

بررسی تئوری و تجربی فرآیند ساخت لوله های قطور به روش CUO

حسن مسلمی نائینی	استاد بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس
امیر حسین رحیم یار هریس	کارشناس ارشد بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس
مهدی سلطانیپور	دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک دانشگاه توکیو - ژاپن
عبدالرحیم ساجدی نژاد	رئیس کارخانه شماره ۴، شرکت لوله سازی اهواز
خالد واحدی	مدیر تولید کارخانه شماره ۴، شرکت لوله سازی اهواز

چکیده

در این مقاله شکل دهی لوله های قطور به روش CUO با استفاده از روش اجزاء محدود و به وسیله نرم افزار MSC.Marc شبیه سازی شده است. روش CUO که جهت تولید لوله های قطور با درز جوش طولی بکار می رود شامل سه مرحله Cing یا خمکاری لبه های ورق، Uing یا شکل دادن ورق به فرم U و Oing یا گرد کردن لوله می باشد. هدف از این تحقیق تحلیل عددی فرآیند شکل دهی لوله به روش CUO و فراهم نمودن امکان بررسی نحوه تاثیر پارامترهای مختلف شکل دهی بر روی خواص و هندسه محصول نهایی می باشد. نوع تحلیل انجام شده کرنش صفحه ای بوده و رفتار ماده الاستیک پلاستیک در نظر گرفته شده است. توزیع تنش معادل و کرنش پلاستیک معادل در هر یک از مراحل تحلیل در بخشهای مختلف ورق و همچنین نیروی لازم جهت انجام هر یک از مراحل فرآیند محاسبه شده است. با استفاده از نتایج این تحلیل می توان شکل هندسی بهینه پانچ و نیروهای وارد بر اجزاء مختلف ماشین آلات شکل دهی را محاسبه نمود. به منظور اطمینان از صحت تحلیل انجام شده نتایج تحلیل با نتایج تجربی مقایسه شده و تطابق مناسبی بین آنها مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: روش شکل دهی CUO - روش اجزاء محدود - MSC.Marc - تحلیل الاستیک پلاستیک

Theoretical and Experimental Investigations of Manufacturing Process of Large Diameter Pipe by C-U-O Method

H. Moslemi Naeini	Professor of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares
A.H. Rahimyar Haris	M.Sc., Department of Mechanical Engineering University of Tarbiat Modares
M. Soltanpour	Ph.D. Student of Mechanical Engineering, Tokyo University, Japan
A. Sajedinezhad	Ahwaz Pipe Mills, Ahwaz, I. R. Iran
K. Vahedi	Ahwaz Pipe Mills, Ahwaz, I. R. Iran

Abstract

In this research forming of CUO large diameter pipes is simulated by MSC.Marc. The aim of the present work is the analysis of forming process and to determine the effects of different forming parameters on geometry and properties of final product. A plane strain elastic-plastic analysis is presented and the distribution of equivalent stress and equivalent plastic strain at each increment as well as required force for each forming part are calculated. Results of the analysis compare well with experiments.

Key words: CUO Forming method, finite element method, MSC.Marc, Elastic- Plastic Analysis.

۱- مقدمه

یومین هوانگ نیز شبیه‌سازی الاستیک-پلاستیک فرآیند خمش UO را با استفاده از روش اجزاء محدود انجام داده است [۵]. هرینگ و کراکیدز در سال ۲۰۰۷ تاثیر پارامترهای شکلدهی نظیر قطر قالب، میزان جابجایی قالب، کرنش فشاری در مرحله Oing و غیره را در کارایی محصول تولیدی و چگونگی بهینه سازی خواص محصول مورد بررسی قرار دادند [۶].

۲- انتخاب روش تحلیل

امروزه روش اجزاء محدود بعنوان یکی از کارآمدترین ابزار جهت شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف علم مهندسی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد و با افزایش سرعت پردازش در کامپیوترها قابلیت‌های این روش نیز بیش از پیش افزایش می‌یابد. نرم‌افزار MSC.Marc یکی از نرم افزارهای پیشرفته جهت تحلیل اجزاء محدود می‌باشد که توانایی بالایی در شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی و مدل‌های تماسی دارد و از این جهت یکی از قویترین نرم افزارهای روز به شمار می‌رود. با توجه به قابلیت‌های مذکور برای تحلیل فرآیند از این نرم افزار بهره گرفته شده است.

۳- نحوه مدل‌سازی

با عنایت به مشکلات عدیده صنایع لوله سازی نظیر شرکت لوله سازی اهواز در تولید لوله های با اقطار و ضخامت بالا مبنای مدل‌سازی بزرگترین سایز تولیدی آن شرکت یعنی، لوله با قطر اسمی ۵۶ اینچ و ضخامت ورق (۰/۷۸ اینچ) ۱۹/۸۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

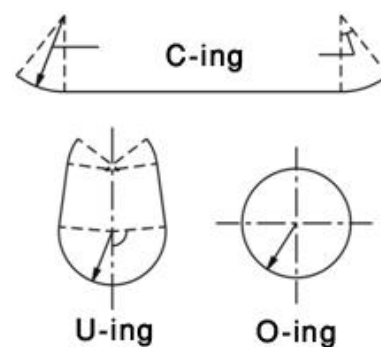
بدین منظور جهت محاسبه عرض ورق از معادله تجربی (۱) استفاده می‌شود که در آن w عرض ورق d قطر نامی لوله و t ضخامت ورق می‌باشند.

$$w = 0.9925(d - t)\pi \quad (1)$$

با استفاده از این معادله عرض مورد نیاز ورق برابر با ۴۳۷۳/۳۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن مساله و بمنظور کاهش زمان اجرا و حافظه مورد نیاز مدل‌سازی تنها برای نیمی از لوله انجام شده است.

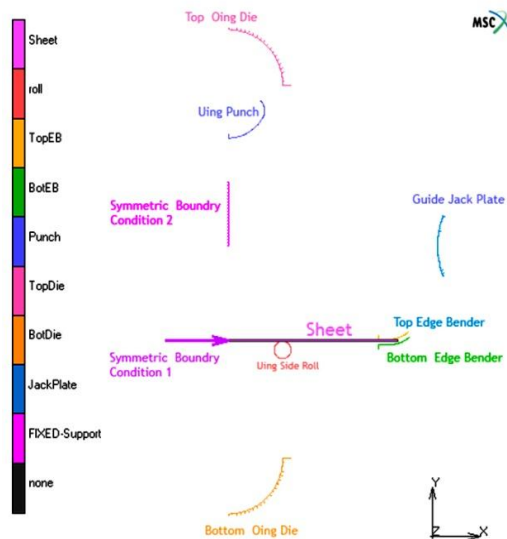
ابعاد قالب و غلتکها در پرس U و O با توجه به نقشه‌های موجود در شرکت لوله‌سازی اهواز استخراج و شبیه سازی شده‌اند. لازم به ذکر است حرکت غلتکهای جانبی در پرس U توسط مکانیزم جناغی شکل موجود در بخش زیرین پرس U صورت می‌پذیرد (حرکت عمودی پانچ منجر به حرکت افقی

یکی از روشهای تولید لوله های قطور با درز جوش طولی فرآیند شکل‌دهی C-U-O می‌باشد [۱]. مراحل تولید لوله در این روش چنانچه در شکل ۱ نشان داده شده است بترتیب عبارتند از: ایجاد انحناء در لبه‌های ورق (C-ing)، شکل‌دهی ورق به حالت (U-ing)، گرد کردن ورق U شکل (O-ing)، جوشکاری و انبساط داخلی. در مرحله اول به دو کناره ورق مسطح فلزی انحنایی نزدیک به انحنای لوله داده می‌شود. این مرحله از ایجاد سطح هموار در نزدیکی درز طولی لوله جلوگیری می‌کند. البته شکل‌دهی ورق به صورت لوله بدون انجام این مرحله غیر ممکن نیست، اما منجر به افزایش نیروی مورد نیاز در مرحله O-ing می‌شود. در مرحله بعدی قسمت مرکزی ورق توسط پانچ با پروفیل مشخص خمیده شده و حالت U شکل به خود می‌گیرد. نکته مهم در این مرحله وجود غلتکهایی در لبه پایینی قالب این دستگاه است که علاوه بر کاهش اصطکاک، در مراحل انتهایی پرس بطرف داخل حرکت کرده و باعث جمع شدن ورق می‌شوند. ورق U شکل به زیر پرسی با قالبهای دایروی شکل منتقل شده و به شکل تقریباً گرد در می‌آید. سپس لوله برای عملیات جوش آماده است. پس از انجام جوشکاری درز لوله، یک منبسط شونده مکانیکی به درون لوله وارد شده و آن را تا قطر طراحی شده منبسط می‌کند.



شکل ۱ - مراحل مختلف تولید لوله در روش CUO [۱]

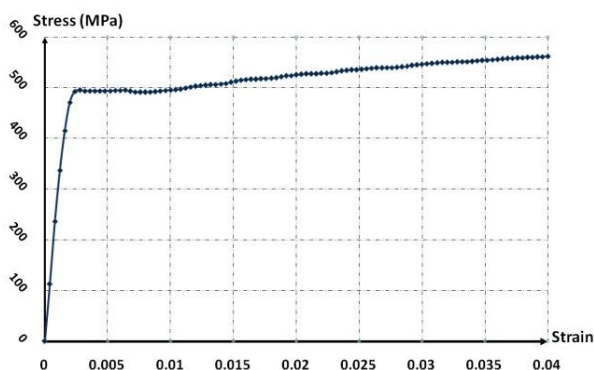
با توجه به وجود مشکلات در تولید لوله با اقطار و ضخامتهای بالا به دلیل افزایش نیروی مورد نیاز در مرحله O بهینه سازی فرآیند تولید مستلزم شبیه سازی فرآیند و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف نظیر فرم هندسی پانچ و نوع فولاد مورد استفاده بر فرآیند می‌باشد. و غالب تحقیقات صورت گرفته در زمینه این فرآیند در همین راستا انجام شده است. کاوادا و همکارانش فرآیند شکل‌دهی لوله به روش UO را یکبار با فرض ماده الاستیک-پلاستیک کامل [۲] و بار دیگر با فرض ماده الاستیک-کارسختی خطی [۳] تحلیل کردند و پروفیل ورق تغییر شکل یافته و نمودار نیرو-کورس را رسم نمودند [۴].



شکل ۲- اجزا و شرایط مرزی مدل سازی در نرم افزار

۴- خواص مواد اولیه

ورقهای مورد استفاده در شرکت لوله‌سازی اهواز با توجه به موارد کاربرد آنها در صنایع نفت و گاز، طبق استاندارد API طبقه‌بندی می‌شوند. برای بدست آوردن خواص فولاد مورد استفاده از یک ورق چند نمونه طولی و عرضی بریده شده و در آزمایشگاه شرکت لوله‌سازی اهواز مورد تست قرار گرفته‌اند که منحنی تنش کرنش استخراج شده در شکل ۲ نشان داده شده است. این منحنی بطور مستقیم به عنوان منحنی تنش-کرنش به نرم‌افزار داده شده است. لازم به ذکر است با توجه به پروسه تولید ورقهای مذکور (نورد) خواص در دو جهت طولی و عرضی به مقدار ناچیزی متفاوت می‌باشد که در مدل حاضر به لحاظ کاهش پیچیدگیهای مدل از لحاظ نمودن این تفاوت صرفنظر شده است.



شکل ۳ - منحنی تنش-کرنش استخراج شده جهت فولاد X70

غلتکها می‌شود) و عملاً حرکت آنها تابعی از حرکت پانچ می‌باشد که تابع مذکور استخراج و در مدلسازی اعمال گردیده است. شعاع انحنای بخشی از لوله که در مرحله C-ling خم می‌شود تقریباً برابر با شعاع انحنای نهایی مرحله O پرس خواهد بود. البته با توجه به نوع تحلیل صفحه‌ای صورت گرفته، بجای استفاده از مجموعه‌ای از غلتکها برای ایجاد انحنا در لبه ورق (روش فعلی تولید در شرکت لوله‌سازی اهواز) از پرس و یک جفت قالب استفاده شده است تا تاثیرات ناشی از کارسختی در این مرحله در مراحل بعدی تحلیل لحاظ گردد. با توجه به مطالب یاد شده، مقادیر ورودی در مدل پرس U در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

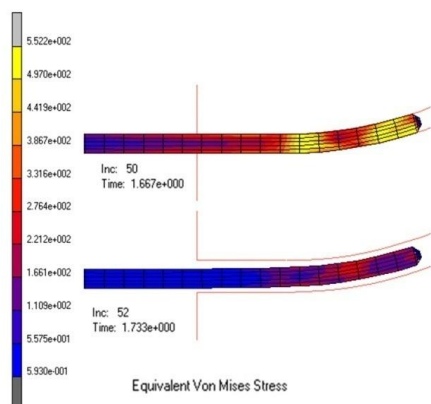
از آنجایی که میزان برگشت فنری پس از انجام مرحله U مانع از ورود دهانه ورق U شکل به داخل قالب‌های پرس O می‌شود، از یک جک برای جمع کردن دهانه استفاده می‌شود که در مدل نیز شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱ - مقادیر در نظر گرفته شده جهت تحلیل

706.4 mm	کورس اولیه پانچ (قبل از حرکت غلتک جانبی)
279.4 mm	طول کورس مکانیزم جناغی در جهت عمودی
985.8 mm	کل حرکت مفید پانچ در جهت عمودی
1000 mm	طول کورس در نظر گرفته شده برای پانچ
2620 mm/min	سرعت حرکت قالب در پرس U

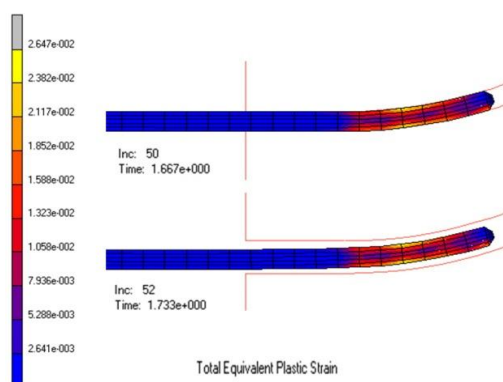
یکی از موارد مهم در شبیه‌سازی این فرآیند انتقال تاریخچه شکل‌دهی در هر یک از مراحل C و U به مرحله بعدی جهت محاسبه میزان تنش تسلیم جهت هر یک از المانها می‌باشد. به این منظور دو امکان متفاوت در نرم‌افزار MSC.Marc 2005 تعبیه شده است. در روش نخست خروجی یک مرحله به عنوان شرط اولیه یا ورودی مرحله بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد اما در روش دوم کل فرآیند شکل‌دهی در یک مدل بطور پیوسته صورت می‌پذیرد. در تحقیق حاضر از روش دوم جهت انتقال تاریخچه شکل‌دهی استفاده شده است.

مرتباً المان انتخابی المان ۴ ضلعی با ۴ گره در هر یک از گوشه‌ها (quad 4) و نوع آن المان کرنش صفحه‌ای شماره ۱۱ نرم افزار می‌باشد.



شکل ۴ - تغییرات تنش معادل وان میزز (MPa) در لبه ورق در حین مرحله Cing

در شکل ۵ هندسه لبه ورق پس از اتمام مرحله C و باربرداری نشان داده شده است. همانگونه که در شکل نشان داده شده است، بجز انتهای لبه که به دلیل وجود لبه‌های تیز (پخ لازم جهت جوشکاری درز لوله) و فعال بودن گزینه تجدید مش بطور موضعی دچار تغییر شکل زیادی شده است، توزیع کرنش در سایر نقاط لبه تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل ۵ - تغییرات کرنش معادل پلاستیک در لبه ورق پس از اتمام مرحله Cing و بار برداری

شکل ۶ نشان دهنده نحوه توزیع تنش معادل در ورق در انتهای کورس پانچ پرس U می‌باشد. مطابق شکل در این مرحله تغییر شکل پلاستیک به ناحیه مرکزی ورق محدود می‌شود. همانگونه که در شکل نشان داده شده است میزان برگشت فنری در این مرحله به اندازه‌ای است که یال ورق بطور تقریبی از زاویه ۹۵ درجه به زاویه ۸۵ درجه باز می‌گردد. در غیر اینصورت امکان خارج کردن پانچ پرس U از داخل ورق از بین می‌رود.

۵- فرضیات و تئوری شبیه سازی

در این مدل پس از اینکه ماده به نقطه تسلیم رسید، کرنش در ماده بر اساس مدل ایزوتروپیک بیان می‌گردد. سطح تسلیم بطور یکنواخت در تمامی جهات با افزایش کرنش پلاستیک معادل توسعه می‌یابد و همچنین کارسختی بصورت ایزوتروپیک و سطح تسلیم بر اساس مدل فون میسر تعریف گردیده است. با توجه به طول نسبتاً زیاد لوله‌ها (۱۲ متر)، در راستای محور لوله و عدم اعمال نیرو در راستای محور لوله، کرنش و تغییر طول در راستای محور قابل صرف‌نظر بوده و تحلیل حاضر کرنش صفحه‌های فرض شده است. نوع موادی که به صورت پیش فرض نرم افزار MCS.Marc پشتیبانی می‌کند عبارتند از: ایزوتروپیک، ارتوتروپیک، انیزوتروپیک و هایپو الاستیک که در تحلیل حاضر با توجه به موارد ذکر شده نوع ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. در بخش مواد ایزوتروپیک چندین زیر گروه تعریف شده است که در این تحلیل ماده از نوع الاستیک-پلاستیک با کارسختی استفاده شده است. بخش الاستیک از رفتار ماده با قانون هوک بیان می‌گردد که با معادله خطی بین تنش و کرنش توسط معادله (۲) بیان می‌شود.

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

ضریب ثابت لامه λ و مدول برشی G در معادله (۲) با توجه به مقادیر مدول یانگ E و ضریب پواسون γ از معادلات (۳) و (۴) محاسبه می‌گردند.

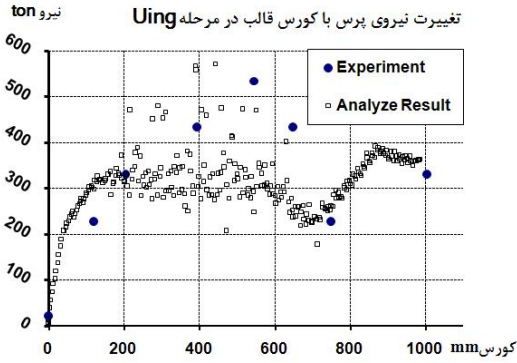
$$\lambda = \gamma E / ((1 + \gamma)(1 - 2\gamma)) \quad (3)$$

$$G = E / 2(1 + \gamma) \quad (4)$$

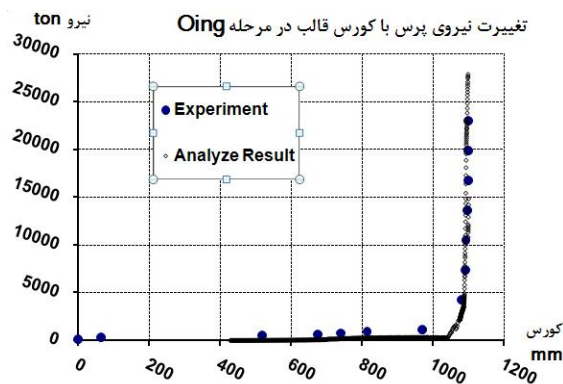
۶- نتایج و بحث

همانگونه که ذکر شد تغییرات تنش و کرنش در نقاط مختلف در هر مرحله زمانی توسط نرم افزار محاسبه می‌شود. در شکل ۳ هندسه لبه ورق و تغییرات تنش معادل ون مایرز در بخش‌های مختلف آن در حین شکل دهی مرحله C نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشترین تنش به تارهای موجود در بالا و پایین ورق اعمال می‌شود.

میلیمتر نهایی کورس وارد مدار می‌شوند. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج تحلیل وجود به گونه ای که ماکزیمم انحراف در انتهای کورس مرحله Oing حدوداً معادل ۱۷/۸ در صد می‌باشد.



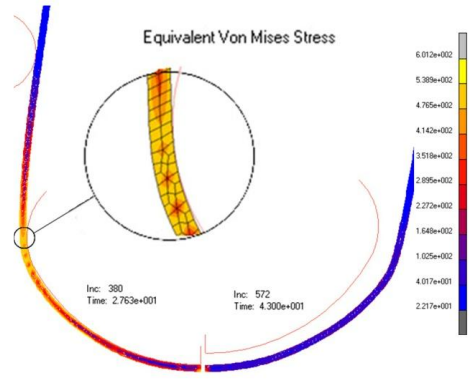
شکل ۸ - مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی نیروی پانچ در پرس U نسبت به کورس



شکل ۹ - مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی نیروی پانچ در پرس O نسبت به کورس

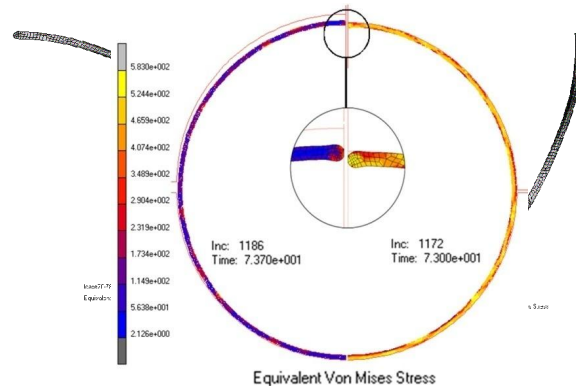
۷- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل عددی فرآیند CUO با استفاده از نرم افزار MSC.Marc برای یکی از اندازه‌های در حال تولید در شرکت لوله‌سازی اهواز انجام و نتایج تحلیل با نتایج تجربی مقایسه گردید. این شبیه‌سازی می‌تواند مقدمه‌ای جهت تحلیل نیروهای وارد بر ماشین‌آلات و در نهایت طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌آلات خطوط تولید لوله به روش C-U-O باشد. همچنین با توجه به اینکه نکته مهم در این روش تولید میزان نیروی مورد نیاز در انتهای مرحله O می‌باشد، می‌توان با استفاده از این تحلیل، شکل بهینه پانچ مرحله U را جهت نیل به کمترین نیروی مورد نیاز در مرحله O بدست آورد.



شکل ۶ - شکل هندسی ورق در پایان مرحله U-ing (قبل و بعد از بار برداری) و تغییرات تنش معادل وان میزز (MPa)

در شکل ۷ توزیع تنش در دو نیمه بالایی و پایینی ورق در انتهای کورس پرس O نشان داده شده است همانگونه که مشاهده می‌شود کلیه قسمت‌های تغییر شکل نیافته ورق در این وضعیت در سطح تنش تسلیم قرار دارند. چنانچه در ادامه اشاره خواهد شد این وضعیت متناظر با ماکزیمم نیروی پرس O می‌باشد که یکی از مهمترین فاکتورها در این روش تولید لوله می‌باشد.



شکل ۷ - شکل هندسی و نحوه توزیع تنش معادل وان میزز (MPa) در دو نیمه بالایی و پایینی ورق در پایان مرحله O-ing (قبل از بار برداری)

در شکل ۸ تغییرات نیروی پانچ در پرس U نسبت به کورس پانچ در دو حالت تجربی و تحلیلی ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین داده‌های به دست آمده از تحلیل و داده‌های تجربی وجود دارد. لازم به ذکر است بدلیل استقلال نیروی غلتکها در تحلیل صورت گرفته، در محدوده‌ای از منحنی که حرکت پانچ و غلتک بطور توأم صورت می‌پذیرد شاهد نوسان داده‌های تحلیل می‌باشیم. مقایسه تغییرات نیروی پرس O نسبت به کورس پرس در دو حالت تجربی و تحلیلی نیز در شکل ۹ صورت گرفته است. در بخش پایانی مرحله O مقدار نیروی پرس بطور ناگهانی افزایش می‌یابد و ۶ جک اصلی پرس در ۱۳۰

مراجع

- [۱] مسلمی نائینی، حسن، مطالعه تئوری و تجربی فرآیند ساخت لوله‌های قطور به روش U&O و تدوین نرم‌افزار طراحی فرآیند، طرح تحقیقاتی مشترک دانشگاه تربیت مدرس و شرکت لوله سازی اهواز، سال ۱۳۸۵.
- [2] A. Baba, Y. Tozawa, K. Kawada, Analysis of Deformation Process in Forming of Tube, J of JSTP, Vol. 13, pp. 33-41, 1972 (in Japanese).
- [3] K. Kawada, Y. Tozawa, Analysis of Deformation Process in Forming of Tube for Elastic Work-Hardening Material, J of JSTP, Vol. 16, pp. 1132-1137, 1975 (in Japanese).
- [4] K. Kawada, Y. Tozawa, Effect of the Diameter of U-Forming Punch on the Forming of Tube, J of JSTP, Vol. 18, pp. 813-820, 1977 (in Japanese).
- [5] Y. M. Huang, D. K. Leo, An Elastic-Plastic Finite Element Simulation of Successive UO-bending Process of Sheet Metal, J of Material Processing of Technology, Vol. 53, pp. 643-661, 1995.
- [6] M.D. Herynk, S. Kyriakides, A. Onoufriou, H.D. Yun, Effects of the UOE/UOC pipe manufacturing processes on pipe collapse pressure, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 49, pp. 533-553 (2007).