



پیش بینی حد خم کاری لوله آلومینیومی 8112 به کمک معیار گلوپی در خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی

مهرداد پالوچ¹، مجید الیاسی^{2*}، مرتضی حسین زاده³

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

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیتا... آملی، آمل

* بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 آذر 1394

پذیرش: 22 اسفند 1394

ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی

حد خم کاری

آلیاژ آلومینیوم 8112

شبیه سازی اجزای محدود

امروزه خم کاری کششی دورانی لوله های جدارنازک در نسبت خم بحرانی یک فرایند تولیدی پرکاربرد در صنایع پیشرفته از جمله هوافضا و خودروسازی است. بیضوی شدن سطح مقطع و تغییرات ضخامت لوله از عیوب جدایی ناپذیر این فرایند به شمار می آیند. هدف از انجام این پژوهش، به دست آوردن کوچک ترین نسبت خم و بیشترین فشار داخلی قابل اعمال در خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی لوله جدارنازک آلومینیومی با آلیاژ 8112 به کمک معیار گلوپی است. برای این منظور کرنش معادل در ناحیه بحرانی انحنای خارجی خم، ملاک تعیین پارگی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که معیار گلوپی انتخاب شده با بیشینه اختلاف 12.5% از تست تجربی، روش مناسبی جهت تعیین آغاز گلوپی در خم کاری است، همچنین تأثیر نسبت خم و فشار داخلی بر بیضوی شدن سطح مقطع و تغییرات ضخامت، به کمک شبیه سازی در نرم افزار آباکوس و تست های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. بر خلاف انتظار، محل بیضوی شدن بیشینه در سطح مقطع میانی خم نبوده و صرف نظر از میزان فشار داخلی و نسبت خم، در سطح مقطع با زاویه تقریباً $\theta=33^\circ$ رخ می دهد. کمترین مقدار بیضوی شدن قابل دستیابی در نسبت های خم 1.6، 1.8 و 2 به ترتیب 11.42%، 7.72% و 4.35% است. علاوه بر این نسبت خم و فشار داخلی اثر قابل توجهی بر کیفیت سطح مقطع لوله های خمیده دارند. بدین صورت که با افزایش نسبت خم و یا فشار، بیضوی شدن سطح مقطع و ضخیم شدن دیواره لوله در انحنای داخلی خم کاهش می یابد، اما افزایش فشار بر خلاف افزایش نسبت خم، سبب افزایش نازک شدن دیواره در انحنای خارجی خم می شود.

Predicting the bending limit of AA8112 tubes using failure criterion in Hydro-Rotary draw bending process

Mehrdad Paluch¹, Majid Elyasi^{1*}, Morteza Hosseinzadeh²

1- Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

* P.O.B. 484, Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 29 November 2015

Accepted 12 March 2016

Available Online 16 May 2016

Keywords:

Hydro-Rotary draw bending

bending limit

AA 8112

FE simulation

ABSTRACT

Nowadays thin-walled tube rotary draw bending in small bending ratio is a production process widely used in advanced industries such as aerospace and automotive. Cross section ovality, wall thickness changing during tube bending are the main inevitable defects in this process. The purpose of this research is to obtain the smallest bending ratio and maximum pressure applicable in hydro-rotary draw bending of thin-walled aluminum alloy 8112 tube using failure criterion. For this purpose, the equivalent plastic strain at the critical extrados region is used for necking prediction. Concluded results showed that this failure criterion by a maximum difference of 12.5% from experimental tests, is a useful method for predicting the necking onset in the bending process. Moreover, the effects of bending ratio and internal pressure on the defects such as cross section ovality and changes in thickness are investigated with simulation in the ABAQUS software and experimental methods. The maximum ovality is not located at the mid-cross section of bent tube unexpectedly and regardless of the internal pressure and bending ratio, occurs at the cross-section with an angle of approximately $\theta=33^\circ$. The minimum achievable amounts of ovality at R/D1.6, R/D1.8 and R/D2 were 11.42%, 7.72% and 4.35% respectively. Furthermore, bending ratio and internal pressure had noticeable effects on the cross section of the bent tubes, so that as the bending ratio or pressure increased, cross-section ovality and the thickening of the tube wall at the intrados decreased, but contrary to bending ratio, as the internal pressure increased, extrados thinning increased.

1- مقدمه

خم کاری با استفاده از ماشین خم کنترل عددی یکی از فرآیندهای تولیدی مرسوم در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا، کشتی‌سازی، کشاورزی، مبلمان و تزیینات است. خم کاری کششی دورانی مرسوم‌ترین و کاربردی‌ترین و انعطاف‌پذیرترین روش خم کاری در میان روش‌های متنوع خم کاری است. این روش هزینه‌های تولید را به علت کاهش ضایعات، کاهش می‌دهد. از دیگر مزایای برجسته این روش کیفیت، دقت و تکرارپذیری بالا، قابلیت اتوماسیون و تولید انبوه آن است. با تکنولوژی کنترل عددی شعاع‌های کوچک خم در لوله‌های جدار نازک، قابل دستیابی است [1].

قالب‌های مورد استفاده در ماشین خم کنترل عددی اساساً شامل پنج جز اصلی از قبیل قالب خم‌کن¹، قالب فشار²، گیره³ و قالب جاروب‌کن⁴ و مندرل⁵ است. مندرل برای جلوگیری از جابه‌جایی انحنای خارجی خم به طرف داخل استفاده می‌شود و دارای انواع گوناگونی است. در این تحقیق به جای مندرل از سیال تحت فشار استفاده شده است. پارامترهای خم کاری کششی دورانی مورد استفاده در این پژوهش در شکل 1 نشان داده شده است.

با توجه به اهمیت موضوع خم کاری در صنایع مختلف، محققان بسیاری این فرآیند را به‌صورت عددی، تحلیلی و تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. لازارسکو [2] تأثیر فشار سیال داخلی بر کیفیت خم کاری لوله آلومینیومی با آلیاژ 1050 را در خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی با نسبت خم 2.5 و ضریب دیواره (نسبت قطر به ضخامت لوله) 16.5 مورد بررسی قرار داد. در پژوهش وی، برای خم کاری از یک مکانیزم خم کاری دستی استفاده شد و نشان داده شد که با افزایش فشار داخلی، بیضوی شدن و ضخیم‌شدگی انحنای درونی خم، کاهش یافته و درصد نازک‌شدگی دیواره لوله در انحنای بیرونی خم افزایش می‌یابد. در تست‌های تجربی وی، قالب فشار قابلیت جابه‌جایی نداشته است. پن و استلسون [3] به‌صورت تحلیلی، رابطه بین انحنای خم و تغییرات سطح مقطع را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنان، تغییرشکل‌های پلاستیک ایجاد شده در منطقه خم و تغییرشکل‌های الاستیک به‌وجود آمده در محل قالب فشار، دو عامل اصلی وقوع بازگشت فنری معرفی شده‌اند. وانگ و آگاروال [4] نیز به کمک شبیه‌سازی به مطالعه خم کاری کششی دورانی پرداختند و برای بهبود کیفیت خم کاری، فشار داخلی و نیروی محوری را نیز به مدل‌هایشان اعمال نمودند. آن‌ها با این عمل به کاهش

چروکیدگی و تغییرشکل سطح مقطع دست یافتند. داکسین و همکاران [5] تأثیر پارامترهای هندسی لوله را بر وقوع بازگشت فنری با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین تأثیر خواص ماده لوله بر بازگشت فنری را نیز مورد مطالعه قرار دادند و توانستند تفاوت بین خواص مکانیکی به‌دست‌آمده از تست کشش استاندارد لوله و تست کشش نمونه‌های خارج شده از لوله را بیابند. خدایاری [6] با استفاده از روش تحلیلی و تجربی، منحنی حد خم کاری لوله‌ها در خم کاری کششی دورانی را برای چندین نوع لوله فولادی به‌دست آورد و نشان داد که منحنی حد خم کاری به‌دست آمده، دقت بیشتری نسبت به نمودار حد شکل‌دهی استاندارد در پیش‌بینی نازک‌شدگی دارد. حسن‌پور و همکاران [7] تأثیر ناهمسانگردی بر چروکیدگی لوله‌ها در خم کاری کششی دورانی را به کمک شبیه‌سازی بررسی کرده‌اند.

نتایج تحقیق آنان نشان داد که با افزایش ناهمسانگردی نرمال و صفحه‌ای (ϵ_0 , ϵ_{90})، از مقدار چروکیدگی کاسته می‌شود.

با وجود تحقیق‌های فراوان در زمینه خم کاری کششی دورانی، تعداد معدودی از آن‌ها این فرآیند را به کمک سیال داخلی مورد مطالعه قرار داده‌اند و در این تحقیق‌ها، مکان دقیق وقوع عیوب خم و همچنین اثر نسبت خم بر عیوب خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی، گزارشی نشده است. در تحقیق حاضر برای اولین بار به کمک معیار گلوبی، حداقل نسبت خم قابل دستیابی و بیشترین فشار داخلی قابل اعمال در هر نسبت خم به‌دست می‌آیند. در نهایت محل وقوع بیضی شدن بیشینه و نازک‌شدگی بحرانی شناسایی شده و اثر نسبت خم و فشار سیال بر توزیع ضخامت و بیضی شدن به کمک شبیه‌سازی و تست‌های تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

2- شبیه‌سازی

2-1- مراحل مدل‌سازی

برای شبیه‌سازی فرآیند خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نسخه 6.14-1 استفاده شده است. به دلیل تقارن، فقط نیمی از هندسه لوله و قالب‌ها در نرم‌افزار مدل شده است. در شکل 2 مدل شبیه‌سازی شده فرآیند خم کاری به همراه فشار سیال داخلی پس از آینه کردن⁶ نسبت به صفحه XY نشان داده شده است. این مدل شامل قالب خم‌کن، گیره، قالب فشار و لوله است. در شبیه‌سازی اجزای محدود این فرآیند، لوله به‌صورت پوسته‌ای⁷ و شکل‌پذیر⁸ و اجزای قالب به‌صورت پوسته‌ای صلب و گسسته⁹ در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند.

در شبیه‌سازی اجزای محدود برای تعریف تماس اجزا از تماس سطح به سطح¹⁰ و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر از نوع قید جنبشی¹¹ تعریف شد [8]. برای بیان رفتار اصطکاکی از مدل اصطکاک کولمب و شرایط تماسی پنالتی¹² برای سطوح استفاده شده است. براساس مرجع [2] ضریب اصطکاک 0.125 وارد شده است.

در قسمت بارگذاری فشار سیال با استفاده از قید فشار به محفظه داخلی لوله وارد گردید. قالب‌های صلب و لوله به ترتیب با المان $R3D4$ و $S4R$ و اندازه المان 2mm و 1.5mm شبکه‌بندی شده‌اند. تعداد المان‌های لوله

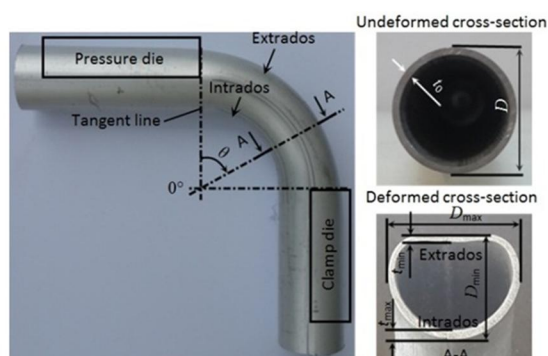


Fig. 1 Parameters of rotary draw bending used in this research

شکل 1 پارامترهای خم کاری کششی دورانی به کار رفته در این تحقیق

⁶Mirror

⁷Shell

⁸Deformable

⁹3D Discrete Rigid

¹⁰Surface to Surface

¹¹Kinematic Contact Method

¹²Penalty

¹Bend die

²Pressure die

³Clamp

⁴Wiper die

⁵Mandrel

ورق در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به کار برده‌اند. در پژوهش دیگری، ماموسی و همکاران [10] با موفقیت توانسته‌اند با استفاده از این معیار گلوبی، نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی را به‌دست آورند. در پژوهش حاضر، تاریخچه کرنش پلاستیک معادل الم آن‌ها در طول مسیر انحنای خارجی خم و گذرنده از صفحه تقارن لوله، برای پیش‌بینی گلوبی شدن بررسی شده است؛ زیرا پارگی همواره در انحنای خارجی خم رخ می‌دهد.

3- مراحل آزمایشگاهی

1-3- تجهیزات و قالب‌ها

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی، از یک دستگاه خم‌کاری با قابلیت کنترل عددی رایانه‌ای شوزتونگ⁵ با مدل 50BR3 استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها سرعت قالب خم‌کن و سرعت قالب فشار به ترتیب 3.6rad/min و 2.4mm/s تنظیم شد. انتخاب سرعت قالب فشار و قالب خم‌کن به گونه‌ای بوده که سرعت نسبی آن‌ها صفر شود و در نتیجه لغزشی بین لوله و قالب فشار به‌وجود نیاید. زیرا همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، یکی از وظایف قالب فشار، هل دادن لوله به ناحیه خم و جلوگیری از نازک‌شدگی بیش از حد است. اگر سرعت قالب فشار به درستی انتخاب نشود، ممکن است سبب عیوبی در خم شود. اگر سرعت آن بیشتر از سرعت دورانی قالب خم‌کن باشد، با توجه به این‌که از قالب جاروب‌کن در آزمایش‌ها استفاده نشده است، بدلیل تغذیه زیاد ماده به ناحیه خم، موجب چروکیدگی در انحنای داخلی خم می‌شود. اگر سرعت آن کمتر از سرعت چرخشی قالب خم‌کن باشد، نازک‌شدگی شدیدی در انحنای خارجی خم به‌وجود می‌آید. این نازک‌شدگی به دلیل لغزش نسبی به‌وجود آمده بین قالب فشار و لوله - در اثر عقب افتادن قالب فشار از لوله - و در نتیجه افزایش نیروی کششی حاصل از اصطکاک در انحنای خارجی خم، ایجاد می‌شود [13].

برای آب‌بندی⁶ دو انتهای لوله از مهره، واسطه و بوش استاندارد استفاده گردید. از یک واحد تأمین فشار⁷ کارگاهی که تنها قابلیت اعمال فشاری ثابت را در طی فرآیند دارد در تست‌ها استفاده شده است. تصویر این واحد تأمین فشار در شکل 5 آورده شده است. پس از ورود روغن به درون لوله و

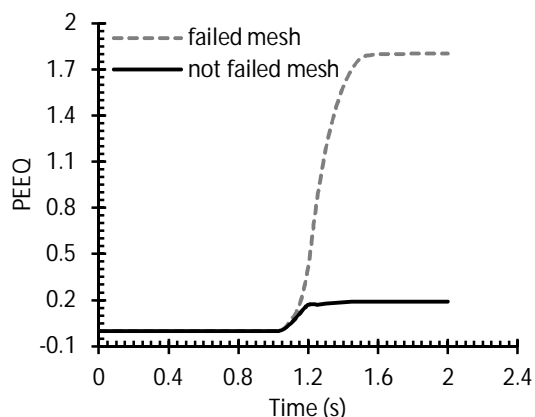


Fig. 3 PEEQ for necked element and its neighbor non necked element in the case R/D1.8 and 2MPa internal fluid pressure

شکل 3 کرنش معادل برای المان گلوبی شده و المان گلوبی نشده مجاور آن، در خم کاری با نسبت خم 1.8 و فشار داخلی 2 مگاپاسکال

4600 عدد بوده است. تحلیل خم کاری طی دو گام¹ دینامیکی صریح² انجام شد. زمان هر گام یک ثانیه بوده است. در گام نخست فشار داخلی به‌صورت خطی به مقدار بیشینه خود رسیده و در گام دوم قالب‌ها آغاز به حرکت کرده و لوله تحت فشار داخلی ثابت، خم می‌گردد. در شبیه‌سازی‌ها قطر خارجی و ضخامت اولیه لوله به ترتیب 22mm و 1mm بوده و خم کاری تحت نسبت‌های خم 2، 1.8، 1.6 و 1.5 و فشارهای داخلی صفر، 1، 1.5، 1.7، 1.8، 2 و 2.4 مگاپاسکال مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

2-2- معیار گلوبی شدن

از معیارهای گلوبی شدن مختلفی می‌توان در شبیه‌سازی استفاده کرد. در این پژوهش از معیار گلوبی شدن کرنش پلاستیک معادل³ برای پیش‌بینی گلوبی شدن فرآیند استفاده شده است. این معیار بیانگر آن است هنگامی که قطعه گلوبی می‌شود، بیشترین کرنش در منطقه گلوبی اتفاق می‌افتد تا قطعه پاره گردد؛ بنابراین افزایش ناگهانی در کرنش معادل یک المان در مقایسه با سایر المان‌ها، نشان‌دهنده آغاز گلوبی در آن المان و در نهایت پارگی قطعه است [9].

کمیت اسکالر کرنش پلاستیک معادل، بیانگر تغییر شکل‌های غیرالاستیک ماده است، به‌طوری که مقادیر مثبت آن به تسلیم ماده اشاره دارد [10]. مقدار کرنش پلاستیک معادل از رابطه (1) به‌دست می‌آید [11,12].

$$\bar{\epsilon}^{pl} = \bar{\epsilon}_0^{pl} + \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}^{pl} dt \quad (1)$$

که $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ و $\dot{\epsilon}^{pl}$ به ترتیب کرنش پلاستیک معادل اولیه و نرخ جریان پلاستیکی متناظر است.

برای نمونه در شکل 3 نمودار کرنش معادل برای المان گلوبی شده و المان گلوبی نشده مجاور آن، در خم کاری با نسبت خم 1.8 و فشار داخلی 2 مگاپاسکال ترسیم شده است. در این شکل، افزایش ناگهانی کرنش معادل المان گلوبی شده در مقایسه با المان کناری آن نشان‌دهنده گلوبی شدن آن المان بوده است.

بافرازه و همکاران [9] این معیار گلوبی را برای پیش‌بینی گلوبی شدن

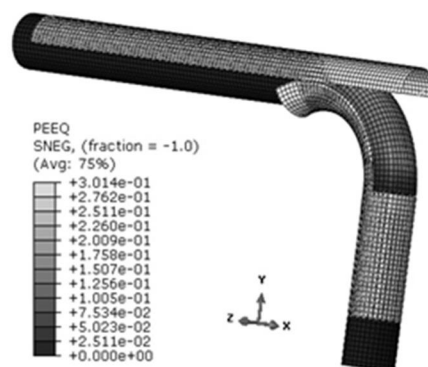


Fig. 2 3D FE model for the Hydro-rotary draw bending after mirroring against XY Plane

شکل 2 مدل شبیه‌سازی شده فرآیند خم کاری کششی دورانی هیدرولیکی پس از آینه کردن نسبت به صفحه XY

⁴ History
⁵ Shuztung
⁶ Sealing
⁷ Power pack

¹ Step
² Dynamic, Explicit
³ Equivalent plastic strain (PEEQ)

جدول 2 آورده شده است. در شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری، از آن‌جا که قالب‌ها به صورت صلب مدل شده‌اند، خواص مکانیکی به آن‌ها نسبت داده نشد. جنس لوله یک ماده الاستو-پلاستیک با کرنش سختی همسان‌گرد فرض شده است. از معادله هولومون برای تعریف کارسختی ماده استفاده شده که مقادیر به‌دست‌آمده به رابطه (2) برازش شده است.

$$\bar{\sigma} = k(\bar{\epsilon})^n \quad (2)$$

در این رابطه k ضریب استحکام، $\bar{\epsilon}$ کرنش حقیقی، $\bar{\sigma}$ تنش حقیقی و n نمای کرنش سختی نامیده می‌شود.

4- نتایج و بحث

1-4- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

جهت اعتبارسنجی مدل اجزای محدود طراحی شده در این پژوهش، نتایج آن با داده‌های تجربی مقایسه شد. برای اندازه‌گیری قطرهای بیشینه و کمینه در مقطع میانی خم، لوله از آن ناحیه برش زده شده است.

شکل 7 اثر فشار داخلی بر تغییرات قطر خارجی لوله (D_{\min} و D_{\max}) در خم‌کاری با نسبت خم 1.8 را نشان می‌دهد. هنگامی که خم‌کاری بدون فشار داخلی انجام شده است، اندازه قطر کمینه و قطر بیشینه سطح مقطع 17.23mm و 22.53mm بوده که به ترتیب دارای 19.22% کاهش و 2.4% افزایش نسبت به قطر نخستین است. دلیل تغییرات ناچیز قطر بیشینه در مقایسه با قطر کمینه این است که لوله در راستای قطر بیشینه توسط شیار

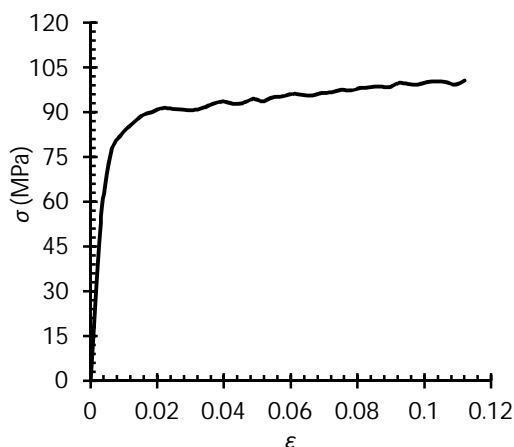


Fig. 6 True stress- strain curve for AA 8112

شکل 6 نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیم با آلیاژ 8112

جدول 1 درصد وزنی عناصر ماده لوله حاصل از آزمایش کوانتومتری

Table 1 Tube Elements wt% from emission spectrometry.						
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	عنصر
0.37	1.21	0.26	0.09	0.11	0.37	درصد
Ca	Pb	Sn	V	Na	Bi	عنصر
0.002	0.02	0.002<	0.007	ناچیز	0.003<	درصد
Cr	Ni	Ti	Zr	B	Ga	عنصر
0.07	0.04	0.011	0.009	0.0011	0.01	درصد

جدول 2 خواص مکانیکی ماده لوله.

Table 2 Mechanical properties of AA 8112 tube.				
تنش تسلیم	ضریب	چگالی	ضریب استحکام	نمای کرنش
(MPa)	پواسون	(kg/m ³)	k (MPa)	n سختی
76.604	0.33	2670	123.543	0.0939



Fig. 4 Hydraulic power supply unit used in experiments (power pack).

شکل 4 واحد تأمین فشار مورد استفاده در تست‌های تجربی

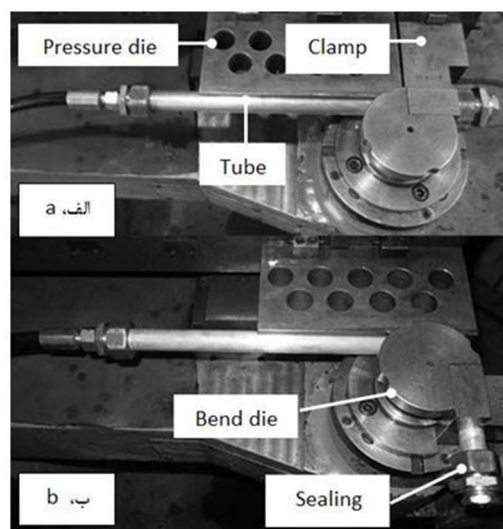


Fig. 5 Dies and sealed tube, a) before bending, b) after bending

شکل 5 مجموعه قالب‌ها و لوله آب‌بندی‌شده در تست تجربی، الف) پیش از خم‌کاری، ب) پس از خم‌کاری

هواگیری، درپوش آن بسته شده و فشار سیال با استفاده از فشارسنج و شیر اطمینان، روی میزان دلخواه تنظیم شد و سپس خم‌کاری آغاز شده است. در تمام طول کورس خم‌کاری، فشار ثابت مانده است. در آزمایش‌های تجربی، لوله در فشارهای ثابت داخلی صفر، 1 و 1.5 و 2 مگاپاسکال و با زاویه 90° و تحت شعاع خم‌کاری¹ 39.6 میلی‌متر ($\frac{R}{\rho}$ برابر 1.8)، خم‌کاری شد.

شکل 5 مجموعه قالب‌ها و لوله آب‌بندی‌شده را پیش و پس از اتمام خم‌کاری نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری ضخامت از کولیس ساعتی با دقت 0.01 میلی‌متر و محدوده اندازه‌گیری 0-150mm استفاده شده است.

3-2- تعیین خواص مکانیکی

برای به‌دست آوردن نمودار تنش-کرنش ماده، نمونه‌های تست کشش طبق استاندارد ASTM E8M تهیه شدند. شکل 6 نمودار تنش-کرنش حقیقی ماده و جدول 1 درصد وزنی عناصر ماده لوله که از آزمایش کوانتومتری به‌دست‌آمده است را نشان می‌دهد. طبق نتایج کوانتومتری، ترکیب شیمیایی لوله به آلیاژ آلومینیم 8112 بسیار نزدیک است. خواص مکانیکی ماده لوله در

¹ Center Line Radius (CLR)

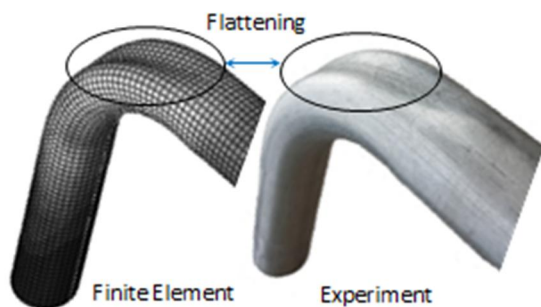


Fig. 8 Flattening phenomenon at the extrados in the bending without internal pressure at $R/D1.8$

شکل 8 ایجاد مسطح‌شدگی در انحنا ی خارجی خم در نسبت خم 1.8 و بدون فشار داخلی

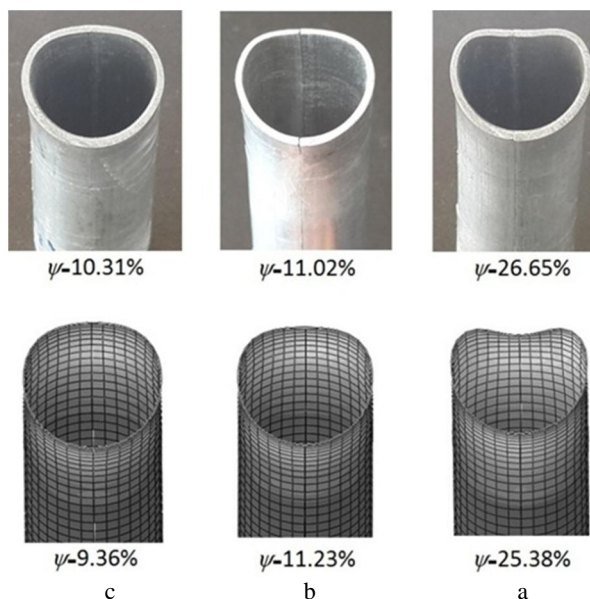


Fig. 9 A-A cross section of tube from experiments and FEM. a) without internal pressure, b) 1MPa, c) 1.5MPa

شکل 9 سطح مقطع A-A لوله حاصل از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی. الف) بدون فشار داخلی، ب) فشار 1 مگاپاسکال، ج) فشار 1.5 مگاپاسکال

مگاپاسکال، بیضی‌شدن سطح مقطع لوله به میزان 61.3% کاهش می‌یابد. این کاهش بیضی‌شدن بیشتر به دلیل تغییر شکل ایجادشده در نیمه انحنا ی خارجی سطح مقطع لوله در اثر افزایش فشار داخلی است. همان‌طور که در تصاویر دیده می‌شود، نیمه درونی سطح مقطع لوله به دلیل این‌که با شیار قالب خم‌کن در تماس است، به ناچار از شکل داخلی قالب تبعیت کرده و بی‌تغییر می‌ماند و در همه فشارها شکل نیم‌دایره‌ای خود را حفظ کرده است. شکل 10 تغییرات ضخامت بیشینه و کمینه را برحسب فشار داخلی در سطح مقطع میانی A-A خم و در نسبت خم 1.8 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فشار داخلی از 0-1.7 مگاپاسکال، ضخامت بیشینه در انحنا ی درونی خم از 1.19mm به 1.17mm کاهش می‌یابد، به عبارتی ضخامت بیشینه به اندازه 1.68% کاهش یافته است. افزایش فشار داخلی، ضخامت کمینه در انحنا ی بیرونی را نیز کاهش می‌دهد. با افزایش فشار داخلی از 0-1.7 مگاپاسکال ضخامت کمینه به‌صورت خطی از 0.91mm به 0.86mm کاهش می‌یابد. به عبارتی با اعمال فشار داخلی، ضخامت کمینه، به اندازه 5.5% کاهش یافته است؛ بنابراین تأثیر افزایش فشار بر نازک‌شدگی،

قالب خم‌کن محدود شده است و نمی‌تواند خیلی از آن فراتر رود، اما در راستای قطر کمینه به دلیل نداشتن فشار سیال از داخل و نداشتن تماس با قالب از خارج می‌تواند بدون هیچ قیدی تغییر شکل دهد. هنگامی که فشار داخلی تا 1.5 مگاپاسکال بالا رود، اندازه قطر کمینه و قطر بیشین 20.22mm و 22.42mm می‌شود که به ترتیب دارای 8% کاهش و 1.9% افزایش نسبت به قطر نخستین است و انحراف کمتری نسبت به خم‌کاری بدون فشار داخلی از قطر نخستین لوله دارند؛ بنابراین همان‌طور که از شکل مشخص است با افزایش فشار داخلی قطر کمینه و بیشینه به قطر نخستین لوله نزدیک شده و بهبود یافته‌اند. مقدار این بهبودی در قطر کمینه 58.37% و در قطر بیشینه 20.83% است، بنابراین فشار داخلی اثر بیشتری بر قطر کمینه نسبت به قطر بیشینه دارد. دلیل تأثیر بیشتر این است که قطر بیشینه به دلیل محدودیتی که پیشتر یاد شد، در حالت بدون فشار داخلی، تغییر شکل زیادی نمی‌دهد که بخواهد با افزایش فشار بهبودی چشمگیری یابد. در شکل 8 نتایج شبیه‌سازی و تست‌های تجربی همخوانی قابل‌پذیرشی دارند، به گونه‌ای که بیشترین درصد خطای بین شبیه‌سازی و تجربی تنها 2% بوده است.

در تست‌های تجربی نخست برای مشاهده شکل‌گیری نمونه، خم‌کاری بدون سیال داخلی انجام شد. در شکل 8 عیب مسطح‌شدگی¹ در خم‌کاری با نسبت خم 1.8 و بدون فشار داخلی نشان داده شده است. شکل 9 سطح مقطع میانی A-A لوله، حاصل از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. لوله شکل 8 به‌صورت برش‌خورده در شکل 9-الف نشان داده شده است که به دلیل نداشتن فشار داخلی، در انحنا ی خارجی خم، مسطح‌شدگی شدیدی به‌وجود آمده است. برای رفع این عیب، خم‌کاری با فشارهای داخلی 1، 1.5 و 2 مگاپاسکال نیز تکرار شد. لوله در فشار 2 مگاپاسکال از ناحیه انحنا ی بیرونی خم پاره می‌شود. برای محاسبه میزان بیضی‌شدن سطح مقطع لوله خمیده از رابطه (3) استفاده شد [2].

$$\psi = \frac{(D_{\max} - D_{\min})}{\frac{(D_{\max} + D_{\min})}{2}} \quad (3)$$

پارامترهای این رابطه در شکل (1) آورده شده است.

وابستگی شدید بیضی‌شدن سطح مقطع لوله به فشار داخلی در شکل 9 دارای اهمیت است، به‌طوری که با افزایش فشار داخلی از 0-1.5

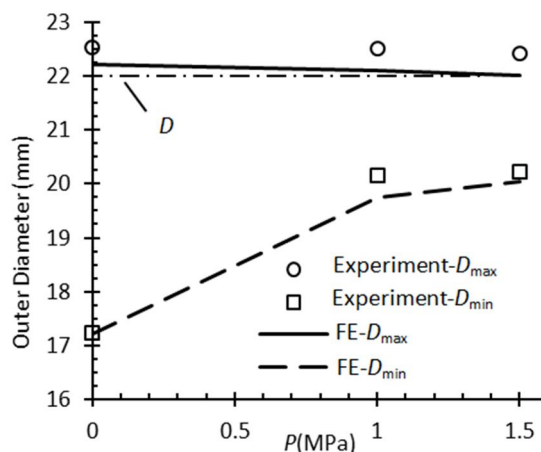


Fig. 7 Effect of internal pressure on the outer diameter of tube at the mid-cross section with $R/D1.8$

شکل 7 تأثیر فشار داخلی را روی تغییرات قطر خارجی لوله در سطح مقطع میانی خم با نسبت 1.8

¹Flattening

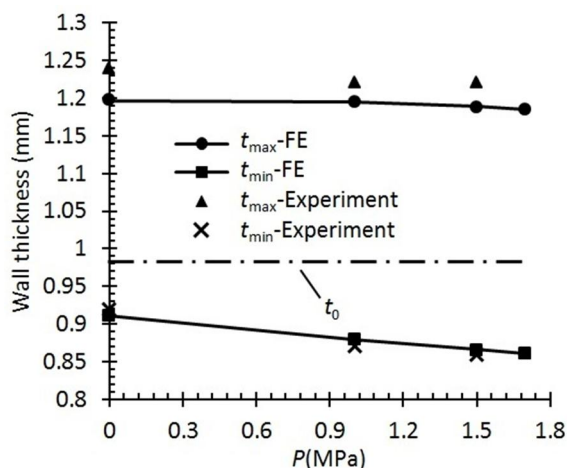


Fig. 10 Maximum and minimum wall thickness variation according to internal pressure at mid-cross section and $R/D=1.8$

شکل 10 تغییرات ضخامت بیشینه و کمینه دیواره لوله برحسب فشار داخلی در سطح مقطع میانی خم و نسبت خم 1.8



Fig. 11 Bent tubes in various pressures

شکل 11 نمونه‌های خم‌شده در فشارهای مختلف

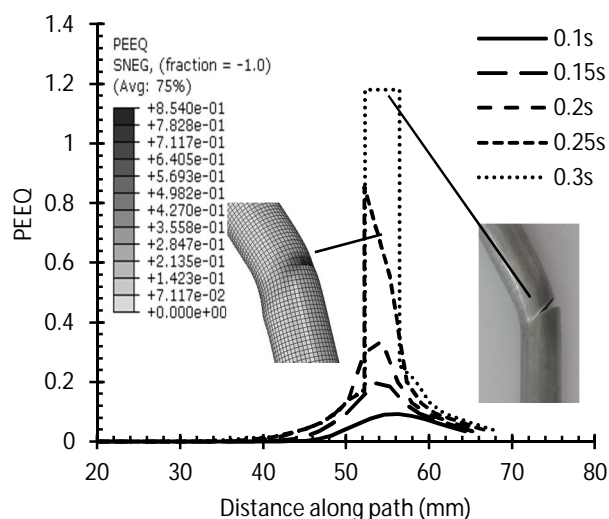


Fig. 12 PEEQ curves in different times of process according to distance along the path through extrados at 2MPa internal pressure and $R/D=1.8$ condition

شکل 12 نمودار کرنش معادل در زم آن‌های مختلف از گام حل برحسب فاصله در طول مسیر تعیین‌شده در انحنا خارجی خم در فشار 2 مگاپاسکال و نسبت خم 1.8

در حدود 3.3 برابر بیشتر از تأثیر آن بر ضخیم‌شدگی است. دلیل این تأثیر بیشتر، نداشتن تماس انحنا بیرونی خم با قالب‌هاست که سبب شکل‌دهی آزاد انحنا بیرونی خم و در نتیجه تغییر شکل بیشتر آن می‌شود، اما در انحنا داخلی خم، دیواره داخلی لوله از یک سمت تحت اثرات اصطکاکی با شیپار قالب خم‌کن است که مانع از جریان آسان مواد و تغییرات ضخامت زیاد آن می‌شود. در این شکل درصد اختلاف شبیه‌سازی با تجربی در تعیین ضخامت 4.3% است.

در تمام شکل‌های 7-10 اختلاف شبیه‌سازی و تست‌های تجربی کمتر از 10% بوده است؛ بنابراین مدل اجزای محدود طراحی‌شده می‌تواند فرآیند خم‌کاری را به خوبی پیش‌بینی کند. تست‌های تجربی در نسبت خم 1.8 و تحت فشارهای داخلی 0، 1، 1.5 و 2 مگاپاسکال انجام گرفته و برای سایر فشارهای داخلی و نسبت‌های خم به پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی اعتماد شده است.

4-2- تعیین حداقل نسبت خم قابل دستیابی و فشار بیشینه قابل اعمال

نمونه‌های شکل داده شده تحت فشار داخلی 0-2 مگاپاسکال با نسبت خم 1.8 در شکل 11 نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش 4-1 بیان شد، در آزمایش تجربی، لوله در فشار 2 مگاپاسکال از ناحیه انحنا بیرونی خم پاره می‌شود. این آزمایش که منجر به پارگی لوله شده است، شبیه‌سازی شده و نمودار کرنش معادل در زم آن‌های مختلف از گام حل در طول مسیر تعیین شده در انحنا خارجی خم (از قالب فشار تا گیره) ترسیم و در شکل 12 نشان داده شده است.

همان‌طور که در بخش 2-2 اشاره شد، در لحظه‌ای از گام حل که کرنش در یک ناحیه کوچک، به‌صورت ناگهانی و به شدت افزایش یابد، نشان‌دهنده آغاز گلوبی است؛ زیرا هنگامی که قطعه دچار گلوبی می‌شود، کرنش‌ها بیشتر در منطقه گلوبی اتفاق می‌افتد تا قطعه پاره شود و گلوبی شدن به معنی مردود بودن قطعه خم شده است؛ بنابراین با توجه به شکل 12، آستانه گلوبی شدن، در لحظه 0.2 ثانیه از گام حل است. زاویه خم هنگام آغاز پارگی در شبیه‌سازی 18 درجه و در تست تجربی در حدود 16 درجه اندازه‌گیری شده است که 12.5% اختلاف دارند.

برای یافتن کوچک‌ترین نسبت خم ممکن، فرآیند خم‌کاری در نسبت‌های خم 1.5، 1.6، 1.8، 2 مدل‌سازی شد. نسبت‌های خم یادشده، تحت فشارهای داخلی مختلف مورد تحلیل قرار گرفته و با بررسی نمودار کرنش پلاستیک معادل در انحنا خارجی خم، بیشترین فشار قابل اعمال در هر نسبت خم با کمک معیار گلوبی به‌دست آمد. در نتیجه کوچک‌ترین نسبت خم قابل دستیابی برابر 1.6 و بیشترین فشار داخلی قابل اعمال به آن 1.5 مگاپاسکال بوده است.

شکل 13 سطوح فشار آزمایش شده در هر نسبت خم را نشان می‌دهد که به کمک معیار گلوبی یادشده، از شبیه‌سازی به‌دست آمده است. بیشینه فشار قابل اعمال در نسبت‌های خم 1.6، 1.8 و 2 به ترتیب 1.5، 1.7 و 2.4 مگاپاسکال به‌دست آمده است. این فشار بیشینه، با افزایش نسبت خم، افزایش می‌یابد. دلیل این امر، کاهش کرنش‌های طولی در انحنا خارجی خم، با افزایش نسبت خم است که سبب می‌شود در شرایط یکسان، نسبت‌های خم بزرگ‌تر، قابلیت تحمل فشارهای بالاتری را داشته باشند. منظور از کرنش طولی، کرنش ایجادشده در راستای محور لوله است. شکل 14 کاهش کرنش طولی در انحنا خارجی خم را با افزایش نسبت خم نشان

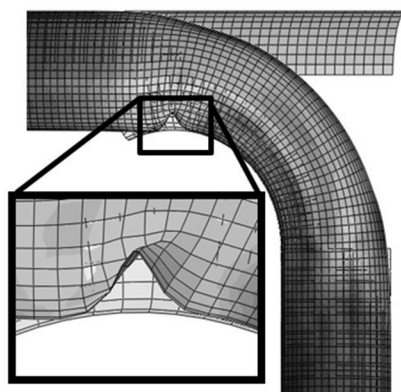


Fig. 15 Wrinkling in the tube which bent at $R/D1.5$ and 1MPa internal pressure condition

شکل 15 لوله چروکیده در نسبت خم 1.5 و فشار 1 مگاپاسکال

خم کوچک‌تر، شرایط خم‌کاری بحرانی‌تر است و همان‌طور که در شکل 14 توضیح داده شد، با افزایش نسبت خم، از شدت تغییر شکل‌های پلاستیک و کرنش‌ها کاسته می‌شود.

به دلیل این‌که در زاویه بحرانی ($\theta=33^\circ$)، بیضوی شدن بیشینه رخ می‌دهد، سطح مقطع لوله در این زاویه معیار ارزیابی کیفیت نهایی قطعه در نظر گرفته شده و طراحی‌های فرآیند و مطالعات بر بیضی شدن براساس مقدار عیب در این مقطع انجام شد. برای بررسی دقیق‌تر، درصد بیضی شدن در تمام فشارها و نسبت‌های خم، در سطح مقطع بحرانی محاسبه شده و در شکل 17 آورده شده است.

از روند نزولی ستون‌های شکل 17 می‌توان به تأثیر مثبت افزایش فشار بر کاهش عیب بیضی شدن سطح مقطع پی برد. فشارهای بیشتر از 1.8 مگاپاسکال تنها در نسبت خم 2 قابل اعمال است و در نسبت‌های خم پایین‌تر منجر به پارگی لوله می‌شود، زیرا میزان تغییر شکل پلاستیکی در انحنا خارجی خم با کاهش نسبت خم افزایش می‌یابد که این امر نازک‌شدگی حاصل از افزایش فشار را تشدید کرده و سبب گلوبی شدن و در نهایت پارگی لوله می‌شود. افزایش فشار با به وجود آوردن فشار یکنواخت بر دیواره داخلی لوله، سطح مقطع آن را از حالت بیضی به دایره نزدیک‌تر می‌کند.

همان‌طور که پیشتر بیان شد و در شکل نیز مشخص است، در تمام فشارها، خم‌کاری با نسبت‌های خم بالاتر دارای مقادیر کمتر بیضی شدن است. مطابق شکل 17، کمترین مقدار بیضی شدن قابل دستیابی در نسبت‌های خم 1.6، 1.8 و 2 به ترتیب 11.42٪، 7.72٪ و 4.35٪ در فشارهای 1.5، 1.7 و 2.4 مگاپاسکال است. با کاهش نسبت خم از 2 به 1.6، در فشارهای 0 و 1 و 1.5 مگاپاسکال، میزان بیضی شدن به ترتیب 67.5٪، 53٪ و 49.2٪ افزایش داشته است که روندی نزولی دارد. این روند نزولی با کاهش شیب پیک آن‌ها در شکل 17 قابل مشاهده است، نشان می‌دهد که در فشارهای بالاتر، بر میزان اثر مثبت فشار داخلی بر بهبود بیضی شدن افزوده می‌شود.

4-4- تأثیر نسبت خم و فشار داخلی بر توزیع ضخامت لوله

شکل 18 تأثیر فشار داخلی بر توزیع ضخامت سطح مقطع میانی خم در راستای محیطی لوله و در نسبت خم 1.8 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل بدیهی است مکان تار خنثی لوله در موقعیتی که ضخامت دیواره با ضخامت نخستین برابر است، قرار دارد، به عبارتی محل تقاطع خط افقی با منحنی‌ها، و ضخامت‌های کمتر از یک میلی‌متر نشان‌دهنده انحنا خارجی و

می‌دهد.

لوله در نسبت خم 1.5 تحت فشارهای کمتر از 1 مگاپاسکال در انحنا داخلی خم چروکیده و در فشارهای بیشتر از آن هم پاره و هم چروکیده می‌شود. شکل 15 تصویر لوله چروکیده در نسبت خم 1.5 و فشار 1 مگاپاسکال را نشان می‌دهد.

3-4- تأثیر نسبت خم بر تغییر شکل سطح مقطع

برای مکان‌یابی بیضی شدن بیشینه سطح مقطع حاصل از تقاطع صفحه گذرنده از محور خمش تحت زوایای مختلف θ (شکل 2) با لوله خمیده را به وجود آورده و مقدار بیضی شدن در آن مقاطع با استفاده از رابطه (3) محاسبه شد. درصد بیضی شدن مقاطع برحسب موقعیت زوایای آن‌ها در شکل 16 نشان داده شده است. نکته مهمی که از شکل 16-الف و ب برداشت می‌شود این است که بیشترین مقدار بیضی شدن، صرف‌نظر از میزان فشار داخلی و نسبت خم، در زاویه حدودی $\theta=33^\circ$ رخ می‌دهد.

با توجه به شکل‌ها، با افزایش نسبت خم، منحنی‌ها به سمت پایین انتقال یافته‌اند و به عبارتی مقدار بیضی شدن کاهش یافته است، زیرا در نسبت‌های

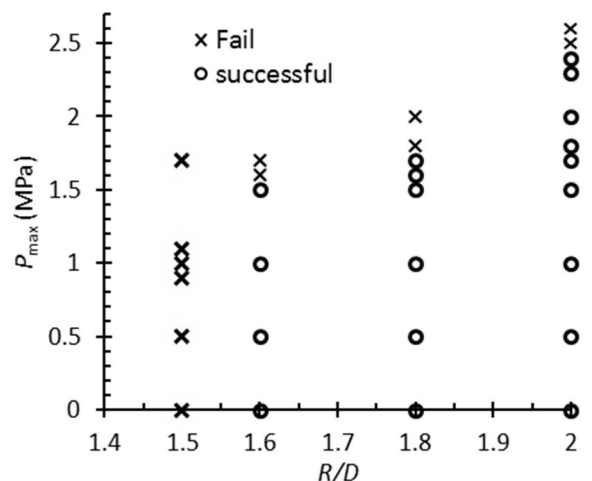


Fig. 13 Internal pressures tested in each bending ratios and predicting failure using failure criterion

شکل 13 فشارهای داخلی تست‌شده در هر نسبت خم و پیش‌بینی شکست لوله به کمک معیار گلوبی

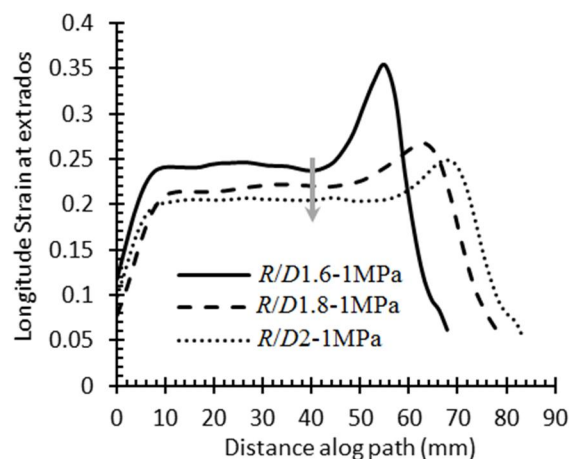


Fig. 14 Decrease of longitude strain at the extrados by increasing the bending ratio

شکل 14 کاهش کرنش طولی در انحنا خارجی خم با افزایش نسبت خم

مگاپاسکال، ضخامت دیواره در انحناهای داخلی و خارجی خم به ترتیب 1.36% و 5.67% کاسته می‌شود (حرکت منحنی‌ها به سمت پایین).

در حالی که در نواحی اطراف تار خنثی، دیواره ضخیم‌تر شده است. همان‌طور که در بخش 4-1 اشاره شد، تأثیر فشار بر ضخامت انحناهای خارجی خم بیش از تأثیر آن بر ضخامت انحناهای داخلی آن است. این مساله از جابه‌جایی عمودی بیشتر منحنی در انحناهای خارجی خم در شکل نیز مشخص است. شکل 19 نیز تأثیر فشار داخلی بر توزیع ضخامت محیطی لوله در سطح مقطع بحرانی A-A با زاویه $\theta = 33^\circ$ و در نسبت خم 2 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار ماده در نسبت خم 2 و سطح مقطع با زاویه 33 نیز مشابه رفتار آن در نسبت خم 1.8 و تحت زاویه 45 (سطح مقطع میانی خم) است.

از شکل 20 می‌توان برای توجیه این رفتارها استفاده کرد. شکل 20-a کرنش ضخامتی، 20-b کرنش طولی و 20-c کرنش محیطی در سطح مقطع میانی لوله در حالت خم‌کاری با نسبت خم 1.8 را نشان می‌دهد. مسیر تعیین‌شده برای استخراج این کرنش‌ها، در شکل 20-d نشان داده شده است. توزیع ضخامت نهایی در دیواره لوله، حاصل اثر مشترک این کرنش‌ها بر دیواره لوله است.

در شکل 20-a کرنش ضخامتی انحناهای داخلی با افزایش فشار افت می‌کند. این افت با توجه به این‌که علامت کرنش مثبت است، نشان‌دهنده افت ضخیم‌شدگی در انحناهای داخلی با افزایش فشار است. مقدار کرنش ضخامتی انحناهای خارجی خم نیز با افزایش فشار رشد داشته است. این رشد با توجه به علامت منفی کرنش ضخامتی در انحناهای خارجی، به معنای کاهش بیشتر ضخامت است. در این شکل مشاهده می‌شود که رفتار کرنش ضخامتی در حالت بدون فشار داخلی با رفتار منحنی‌های فشارهای بالاتر متفاوت است. این امر به دلیل اعوجاج سطح مقطع در حالت بدون فشار است که توزیع کرنش را تغییر داده است. در محل تار خنثی نیز با افزایش فشار، اندازه کرنش‌های ضخامتی با علامت منفی کاهش یافته است که خود نشان‌دهنده افزایش ضخامت در تار خنثی و نواحی اطراف آن است.

در شکل 20-b، کرنش طولی در انحناهای داخلی و خارجی با افزایش

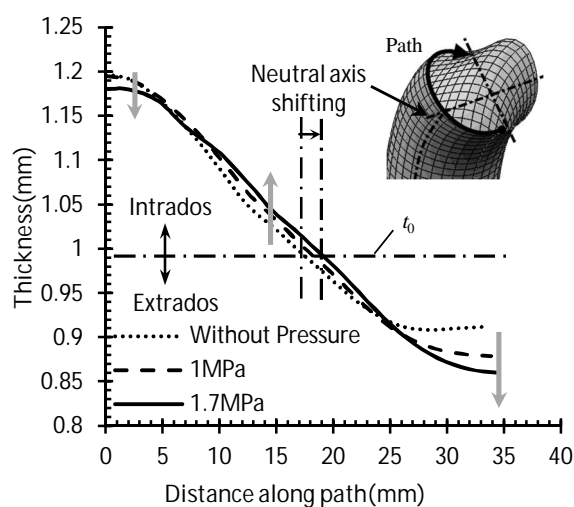
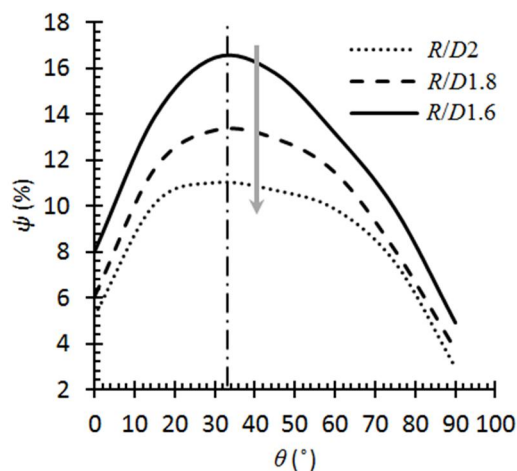


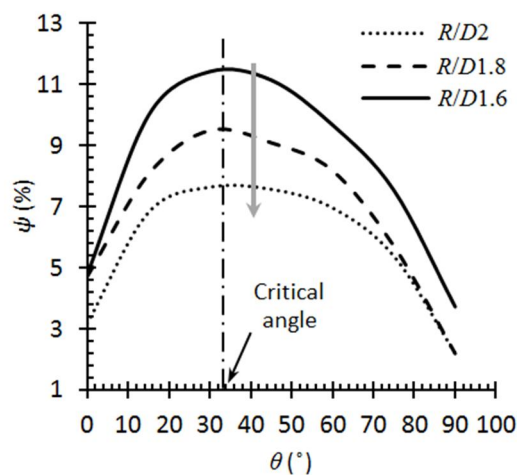
Fig. 18 Effects of internal fluid pressure on the hoop thickness distribution at mid-cross section with $R/D1.8$

شکل 18 تأثیر فشار داخلی بر توزیع ضخامت محیطی لوله در سطح مقطع میانی خم و تحت نسبت خم 1.8

ضخامت‌های بیش از یک میلی‌متر انحناهای داخلی خم را نشان می‌دهد. در شکل 18 جابه‌جایی تار خنثی نیز مشخص شده است که با افزایش فشار به سمت انحناهای خارجی خم جابه‌جا می‌شود. با افزایش فشار از 0 تا 1.7



الف،



ب،

Fig. 16 Ovality of cross sections according to their angular position along bending direction. a) 1MPa internal pressure, b) 1.5MPa internal pressure.

شکل 16 درصد بیضوی شدن مقاطع بر حسب موقعیت زاویه‌ای آن‌ها. الف) تحت فشار داخلی 1 مگاپاسکال، ب) تحت فشار داخلی 1.5 مگاپاسکال.

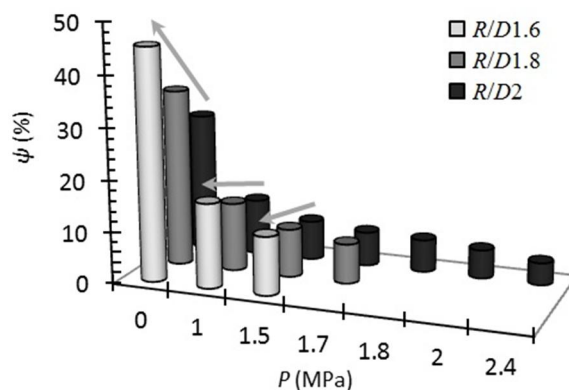


Fig. 17 Effect of internal pressure on the critical cross sections ovality

شکل 17 تأثیر فشار بر درصد بیضوی شدن در سطح مقطع بحرانی.

کرنش ضخامتی و کرنش محیطی با علامت منفی و افزایش کرنش طولی با علامت مثبت، همگی سعی در نازک کردن دیواره لوله دارند. به عبارتی با کاهش نسبت خم، تمام کرنش‌ها افزایش یافته و سبب تغییر شکل پلاستیکی شدیدتر دیواره لوله می‌شود. این افزایش کرنش در انحنای داخلی بیش از انحنای خارجی خم بوده که مسبب درصد ضخیم‌شدگی بیشتر از درصد نازک‌شدگی شود. برای نمونه میزان و جهت افزایش کرنش طولی با پیکان در شکل 22 نشان داده شده است. به طور کلی (با توجه به جهت پیک آن‌ها در شکل 21) با کاهش نسبت خم، ضخامت دیواره لوله (چه در انحنای داخلی، چه انحنای خارجی خم) از ضخامت نخستین لوله فاصله گرفته است.

در شکل a-21 بیشترین و کمترین ضخامت مربوط به نسبت خم 1.6 بوده و به ترتیب برابر 1.23mm و 0.82mm است که درصد ضخیم‌شدگی و نازک‌شدگی 23% و 18% را نتیجه می‌دهند. در شکل b-21 نیز بیشترین و کمترین ضخامت مربوط به نسبت خم 1.6 بوده و به ترتیب برابر 1.22mm و 0.81mm است که درصد ضخیم‌شدگی و نازک‌شدگی 22% و 19% را نتیجه می‌دهند. با توجه به درصدهای یادشده در هر دو مورد شکل a-21 و b-21، درصد ضخیم‌شدگی بیشینه از درصد نازک‌شدگی بیشینه، بیشتر بوده است. به کمک شکل 22 می‌توان دلیل این امر را توضیح داد. در این شکل به دلیل این‌که کرنش ضخامتی و کرنش طولی در انحنای داخلی، اندازه بیشتری را نسبت به انحنای خارجی دارند ($A > A'$, $B > B'$) به بالاتر رفتن درصد ضخیم‌شدگی (در انحنای داخلی) نسبت به نازک‌شدگی (در انحنای خارجی) کمک می‌کنند. هرچند کرنش محیطی با علامت مثبت در انحنای داخلی به‌عنوان عاملی برای کاهش مقدار ضخیم‌شدگی عمل می‌کند، اما وجود کرنش محیطی بزرگ‌تر با علامت منفی در انحنای خارجی ($C' > C$) نیز از نازک‌شدگی در انحنای خارجی می‌کاهد. پس درصد ضخیم‌شدگی در انحنای داخلی از درصد نازک‌شدگی در انحنای خارجی پیشی می‌گیرد.

مقدار نازک‌شدگی در شکل 21 (در تمام نسبت‌های خم) در نزدیکی خط مماسی نسبت به سایر نقاط کمتر است و با افزایش فاصله از خط مماسی اندک اندک افزایش یافته تا در نواحی با فاصله حدودی 70-90% از خط مماسی به اوج می‌رسد. دلیل افت و خیز منحنی‌های نازک‌شدگی، تغییرات بیضوی شدن سطح مقطع لوله در مقاطع مختلف است، یعنی موقعیت‌هایی

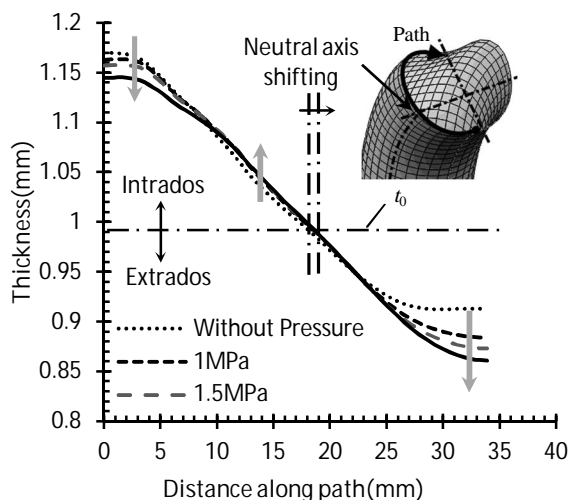


Fig. 19 Effects of internal fluid pressure on the hoop thickness distribution in A-A cross-section at $\theta=33$ and $R/D2$

شکل 19 تأثیر فشار داخلی بر توزیع ضخامت محیطی لوله در سطح مقطع A-A به‌وجود آمده در زاویه $\theta=33$ و تحت نسبت خم 2

فشار از 0-1 مگاپاسکال افزایش داشته و پس از آن به‌جز در محل تار خنثی تقریباً بی‌تغییر می‌ماند، یعنی ضخامت در انحنای داخلی و خارجی کاهش یافته است. در محل تار خنثی با افزایش فشار اندازه کرنش طولی با علامت مثبت پیوسته افت کرده است. این افت به معنای این است که از مقدار کاهش ضخامت کاسته و در نتیجه دیواره لوله در نواحی اطراف تار خنثی ضخیم شده است.

توزیع کرنش محیطی در فشار 0 در شکل c-20 نیز رفتار متفاوتی را با منحنی‌های فشارهای بالاتر دارد. همان‌طور که در توضیحات شکل a-20 بیان شد، دلیل این مساله، اعوجاج سطح مقطع لوله به دلیل نداشتن فشار داخلی است. منحنی در نقطه A به دلیل تاخوردگی تغییر شکل پلاستیکی شدیدی می‌دهد و کرنش محیطی شدیدی در آن به‌وجود می‌آید. این نقطه در شکل d-20 روی سطح مقطع عرضی لوله نشان داده شده است. نقطه B نیز که خارجی‌ترین نقطه سطح مقطع است، به دلیل نداشتن فشار داخلی، کرنش محیطی ناچیزی را تجربه می‌کند. این نقطه نیز در شکل d-20 نشان داده شده است.

کرنش محیطی انحنای داخلی خم در شکل c-20 با افزایش فشار رشد یافته است که سبب کاهش ضخامت انحنای داخلی با افزایش فشار شد. در محل تار خنثی و نواحی اطراف آن و انحنای خارجی خم نیز با افزایش فشار از شدت کرنش محیطی منفی کاسته شده که نشان‌دهنده کاهش تمایل ماده به ضخیم‌شدگی در نواحی یادشده با افزایش فشار است. در شکل c-d-20 انتقال منحنی‌های کرنش‌های محیطی، طولی و ضخامتی با افزایش فشار، اثر خود را بر تغییرات ضخامت را تضعیف نکرده و همچنین تشدید هم کرده است. با توجه به مطالب بیان شده در مورد شکل d-a-20 نحوه توزیع و جابه‌جایی کرنش‌ها، رفتار ماده را در شکل‌های 18 و 19، از جمله افت ضخامت انحنای داخلی و خارجی خم، و افزایش ضخامت در مناطق اطراف تار خنثی با افزایش فشار را کاملاً توجیه کرده است.

شکل‌های b-a-21 توزیع ضخامت طولی لوله در انحنای داخلی و خارجی خم را در نسبت‌های مختلف خم نشان می‌دهد. شکل a-21 در فشار 1 مگاپاسکال و b-21 در فشار 1.5 بوده است. اندازه‌گیری ضخامت در انحنای داخلی و خارجی خم، از خط مماسی آغاز شده و تا ابتدای گیره ادامه یافت. در این شکل، میزان فاصله از خط مماسی به درصدی از کل مسیر تبدیل شده است. منحنی‌هایی که دارای مقادیر بزرگ‌تر از 1mm هستند، ضخیم‌شدگی انحنای داخلی خم و منحنی‌هایی که دارای مقادیری کمتر از 1mm هستند، نازک‌شدگی انحنای خارجی خم را نشان می‌دهند.

نکته مهم در شکل 21 این است که با کاهش نسبت خم از 2 به 1.6، ضخامت بیشینه و کمینه دیواره لوله در فشار 1 مگاپاسکال، به ترتیب 4.95% افزایش و 3.13% کاهش می‌یابد، این مقادیر در فشار 1.5 مگاپاسکال به ترتیب 5.36% افزایش و 3.22% کاهش یافته است. جهت انتقال منحنی‌ها با کاهش نسبت خم، با پیک آن‌هایی در شکل‌ها مشخص شده است. با توجه به درصدهای یادشده، مقدار افزایش ضخامت بیشینه (در انحنای داخلی) بیش از مقدار افزایش نازک‌شدگی (در انحنای خارجی) بوده است. شکل 22 برای توجیه این رفتار آورده شده است. این شکل توزیع کرنش‌های طولی و محیطی و ضخامتی در سطح مقطع میانی خم ($\theta=45$) را در فشار 1 مگاپاسکال نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در انحنای داخلی با کاهش نسبت خم، کرنش ضخامتی و کرنش محیطی با علامت مثبت افزایش یافتند و کرنش طولی با علامت منفی افزایش یافت، که همگی سعی در ضخیم کردن دیواره لوله دارند. برعکس در انحنای خارجی با کاهش نسبت خم، افزایش

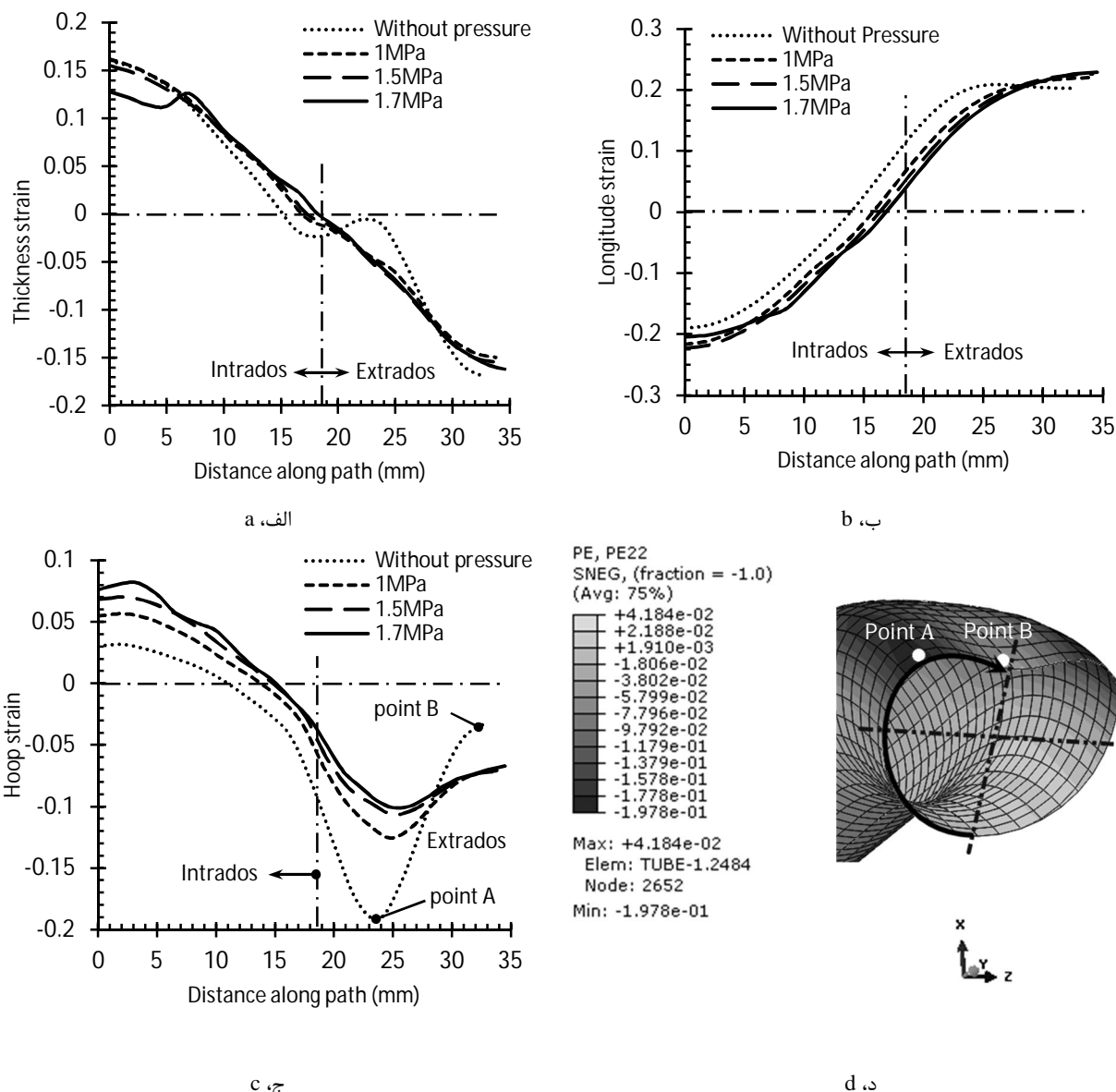


Fig. 20 a) Thickness strain, b) Longitude strain, c) Hoop strain distribution at mid-cross section with $R/D=1.8$, along the determined path shown in d)

شکل 20 نمودار الف) کرنش ضخامت، ب) کرنش طولی و ج) کرنش محیطی در سطح مقطع میانی لوله در حالت خم‌کاری با نسبت خم 1.8، د) مسیر تعیین شده برای استخراج کرنش‌ها

و مسطح‌شدگی است، اما زمانی که فشار بالا رود، دیواره خارجی امکان نزدیک‌شدن به انحنا داخلی را ندارد و مسطح‌شدگی کمتری به‌وجود می‌آید و به ناچار در اثر تنش‌های وارده، نازک می‌شود.

در شکل 23 به دلایل یادشده در مورد شکل 21، با کاهش نسبت خم، منحنی‌های ضخیم‌شدگی در سطوح بالاتری قرار گرفته‌اند. منحنی‌های نازک‌شدگی با کاهش نسبت خم به سمت پایین شیف‌ت پیدا کرده‌اند که خود نشان‌دهنده افزایش نازک‌شدگی به دلیل تغییرات کرنش یادشده در شکل 22 است. دیواره لوله در خم‌کاری با نسبت خم 1.8 و فشار داخلی 1.7 مگاپاسکال دارای بیشترین نازک‌شدگی و در خم‌کاری با نسبت خم 2 و بدون فشار داخلی دارای کمترین نازک‌شدگی به ترتیب معادل 20.38% و 12.12% است. در خم‌کاری با نسبت خم 1.6 و بدون فشار داخلی، دیواره لوله دارای بیشترین ضخیم‌شدگی و در خم‌کاری با نسبت خم 2 و فشار داخلی 2.4 مگاپاسکال دارای کمترین ضخیم‌شدگی به ترتیب معادل 23.3% و 15.4%

که درصد بیضی‌شدن کمتر باشد، نازک‌شدگی بیشتر است. شکل 23 برای جمع‌بندی اثر فشار و نسبت خم بر توزیع ضخامت و بیضی‌شدن آورده شده که در آن درصد تغییرات نازک‌شدگی بیشینه، ضخیم‌شدگی بیشینه و بیضی‌شدن در تمام فشارها و نسبت‌های خم نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ضخیم‌شدگی در تمام نسبت‌های خم با افزایش فشار روند کاهشی و درصد نازک‌شدگی افزایش داشته است و این روند افزایشی به دلیل تماس نداشتن با قالب دارای شیب بیشتری نسبت به روند کاهشی ضخیم‌شدگی بوده است.

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، فشار داخلی تأثیر بیشتری بر نازک‌شدگی (نسبت به ضخیم‌شدگی) داشته است. در فشارهای بالاتر به دلیل کاهش بیضی‌شدن و مسطح‌شدگی، نازک‌شدگی بیشتر است. بدون اعمال فشار سیال، دیواره انحنا خارجی خم برای گریز از تنش‌های وارده هنگام خم‌کاری، به دیواره داخلی نزدیک می‌شود که نتیجه آن افزایش بیضی‌شدن

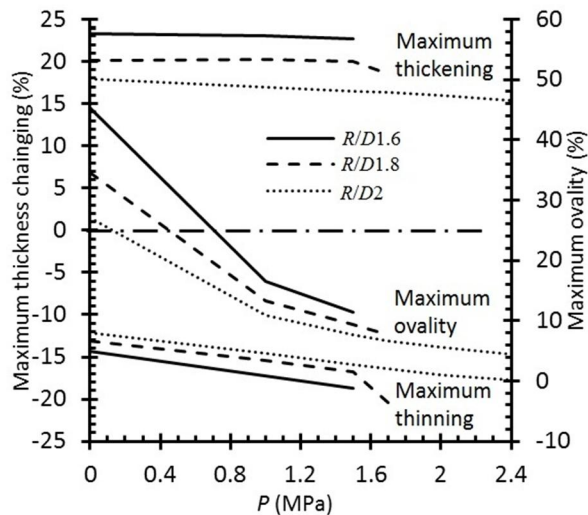


Fig. 23 Maximum wall thinning, thickening and ovality at all bending ratios and internal pressures

شکل 23 نازک‌شدگی، ضخیم‌شدگی و بیضی‌شدن بیشینه، در تمام فشارها و نسبت‌های خم

است.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با کمک معیار گلوبی، کمترین نسبت خم قابل دستیابی و بیشترین فشار داخلی قابل اعمال، در فرایند خم‌کاری کششی دورانی هیدرولیکی پیش‌بینی شده است. سپس تأثیر پارامترهای نسبت خم و فشار سیال داخلی روی بیضی‌شدن سطح مقطع و تغییرات ضخامت دیواره لوله آلومینیومی آلیاژ 8112 به کمک شبیه‌سازی و تست تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. براساس این پژوهش، نتایج زیر را می‌توان بیان کرد:

1. کوچک‌ترین نسبت خم قابل دستیابی برابر 1.6 و بیشترین فشار داخلی قابل اعمال در آن نسبت خم، 1.5 مگاپاسکال است، همچنین بیشترین فشار قابل اعمال در نسبت‌های خم 1.8 و 2 به ترتیب 1.7 و 2.4 مگاپاسکال است. لوله در نسبت خم 1.5، تحت فشارهای کمتر از 1 مگاپاسکال در انحنای داخلی خم چروکیده و در فشارهای بیشتر از آن، هم پاره و هم چروکیده می‌شود.

2. در تمام نسبت‌های خم، ضخیم‌شدگی بیشینه در انحنای داخلی با افزایش فشار، روند کاهشی و نازک‌شدگی بیشینه در انحنای خارجی روند افزایشی داشته است و این روند افزایشی به دلیل عدم تماس انحنای خارجی با قالب، دارای شیب بیشتری نسبت به روند کاهشی ضخیم‌شدگی بوده است؛ بنابراین فشار داخلی تأثیر بیشتری بر نازک‌شدگی (نسبت به ضخیم‌شدگی) داشته است.

3. مقدار نازک‌شدگی در شکل 23 (در کلیه نسبت‌های خم) در نزدیکی خط مماسی نسبت به سایر نقاط کمتر است و با افزایش فاصله از خط مماسی اندک اندک افزایش یافته تا در نواحی با فاصله حدودی 90-70% از خط مماسی به اوج می‌رسد. دلیل این افت و خیز منحنی‌های نازک‌شدگی، تغییرات بیضی‌شدن سطح مقطع لوله در مقاطع مختلف است، یعنی موقعیت‌هایی که درصد بیضی‌شدن کمتر باشد، نازک‌شدگی بیشتر است.

4. در این فرایند، با افزایش نسبت خم، ضخامت دیواره لوله (چه در انحنای داخلی، چه انحنای خارجی خم) به ضخامت نخستین لوله

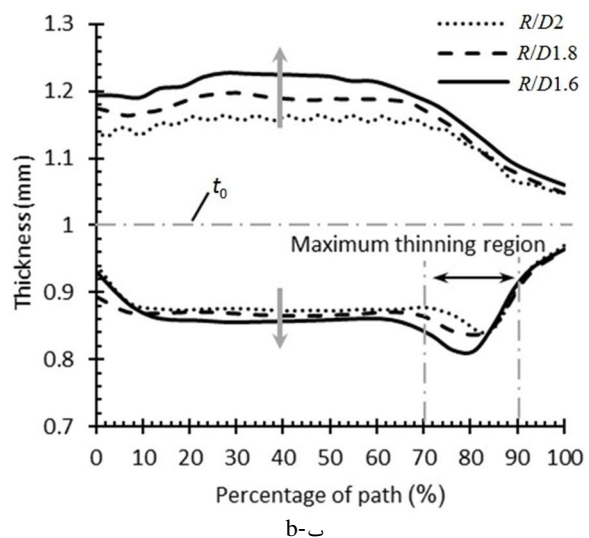
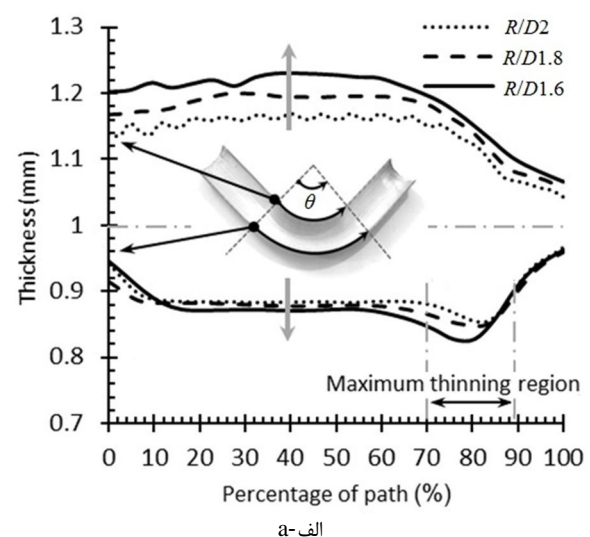


Fig. 21 thickness distribution along intrados and extrados paths under 1.5MPa internal pressure condition

شکل 21 توزیع ضخامت در انحنای داخلی و خارجی خم، تحت فشار الف) 1 مگاپاسکال، ب) 1.5 مگاپاسکال

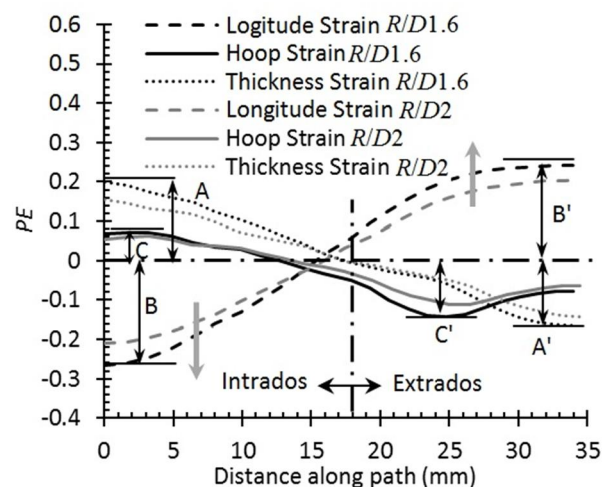


Fig. 22 strain Distribution along hoop direction at the mid-cross section with 1MPa internal pressure

شکل 22 توزیع کرنش‌های طولی و محیطی و ضخامتی در سطح مقطع میانی خم (45°) و در فشار 1 مگاپاسکال

نزدیک‌تر می‌گردد. به عبارتی ضخامت محیطی لوله یکنواخت‌تر می‌شود.

5. بیضوی‌شدن بیشینه، صرف‌نظر از میزان فشار داخلی و نسبت خم، در سطح مقطع با زاویه تقریباً $\theta=33^\circ$ رخ می‌دهد. کمترین مقدار بیضوی‌شدن قابل دستیابی در نسبت‌های خم 1.6، 1.8 و 2 به ترتیب 11.42٪، 7.72٪ و 4.35٪ است.

6. با کاهش نسبت خم از 1.6 به 2، در فشارهای 0-1.5 مگاپاسکال، میزان بیضوی‌شدن به ترتیب 67.5٪، 53٪ و 49.2٪ افزایش داشته است که روند نزولی دارد. این روند نزولی نشان می‌دهد که در فشارهای بالاتر، بر میزان اثر مثبت فشار داخلی روی بهبود بیضوی‌شدن افزوده می‌شود، همچنین مقدار بیضوی‌شدن با کاهش نسبت خم، افزایش یافته است.

6- فهرست علائم

P	فشار داخلی (MPa)
$PEEQ$	کرنش پلاستیک معادل
R	شعاع خم (mm)
علائم یونانی	
$\bar{\sigma}$	تنش حقیقی (MPa)
$\bar{\epsilon}$	کرنش حقیقی
$\bar{\epsilon}_0^{pl}$	کرنش پلاستیک معادل اولیه
$\bar{\epsilon}^{pl}$	نرخ جریان پلاستیکی متناظر

7- مراجع

- [1] A. Mentalla, M. Strano, R. Gemignani, A new method for Feasibility Study and determination of the loading curves in the Rotary Draw-Bending Process, *Material Forming*, Vol. 1, No. 1, pp. 165-168, 2008.
- [2] L. Lazaresco, Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending, *Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 1, pp. 85-91, 2013.
- [3] K. Pan, K. A. Stelson, On the plastic deformation of a tube during bending, *Engineering for Industry*, Vol. 117, No. 1, pp. 494-500, 1995.
- [4] J. Wang, R. Agarwal, Tube bending under axial force and internal pressure, *Mechanical Science and Engineering*, Vol. 128, No. 2, pp. 598-600, 2006.
- [5] E. Da-xin, H. Hua-hui, L. Xiao-yi, Springback deformation in tube bending, *Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 16, No. 2, pp. 177-183, 2009.
- [6] G. Khodayari, Bending limit curve for rotary draw bending of tubular components in automotive hydroforming applications, *SAE Materials and Manufacturing*, Vol. 1, No. 1, pp. 841-848, 2008.
- [7] K. Hasanpour, M. Barati, B. Amini, M. Poursina, The effect of anisotropy on wrinkling of tube under rotary draw bending, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 3, pp. 783-792, 2013.
- [8] H. Yang, H. Li, M. Zhan, Friction role in bending behaviors of thin-walled tube in rotary-draw-bending under small bending radii, *Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 1, pp. 2273-2284, 2010.
- [9] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, *Manufacturing Processes*, Vol. 18, No. 1, pp. 131-140, 2015.
- [10] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, R. Mahdaviinejad, A novel approach to the determination of forming limit diagrams for tailor-welded blanks, *Materials Engineering Performance*, Vol. 22, No. 1, pp. 3210-3221, 2013.
- [11] *Abaqus User Guide*, Accessed on 13 January 2016; <http://abaqus.software.polimi.it/v6.13/books/usb/default.htm>.
- [12] *Getting Started with Abaqus: Interactive Edition*, Accessed on 20 February 2016; <http://ivtabaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/books/hhp/default.htm?startat=pt03ch06.html>.
- [13] L. Heng, Y. He, Z. Me, G. Rui-Jie, Forming characteristics of thin-walled tube bending process with small bending radius, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 16, No. 1, pp. 613-623, 2006.