها شبکه بندی شده اند، کرنش های اصلی ایجاد شده در هر شرایط به دست آمد تا منحنی حد شکل دهی تجربی تعیین گردد. در "شکل 21" منحنی حد شکل دهی به دست آمده از آزمایش های تجربی و شبیه سازی اجزای محدود نشان داده شده اند.

2-5- شکل دهی قطعه سه راهی و صحت سنجی منحنی حد شکل دهی

برای صحت سنجی منحنی حد شکل دهی به دست آمده، شکل دهی قطعه سه راهی (T شکل) مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور مطالعه شکل پذیری قطعه، شکل دهی آن در دو حالت بارگذاری آزاد و بارگذاری با تغذیه محوری با استفاده از آزمایش تجربی، شبیه سازی با استفاده از منحنی حد شکل دهی

قطعه در راستای طول لوله، در حالتی که طول ناحیه تغییر شکل کمتر است، بیشتر خواهد بود. از طرفی، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، در یک فشار یکسان، کرنش محیطی اعمالی به قطعه نیز کمتر می باشد.

جدول 5 شرایط مختلف برای بررسی اثر طول بالچ، شعاع ورودی قالب: 5 mm
Table 5 Different conditions to study the effect of bulge length, die entrance radius: 5 mm

شرایط	مقدار تغذیه (mm)	طول بالچ (mm)
1	0	20
2	0	40
3	0	60
4	10	20
5	10	40
6	10	60

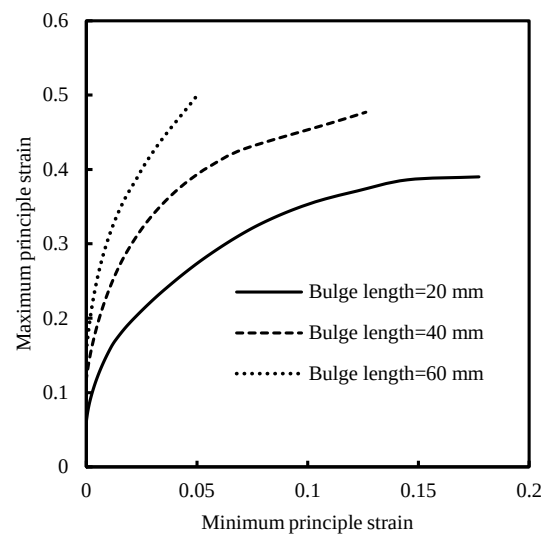


Fig.15 Strain path with respect to bulge length in free bulge test

شکل 15 مسیرهای کرنش مربوط به طول بالچ های مختلف در آزمایش بالچ آزاد

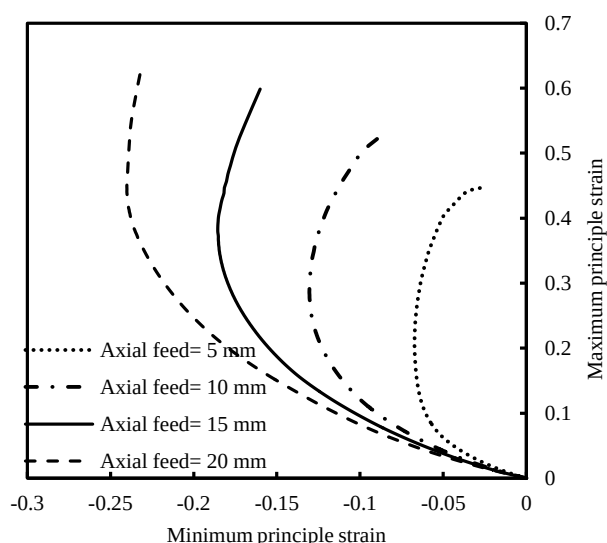


Fig. 17 Effect of axial feed on strain path (bulge length of 60 mm and die radius of 5 mm)

شکل 17 اثر تغذیه محوری بر مسیر کرنش (طول بالچ 60 mm و شعاع ورودی قالب 5 mm)

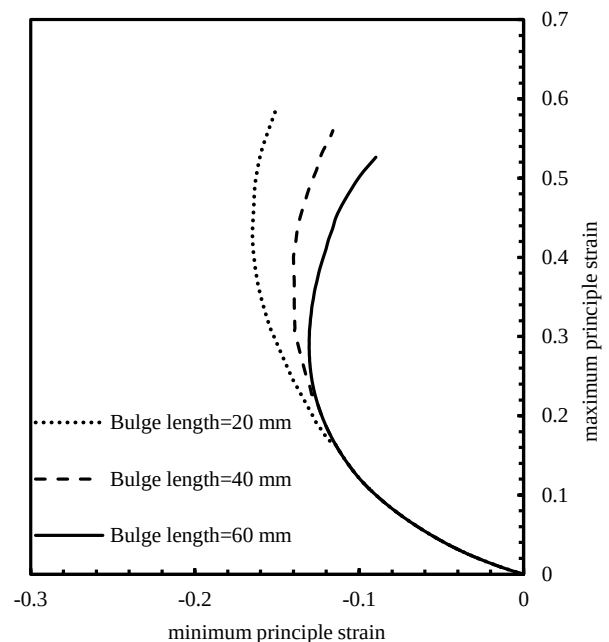


Fig. 16 Strain path with respect to bulge length in bulge test with axial feed

شکل 16 مسیر کرنش بر حسب طول بالچ در آزمایش بالچ با تغذیه محوری



Fig. 20 A number of bulged components with various axial feeds (10mm, 5mm)

شکل 20 تعدادی از قطعات بالچ شده با تغذیه های مختلف (10 mm و 15 mm)

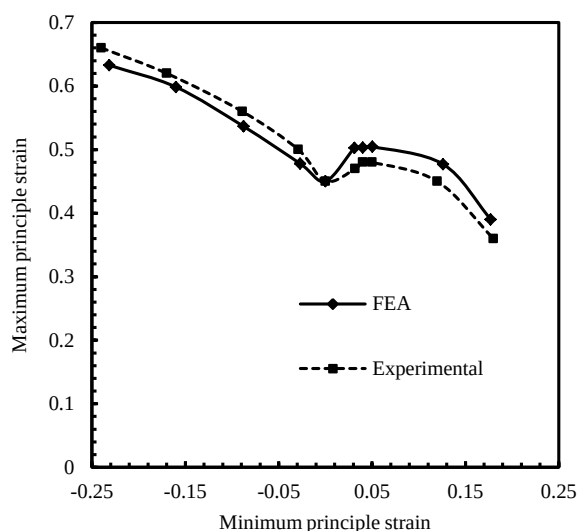


Fig. 21 Forming limit curves obtained from experiment and simulation with GTN criterion for 304 stainless steel tube

شکل 21 منحنی های حد شکل دهی به دست آمده از تجربی و شبیه سازی به کمک معیار GTN برای لوله فولادی زنگ نزن 304

سه راهی با استفاده از معیار آسیب GTN و نیز منحنی حد شکل دهی در حالت بارگذاری آزاد و با استفاده از مسیر فشار به دست آمده از آزمایش تجربی نشان داده شده است. در شبیه سازی مربوط به استفاده از منحنی حد شکل دهی قطعه سالم شکل گرفت و مسیر کرنش مربوط به آن منحنی FLD به دست آمده را قطع نکرد. در صورتی که قطعه در شبیه سازی مربوط به وارد کردن ضرایب GTN در نرم افزار (استفاده از معیار آسیب GTN)، دچار پارگی شد و مسیر کرنش مربوط به آن منحنی FLD را قطع کرده است. با توجه به این بررسی ها و همچنین با توجه به این که در آزمایش تجربی نیز قطعه پاره شد، این نتیجه حاصل شد که در شرایط بارگذاری آزاد، استفاده از معیار آسیب GTN می تواند پارگی را به درستی پیش بینی نماید. در "شکل 23" قطعه پاره شده در آزمایش تجربی و شبیه سازی اجزای محدود با وارد کردن منحنی حد شکل دهی نشان داده شده است.

در ادامه برای مطالعه دقیق تر، شکل دهی قطعه در شرایط بارگذاری آزاد با استفاده از شبیه سازی با وارد نمودن ضرایب GTN به نرم افزار و آزمایش تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. هم در شبیه سازی و هم در آزمایش تجربی

جدول 6 شرایط پارامتری مربوط به آزمایش های تجربی بالچ

Table 6 Condition parameters of experimental data bulge

شرایط	مقدار تغذیه (mm)	شعاع ورودی قالب (mm)	طول بالچ (mm)
1	0	15	60
2	0	10	60
3	0	5	60
4	0	5	40
5	0	5	20
6	5	5	60
7	10	5	60
8	15	5	60
9	20	5	60

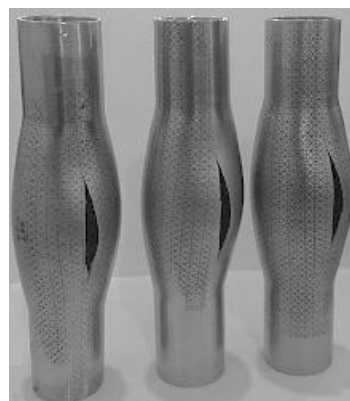


Fig. 18 Experimental Bulged components for the effect of die radius in free bulge (l=60mm)

شکل 18 قطعات تجربی بالچ شده در آزمایش مربوط به اثر شعاع ورودی قالب در حالت آزاد (طول بالچ 60 mm)



Fig. 19 Experimental bulged components for the effect of different lengths in free bulge (r =5 mm)

شکل 19 قطعات تجربی بالچ شده در آزمایش مربوط به اثر طول ناحیه بالچ در حالت آزاد (شعاع ورودی قالب 5 mm)

به دست آمده در قسمت قبل و همچنین شبیه سازی با مدل آسیب GTN بررسی شد. هدف از انجام بررسی با دو حالت شبیه سازی پیش بینی درست تر پارگی توسط این دو معیار می باشد.

ابتدا شکل دهی قطعه مورد نظر با استفاده از آزمایش تجربی در حالت بارگذاری آزاد مورد مطالعه قرار گرفت. با افزایش فشار تا 81 MPa پارگی در قطعه مشاهده شد. در ادامه با توجه به شرایط آزمایش، شبیه سازی قطعه در دو حالت استفاده از معیار آسیب GTN (قرار دادن ضرایب GTN) و استفاده از منحنی حد شکل به دست آمده در قسمت قبل، انجام شد.

در "شکل 22" مسیر کرنش های مربوط به المان بحرانی در شبیه سازی

قطعه به طور سالم شکل گرفته است. در "شکل 24" مسیر کرنش به دست آمده از شبیه سازی نشان داده شده است. برای درست آزمایی شبیه سازی نیز توزیع ضخامت و توزیع کرنش قطعه شکل داده شده با شرایط بارگذاری با تغذیه محوری و مقایسه آن با آزمایش تجربی در "شکل های 25، 26 و 27" مشاهده می شود. با توجه به این سه شکل تطابق قابل قبولی بین نتایج وجود داشته و نازک شدگی و کرنش ها نیز افزایش می یابد. در "شکل 28" قطعات شکل گرفته شده در آزمایش تجربی و شبیه سازی اجزای محدود نشان داده شده اند.

6- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای هندسی در فرآیند بالچ و در پی آن به دست آوردن منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ نزن 304 با استفاده از معیار شکست نرم GTN پرداخته شد. با بررسی های انجام شده مشخص شد که در شرایط بارگذاری آزاد، با کاهش شعاع ورودی قالب، نسبت کرنش افزایش (افزایش کرنش اصلی کوچکتر) می یابد. در حالی که در شرایط

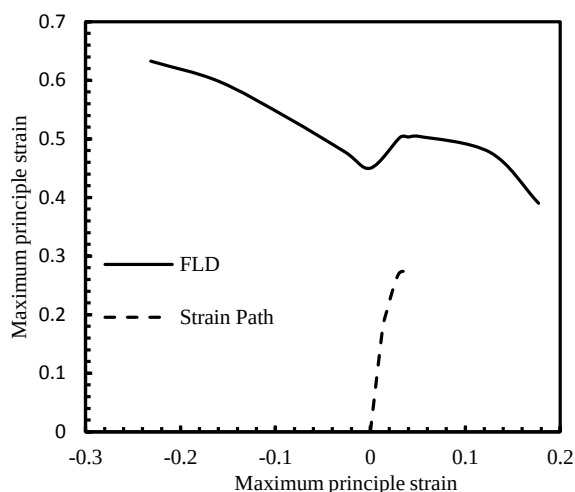


Fig. 24 The strain path of the simulation by entering GTN coefficients in free bulge

شکل 24 مسیر کرنش مربوط به شبیه سازی با مدل GTN در شرایط بارگذاری آزاد

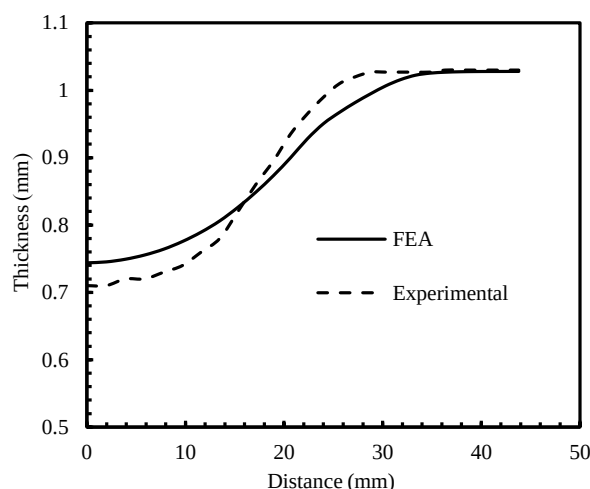


Fig. 25 experimental and simulation curves longitudinal Thickness distribution in the T-shaped piece in free bulge

شکل 25 منحنی های تجربی و شبیه سازی توزیع ضخامت طولی در قطعه T شکل در حالت بارگذاری آزاد

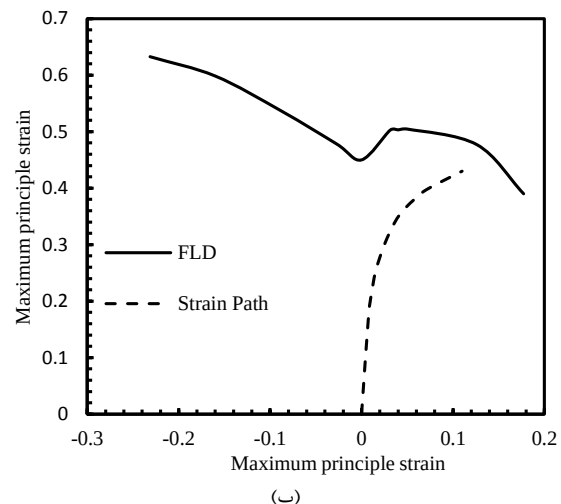
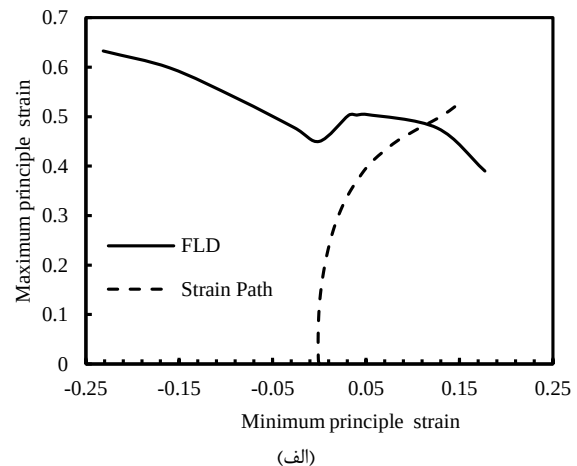


Fig. 22 (a) the strain path of the simulation by entering the coefficients GTN in free bulge (b) the strain path of the simulation by entering the forming limit curve in free bulge

شکل 22 الف- مسیر کرنش مربوط به شبیه سازی با وارد کردن ضرایب GTN در حالت آزاد ب- مسیر کرنش مربوط به شبیه سازی با وارد کردن منحنی حد شکل دهی در حالت آزاد

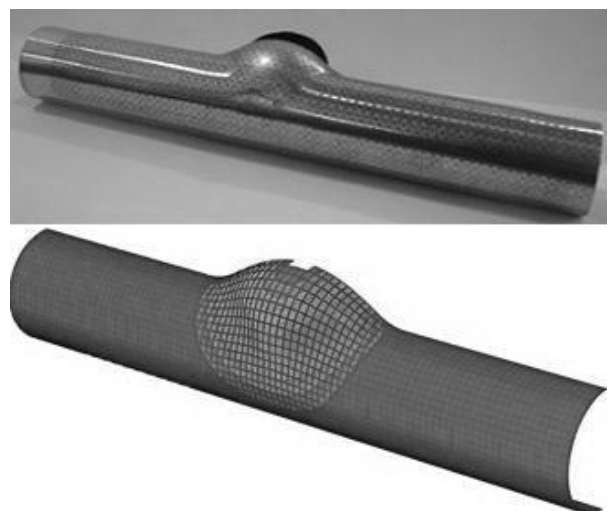


Fig. 23 Predicted fracture in experimental and FEM by entering the coefficients GTN

شکل 23 قطعه پاره شده در آزمایش تجربی به همراه مشاهده پارگی در شبیه سازی با وارد کردن ضرایب GTN

به ترتیب نسبت کرنش کاهش (کاهش کرنش اصلی کوچکتر) و افزایش (افزایش کرنش اصلی کوچکتر) یافته است. با مطالعه بر روی اثر مقدار تغذیه محوری بر مسیر کرنش مشخص شد که مسیر کرنش‌ها در سمت چپ منحنی (کرنش‌های اصلی منفی) قرار گرفت و با افزایش مقدار تغذیه محوری، منحنی به سمت چپ (افزایش کرنش اصلی بزرگتر و کاهش مقدار کرنش اصلی کوچکتر) جابجا شده است. با بررسی‌های انجام شده منحنی حد شکل‌دهی لوله موردنظر به‌دست آمد. در ادامه با مطالعه‌های انجام شده بر روی شکل‌دهی قطعه T شکل، مشخص شد که وارد کردن ضرایب GTN به نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود نسبت به وارد کردن منحنی حد شکل‌دهی، پارگی را (با توجه به منحنی حد شکل‌دهی به‌دست آمده) درست‌تر پیش‌بینی می‌کند.

7- مراجع

- [1] S. Holmberg, B. Enquist, P. Thilderkvist, Evaluation of sheet metal forming by tensile tests, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 145, No. 1, pp. 72-83, 2004.
- [2] T. B. Stoughton, X. Zhu, Review of theoretical models of the strain based FLD and their relevance to the stress-based FLD, *International Journal of Plasticity*, Vol. 20, No. 8, pp. 1463-1486, 2004.
- [3] T. B. Stoughton, A general forming limit criterion for sheet metal forming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, No. 1, pp. 1-27, 2000.
- [4] M. Ahmetoglu, T. Altan, Tube hydroforming: State-of-the-art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No. 1, pp. 25-33, 2000.
- [5] M. Koç, T. Altan, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 1, pp. 123-138, 2002.
- [6] A. R. Ragab, Prediction of fracture limit curves in sheet metals using a void growth and coalescence model, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, No. 1, pp. 206-213, 2008.
- [7] P. Thanakijkasem, V. Uthaisangsuk, A. Pattarangkun, S. Mahabunphachai, Effect of bright annealing on stainless steel 304 formability in tube hydroforming, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 12, No. 9, pp. 3817-3823, 2014.
- [8] A. Pambhar, K. Narasimhan, Prediction of stress and strain based forming limit diagram during tube hydroforming process, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 66, No. 5, pp. 665-669, 2013.
- [9] M. Brunet, S. Mguil, F. Morestin, Analytical and experimental studies of necking in sheet metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, pp. 40-46, 1998.
- [10] W. W. Zhang, X. S. Wang, X. L. Cui, S. J. Yuan, Analysis of corner filling behavior during tube Hydro forming of rectangular section based on Gurson-Tvergaard-Needleman ductile damage model, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 20, No. 9, pp. 1-9, 2014.
- [11] M. Falahati Naghibi, M. Gerdooei, M. Bakhshi Jooybari, A. Gorji Valokola, Experimental and numerical study of formability in stainless steel 304 tube by hydroforming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 224-232, 2015. (In Persian)
- [12] H. Moslemi Naeini, S. Hashemi, G. H. Liaghat, M. Mohammadi, H. Deilami Azodi, Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 133-140, 2014. (In Persian)
- [13] S. J. Hashemi, H. Moslemi Naeini, Gh. Liaghat, J. Shahbazi Karami, A. H. Roohi, Prediction of bursting in warm tube hydroforming using modified ductile fracture criteria, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 201-211, 2015. (In Persian)
- [14] M. Mohammadi, J. S. Karami, S. J. Hashemi, Forming limit diagram of aluminium / copper bi-layered tube by bulge test, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-11, 2017.
- [15] W. Wcislik, Experimental determination of critical void volume fraction f_v for the Gurson Tvergaard Needleman (GTN) model, *21st European Conference on Fracture*, Catania, Italy, 20-24 June, 2016.
- [16] L. F. Peng, Z. T. Xu, M. W. Fu, X. M. Lai, Forming limit of sheet metals in meso-scale plastic forming by using different failure criteria, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 120, No. 1, pp. 190-203, 2017.
- [17] B. Teng, W. Wang, Y. Liu, Sh. Yuan, Bursting prediction of hydroforming aluminium alloy tube based on Gurson-Tvergaard-Needleman damage model, *11th International Conference on Technology of Plasticity*, Nagoya, Japan, October 19-24, 2014.
- [18] H. Min, L. I. Fuguo, W. Zhigang, Forming limit stress diagram prediction of aluminum alloy 5052 based on GTN model parameters determined by in situ

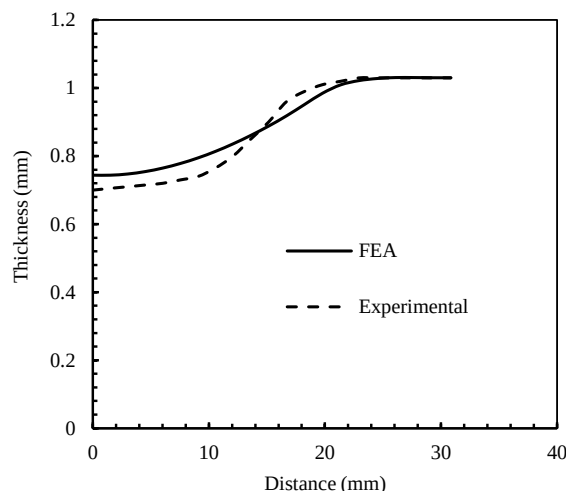


Fig. 26 experimental and simulation curves longitudinal strain distribution in the T-shaped piece in free bulge

شکل 26 منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی توزیع ضخامت محیطی در قطعه T شکل در حالت بارگذاری آزاد

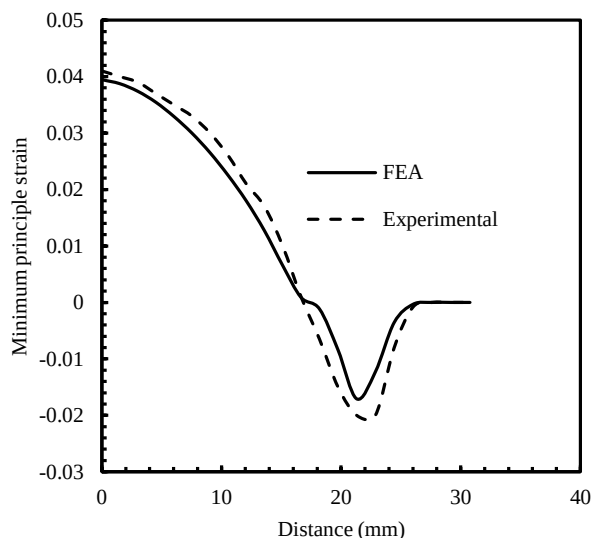


Fig. 27 experimental and simulation curves longitudinal strain distribution in the T-shaped piece in free bulge

شکل 27 منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی توزیع کرنش طولی در قطعه T شکل در حالت بارگذاری آزاد

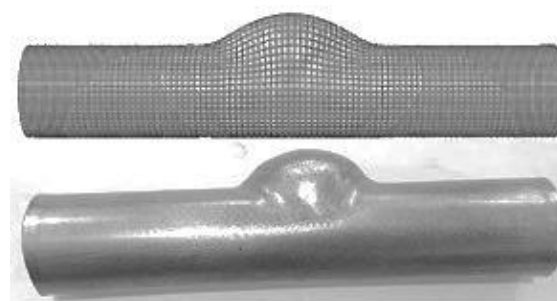


Fig. 28 Comparison bulging parts in experimental and FEA

شکل 28 مقایسه قطعات بالج شده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود

بارگذاری با تغذیه محوری تاثیر چشمگیری نداشته است. در ادامه، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل در شرایط بارگذاری آزاد و با تغذیه محوری،

- Testing and Evaluation*, Vol. 37, No. 6, pp.538-544, 2009.
- [22] X. Yang, J. Zhou, X. Ling, Study on plastic of AISI 304 stainless steel induct by ultrasonic impact treatment, *Journal of material and Design*, Vol. 36, No. 1, pp. 477-481, 2012.
- [23] A. Kami, B. Mollaei Dariani, A. Sadough Vanini, D. S. Comsa, D. Banabic, Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage mode, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 216, No. 3, pp. 472-483, 2015.
- [24] A. Franklin, Comparison between a quantitative microscope and chemical method for assessment of non-metallic inclusions, *Journal of Iron Steel Institute*, Vol. 207, No. 1, pp. 181-186, 1969.
- [25] N. Asnafi, Analytical modelling of tube hydroforming, *Thin-Walled Structures*, Vol. 34, No. 4 pp. 295-330, 1999.
- tensile test, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 24, No. 3, pp. 378-386, 2011.
- [19] M. E. Hosseini, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi Jooybari, An analytical investigation into the effect of GTN model parameters on the forming limit diagram of sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 242-252, 2015. (In Persian فارسی)
- [20] S. Yang, J. Zhou, X. Ling, Zh. Yang, Effect of geometric factors and processing parameters on plastic damage of SUS304 stainless steel by small punch test, *Journal of Material and Design*, Vol. 41, No. 1, pp. 447-452, 2012.
- [21] Z. Zhou, X. Ling, Ductile damage analysis for small punch specimens of type 304 stainless steel based on GTN model, *Journal of*