



## مطالعه تجربی و عددی منحنی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 در فرایند هیدروفرمینگ

مهدی فلاحتی نقیبی<sup>1</sup>، مهدی گردویی<sup>2\*</sup>، محمد بخشی جوئیباری<sup>3</sup>، عبدالحمید گرچی ولوکلا<sup>4</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

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

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

\*شاهرود، صندوق پستی 316، gerdooei@shahroodut.ac.ir

### چکیده

در این مقاله با هدف ارائه‌ی یک الگوی جدید تست جهت پیش‌بینی حد شکل دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304، نخست به بررسی عددی اثر نحوه بارگذاری و هندسه قالب بر مسیر کرنش و ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در لوله پرداخته و مطالعه اثر هندسه قالب با تغییر در شعاع گوشه و طول ناحیه تغییر شکل انجام شد. در این پژوهش، اثر مقدار تغذیه محوری لوله در حالت بارگذاری با تغذیه محوری بر نسبت کرنش ( $\beta$ ) نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این شرایط، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، نسبت کرنش ( $\beta$ ) به سمت صفر میل می‌کند که این نتیجه مستقل از شرایط مرزی است. با افزایش شعاع گوشه قالب در حالت بارگذاری آزاد، نسبت کرنش ( $\beta$ ) کاهش می‌یابد و مسیر کرنش به سمت حالت کرنش-صفحه‌ای نزدیک می‌شود؛ درحالی‌که در بارگذاری با تغذیه محوری، افزایش شعاع قالب تأثیر قابل توجهی بر مسیر کرنش قطعه و نسبت کرنش ندارد. در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، با افزایش مقدار تغذیه لوله، نسبت کرنش ( $\beta$ ) کاهش چشم‌گیری می‌یابد. در بخش تجربی از این تحقیق، تعداد 10 تست از شبیه‌سازی مذکور برای استخراج منحنی حد شکل دهی به‌گونه‌ای انتخاب و اجرا گردید که پراکندگی یکنواختی از نقاط پارگی در صفحه کرنش حاصل شود. لوله‌های مدرج شده تحت شرایط کنترل شده تا رسیدن به پارگی تحت بارگذاری قرار گرفت و با اندازه‌گیری کرنش در نواحی مجاور پارگی منحنی حد شکل دهی لوله فولادی ترسیم گردید.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 خرداد 1393

پذیرش: 23 مرداد 1393

ارائه در سایت: 16 مهر 1393

کلید واژگان:

تحلیل تجربی کرنش

شبیه‌سازی اجزای محدود

نمودار حد شکل دهی

هیدروفرمینگ لوله

## Experimental and numerical study of formability in stainless steel 304 tube by hydroforming process

Mahdi Falahati Naghibi<sup>1</sup>, Mahdi Gerdooei<sup>1\*</sup>, Mohammad Bakhshi Jooybari<sup>2</sup>, Abdolhamid Gorji Valokola<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran

\*P.O.B. 316 Shahrood, Iran, gerdooei@Shahroodut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 25 May 2014  
Accepted 14 August 2014  
Available Online 08 October 2014

**Keywords:**  
Empirical analysis of strain  
FEM simulation  
FLD  
Tube hydroforming

### ABSTRACT

In this paper, with the aim of providing a new test pattern for empirical prediction of FLD of 304 stainless steel tube, first, numerical investigation of hydro-bulging process with various load paths and die geometries has been performed on strain path and plastic instability. Study on geometry of dies has been performed by varying die corner radius ( $R$ ) and bulging length ( $W$ ). Here, effect of axial feeding on strain ratio ( $\beta$ ) has been studied. In this condition, by increasing  $W$ , strain ratio ( $\beta$ ) tends to a value of zero, a situation that is independent of boundary condition. By increasing die corner ( $R$ ) in free loading condition, reduction of  $\beta$  occurs and the strain path approaches to plane strain state; while in loading with axial feeding condition, increasing of  $R$  has negligible effect on strain path and ratio. In loading with axial feeding condition, increase in axial feeding strain ratio ( $\beta$ ) is reduced drastically. From the simulated tests, number of 10 tests with distributed loading path on strain diagram was selected for empirical study. Meshed tubes are loaded controllably until tearing and the FLCs were drawn using strains obtained near tearing locations.

### 1- مقدمه

با این فرایند دارای مزایای متعددی است که به عنوان نمونه می‌توان به بهبود خواص مکانیکی، کاهش مراحل تولید، افزایش مقاومت به خوردگی به دلیل عدم استفاده از عملیات جوشکاری، کاهش وزن، کاهش هزینه قالب، افزایش

هیدروفرمینگ لوله فرایندی است که در سال‌های اخیر برای تولید قطعه‌های یکپارچه و بدون درز مورد توجه قرار گرفته است. شکل‌دهی قطعه‌های لوله‌ای

Please cite this article using:

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)

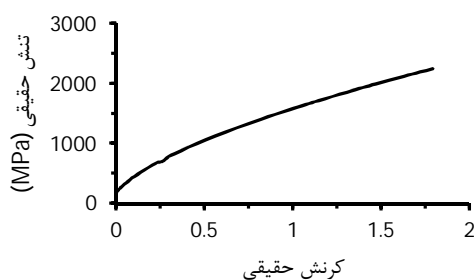
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ترکیب‌دهی در فرایند هیدروفرمینگ، معیار گلوبی شدن پختی کاملاً مناسب است. همچنین ناپایداری پلاستیک با افزایش توان کرنش‌سختی و پارامتر ناهمسانگردی کاهش می‌یابد. فشار ترکیب‌دهی نیز با افزایش مقدار توان کرنش‌سختی و پارامتر ناهمسانگردی افزایش می‌یابد.

در یک جمع‌بندی می‌توان بیان کرد که استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) به دست آمده از روش‌های شکل‌دهی سنتی که در شرایط فشار هیدروستاتیکی بسیار ناچیز حاصل شده است در فرایندهای هیدروفرمینگ معتبر نیست. از سوی دیگر به‌کارگیری منحنی حد شکل‌دهی (FLD) به دست آمده از روش‌های شکل‌دهی ورق نیز در فرایندهای هیدروفرمینگ لوله نامعتبر و خطاساز است. لذا در این مقاله، با هدف پیش‌بینی تجربی حد شکل‌دهی یک لوله از جنس فولاد زنگ‌نزن 304، نخست در فرایند هیدروبالجینگ متقارن محوری به بررسی عددی اثر نحوه بارگذاری و هندسه قالب بر مسیر کرنش‌گذاری و ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در حین فرایند هیدروفرمینگ پرداخته شده است. این مطالعه شامل شبیه‌سازی عددی فرایند و تعقیب مسیر کرنش تا لحظه پارگی است و در نتیجه آن، تست‌های تجربی مناسب به منظور دستیابی به نقاط کرنش بحرانی با پراکندگی متوازن در صفحه کرنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر طراحی گردید. پس از ساخت قالب‌ها، فرایند هیدروفرمینگ برای پیش‌بینی کرنش بحرانی به اجرا گذاشته شد و تا رسیدن به لحظه پارگی لوله ادامه یافت. سپس تحلیل تجربی کرنش با اندازه‌گیری مقادیر کرنش در نواحی هم-جوار پارگی صورت گرفت. از هر آزمایش تعدادی از نقاط مربوط به حد شکل‌دهی استخراج و نمودار حد شکل‌دهی (FLD) فلز مورد نظر ترسیم گردید. از مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به ارائه یک الگوی تجربی جدید جهت استخراج حد شکل‌دهی لوله‌های فلزی در فرایند هیدروفرمینگ لوله اشاره کرد.

## 2- شرح آزمون‌های تجربی

لوله مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد زنگ‌نزن 304 است. قطر خارجی لوله 38mm، طول آن 200mm و ضخامت آن 0/75mm است. به منظور تعیین خواص مکانیکی آن، آزمون کشش لوله انجام شده است. بدین منظور، نمونه‌هایی مطابق استاندارد ASTM-A370 تهیه شد. این نمونه‌ها در دمای محیط تا حد پارگی کشیده شدند و از این طریق، منحنی تنش-کرنش حقیقی نمونه‌ها به دست آمد. منحنی تنش-کرنش حقیقی به دست آمده از تست کشش در شکل 1 نشان داده شده است. درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده لوله فولادی و مشخصات فیزیکی لوله شامل مدول کشسان، ضریب پواسون و چگالی به ترتیب در جدول 1 و جدول 21 درج شده است. در تمامی بررسی‌ها از ناهمسانگردی لوله‌ها صرف‌نظر شده است.



شکل 1 منحنی تنش-کرنش حقیقی لوله فولادی زنگ‌نزن 304

دقت و افزایش بهره‌وری مواد اشاره نمود [1,2]. تولید محصولات پیچیده صنعتی از لوله‌های فلزی با هدف افزایش نسبت استحکام به وزن سازه‌ها و خصوصاً کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه در سال‌های اخیر مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است. پارگی در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدود کننده، با استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی (FLD) مورد ارزشیابی قرار می‌گیرد.

منحنی‌های حد شکل‌دهی در حقیقت محدوده کرنش‌هایی است که یک ورق یا لوله می‌تواند تحمل کند و نشان‌دهنده ارتباط بین کرنش‌های درون-صفحه‌ای بزرگ‌تر  $\epsilon_1$  و کوچک‌تر  $\epsilon_2$  است. در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌های فلزی پارامتر  $\beta$  که بیان‌کننده نسبت کرنش  $\epsilon_2$  به  $\epsilon_1$  است، متأثر از عواملی مانند شکل هندسه قالب، ابعاد اولیه ورق و میزان نیروی ورق‌گیر و مکانیزم روانکاری خواهد بود. کاربرد نمودارهای حد شکل‌دهی در طراحی قطعه، بهینه‌سازی قالب، آزمایش قالب و کنترل کیفیت در حین تولید است [4,3]. نمودارهای حد شکل‌دهی در تشخیص مسائل بالفعل و بالقوه شکل‌دهی نیز بسیار سودمند واقع شده‌اند. ورق‌ها و لوله‌هایی را که با شبکه‌های دایره‌ای نشانه‌گذاری شده‌اند، می‌توان با استفاده از قالب‌های آزمایشی، یا قالب‌های اصلی که در تولید به کار می‌روند، شکل داد. کرنش‌های موضعی نزدیک به نقطه پارگی، یا نقاط مشکوک را می‌توان سنجید و با نمودار حد شکل‌دهی مقایسه کرد. بدین ترتیب دستیابی به دو هدف ممکن می‌شود: نخست آنکه می‌توان نقاط در دسترس را شناسایی کرده و شدت مسئله را، حتی در هنگامی که پارگی رخ نمی‌دهد سنجید. هدف دوم مقایسه کرنش-های اندازه‌گیری شده با نمودار حد شکل‌دهی و شناسایی ماهیت مسئله است [5].

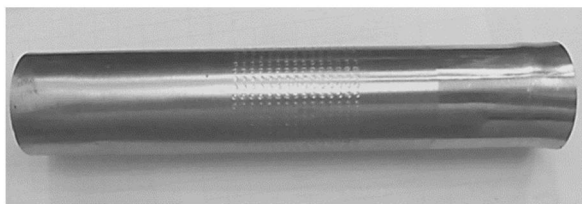
در سال‌های اخیر فعالیت‌های پژوهشی قابل‌توجهی در راستای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ، با هدف دستیابی به یک قطعه بدون نقص صورت گرفته است. اگرچه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه منحنی حد شکل‌دهی قطعات ورقی صورت گرفته است [6-12]، ولی تحقیقات انجام شده در زمینه منحنی حد شکل‌دهی قطعات لوله‌ای محدود است. اسنانی [14,13] در راستای پیش‌بینی پارگی، مدل هیدروفرمینگ لوله را تحلیل نموده و تغییر شکل پلاستیک آن را بررسی نمود. وی معیار گلوبی‌شدن موضعی را برای پیش‌بینی پارگی بکار برد. این محقق از مدل تحلیلی خود برای نشان دادن حد شکل‌دهی حین بارگذاری آزاد استفاده نموده و اثر پارامترهای ماده و فرایند را بر مسیر بارگذاری و شکل‌دهی قطعه مورد بررسی قرار داد. کیم و همکاران [15] تحلیل المان محدود را برای پیش‌بینی پارگی در فرایند هیدروفرمینگ لوله انجام دادند و ناپایداری پلاستیک پختی را برای پیش‌بینی عددی حد شکل‌دهی بکار بردند. برای لوله‌های ناهمسانگرد، بر مبنای معیار هیل درجه دو، حل نمودی پتانسیل پلاستیک را در نظر گرفتند. آن‌ها از طریق این تئوری، اثرات ناهمسانگردی را بر روی حد کرنش و فشار پارگی بررسی نمودند. امیر عبدالهیان و گردویی [17,16] ترکیب‌دهی لوله را در فرایند هیدروفرمینگ، در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، به صورت تحلیلی و بر مبنای ناپایداری پلاستیک پیش‌بینی نمودند. آن‌ها با استفاده از معیار ناهمسانگردی هیل درجه دو و به‌کارگیری تئوری نمودی پلاستیسیته، نمودار حد تنش شکل‌دهی و نمودار ترکیب‌دهی نسبت به جابجایی محوری را به دست آوردند. بعلاوه، این محققان تأثیر خواص مواد مانند پارامتر ناهمسانگردی، توان کرنش‌سختی و ضریب استحکام را روی ناپایداری پلاستیک و فشار ترکیب‌دهی بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها نشان داد که برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی و فشار

جدول 1 ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ‌نزن 304

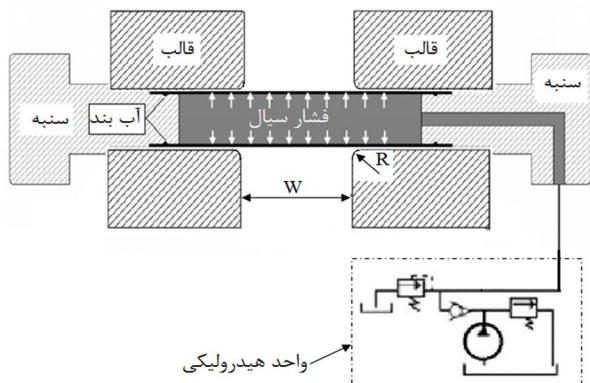
عنصر	درصد وزنی
کربن	0/08
کروم	18 - 20
نیکل	8 - 10/5
منگنز	2
فسفر	0/045
سیلیسیم	1
گوگرد	0/03
آهن	66-74

جدول 2 خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله فولادی

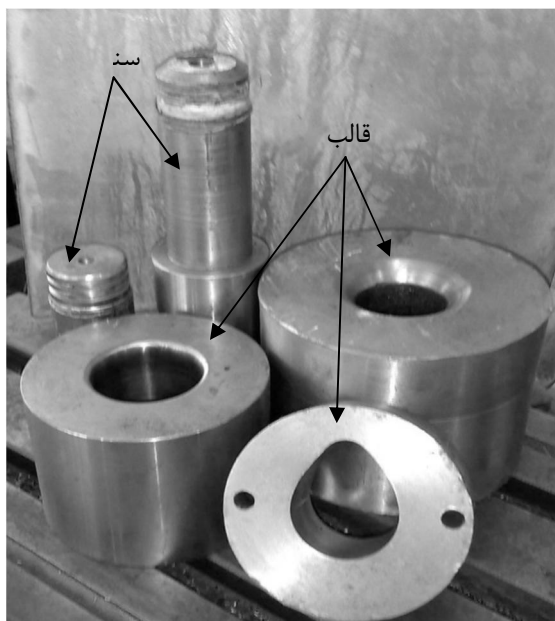
چگالی $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7930
مدول یانگ $E$ (GPa)	200
تنش تسلیم (MPa)	215
ضریب پواسون $\nu$	0/29



شکل 2 لوله شبکه‌بندی شده



شکل 3 طرح‌واره قالب هیدروفورمینگ لوله



شکل 4 اجزای مختلف قالب هیدروفورمینگ لوله



شکل 5 پرس استفاده شده در آزمایش‌های تجربی

به منظور اندازه‌گیری کرنش پس از شکل‌دهی، بر اساس استاندارد ASTM E-2218 از دایره‌هایی به قطر 2/5mm و فاصله مرکز تا مرکز 3mm برای شبکه‌بندی لوله‌ها استفاده شد. پس از انجام آزمایش، برای اندازه‌گیری دایره‌های تغییر شکل یافته از نوار مایلر و کولیس دیجیتال استفاده گردید. نمونه‌ای از لوله شبکه‌بندی شده مورد استفاده در انجام آزمایش‌های تجربی در شکل 2 نشان داده شده است. طرح‌واره قالب استفاده شده در این تحقیق و پارامترهای هندسی مورد بررسی ( $R$  و  $W$ ) در شکل 3 و اجزای قالب هیدروفورمینگ در شکل 4 قابل مشاهده است.

نحوه عملکرد مجموعه قالب هیدروفورمینگ لوله به این شرح است که ابتدا لوله درون قالب قرار می‌گیرد. سپس سنبه‌ها در دو طرف لوله‌ها قرار می‌گیرند و قالب توسط حلقه‌های آب‌بندی نصب شده در انتهای سنبه‌ها، از دو طرف آب‌بندی می‌شود. سپس روغن پرفشار از واحد هیدرولیک و از طریق سوراخ مرکزی سنبه بالایی به داخل لوله اعمال می‌گردد. در حالت بارگذاری بدون تغذیه محوری، با ایجاد فشار داخلی، لوله در ناحیه شبکه‌بندی شده انبساط می‌یابد. این افزایش فشار تا حدی ادامه می‌یابد که در لوله پارگی ایجاد شود. در این حالت، سنبه‌ها هیچ‌گونه تغذیه محوری به لوله نمی‌دهند و تنها نقش آب‌بندی قالب را به عهده دارند. در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، پس از افزایش فشار و بشک‌های شدن لوله، سنبه‌ها لوله را به درون قالب تغذیه می‌کنند.

به منظور تأمین تغذیه محوری و فشردن لوله به درون قالب، تمامی آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه تست اونیورسال هیدرولیکی DMG با ظرفیت 600kN انجام شده است که تصویر آن در شکل 5 قابل مشاهده است. این دستگاه در طول انجام آزمایش‌ها متصل به یک واحد کامپیوتری بوده و کلیه حرکات آن توسط کامپیوتر قابل کنترل است به طوری که امکان تنظیم دقیق نرخ پیشروی در هر لحظه را میسر می‌سازد. سرعت این دستگاه متغیر است و با استفاده از کامپیوتر متصل به آن قابل تنظیم است. حداکثر سرعت در ماشین اونیورسال 200mm/min است.

### 3- شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفورمینگ لوله

منظور مدل‌سازی فرایند هیدروفورمینگ لوله از نرم‌افزار المان محدود

دمای محیط، این کاهش زمان تأثیری در مکانیک فرایند شکل‌دهی نخواهد داشت [19].

مشخصات تماس بکار رفته در این پژوهش تماس سطح به سطح<sup>5</sup> است. در قسمت تعیین مشخصات تماس سطوح، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شد. ضریب اصطکاک 0/06 برای تماس سطح لوله با سنبه و قالب تعریف شده است [20].

شرایط مرزی استفاده شده در این پژوهش به سه دسته قیود تقسیم می‌شوند. نوع اول قید مربوط به تقارن است که به لبه‌های لوله اعمال می‌شود. نوع دوم قید جابجایی است که برای محدود کردن درجه‌های آزادی قالب اعمال می‌شود. قید سوم مربوط به جابجایی سنبه است که با کنترل درجه آزادی  $UY$  نقطه مرجع سنبه اعمال می‌شود. این مقدار در چهار شبیه‌سازی که با تغذیه محوری همراه است برابر 10، 20، 30 و 40mm لحاظ گردید. بارگذاری شامل اعمال فشار خطی به سطح داخلی لوله است.

المان بکار رفته در مدل لوله از نوع C3D8R است که یک المان توپر هشت‌گره‌ای می‌باشد. برای شبکه‌بندی قالب و سنبه از المان نوع R3D4 و با شکل مستطیلی استفاده شد. برای دست آوردن ابعاد و تعداد بهینه المان-ها، مدل‌هایی با عدد دانه‌بندی مختلف شبیه‌سازی شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، از آنالیز حساسیت مش بر اساس تابع هدف کرنش استفاده شد. همچنین اثر مقدار دانه‌بندی، بر زمان تحلیل فرایند در حالت‌های مختلف مقایسه و در نهایت با بررسی نتایج، مقدار 1/5mm برای طول المان‌های لوله و تعداد 3 المان در ضخامت لوله انتخاب شد.

#### 4- نتایج و بحث

در این بخش، نخست اثر نحوه بارگذاری (بارگذاری آزاد، بارگذاری با ثابت ماندن انتهای لوله و بارگذاری با تغذیه محوری لوله) و پارامترهای هندسی قالب (شعاع گوشه قالب و طول ناحیه تغییر شکل) و مقدار تغذیه محوری لوله در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، بر مسیر کرنش و ناپایداری پلاستیک ایجاد شده در لوله، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن که با انجام آزمایش‌های تجربی و اندازه‌گیری کرنش در نواحی هم‌جوار پارگی ترسیم شده است، ارائه می‌گردد.

#### 4-1- اعتبار سنجی به نتایج شبیه‌سازی

در این پژوهش، به منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، توزیع کرنش و ضخامت یک قطعه در جهت محیطی و طولی، حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، با یکدیگر مقایسه شد. در شکل 8 مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده است. میزان خطای تحلیل عددی در مقایسه با تحلیل تجربی برای کرنش طولی 7%، کرنش محیطی 3%، ضخامت در طول 6% و ضخامت در محیط 4% است. برای محاسبه درصد خطا از رابطه (1) استفاده شد. به دلیل هزینه‌بر بودن بررسی همه پارامترها از طریق آزمایش تجربی، از نتایج تحلیل اجزای محدود برای بررسی اثر پارامترهای موثر بر مسیر کرنش لوله استفاده شد.

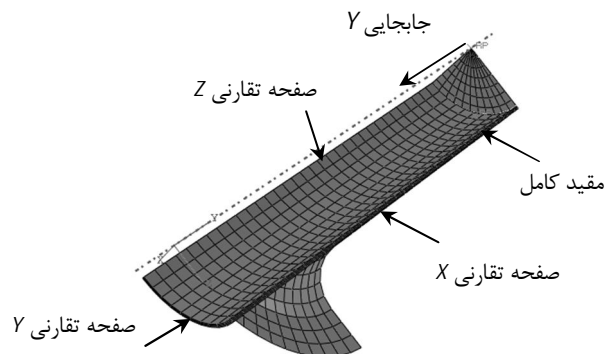
$$\%Error = \left| \frac{\varphi_{FEM} - \varphi_{Exp}}{\varphi_{Exp}} \right| \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه  $\varphi_{FEM}$  خروجی المان محدود و  $\varphi_{Exp}$  خروجی تحلیل تجربی است.

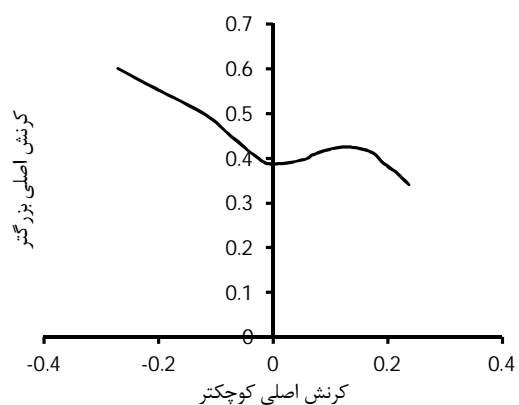
آباکوس<sup>1</sup> 6.11 استفاده شد. شرح تعریف مسئله به اختصار در این بخش بیان می‌شود. به دلیل تقارن محوری اجزای قالب و لوله و همچنین به منظور کاهش زمان تحلیل، یک هشتم مجموعه قالب و لوله به صورت سه بعدی مدل شد. در مدل‌سازی قطعات، فقط سطوحی از قالب که در تماس با لوله قرار می‌گیرند، به صورت پوسته‌ای مدل شد. مدل لوله از نوع شکل‌پذیر<sup>2</sup> و مدل سایر قطعات قالب، از نوع صلب گسسته<sup>3</sup> انتخاب شد.

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله مطابق جدول 2 و شکل 1 در نرم‌افزار وارد گردید. لوله‌های فولادی استفاده شده در آزمایش‌ها همسانگرد فرض شده و با  $R=1$  در نظر گرفته شد. در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی پارگی لوله فولادی زنگ‌نزن در حالت بالج آزاد، مطابق شکل 7 منحنی حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌نزن که از مرجع [18] استخراج شد، به عنوان معیار پارگی مورد استفاده قرار گرفت.

در این پژوهش، انجام شبیه‌سازی فرایند در یک گام تنظیم گردید که در آن ابتدا سنبه ثابت بوده و لوله با افزایش فشار داخلی، بشکته‌ای می‌شود. سپس همزمان با افزایش فشار داخلی یا ثابت بودن آن، سنبه نیز حرکت کرده و موجب تغذیه محوری لوله می‌شود. حرکت سنبه بر اساس سرعت ثابت و جابجایی معین تنظیم شده است. با توجه به نوع فرایند که در حالت سرد انجام می‌شود و تغییر شکل زیاد ماده، از گزینه حل صریح دینامیکی<sup>4</sup> برای تحلیل استفاده شد. برای کاهش زمان محاسبات در استفاده از حلگر صریح زمان، تحلیل به میزان کسری از زمان واقعی فرایند، برابر 0/1 ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به حساسیت به نرخ کرنش بسیار پایین فولاد زنگ‌نزن در



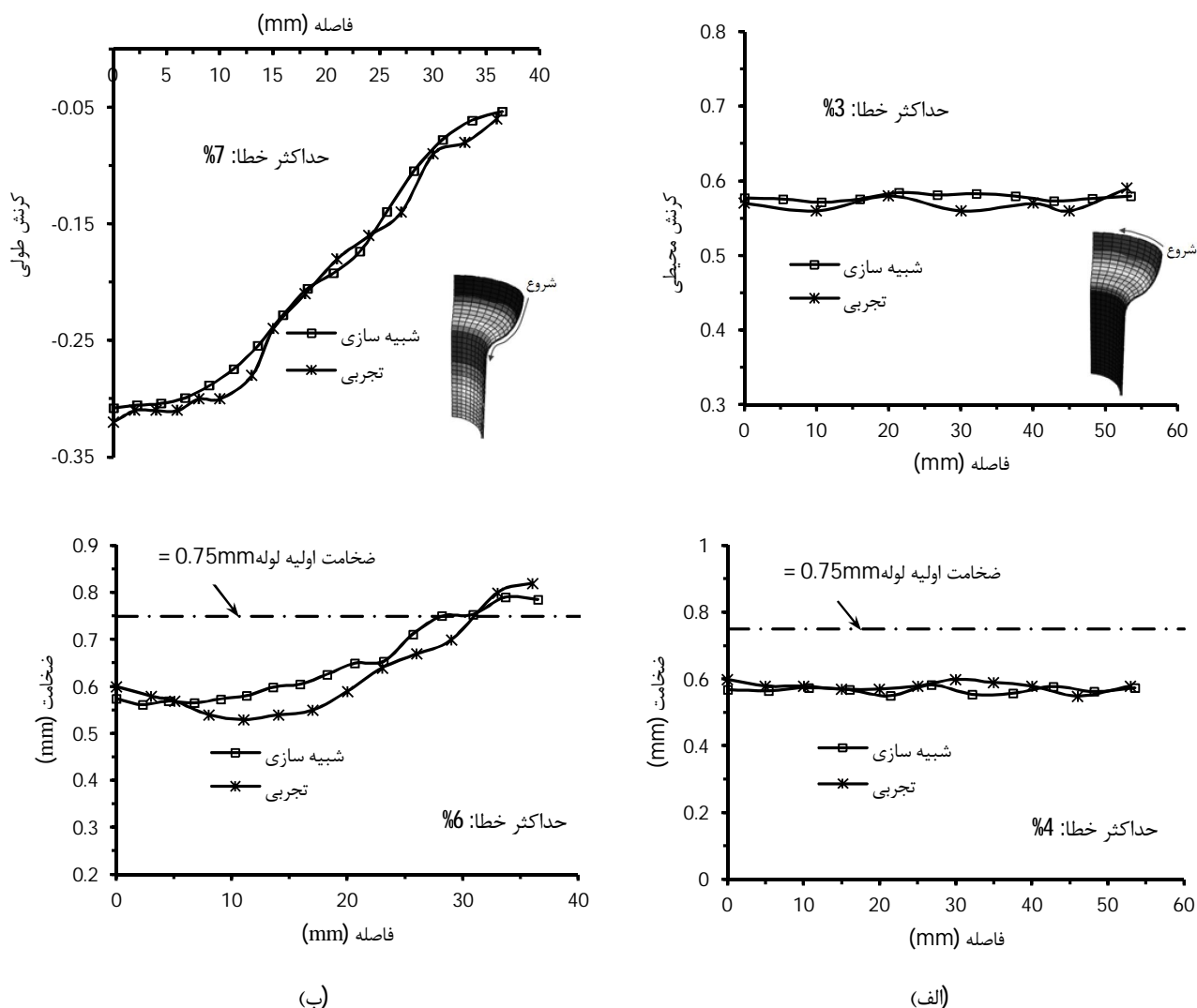
شکل 6 مدل شبیه‌سازی اجزای قالب



شکل 7 منحنی حد شکل‌دهی ورق فولادی زنگ‌نزن 304 [18]

1- Abaqus  
2- Deformable  
3- Discrete rigid  
4- Dynamic Explicit

5- Surface to surface



شکل 8 مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی، در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، ( $R=10\text{mm}$ ,  $W=40\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ ), (الف) در جهت محیطی، (ب) در جهت طولی

#### 4-2-1- بررسی اثر شعاع گوشه قالب ( $R$ )

در این حالت، با ثابت نگه‌داشتن اندازه طول ناحیه تغییر شکل ( $W$ ) برابر  $40\text{mm}$ ، اثر شعاع‌های گوشه مختلف قالب ( $5\text{mm}$ ،  $10\text{mm}$  و  $15\text{mm}$ ) بر مسیر کرنش لوله مورد مطالعه قرار گرفته است. مسیرهای کرنش مربوط به شعاع‌های مختلف گوشه قالب در شکل 9 نشان داده شده است. در حالت بارگذاری آزاد، با اعمال فشار داخلی به لوله و بشکته‌ای شدن آن در ناحیه تغییر شکل، کرنش‌های محیطی و طولی المان‌های قطعه در این ناحیه کششی هستند. از این رو، در این حالت از بارگذاری، مسیرهای کرنش قطعه در سمت راست نمودار (کرنش‌های اصلی کوچک‌تر و بزرگ‌تر مثبت هستند) قرار می‌گیرند. کرنش طولی اعمالی به قطعه در ناحیه تغییر شکل، با جریان مواد به این ناحیه ارتباط دارد. با افزایش شعاع گوشه قالب، مواد با سهولت بیشتری به ناحیه تغییر شکل جریان می‌یابند و در نتیجه کرنش طولی وارد بر قطعه در این ناحیه کاهش می‌یابد. از طرفی، شعاع گوشه قالب تأثیر چندانی بر کرنش محیطی قطعه ندارد. لذا با افزایش شعاع گوشه قالب، مسیر کرنش قطعه به سمت چپ نمودار جابجا می‌شود و نسبت کرنش ( $\beta$ ) کاهش می‌یابد.

در این پژوهش، اثر سه نوع بارگذاری شامل بارگذاری آزاد، بارگذاری با ثابت ماندن انتهای لوله و بارگذاری با تغذیه محوری بر مسیر کرنش لوله، از طریق شبیه‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل تشابه زیاد نتایج مربوط به حالت بارگذاری آزاد و بارگذاری با ثابت ماندن انتهای لوله، در این مقاله تنها نتایج مربوط به حالت بارگذاری آزاد و بارگذاری با تغذیه محوری مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

#### 4-2-2 بارگذاری آزاد

در این حالت، پس از قرار دادن لوله در داخل قالب، سنبه‌ها از دو طرف قرار داده می‌شوند تا آب‌بندی قالب به طور کامل انجام شود. سپس با اعمال فشار داخلی، لوله در ناحیه شبکه‌بندی شده منبسط می‌شود. اعمال فشار سیال تا زمانی ادامه می‌یابد که در لوله پارگی ایجاد شود. در این حالت از بارگذاری، اگرچه سنبه‌ها تغذیه محوری به لوله نمی‌دهند و تنها آب‌بندی قالب را تأمین می‌کنند ولی پیشروی ناچیزی (کمتر از 2 میلی‌متر از هر طرف لوله) مشاهده می‌شود. در این پژوهش، با تغییر پارامترهای هندسی قالب در این حالت از بارگذاری، اثر آن‌ها بر مسیر کرنش قطعه بررسی شد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

4-3-1- بررسی اثر شعاع گوشه قالب ( $R$ )

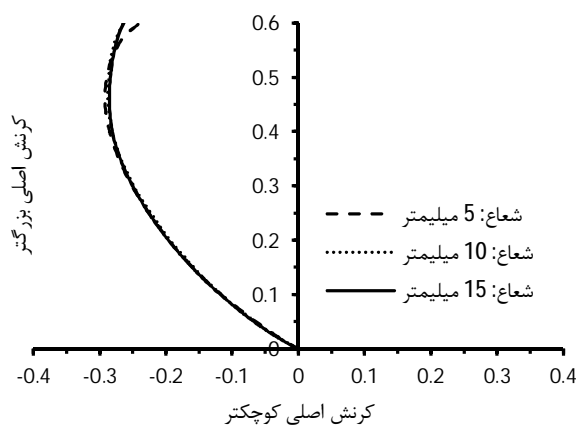
در این حالت از بارگذاری، با ثابت نگه‌داشتن اندازه طول ناحیه تغییر شکل ( $W$ ) در 40mm و تغذیه محوری لوله ( $L$ ) برابر 40mm، اثر شعاع‌های گوشه مختلف قالب (5mm، 10mm و 15mm) مورد مطالعه قرار گرفته است. مسیرهای کرنش مربوط به شعاع‌های گوشه مختلف در این حالت از بارگذاری در شکل 11 نشان داده شده است. در بارگذاری با تغذیه محوری، به دلیل تغذیه لوله به ناحیه تغییر شکل و اعمال نیروی فشاری طولی، لوله در جهت طول تحت کرنش فشاری قرار می‌گیرد. از طرفی انبساط لوله در این ناحیه منجر به ایجاد کرنش کششی در محیط لوله می‌شود. از این رو، مسیرهای کرنش قطعه، در سمت چپ منحنی قرار گرفته است. افزایش شعاع گوشه قالب در این حالت از بارگذاری، تأثیری بر مسیر کرنش قطعه ندارد. با تغییر شعاع گوشه قالب، کرنش‌های محیطی و طولی در ناحیه بروز پارگی تقریباً برابر هستند. زیرا با اعمال تغذیه محوری، تغییر شعاع گوشه قالب نقش کم-تری در بهبود جریان ماده به ناحیه تغییر شکل دارد و عمده تغذیه مواد توسط سنبه انجام می‌گیرد. از این رو، اثر تغییر شعاع گوشه قالب بر کرنش محیطی و طولی قطعه در ناحیه تغییر شکل ناچیز است.

4-3-2- بررسی اثر طول ناحیه تغییر شکل ( $W$ )

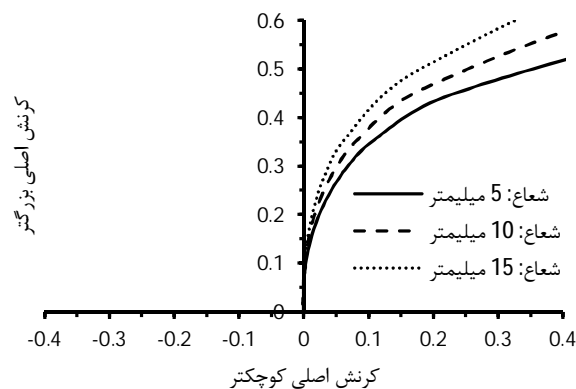
به منظور مطالعه اثر طول ناحیه تغییر شکل بر مسیر کرنش قطعه، با ثابت نگه‌داشتن اندازه شعاع گوشه قالب ( $R$ ) برابر 10mm و تغذیه محوری لوله ( $L$ ) در 40mm، اثر طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل (20mm، 40mm و 60mm) مورد بررسی قرار گرفت. مسیرهای کرنش مربوط به طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری با تغذیه محوری در شکل 12 نشان داده شده است. در این حالت از بارگذاری، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، نسبت کرنش ( $\beta$ ) افزایش می‌یابد. با بزرگ‌تر شدن طول این ناحیه، فشار وارد بر المان‌های لوله در ناحیه تغییر شکل کاهش می‌یابد. از این رو، کرنش فشاری اعمال شده 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 است.

4-3-3- بررسی اثر مقدار تغذیه محوری لوله ( $L$ )

به منظور بررسی اثر مقدار تغذیه محوری بر مسیر کرنش لوله، با شعاع گوشه



شکل 11 مسیرهای کرنش مربوط به شعاع‌های گوشه مختلف قالب در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، ( $R=10mm$ ،  $L=40mm$ )، حاصل از شبیه‌سازی



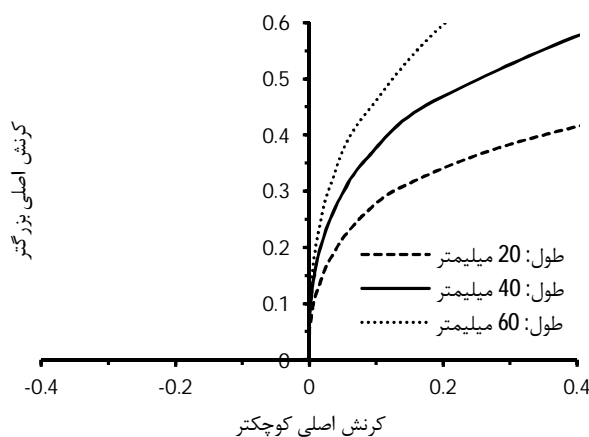
شکل 9 مسیرهای کرنش مربوط به شعاع‌های گوشه مختلف قالب در حالت بارگذاری آزاد ( $W=40mm$ )، حاصل از شبیه‌سازی

4-2-2- بررسی اثر طول ناحیه تغییر شکل ( $W$ )

در این حالت، با ثابت نگه‌داشتن اندازه شعاع گوشه قالب ( $R$ ) برابر 10mm، اثر طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل (20mm، 40mm و 60mm) بر مسیر کرنش مورد بررسی قرار گرفته است که مسیرهای کرنش حاصل در شکل 10 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، نسبت کرنش ( $\beta$ ) کاهش یافته است و مسیر کرنش قطعه به سمت چپ نمودار جابجا شده است. علت این امر آن است که با افزایش طول این ناحیه، به دلیل وجود مواد بیشتر در منطقه تغییر شکل، در یک فشار معین، تغییرات کرنش در طول نمونه کم‌تر است. از طرفی ارتفاع بشک‌های شدن لوله در ناحیه تغییر شکل، در یک فشار معین، کاهش یافته و کرنش محیطی لوله نیز کاهش می‌یابد.

## 4-3-3- بارگذاری با تغذیه محوری

در این حالت، سنبه‌ها علاوه بر آب‌بندی قالب، نقش اعمال تغذیه محوری به لوله را نیز دارند، به گونه‌ای که پس از قرار گرفتن لوله در داخل قالب و انجام آب‌بندی توسط سنبه‌ها، با اعمال فشار داخلی سیال، لوله در ناحیه شبکه-بندی شده منبسط می‌شود. سپس با اعمال تغذیه محوری، شکل‌دهی لوله تا لحظه پارگی ادامه می‌یابد.



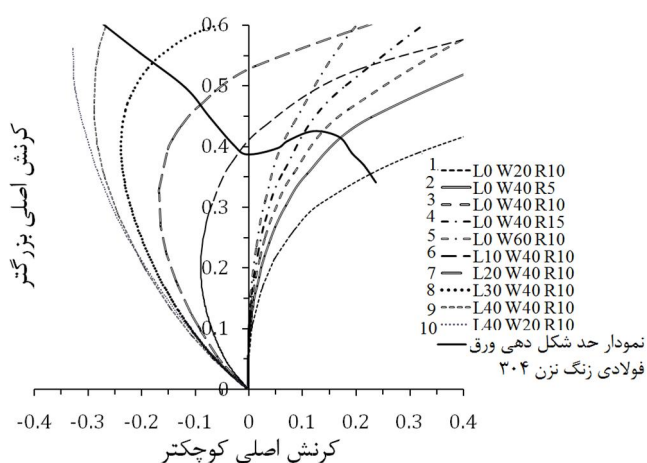
شکل 10 مسیرهای کرنش مربوط به طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری آزاد ( $R=10mm$ )، حاصل از شبیه‌سازی



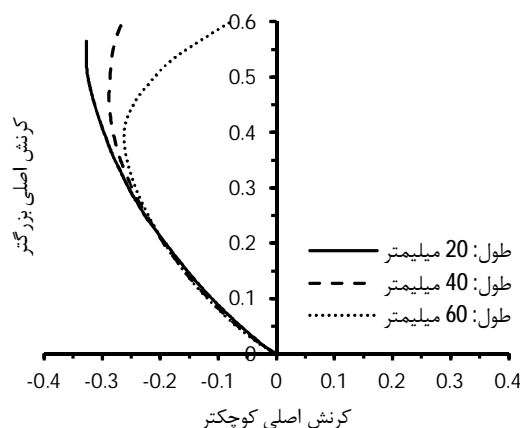
از آزمون‌های سری 1 تا 5 که انبساط‌دهی آزاد لوله با هندسه‌های مختلف قالب است؛ برای استخراج نقاط سمت راست منحنی و همچنین از آزمون‌های سری 6 تا 10 که بالچینگ لوله با مقادیر مختلف پیشروی محوری است؛ برای سمت چپ دیاگرام استفاده شده است. در شکل 14 مسیرهای کرنش به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود آزمایش‌های طراحی شده بر روی منحنی FLD ورق فولادی زنگ‌نزن 304 نشان داده شده است. شکل-دهی نمونه‌ها در آزمایشگاه تا زمانی ادامه یافت که در لوله پارگی ایجاد شود. سپس به منظور محاسبه نسبت کرنش ( $\beta$ )، کرنش‌ها در نزدیک‌ترین نقطه به محل پارگی اندازه‌گیری شدند. تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه در شکل 15 مشاهده می‌گردد. منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 حاصل از این پژوهش در شکل 16 ارائه شده است. در شکل 17 منحنی‌های حد شکل‌دهی مربوط به ورق فولادی زنگ‌نزن 304 مستخرج از مرجع [18] و منحنی FLD لوله، حاصل از این تحقیق بر روی یک دیاگرام نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود منحنی حد شکل‌دهی لوله، در بیش‌ترین اختلاف در سمت راست به میزان 8 درصد پایین‌تر از منحنی ورق قرار گرفته است. هر چه مسیر کرنش به سمت چپ دیاگرام میل کند، رفته رفته از این اختلاف کاسته می‌شود.

جدول 3 مشخصات حالت‌های انتخاب شده جهت انجام آزمایش‌های تجربی و نسبت کرنش گلوبی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی ( $\beta^*$ ) و حاصل از آزمایش تجربی ( $\beta$ )

شماره آزمایش	R (mm)	L (mm)	W (mm)	$\beta^*$	$\beta$
1	10	0	20	0/69	0/6
2	5	0	40	0/41	0/38
3	10	0	40	0/32	0/28
4	15	0	40	0/225	0/18
5	10	0	60	0/174	0/1
6	10	10	40	-0/04	-0/04
7	10	20	40	-0/165	-0/18
8	10	30	40	-0/237	-0/321
9	10	40	20	-0/366	-0/44
10	10	40	40	-0/5	-0/45



شکل 14 مسیرهای کرنش آزمایش‌های طراحی شده بر روی منحنی FLD ورق فولادی زنگ‌نزن 304، حاصل از شبیه‌سازی

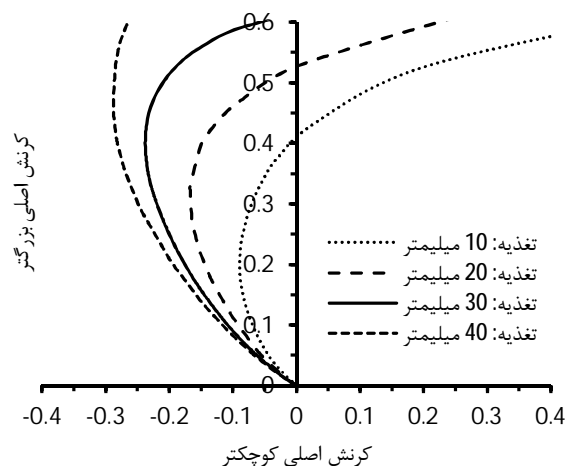


شکل 12 مسیرهای کرنش مربوط به طول‌های مختلف ناحیه تغییر شکل در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، ( $R=10\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ )، حاصل از شبیه‌سازی

قالب ( $R$ ) برابر 10mm و طول منطقه تغییر شکل ( $W$ ) برابر 40mm و مقادیر مختلف تغذیه لوله (10mm, 20mm, 30mm, 40mm) تحلیل و بررسی عددی صورت گرفت. اثر مقدار تغذیه محوری لوله بر مسیر کرنش قطعه در شکل 13 نشان داده شده است. با افزایش تغذیه محوری و جریان یافتن مواد به ناحیه تغییر شکل، فشار اعمالی در جهت طول لوله افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کرنش فشاری در این جهت و کاهش نسبت کرنش ( $\beta$ ) خواهد شد.

#### 4-4- ترسیم منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304

پس از انجام شبیه‌سازی و مطالعه اثر نحوه بارگذاری و پارامترهای هندسی قالب بر مسیر کرنش لوله، آزمایش‌های تجربی به منظور ترسیم منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 انجام گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها، آزمایش‌هایی با تغییر در نحوه بارگذاری، شعاع گوشه قالب، طول ناحیه تغییر شکل و مقدار تغذیه محوری لوله انجام شد تا نقاط مختلفی جهت ترسیم منحنی حد شکل‌دهی حاصل شود. جدول 3 حالت‌های انتخاب شده جهت انجام آزمایش تجربی و استخراج نقاط ناپایداری پلاستیک را به همراه نسبت کرنش گلوبی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی المان محدود ( $\beta^*$ ) و حاصل از آزمایش تجربی ( $\beta$ ) نشان می‌دهد.



شکل 13 مسیرهای کرنش مربوط به مقادیر مختلف تغذیه لوله، حاصل از شبیه‌سازی ( $R=10\text{mm}$ ,  $W=40\text{mm}$ )

200mm و ضخامت 0/75mm استفاده شد. نتایج بدست آمده از این پژوهش به طور خلاصه در زیر ارائه می‌گردد:

1- در حالت بارگذاری آزاد لوله، میزان پیشروی محوری لوله بسیار ناچیز بوده و مسیر کرنش مشابه بارگذاری لوله با انتهای مقید است. در چنین شرایطی مسیر کرنش در حین فرایند در سمت راست منحنی FLD قرار می‌گیرد.

2- با افزایش طول ناحیه تغییر شکل، مسیر کرنش قطعه به حالت کرنش-صفحه‌ای نزدیک می‌شود و نسبت کرنش ( $\beta$ ) به سمت صفر میل می‌کند. این نتیجه مستقل از نحوه بارگذاری است.

3- با افزایش شعاع گوشه قالب در حالت بارگذاری آزاد، مسیر کرنش به حالت کرنش-صفحه‌ای نزدیک می‌شود و نسبت کرنش ( $\beta$ ) کاهش می‌یابد. اما در حالت بارگذاری با تغذیه محوری لوله، این پارامتر هیچ اثری بر مسیر کرنش قطعه و نسبت کرنش ( $\beta$ ) ندارد.

4- در حالت بارگذاری با تغذیه محوری، با افزایش مقدار تغذیه لوله، نسبت کرنش ( $\beta$ ) کاهش می‌یابد.

5- در این پژوهش، منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 از طریق آزمایش تجربی به دست آمده است. منحنی حد شکل‌دهی حاصل برای لوله، شبیه به منحنی مربوط به ورق با همان جنس است، با این تفاوت که منحنی حد شکل‌دهی لوله اندکی پایین‌تر از منحنی حد شکل‌دهی ورق قرار می‌گیرد.

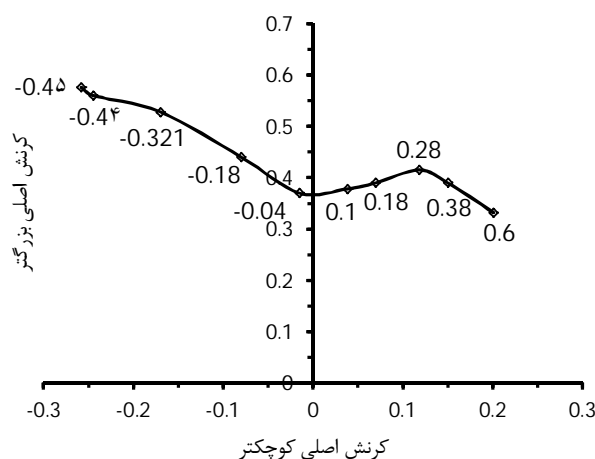
6- نقاط سمت راست منحنی FLD با 5 عدد تست بالچینگ آزاد و نقاط سمت چپ منحنی FLD با 5 عدد تست بالچینگ با تغذیه محوری متفاوت قابل استخراج است. مجموعاً برای استحصال منحنی FLD لوله‌های فلزی می‌توان از 10 آزمون هیدروبالچینگ لوله بر طبق ساختار طراحی شده در این مقاله بهره برد.

## 6- مراجع

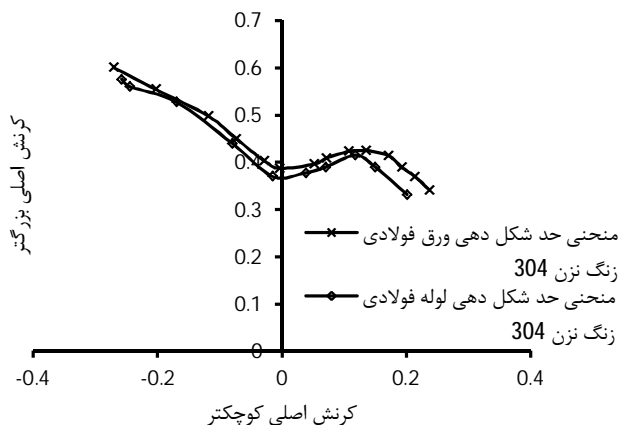
- [1] S. S. Eftekhari, B. S. Ahmadi, K. Khalili, B. Kang, Ultrasonic tube hydroforming, a numerical and analytical study, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No.4, pp. 46-59, 2013. (In Persian)
- [2] M. Ahmetoglu, T. Altan, Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No. 1, pp. 25-33, 2000.
- [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] 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.
- [5] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal forming: Mechanics and metallurgy*: Cambridge University Press, 2011.
- [6] S. P. Keeler, *Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches*, MIT, pp. 25-48, 1961.
- [7] G. M. Goodwin, Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, *SAE Technical Paper*, pp. 1968.
- [8] D. Banabic, *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits*: Springer, 2000.
- [9] H. Kleemola, M. Pelkkikangas, Effect of predeformation and strain path on the forming limits of steel, copper and brass, *Sheet Metal Industries*, Vol. 64, No. 6, pp. 591-592, 1977.
- [10] R. Arrieux, C. Bedrin, M. Boivin, Determination of an intrinsic forming limit stress diagram for isotropic metal sheets, in *Proceeding of*, 61-71.
- [11] A. F. Graf, W. F. Hosford, Calculations of forming limit, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 24, No. 11, pp. 2497-2501, 1993.
- [12] V. Nandedkar, K. Narasimhan, Measurement of strain history during the stretching of forming-grade steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89, pp. 24-29, 1999.



شکل 15 تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه



شکل 16 منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304، حاصل از آزمایش‌های تجربی (اعداد روی نمودار بیان‌کننده نسبت کرنش  $\beta$  است)



شکل 17 منحنی‌های حد شکل‌دهی لوله و ورق فولادی زنگ‌نزن 304

## 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی مورد مطالعه قرار گرفت و اثر نحوه بارگذاری و هندسه قالب و همچنین مقدار تغذیه محوری لوله بر مسیر کرنش قطعه مورد بررسی و بحث قرار گرفت. بدین منظور از لوله‌هایی با طول



- process, *Fifth Joint Conference of Metallurgical Engineers Society and the scientific Casting community*, 2011. (In Persian)
- [18] R. Makkouk, N. Bourgeois, J. Serri, B. Bolle, M. Martiny, M. Teaca, G. Ferron, Experimental and theoretical analysis of the limits to ductility of type 304 stainless steel sheet, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 27, No. 2, pp. 181-194, 2008.
- [19] Abaqus version 6.11 documentation, *Abaqus Analysis User's Manual*.
- [20] G. Ngaile, S. Jaeger, T. Altan, Lubrication in tube hydroforming (THF): Part I. Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition and expansion zones, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 108-115, 2004.
- [13] N. Asnafi, Analytical modelling of tube hydroforming, *Thin-Walled Structures*, Vol. 34, No. 4, pp. 295-330, 1999. (In Persian)
- [14] N. Asnafi, A. Skogsgårdh, Theoretical and experimental analysis of stroke-controlled tube hydroforming, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 279, No. 1, pp. 95-110, 2000. (In Persian)
- [15] J. Kim, S.-W. Kim, W.-J. Song, B.-S. Kang, Analytical approach to bursting in tube hydroforming using diffuse plastic instability, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, No. 10, pp. 1535-1547, 2004.
- [16] S. Amirabdollahian, M. Gerdooyi, Numerical study of plastic instability in tube hydroforming, *Fifth Conference of Metal Forming and Materials*, Sharif University of Technology, 2011. (In Persian)
- [17] S. Amirabdollahian, M. Gerdooyi, Studying the effect of the anisotropic tube properties of on bursting caused by the pressure in hydroforming