



## Numerical and Experimental Investigation of Low Pressure Hydroforming of Aluminum Tubes

Seyed Jalal Hashemi<sup>1\*</sup>, Yaghoub Dadgar Asl<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 07.26.2021

**Revised:** 08.11.2021

**Accepted:** 09.05.2021

**Keyword:**

Low pressure hydroforming (LPTH)  
Thickness distribution  
Corner radius

**\*Corresponding Author:**

Seyed Jalal Hashemi

**Email:** [j\\_hashemi@tvu.ac.ir](mailto:j_hashemi@tvu.ac.ir)

### ABSTRACT

Tube hydroforming process is used widely in production of car structural parts. High strength to weight ratio is one of the properties of parts which is produced using this process. Low pressure tube hydroforming (LPTH) is one method recommended for solving problems of tube hydroforming such as requiring high pressure of fluid and sealing problems. LPTH method is similar to crushing a hollow solid body. Unlike high pressure tube hydroforming, upper die is not fixed in this process and it moves at the same time by applying internal pressure and squeezes the tube. Main defects in low pressure hydroforming are tube wall thinning and geometric errors at final form of the part. In this paper, LPTH of AA6063 aluminum tubes was carried out and circular cross section of tube was deformed to rectangular. Thickness distribution, formed corner radius and flatness of top surface of part was investigated under three different loading paths. Results show that lower corner radius can be achieved with higher internal pressure while thinning is increased. Maximum of flatness was obtained when moving of the upper die was carried out after reaching the maximum of internal pressure. Minimum of radius was formed at upper corner equal to 5.63mm and at lower corner equal to 5.62mm under internal pressure of 10MPa. Concavity of upper surface of part was decreased to 0.2mm by applying 10MPa internal pressure.





## بررسی عددی و تجربی هیدروفرمینگ فشار پایین لوله‌های آلومینیومی

سید جلال هاشمی<sup>\*۱</sup>، یعقوب دادگر اصل<sup>۲</sup>

۲-۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

فرایند هیدروفرمینگ لوله به‌طور گسترده در تولید قطعات ساختاری اتومبیل استفاده می‌شود. یکی از خصوصیات قطعات تولید شده با این فرایند، نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشد. هیدروفرمینگ لوله فشار پایین، یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای حل مشکلات هیدروفرمینگ لوله از قبیل نیاز به فشار بالای سیال و مشکلات آب‌بندی می‌باشد. روش انجام هیدروفرمینگ فشار پایین لوله شبیه فشردن یک جسم جامد توخالی است و در آن برخلاف هیدروفرمینگ فشار بالا، قالب بالایی در طول فرایند ثابت نمی‌باشد و هم‌زمان با اعمال فشار داخلی به لوله حرکت می‌کند و لوله را تحت فشار قرار می‌دهد. نازک‌شدگی دیواره‌های لوله پس از شکل‌دهی و خطاهای هندسی در فرم نهایی قطعه، از عیوب مهم فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین می‌باشند. در این مقاله، فرایند هیدروفرمینگ فشارپایین لوله‌های آلومینیومی آلیاژ AA6063 انجام شده و مقطع گرد لوله به‌وسیله فرایند هیدروفرمینگ به مقطع مستطیلی تغییر شکل داده است. توزیع ضخامت، مقادیر شعاع گوشه شکل داده شده و تختی سطح بالایی قطعه تحت مسیرهای بارگذاری متفاوت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار داخلی می‌توان به شعاع گوشه کمتری دست پیدا کرد اما نازک‌شدگی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین تختی سطح بالایی قطعه زمانی حاصل می‌شود که جابه‌جایی قالب بالایی بعد از رسیدن فشار داخلی به مقدار ماکزیمم خود انجام شود. حداقل شعاع گوشه تولید با فشار داخلی ۱۰ مگاپاسکال در گوشه بالایی مقطع ۵/۶۳mm و در گوشه پایینی مقطع ۵/۶۲mm شکل داده شده است. با اعمال فشار داخلی ۱۰ مگاپاسکال، فرورفتگی سطح بالایی قطعه به ۰/۲mm رسیده است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

### کلید واژگان:

هیدروفرمینگ لوله فشار پایین  
توزیع ضخامت  
شعاع گوشه

\*نویسنده مسئول: سید جلال هاشمی

پست الکترونیکی:

[J\\_hashemi@tvu.ac.ir](mailto:J_hashemi@tvu.ac.ir)



## مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله در بسیاری از صنایع برای شکل‌دهی قطعات پیچیده به‌کار می‌رود. از صنایعی که در آن‌ها فرایند هیدروفرمینگ استفاده گسترده‌ای دارد، می‌توان به صنایع نفت و گاز، خودروسازی، هوا فضا، ساخت شیرآلات بهداشتی، لوازم خانگی و صنایع نظامی اشاره کرد.

اگر چه فرایند هیدروفرمینگ لوله از دهه‌های اخیر در صنعت مورد توجه قرار گرفته است ولی پیشرفت‌های تجربی و نظری آن به سال ۱۹۴۰ میلادی برمی‌گردد. گری و همکارانش [۱] در مورد تولید قطعات مسی T- شکل به‌وسیله فشار داخلی و تغذیه محوری در سال ۱۹۴۰ مقاله‌ای را منتشر کردند. معمولاً در فرایند هیدروفرمینگ برای شکل‌دهی لوله و اطمینان از شکل‌گیری گوشه‌های قطعه از فشار بالای داخلی استفاده می‌شود. در هیدروفرمینگ لوله فشار بالا (HPTH) دو نیمه قالب بسته و با اعمال فشار زیاد شکل‌دهی انجام می‌شود [۲]. اما در HPTH مشکلاتی مانند نیاز به یک سیستم تأمین‌کننده فشار بالا و نیروی زیاد بسته نگهداشتن دو نیمه قالب وجود دارد. در راستای حذف مشکلات HPTH فرایند جدیدی به نام هیدروفرمینگ لوله فشار پایین (LPTH) مورد توجه قرار گرفته است. در این فرایند فشار داخلی مورد استفاده برای شکل‌دهی لوله کمتر از ۸۳ مگاپاسکال می‌باشد [۳]. در LPTH لوله با سیال با فشار پایین پر می‌شود در حالی که قالب بالایی متحرک است و در طول انجام فرایند قالب‌ها بسته می‌شوند [۴]. استفاده از فشار شکل‌دهی پایین، علاوه بر کاهش اندازه قالب و تجهیزات، از خطرات احتمالی استفاده از فشار بالا را کمتر خواهد کرد. مطالعات تحلیلی و تجربی زیادی روی HPTH مقاطع غیرگرد انجام شده است. در این مطالعات، پارامترهای فرایندی و رفتار تغییرشکل ماده بررسی شده است. چوی و همکارانش [۵] تولید یک مقطع مربعی با استفاده از هیدروفرمینگ دوطرفه را بررسی کردند و نشان دادند که با اعمال فشار خارجی توزیع ضخامت در سطح مقطعه قطعه در ناحیه انتقال بهبود می‌یابد. ژو و همکارانش [۶] تأثیر ضریب اصطکاک، ضریب کارسختی و ضریب ناهمسانگردی بر توزیع ضخامت مقطع مربعی در هیدروفرمینگ فشار بالا را به‌صورت تحلیلی و عددی بررسی کردند. اوربان و هو [۷] یک مدل تحلیلی را برای تعیین تنش‌ها و کرنش‌ها در سطح مقطع لوله در هیدروفرمینگ یک قطعه مربعی در حالت دوبعدی توسعه دادند. در این مدل، تأثیر ضریب اصطکاک و پارامترهای ماده در نظر گرفته شد. مانابه و آمینو [۸] به‌صورت عددی و تجربی تأثیر فاکتورهای مختلف بر هیدروفرمینگ مقطع مربعی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغذیه محوری و روانکاری بهتر باعث بهبود کیفیت محصول خواهد شد. چو و یانگ [۹] با در نظر گرفتن تأثیر ناهمسانگردی شرایط منجر به ترکیدگی لوله را در یک قالب مربعی پیش‌بینی کردند. هوانگ و چن [۱۰] مدلی را برای تعیین توزیع ضخامت و فشار موردنیاز برای شکل‌دهی شعاع گوشه مشخص در فرایند هیدروفرمینگ لوله فشار بالا توسعه دادند. نتایج مدل توسعه داده شده، تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان داد. تحقیقات زیادی نیز در مورد تأثیر دما بر HPTH انجام شده است. براساس پژوهش‌های انجام گرفته در دمای بالا [۱۱؛ ۱۲] هیدروفرم‌پذیری لوله‌های آلومینیومی و منیزیمی در هیدروفرمینگ گرم افزایش می‌یابد. هاشمی و همکارانش [۱۳] تحقیقی را در مورد پیش‌بینی ترکیدگی در هیدروفرمینگ لوله انجام دادند. براساس نتایج آن‌ها معیار آیدای اصلاح‌شده بهترین پیش‌بینی را مقاطع مربعی در فرایند هیدروفرمینگ دارد.

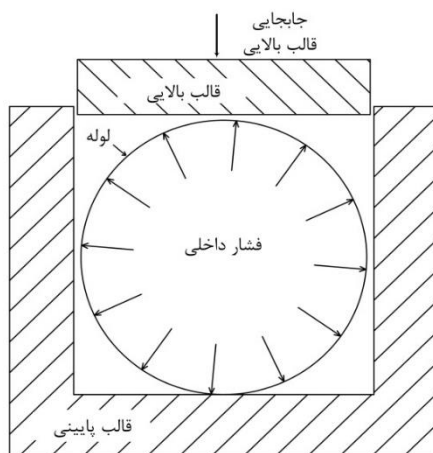
بر خلاف HPTH تحقیقات زیادی در مورد LPTH انجام نشده است. هوانگ و آلتان [۱۴] تبدیل مقطع گرد لوله را به مثلث با استفاده از LPTH بررسی کردند. همین نویسندگان در مطالعه دیگری [۱۵] تولید مقطع مستطیلی را به‌وسیله LPTH مطالعه کرده‌اند. نیخاره و همکارانش [۱۶] یک مدل تحلیلی را برای تعیین نیروی بسن قالب در LPTH توسعه دادند. همین نویسندگان در یک پژوهش دیگر [۴] به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود LPTH و HPTH مقطع مربعی را مقایسه کردند و توزیع ضخامت و تنش را در سطح مقطع بررسی کردند. نیخاره و همکارانش [۱۷] شرایط بحرانی ایجاد کمانش در هیدروفرمینگ فشار پایین مقاطع مربعی را به‌صورت تحلیلی تعیین کردند. چو و همکارانش

[۱۸] برگشتن فنری را در هیدروفرمینگ فشار پایین مقاطع مربعی به صورت تحلیلی مطالعه کردند. تروت و همکارانش [۱۹] با استفاده از مدل عددی دوبعدی و با در نظر گرفتن پرشدگی گوشه‌های قالب برای شکل دهی بهتر از پیش‌فرم در هیدروفرمینگ فشار پایین استفاده کردند. ژانگ و همکارانش [۲۰] به صورت تجربی دقت ابعادی مقطع مربعی را در شکل دهی با هیدروفرمینگ را بررسی کردند و اصطکاک را به عنوان عامل بازدارنده در دستیابی به دقت بالاتر می‌باشد. با بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص می‌شود تا به حال فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین لوله‌های آلومینیومی با مقطع مستطیلی انجام نشده است. در ضمن در پژوهش‌های قبل که روی این مقطع تحقیقاتی انجام گرفته، تأثیر منحنی بارگذاری و مقدار فشار بر شعاع گوشه، ایجاد شده و دقت شکل دهی مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله، تولید یک مقطع مستطیلی با استفاده از LPTH روی لوله‌های آلومینیومی بررسی شده است. در این راستا، شبیه‌سازی سه بعدی فرایند شکل دهی انجام شده و برای صحت‌سنجی نتایج عددی یک دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین طراحی و ساخته شده است. روش‌های مختلف اعمال منحنی بارگذاری شامل تغییرات فشار داخلی نسبت به جابه‌جایی قالب بالایی استفاده شده است تا توزیع ضخامت بهتری در سطح مقطع محصول ایجاد شود و کمترین فرورفتگی در سطح بالای قطعه به وجود آید. شعاع گوشه شکل گرفته نیز در حالت‌های مختلف بررسی شده است.

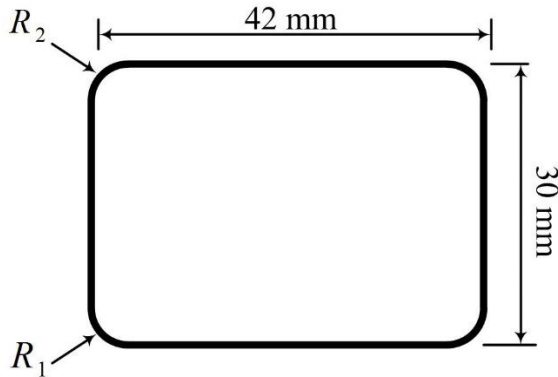
### بخش تجربی

طرح شماتیک نحوه انجام LPTH در این پژوهش به صورت دوبعدی در شکل ۱ نمایش داده شده است. قالب پایین ثابت می‌باشد و لوله درون آن قرار می‌گیرد. قالب بالا متحرک می‌باشد و با حرکت به سمت پایین باعث تغییر شکل لوله می‌شود. به منظور جلوگیری از فرورفتگی در قسمت بالای لوله و همچنین ایجاد گوشه‌های با شعاع کمتر فشار داخلی در داخل لوله ایجاد می‌شود. نسبت تغییرات فشار داخلی لوله به جابه‌جایی قالب بالایی در زمان بسته شدن، تأثیر زیادی بر شکل و کیفیت محصول نهایی خواهد داشت.

بررسی عددی و تجربی هیدروفرمینگ فشار پایین لوله آلیاژ آلومینیوم AA6063 با قطر بیرونی اولیه ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و طول اولیه لوله ۱۴۰ میلی‌متر و تبدیل آن به یک مقطع مستطیل مطابق با شکل ۲ در داخل قالب هیدرو فرمینگ با گوشه‌های تیز و بررسی اختلاف کمینه و بیشینه نقاط طول و عرض قطعه و شعاع گوشه بالایی مقطع ( $R_2$ ) و پایینی مقطع ( $R_1$ ) و توزیع ضخامت می‌باشد.

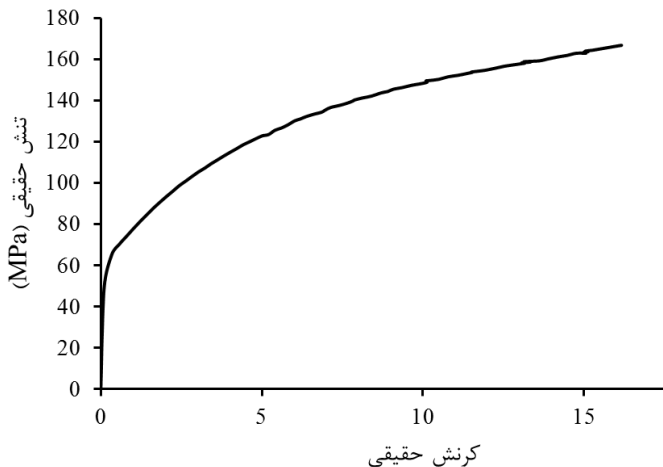


شکل ۱. طرح شماتیک نحوه انجام LPTH

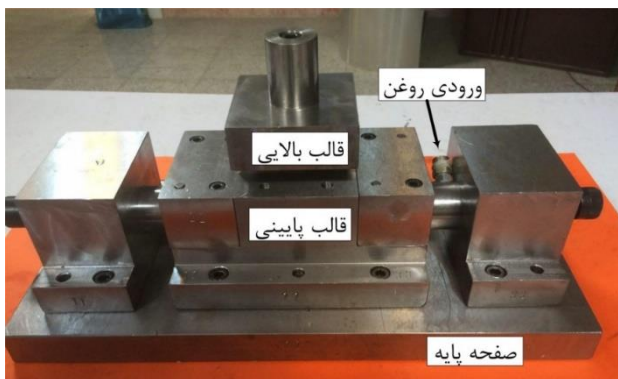


شکل ۲. سطح مقطع مورد بررسی

آزمون کشش، آزمایش استاندارد تک محوری، روشی است که معمولاً برای تشخیص رفتار تغییر شکل مواد لوله‌ای استفاده می‌شود. براساس آزمون کشش لوله‌ها که طبق استاندارد ASTM-E8M، در آزمایشگاه شکل‌دهی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است، نمودار تنش- کرنش حقیقی نشان داده شده در شکل ۳ به دست آمده است. به منظور بررسی تجربی تغییر شکل لوله‌های آلومینیومی یک دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین، طراحی و ساخته شد. اجزای دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. آب‌بندی دو انتهای لوله از نوع فلز به فلز می‌باشد؛ در نتیجه دو انتهای لوله ثابت است و تغذیه محوری انجام نشده است. طول ناحیه تغییر شکل در قالب ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. اجزای مجموعه به صورت دمونتاژ شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. برای اعمال فشار داخلی از پمپ هیدرولیک دستی با ظرفیت ۴۰۰ بار نشان داده شده در شکل ۵ استفاده شد. به منظور کنترل حداکثر فشار داخلی نیز از یک شیر فشار شکن و گیج فشار استفاده شد که در شکل ۵ نمایش داده شده است و جابه‌جایی قالب بالایی توسط پرس هیدرولیک ۶۰ انجام گردید. نحوه قرار گرفتن مجموعه زیر دستگاه پرس در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار تنش- کرنش حقیقی لوله آلومینیومی AA6063



شکل ۴. مجموعه آزمایشگاهی LPTH



شکل ۵. اجزای مجموعه و مدار هیدرولیکی

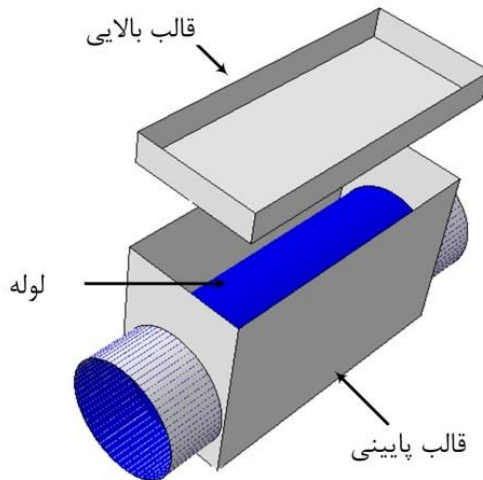


شکل ۶. نحوه قرارگیری مجموعه LPTH زیر دستگاه پرس

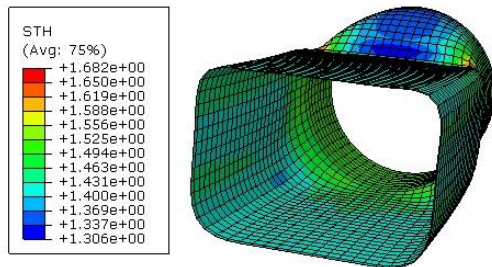
### شبیه‌سازی اجزای محدود

به‌منظور بررسی بیشتر تغییر شکل لوله طی فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین، از شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدل سه‌بعدی ایجاد شده در شکل ۷ مشاهده می‌شود. قالب بالایی و قالب پایینی به‌صورت سطح صلب گسسته مدل شده‌اند. لوله به‌عنوان یک سطح شکل‌پذیر مدل شده و برای مش‌بندی آن از المان S4R با اندازه المان ۲ میلی‌متر استفاده شده است. در زمان شکل‌دهی، قالب پایین در مکان خود ثابت می‌باشد و قالب بالایی مطابق با منحنی بارگذاری از پیش تعریف‌شده باعث تغییر شکل مقطع لوله می‌شود. منحنی تنش- کرنش حقیقی ساده طبق نتایج کشش تک‌محوری در دمای محیط به‌دست‌آمده برای خواص پلاستیک به نرم‌افزار داده شده است. برای شرایط تماسی سطح خارجی لوله و قالب در این تحقیق، مدل تماسی سطح به سطح استاندارد با ضریب اصطکاک طبق مدل اصطکاکی کولمب با مقدار  $0/3$  استفاده شد. در زمان شکل‌دهی لوله تحت همه منحنی‌های بارگذاری دو انتهای لوله مقید می‌باشد و تغذیه محوری اعمال نشده است. فشار سیال هیدروفرمینگ نیز با فشار یکنواخت سطحی جایگزین شده است. نمونه‌ای از تغییر شکل لوله توسط منحنی بارگذاری و حرکت قالب بالایی به همراه توزیع ضخامت در شکل ۸ مشاهده می‌شود. به‌منظور مشخص شدن بهتر تغییر سطح مقطع، نصف لوله نمایش داده شده است.

مهم‌ترین پارامتر در راستای تولید قطعه هیدروفرمینگ با حداقل عیوب، شامل چروکیدگی و ترکیدگی منحنی بارگذاری می‌باشد. اعمال فشار داخلی بیش‌ازحد باعث ترکیدگی قطعه می‌شود و از طرف دیگر اعمال فشار داخلی کم باعث تنش‌های فشاری زیاد در دیواره لوله و در نتیجه چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع می‌شود. هدف اصلی این تحقیق، تعیین منحنی بارگذاری مناسب برای تولید مقطع مستطیل با گوشه‌های تیز می‌باشد. در این راستا تأثیر سه نوع منحنی بارگذاری متفاوت بررسی شده است.

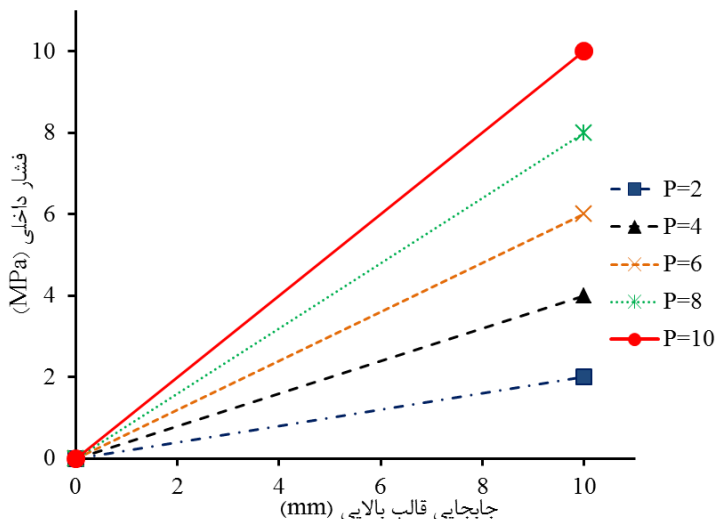


شکل ۷. مدل شبیه‌سازی عددی



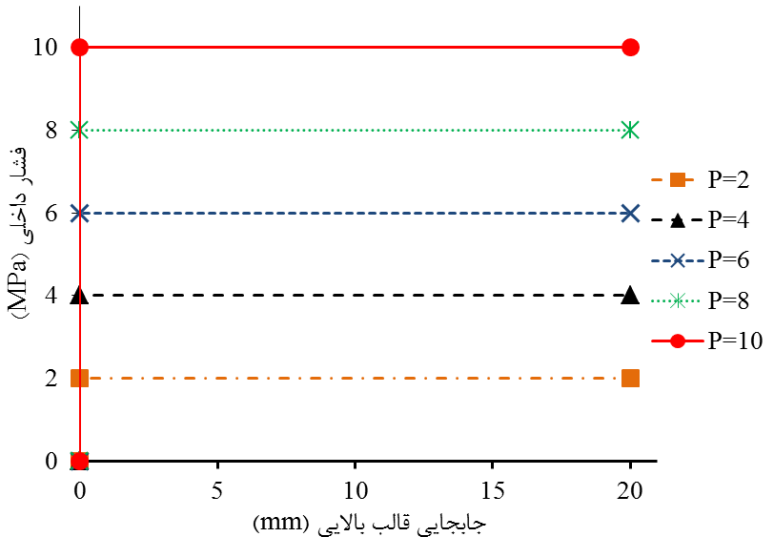
شکل ۸. تغییر شکل لوله

در منحنی بارگذاری نوع اول، افزایش فشار داخلی لوله و جابه‌جایی قالب بالایی به‌صورت هم‌زمان انجام شده است. به این صورت که در ابتدای فرایند، قالب بالایی با لوله بدون فشار داخلی در تماس است. سپس با افزایش فشار، قالب بالایی نیز حرکت می‌کند و در زمان جابه‌جایی ماکزیمم قالب بالایی یعنی ۱۰ میلی‌متر، فشار داخلی نیز به ماکزیمم خود می‌رسد. منحنی‌های بارگذاری نوع اول با فشار داخلی ماکزیمم متفاوت در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در منحنی بارگذاری نوع دوم، ابتدا قالب بالایی ثابت می‌باشد و در فاصله ۱۰ میلی‌متر از سطح لوله بدون تماس اولیه با آن قرار می‌گیرد، در حالی که فشار داخلی افزایش می‌یابد. پس از رسیدن فشار به مقدار مشخص و حداکثر خود، قالب بالایی برای تغییر شکل لوله به سمت پایین حرکت می‌کند. شکل ۱۰ نحوه تغییرات فشار داخلی نسبت به جابه‌جایی قالب را برای این نوع منحنی نمایش می‌دهد. منحنی‌های بارگذاری نوع سوم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ابتدا فشار داخلی صفر می‌باشد و قالب بالایی تا مقدار موردنیاز پایین می‌آید تا ارتفاع قطعه که برابر با ۳۰ میلی‌متر است حاصل شود. سپس فشار داخلی تا مقدار مشخص شده افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ نمودارهای تغییرات فشار داخلی به‌صورت مجزا از نمودار جابه‌جایی قالب بالایی رسم شده است.

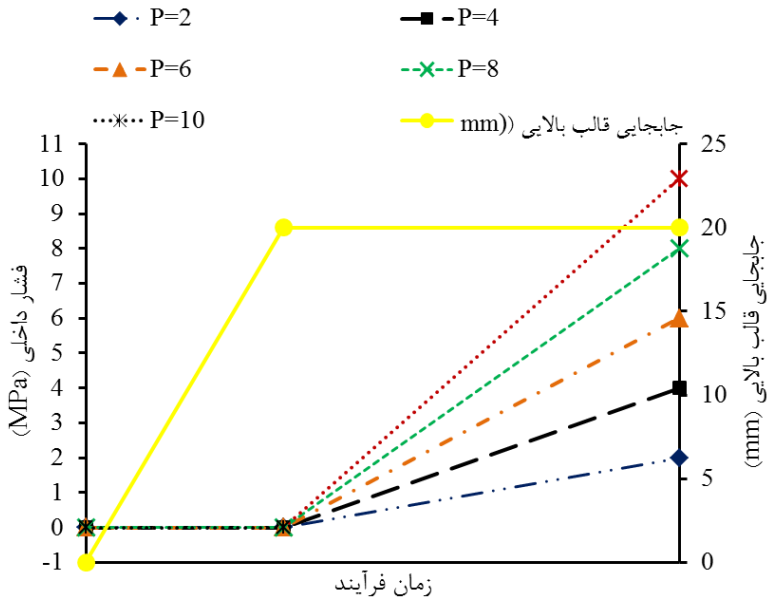


شکل ۹. منحنی‌های بارگذاری نوع اول





شکل ۱۰. منحنی‌های بارگذاری نوع دوم



شکل ۱۱. منحنی‌های بارگذاری نوع سوم

### نتایج و بحث

دو نمونه از قطعات شکل داده شده توسط دستگاه هیدروفورمینگ فشار پایین در شکل ۱۲ نشان داده شده است. هرچه فشار داخلی اعمال شده کمتر باشد، احتمال ایجاد فرورفتگی در سطح بالایی قطعه بیشتر می‌شود. مقطع میانی قطعه شکل داده شده به وسیله منحنی بارگذاری نوع اول با فشار ۱۰ مگاپاسکال در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

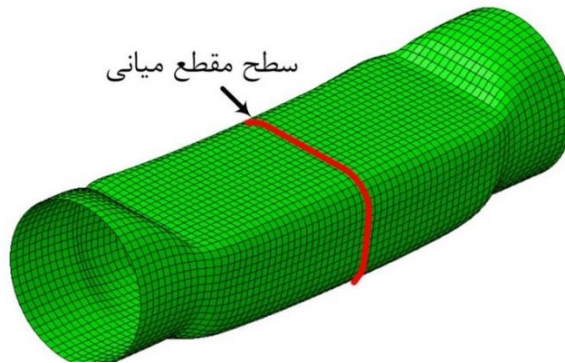


شکل ۱۲. قطعات شکل داده شده

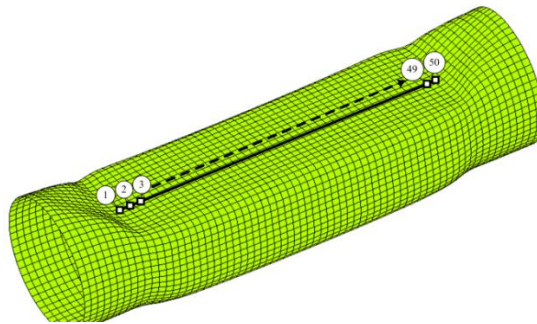


شکل ۱۳. سطح مقطع میانی قطعه شکل داده شده

به منظور بررسی دقت ابعادی و کیفیت قطعات شکل داده شده توسط منحنی‌های بارگذاری مختلف دو مسیر روی محیط قطعه انتخاب شد. مسیر اول، محیطی و در مقطع میانی قطعه می‌باشد و مسیر دوم طولی است و سطح بالایی قطعه شکل داده شده وجود دارد. موقعیت این دو مسیر در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نشان داده شده است.

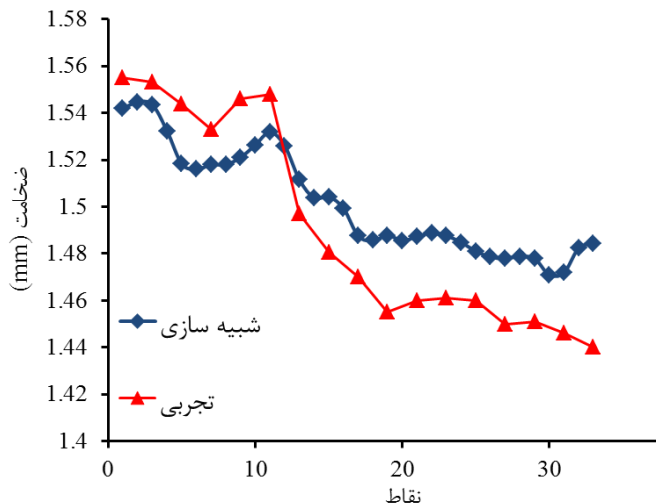


شکل ۱۴. مسیر مقطع میانی

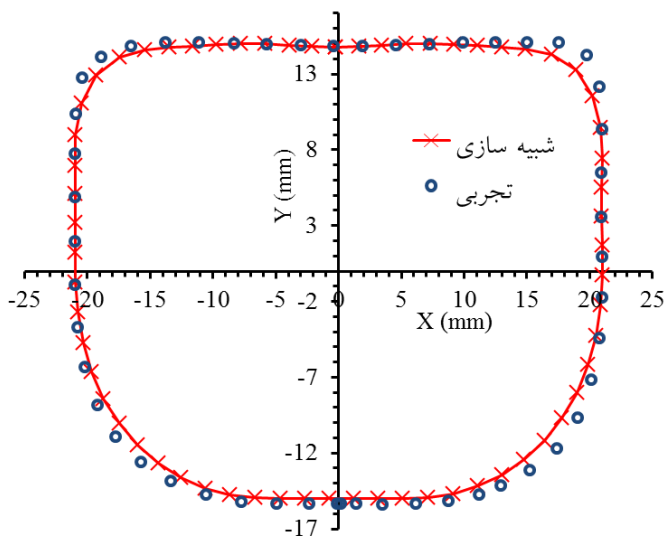


شکل ۱۵. مسیر طولی بررسی شده

به منظور بررسی صحت نتایج عددی، در دو حالت مقایسه با نتایج تجربی صورت گرفت. قطعه شکل داده شده به وسیله منحنی بارگذاری نوع سوم با فشار داخلی حداکثر ۱۰ مگاپاسکال از مقطع میانی بریده شد و توزیع ضخامت و پروفیل سطح بیرونی آن با نتایج عددی مقایسه گردید. برای اندازه‌گیری ضخامت از یک میکرومتر دیجیتال استفاده شد و پروفیل مقطع نیز با استفاده از دستگاه CMM به دست آمد. شکل ۱۶ توزیع ضخامت به دست آمده از نتایج عددی و تجربی برای این حالت را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن، فقط ضخامت در نصف مقطع رسم شده است. طبق نتایج به دست آمده حداکثر خطای ۳ درصد بین نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، مطابق شکل ۱۷، پروفیل مقطع میانی به دست آمده از نتایج عددی نسبت به نتایج تجربی خطای چندانی ندارد و در نتیجه می‌توان برای بررسی بیشتر به نتایج عددی اعتماد کرد.



شکل ۱۶. توزیع ضخامت در مقطع میانی

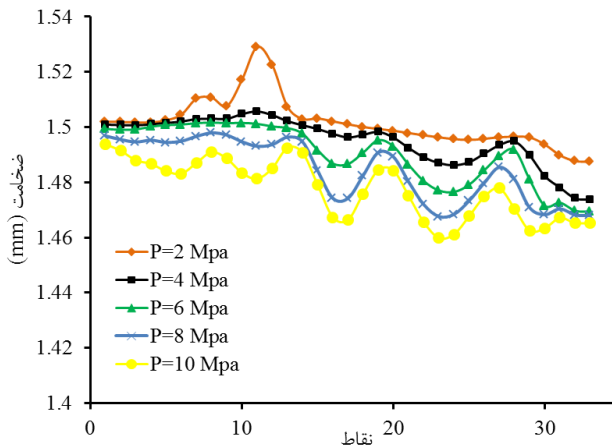


شکل ۱۷. توزیع ضخامت در مقطع میانی

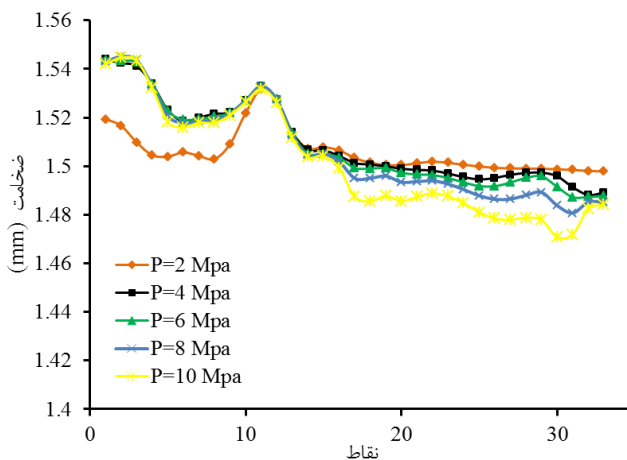
تأثیر نوع منحنی بارگذاری اعمال شده بر توزیع ضخامت در مسیر رسم شده در شکل ۱۴ بررسی شد. نمودارهای توزیع ضخامت از نتایج عددی به دست آمده و به دلیل تقارن نصف مقطع بررسی شده است. توزیع ضخامت برای منحنی‌های بارگذاری نوع اول با فشارهای ماکزیمم مختلف در شکل ۱۸ آمده است. هرچه فشار داخلی بیشتر باشد تنش کششی در راستای محیطی مقطع، بیشتر و در نتیجه، ضخامت دیواره کمتر می‌شود. البته همان‌طور که در بخش بعد شرح داده می‌شود این تنش‌های کششی باعث شکل‌گیری شعاع گوشه کمتری خواهند شد. در زمان شکل‌دهی لوله با این نوع منحنی بارگذاری، در ابتدای فرایند به دلیل کم بودن فشار داخلی، سطح بالایی قطعه دچار فرورفتگی کمی

می‌شود و سپس با افزایش فشار، این فرورفتگی کاهش می‌یابد. این موضوع باعث نوسان ضخامت مقطع در بالای قطعه خواهد شد. از طرف دیگر دیواره عمودی مقطع که در ابتدای فرایند با قالب تماس کمتری دارد، بیشترین نازک‌شدگی را خواهد داشت.

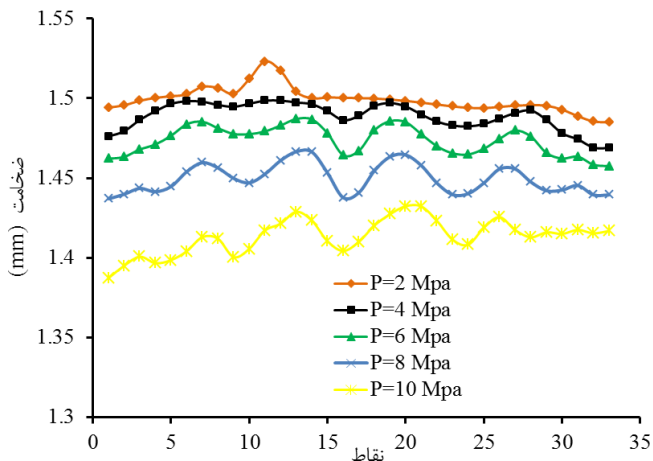
توزیع ضخامت مقطعی میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع دوم و نوع سوم به ترتیب در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شوند. در مورد منحنی بارگذاری نوع دوم، حداکثر ضخامت در بالاترین نقطه مقطع که با قالب بالایی در تماس می‌باشد رخ داده است. حداکثر نازک‌شدگی برای منحنی‌های بارگذاری نوع سوم رخ می‌دهد که اعمال فشار داخلی بعد از جابه‌جایی کامل قالب بالایی انجام می‌شود. بهترین توزیع ضخامت و با کمترین نوسان توسط منحنی‌های نوع دوم ایجاد شده است.



شکل ۱۸. توزیع ضخامت در مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع اول



شکل ۱۹. توزیع ضخامت در مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع دوم



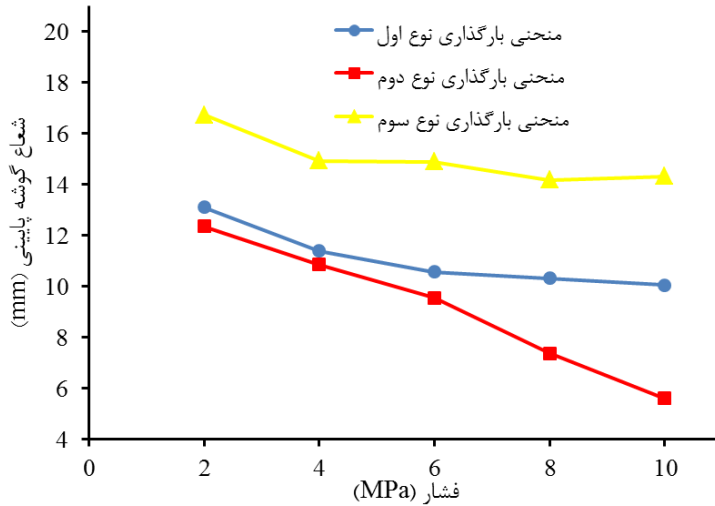
شکل ۲۰. توزیع ضخامت در مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع سوم

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت قطعات شکل داده شده، شعاع گوشه مقطع می‌باشد که هرچه کمتر باشد کیفیت قطعه بالاتر محسوب می‌شود. اعمال فشار داخلی بیشتر می‌تواند به شکل‌گیری شعاع گوشه کمتر کمک کند اما از طرف دیگر نازک‌شدگی بیشتری رخ خواهد داد. مقدار شعاع گوشه پایینی و گوشه بالایی مقطع میانی قطعه برای منحنی‌های بارگذاری مختلف در شکل ۲۱ و ۲۲ آورده شده است.

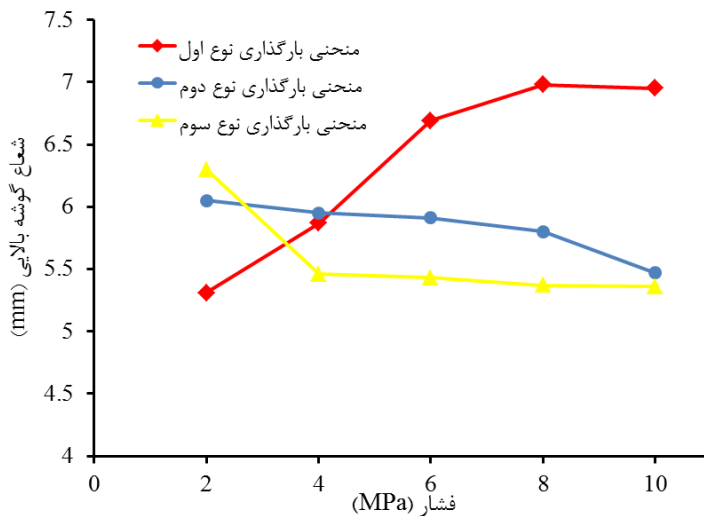
در مورد هر سه نوع منحنی بارگذاری نوع اول و دوم و سوم با افزایش فشار داخلی شعاع گوشه شکل گرفته در قسمت پایین قطعه ( $R_1$ ) کاهش یافته است. اما تیزترین گوشه پایینی به وسیله منحنی‌های بارگذاری نوع دوم و با فشار ۱۰ مگاپاسکال تولید شده است. در مورد منحنی‌های بارگذاری نوع دوم، مقدار  $R_1$  کمتری حاصل شده است. در این نوع منحنی، بارگذاری ابتدا فشار داخلی روی لوله اعمال می‌گردد؛ در نتیجه دیواره لوله دچار تنش کششی می‌شود و ضخامت آن کاهش می‌یابد و در ادامه با حرکت قالب بالایی و استحکام کمتر دیواره لوله شعاع کمتری به دست می‌آید. اما در مورد منحنی بارگذاری نوع سوم، با توجه به اینکه حرکت قالب بالایی در فشار صفر انجام می‌شود ضخامت لوله تغییر چندانی نمی‌کند و اعمال فشار داخلی نمی‌تواند باعث ایجاد گوشه تیز شود.

در مورد شعاع گوشه بالا، روند تغییرات با شعاع گوشه پایینی متفاوت است. در مورد منحنی بارگذاری نوع دوم، همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود در همه فشارها فرورفتگی سطح بالایی قطعه از بین رفته است و در نتیجه ماده در سطح بالایی به گوشه منتقل می‌شود. با افزایش فشار تا ۱۰ مگاپاسکال گوشه قطعه دچار کشش می‌شود و شعاع کاهش می‌یابد. شعاع گوشه بالایی ایجادشده با منحنی بارگذاری نوع اول، با افزایش فشار نهایی بیشتر می‌شود. با بررسی تاریخچه تغییر شکل سطح مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری نوع اول، مشخص می‌شود که در فشارهای نهایی پایین مانند ۲ مگاپاسکال، در ابتدای فرایند شکل‌دهی، سطح بالایی به واسطه پایین آمدن قالب بالایی تخت می‌شود و به دلیل فشار پایین ماده به سمت منطقه شعاع پایینی حرکت نمی‌کند اما در فشارهای بالاتر پس از تخت شدن سطح بالایی قطعه، منطقه شعاع پایینی تحت کشش قرار می‌گیرد و ماده را از ناحیه شعاع بالا به سمت خود می‌کشد. در نتیجه طول ماده قرار گرفته در ناحیه شعاع بالایی کم می‌شود و شعاع افزایش می‌یابد. تاریخچه تغییر شکل سطح مقطع میانی برای منحنی بارگذاری نوع دوم با فشار نهایی ۱۰ مگاپاسکال در شکل ۲۳ نشان داده شده است. در مورد منحنی بارگذاری

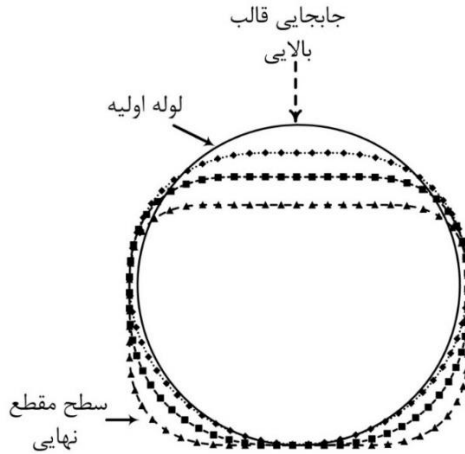
نوع سوم، در مورد فشار نهایی ۲ مگاپاسکال که فرورفتگی سطح بالایی زیاد است شعاع گوشه نیز بیشتر است. در ادامه نیز با توجه به اینکه فرورفتگی تا فشارهای بالا کاملاً از بین نمی‌رود،  $R_2$  تقریباً مقدار ثابتی دارد.



شکل ۲۱. شعاع گوشه پایین در مقطع میانی

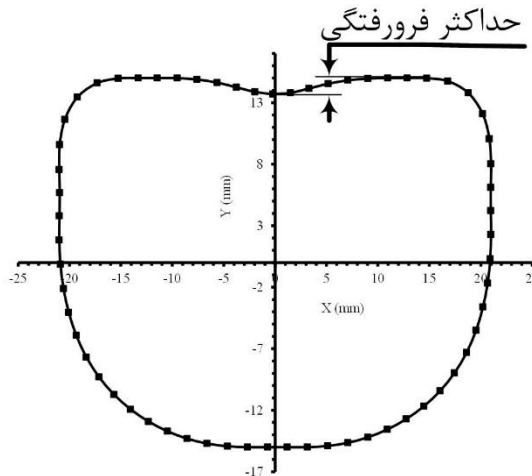


شکل ۲۲. شعاع گوشه بالایی در مقطع میانی



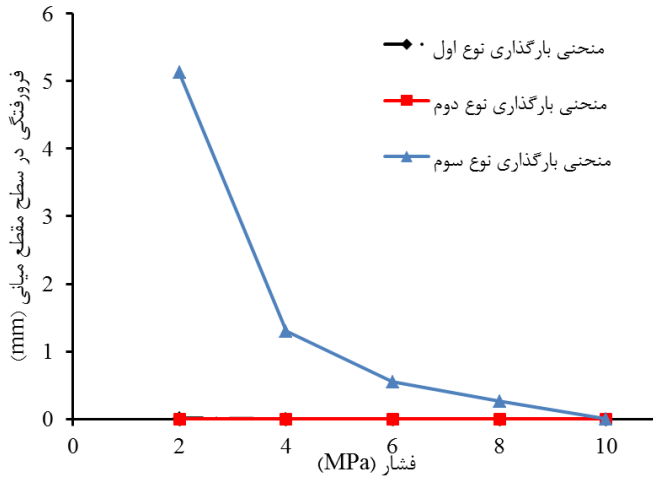
شکل ۲۳. تاریخچه تغییر شکل مقطع میانی تحت منحنی بارگذاری نوع دوم با فشار نهایی ۱۰ مگاپاسکال

یکی از مشکلات قطعات تولید شده به روش هیدروفرمینگ، فشار پایین فرورفتگی سطح بالایی قطعه می‌باشد. شکل ۲۴ میزان این عیب را در مقطع میانی قطعه شکل داده شده به وسیله منحنی بارگذاری نوع سوم با فشار ماکزیمم ۴ مگاپاسکال نمایش می‌دهد. به منظور بررسی این عیب، مقادیر آن در قطعات شکل داده شده به وسیله منحنی‌های بارگذاری مختلف اندازه‌گیری شده که در شکل ۲۵ آمده است. برای منحنی‌های بارگذاری نوع اول و دوم این عیب به صفر رسیده است و مقدار این عیب برای منحنی نوع سوم حداکثر می‌باشد. هرچه فشار ماکزیمم بالاتر باشد مقدار عیب کمتری ایجاد می‌شود. در مورد منحنی نوع سوم، به دلیل این که پایین آمدن قالب بالایی تحت فشار صفر انجام می‌شود، فرورفتگی زیادی در سطح بالایی قطعه ایجاد می‌شود که حتی با اعمال فشار داخلی تا ۱۰ مگاپاسکال از بین نمی‌رود.



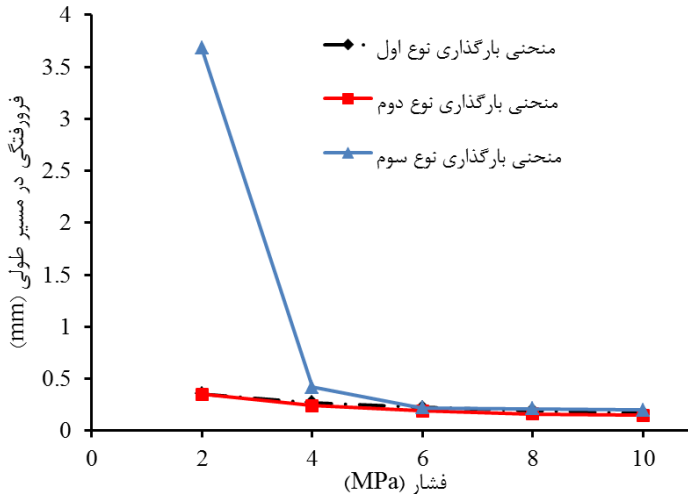
شکل ۲۴. حداکثر فرورفتگی در مقطع میانی





شکل ۲۵. فرورفتگی در مقطع میانی تحت منحنی‌های بارگذاری مختلف

برای بررسی میزان تختی سطح بالایی قطعه، مقدار حداکثر اختلاف ارتفاع در نقاط مختلف مسیر طولی نشان داده شده در شکل ۱۵ اندازه‌گیری شد. هرچه این اختلاف ارتفاع در قطعه شکل داده شده کمتر باشد، تختی سطح بالایی بیشتر خواهد بود. مقدار اختلاف ارتفاع برای قطعات شکل داده شده توسط منحنی‌های بارگذاری مختلف در شکل ۲۶ نشان داده شده است. با افزایش فشار داخلی مقدار فرورفتگی برای همه منحنی‌های بارگذاری کاهش یافته است. همانند فرورفتگی عرضی، در اینجا نیز بیشترین مقدار عیب برای منحنی بارگذاری نوع سوم به وجود آمده است. البته با افزایش فشار داخلی مقدار عیب برای این نوع بارگذاری به بارگذاری نوع اول و دوم نزدیک شده است.



شکل ۲۶. حداکثر فرورفتگی در مسیر طولی

## نتیجه گیری

در این مقاله، هیدروفرمینگ فشار پایین یک لوله آلومینیومی با آلیاژ AA6063 بررسی گردید و یک سطح مقطع مستطیلی تولید شد. توزیع ضخامت، پروفیل سطح مقطع و تختی سطح بالایی قطعه بررسی گردید و از منحنی‌های بارگذاری متفاوت در شبیه‌سازی عددی و کار تجربی استفاده شد. مهم‌ترین نتایج عبارتند از:

- ۱- بهترین پروفیل سطح مقطع به‌وسیله منحنی‌های بارگذاری نوع دوم و با فشار ۱۰ مگاپاسکال ایجاد می‌شود که باعث شکل‌گیری شعاع گوشه بالایی به اندازه ۵/۴۷ میلی‌متر و شعاع گوشه پایینی ۵/۶۲ میلی‌متر می‌شود. در این منحنی بارگذاری ابتدا فشار داخلی تا ۱۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و سپس قالب بالایی لوله را تحت تغییر شکل قرار می‌دهد. با افزایش فشار داخلی تا حد تحمل ترکیدگی لوله می‌توان شعاع گوشه را کاهش داد.
- ۲- در صورتی که حرکت قالب بالایی در فشار صفر انجام شود، فرورفتگی زیادی در سطح بالایی قطعه به‌وجود می‌آید که فقط با اعمال فشارهای داخلی زیاد از بین خواهد رفت. هم‌چنین منحنی بارگذاری نوع دوم بیشترین تختی را برای سطح بالایی قطعه در دو راستای طولی و عرضی ایجاد می‌کند.
- ۳- یکنواخت‌ترین توزیع ضخامت به‌وسیله منحنی بارگذاری نوع دوم ایجاد گردید و بیشترین نازک‌شدگی برای منحنی بارگذاری نوع سوم ایجاد شد.

## References

- [1] Gray, J. E., Devereaux, A. P., & Parker, W. M. (1940). Apparatus for making wrought metal T's. In: Google Patents.
- [2] Zafar, N. (2002). *Optimization of tube hydroforming process*. Michigan State University. [https://books.google.com/books/about/Optimization\\_of\\_Tube\\_Hydroforming\\_Process.html?id=03BXnS6JIYkC](https://books.google.com/books/about/Optimization_of_Tube_Hydroforming_Process.html?id=03BXnS6JIYkC)
- [3] Singh, H. (2003). *Fundamentals of hydroforming*. Society of Manufacturing Engineers. <https://cart.sme.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details/productId/115604#>
- [4] Nkhare, C., Weiss, M & ,Hodgson, P. D. (2009). FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel. *Computational Materials Science*, 47(1), 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.06.024>
- [5] Cui, X.-L., Wang, X.-S., & Yuan, S.-J. (2014). Deformation analysis of double-sided tube hydroforming in square-section die. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(7), 1341-1351. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.005>
- [6] Xu, X., Li, S., Zhang, W., & Lin, Z. (2009). Analysis of thickness distribution of square-sectional hydroformed parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(1), 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.01.034>
- [7] Orban, H., & Hu, S. J. (2007). Analytical modeling of wall thinning during corner filling in structural tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 194(1), 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.112>
- [8] Manabe, K.-i., & Amino, M. (2002). Effects of process parameters and material properties on deformation process in tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(2), 285-291. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00094-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00094-8)
- [9] Chow, C. L., & Yang, X. J. (2002). Bursting for fixed tubular and restrained hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 107-114. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00754-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00754-9)

- [10] Hwang, Y.-M., & Chen, W.-C. (2005). Analysis of tube hydroforming in a square cross-sectional die. *International Journal of Plasticity*, 21(9), 1815-1833. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.09.004>
- [11] Hashemi, S., Naeini, H. M., Liaghat, G., & Tafti, R. A. (2015). Prediction of bulge height in warm hydroforming of aluminum tubes using ductile fracture criteria. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(1), 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.08.003>
- [12] He, Z., Yuan, S., Liu, G., Wu, J., & Cha, W. (2010). Formability testing of AZ31B magnesium alloy tube at elevated temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(6), 877-884. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.020>
- [13] Hashemi, S. J., Moslemi Naeini, H., Liaght, G. H., Shahbazi, J., & Roohi, A. H. (2015). Prediction of Bursting in Warm Tub Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria. *Modares Mechanical Engineering*, 14(16), 201-211.
- [14] Hwang, Y.-M., & Altan, T. (2002). FE simulations of the crushing of circular tubes into triangular cross-sections. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 833-838. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00385-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00385-0)
- [15] Hwang, Y.-M., & Altan, T. (2003). Finite element analysis of tube hydroforming processes in a rectangular die. *Finite Elements in Analysis and Design*, 39(11), 1071-1082. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(02\)00157-9](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00157-9)
- [16] Nikhare, C., Weiss, M., & Hodgson, P. D. (2010). Die closing force in low pressure tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2238-2244. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.011>
- [17] Nikhare, C., Weiss, M., & Hodgson, P. D. (2017). Buckling in low pressure tube hydroforming. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.015>
- [18] Chu, G.-n., Lin, C.-y., Li, W., & Lin, Y.-l. (2018). Effect of internal pressure on springback during low pressure tube hydroforming. *International Journal of Material Forming*, 11(6), 855-866. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1395-y>
- [19] Trott, A., & Nikhare, C. P. (2018). *Effect of preform during low pressure tube hydroforming*. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- [20] Zhang, X., Chu, G., He, J., & Yuan, S. (2019). Research on a hydro-pressing process of tubular parts in an open die. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5), 2795-2803. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03893-x>