

تحلیل تجربی و عددی فرآیند هیدروفرمینگ لوله با فشار نوسانی در قالب جعبه‌ای شکل*

محسن لوح موسوی^(۱) محمد بخشی جوئیباری^(۲) کن ایچیرو موری^(۳) محمود فرزین^(۴) سید جمال حسینی پور^(۵)

چکیده در سال‌های اخیر، فرایند هیدروفرمینگ لوله برای کم کردن وزن و افزایش استحکام قطعات، مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است. به این دلیل، دانش فنی برای تولید قطعات با کیفیت و دقت مطلوب، با این روش در حال گسترش است. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود فرایند هیدروفرمینگ لوله، روش استفاده از فشار داخلی نوسانی است. در عین حال، علت بهبود شکل پذیری در هیدروفرمینگ با فشار نوسانی، به خصوص در حالت قالب بسته، هنوز کاملاً روشن نیست. در این تحقیق، فرایند هیدروفرمینگ لوله با فشار نوسانی در قالب جعبه‌ای شکل، به کمک روش اجزای محدود و به صورت سه بعدی شبیه سازی شده و ساز و کار بهبود شکل دهی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همچنین، جواب‌های به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی، مقایسه و نشان داده شده است که بهبود شکل دهی در اثر فشار نوسانی در مرحله‌ی قبل از تماس لوله و قالب، در ناحیه‌ی انبساط لوله اتفاق می‌افتد؛ از این رو، این نتیجه گیری به عمل آمده است که علت بهبود شکل دهی لوله به رفتار تغییر شکل آن در مرحله‌ی قبل از تماس مربوط می‌شود؛ به نحوی که شکل هندسی لوله در زمان تماس با قالب برای فشار نوسانی به صورت یک برآمدگی مسطح است، درحالی که برای فشارهای غیر نوسانی بالا و پایین، به ترتیب، برجستگی محدب و چروکیدگی اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی هیدروفرمینگ لوله، فشار نوسانی، شبیه سازی اجزای محدود، بهبود شکل پذیری لوله.

Experimental Study and Numerical study of Pulsating Hydroforming of Tube in Box-Shaped Die

M. Loh-Mousavi M. Bakhshi-Jooybari K. Mori M. Farzin S.J. Hosseinipour

Abstract In recent years, the hydroforming has attracted the attention of the automotive industry due to reduction in weight and increase in strength of automotive parts. Thus, the knowledge of the process to produce parts with desired quality and accuracy has been growing. One of the effective methods in improving the formability in the hydroforming is known as pulsating hydroforming. However, the reason of improvement of the formability in pulsating hydroforming is still unclear for the closed-die hydroforming of tubes. In this study, the pulsating hydroforming of tube with box die was simulated by the finite element method to examine the effect of pulsating pressure on improvement of formability. In addition, the calculated results are compared with experimental results and it is shown that the improvement of the formability occurs before contact of the tube and die in expansion zone of the tube. Thus, it can be obtained from the results, that the main reason of improvement of the formability is due to the deformation behavior before start of contact of the tube and die. Flat bulging appears for the pulsating pressure in the former stage, whereas round bulging and wrinkling occur for the high and low non-pulsating pressures, respectively.

Key Words Tube Hydroforming, Pulsating Pressure, Finite Element Simulation, Improvement of Formability of Tube.

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۵/۱۲/۲۷ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۷/۲/۱۴ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

(۲) دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه مازندران

(۳) استاد، دانشکده مهندسی سیستم‌های تولیدی - دانشگاه صنعتی توپوهایشی ژاپن

(۴) دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۵) استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه مازندران

مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله، روش نسبتاً جدیدی برای شکل دادن لوله به منظور تولید قطعات توخالی پیچیده است. از مزایای اصلی این فرایند، کم کردن وزن قطعات و کم کردن عملیات جوشکاری است و به همین خاطر در سال‌های اخیر، مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است [1]. در این فرایند، لوله‌های مستقیم و یا خمیده، تحت فشار سیال به اشکال مورد نظر در می‌آید. با انبساط لوله‌ی تحت فشار بالا، ضخامت جداره‌ی آن کاهش می‌یابد. این امر، در نهایت منجر به پارگی لوله می‌شود. برای اجتناب از کاهش موضعی ضخامت جداره‌ی لوله، هم‌زمان با اعمال فشار داخلی، لوله از یک سمت یا هر دو سمت، تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، مقدار ماده‌ی بیشتری در ناحیه‌ی تغییر شکل لوله وارد می‌شود که اصطلاحاً تغذیه‌ی محوری نامیده می‌شود. با این حال، تغذیه‌ی محوری نامناسب منجر به به وجود آمدن عیوب دیگری از قبیل چروکیدگی و یا خالی ماندن گوشه‌های قالب می‌شود [2]. به طور کلی، برای تولید یک قطعه‌ی بی‌عیب با ابعاد و تolerانس‌های مورد نیاز، انتخاب مسیر فشار برحسب تغذیه‌ی محوری بسیار مهم است [3]. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود فرایند هیدروفرمینگ لوله، استفاده از مسیر فشار نوسانی است که به آن هیدروفرمینگ نوسانی لوله گفته می‌شود [4]. در این روش، فشار داخلی برحسب تغذیه‌ی محوری، به صورت نوسانی اعمال می‌شود. ساز و کار بهبود شکل پذیری به کمک این روش، با استفاده از امواج اولتراسونیک که روشی برای کم کردن اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی است، متفاوت می‌باشد؛ زیرا تعداد نوسانات در هیدروفرمینگ نوسانی به مراتب کم‌تر از فرکانس امواج اولتراسونیک می‌باشد [5]. موری و هم‌کارانش، فرایند بشکه‌ای شدن آزاد لوله را تحت فشار نوسانی به کمک یک مدل اجزای محدود متقارن محوری، بررسی کرده‌اند [6,7]. هاما و

هم‌کارانش تأثیر فشار نوسانی در بهبود فرایند هیدروفرمینگ یک قطعه‌ی خودرو را به وسیله‌ی روش اجزای محدود صریح استاتیکی، شبیه سازی کرده و تأثیر فشار نوسانی را با اثر کاهش اصطکاک لوله و قالب در بهبود شکل پذیری، مقایسه کرده‌اند [8].

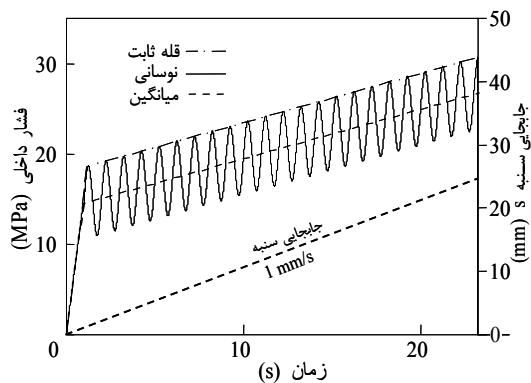
نگارندگان مقاله‌ی [9] در پژوهشی دیگر، ساز و کار بهبود شکل‌دهی سه راهی را با استفاده از هیدروفرمینگ نوسانی با روش اجزای محدود صریح دینامیکی، مورد مطالعه قرار داده‌اند. براساس نتایج پژوهش مذکور، فشار نوسانی، ضمن بهبود شکل پذیری، دقت ابعادی و هندسی قطعه را نیز بهبود می‌دهد. از سوی دیگر، تغییر شکل تدریجی تحت فشار نوسانی، امکان تغذیه محوری بیشتری را نسبت به فشار غیرنوسانی فراهم می‌کند؛ از این رو از پارگی لوله تا مرحله‌ی پایانی شکل‌دهی جلوگیری می‌شود.

هم‌چنین نگارندگان مقاله‌ی [10] با کنترل چروکیدگی به کمک فشار نوسانی، مقدار پرشدگی قالب در فرایند هیدروفرمینگ قالب بسته را بهبود دادند. در این مقاله، فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در یک قالب بسته‌ی جعبه‌ای شکل به صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود. هدف از این بررسی، مقایسه‌ی تأثیر فشار نوسانی در قبل و بعد از تماس لوله با قالب در ناحیه‌ی انبساط است؛ به عبارت دیگر، هدف از این مطالعه، پاسخ دادن به این سوال است که آیا تأثیر فشار نوسانی بر شکل پذیری در مقایسه با فشار ثابت، قبل از تماس لوله با قالب که اصطکاک بین لوله و قالب وجود ندارد بیشتر است، یا در مرحله‌ی تماس با قالب که بین لوله و جداره‌ی قالب، اصطکاک وجود دارد؟

در ادامه، تأثیر فشار نوسانی بر شکل هندسی قطعه و بردار جریان مواد در لحظه‌ی تماس لوله و قالب و هم‌چنین برای مرحله‌ی پایان شکل‌دهی بررسی می‌شوند. در نهایت، منحنی درصد پرشدگی گوشه‌ی قالب، برحسب تغذیه محوری برای فشارهای نوسانی و غیرنوسانی مقایسه می‌شوند.

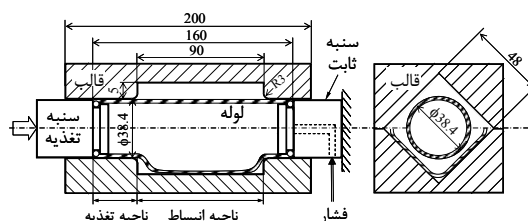
مراحل آزمایشگاهی

حداکثر مقدار فشار نوسانی می‌باشد. از یک پمپ هیدرولیکی مجهز به شیر خود کار با کنترل کامپیوتری برای اعمال فشار با سه نوع مسیر بالا استفاده شده است. سیال به کار رفته جهت شکل دهی لوله، مخلوطی از روغن و آب می‌باشد. سطح خارجی لوله‌ها قبل از انجام آزمایش با روغن ماشین، روان کاری شده و در صورت بروز پدیده‌ی پارگی لوله در حین آزمایش، فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری بی‌درنگ متوقف می‌شود.



شکل ۲ مشخصه‌های فشار استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود و آزمایش‌ها

کلیه‌ی کارهای تجربی و مراحل آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه شکل دهی فلزات دانشگاه صنعتی تویوهاشی، در کشور ژاپن به انجام رسیده است. مجموعه قالب جعبه‌ای شکل استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها و شبیه سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در شکل (۱) نمایش داده شده است. لوله از جنس STKMA11، که یک فولاد کم کربن (C % 0.08) است، بوده و طول، ضخامت و قطر خارجی آن، به ترتیب؛ ۱۶۰، ۱ و ۳۸/۴ میلی‌متر است. لوله به وسیله سنبه تغذیه از یک طرف با سرعت یک میلی‌متر بر ثانیه فشرده می‌شود و سنبه‌ی طرف دیگر ثابت است. کل جابه‌جایی سنبه تغذیه ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱ اجزای مهم قالب و ابزار استفاده شده در هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه‌ای شکل

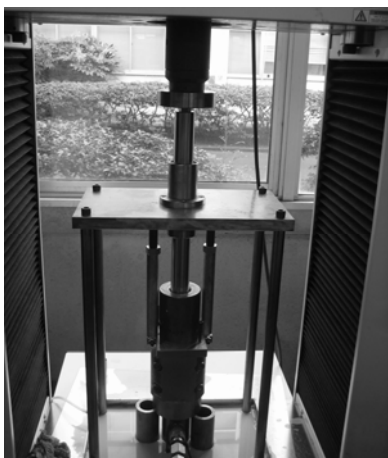
برای انجام فرایند هیدروفرمینگ نوسانی و مطالعه‌ی تأثیر فشار نوسانی بر بهبود شکل پذیری و سازوکار مربوطه، از تجهیزات زیر استفاده شده است:

- دستگاه پرس اونیورسال ساخت شرکت شیماتزو (Shimatzu) ژاپن با ظرفیت ۲۵ تن که برای تأمین تغذیه‌ی محوری و فشردن لوله به درون قالب، استفاده شده است. در شکل (۳) دستگاه مذکور به همراه یک مجموعه قالب نشان داده شده است. دستگاه، توسط یک کامپیوتر و یک رابط گرافیکی پیشرفته، کنترل می‌شود که به سادگی، کنترل سرعت و مقدار جابه‌جایی سنبه را میسر می‌سازد.
- دستگاه تولید کننده‌ی فشار هیدرولیکی نوسانی داخل لوله که در شکل (۴) نشان داده شده است. کامپیوتری که پرس اونیورسال را کنترل می‌کند، کنترل فشار هیدرولیکی را نیز برعهده دارد. بدین

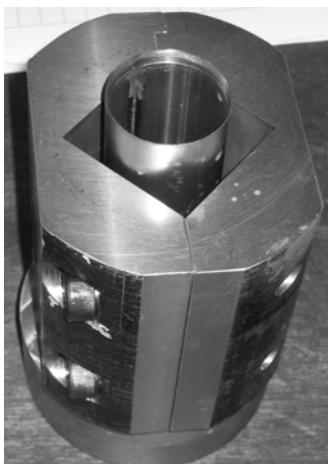
برای بررسی اثر فشار نوسانی بر توزیع ضخامت و تغییر شکل لوله، مسیر فشار نوسانی نشان داده شده در شکل (۲)، انتخاب شده است. علاوه بر این مسیر فشار، به منظور انجام مقایسه، دو نوع مسیر فشار ثابت با مقدار میانگین و مسیر فشار ثابت با مقدار حداکثر (قله) انتخاب گردیده‌اند. معادله‌ی (۱)، بیان‌گر مسیر فشار نوسانی استفاده شده در آزمایش‌ها برحسب زمان انجام فرایند می‌باشد. بزرگی دامنه (Δp) و فرکانس آن (f) فشار نوسانی اعمال شده به ترتیب، برابر ۴ مگاپاسکال و یک هرتز است.

$$p = \Delta p \sin 2\pi f(t-1) + (14+t) \text{ MPa} \quad (1)$$

فشار میانگین، بیان‌گر مقدار متوسط فشار نوسانی در طول انجام فرایند است؛ درحالی که فشار قله، معرف



شکل ۵ تصویر مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش



شکل ۶ تصویر قالب و نمونه‌ی اولیه‌ی لوله‌ی استفاده شده در آزمایش هیدروفرمینگ انبساط لوله در قالب جعبه‌ای شکل

۳. شبیه سازی اجزای محدود: فرایند هیدروفرمینگ لوله‌ی جعبه‌ای شکل در قالب بسته، به کمک نرم افزار اجزای محدود صریح دینامیکی ABAQUS شبیه سازی شد. مطابق شکل (۷)، به خاطر تغییر شکل متقارن لوله، فقط نیمی از اجزای قالب و لوله توسط المان پوسته‌ای، مدل سازی شده است. لازم به یادآوری است که برای انجام تمامی آزمایش‌ها، لوله‌ها به صورتی داخل قالب قرار داده شدند که محل قرار گرفتن خط جوش آن‌ها در قالب پایین، مطابق شکل (۷) در صفحه‌ی تقارن، قالب

ترتیب، مسیر فشار داخل لوله برحسب مقدار جابه‌جایی و سرعت سنبه به طور هم‌زمان، قابل تعریف و کنترل است. اجزای مهم مجموعه دستگاه هیدروفرمینگ نوسانی در شکل (۴) نمایش داده شده است. حداکثر ظرفیت ایجاد فشار توسط این دستگاه، ۷۰ مگاپاسکال است که برای تولید این میزان فشار، از یک تشدید کننده استفاده شده است.

شکل (۵)، تصویر مجموعه قالب و ابزار استفاده شده در آزمایش را نشان می‌دهد. شکل (۶)، تصویر قالب را در این فرایند نشان می‌دهد که از دو نیمه تشکیل شده است. برای هر آزمایش، پس از قرار گرفتن لوله در درون قالب، دو نیمه قالب توسط چهار پیچ آلن به هم متصل شدند. برای ساخت قالب جعبه‌ای شکل از دستگاه وایرکات استفاده شده تا حداکثر دقت در ساخت آن رعایت شود.



شکل ۳ دستگاه پرس اونیورسال استفاده شده در آزمایش‌ها



شکل ۴ دستگاه تولید کننده‌ی فشار هیدرولیکی نوسانی

تنش جریان و ضریب ناهمسانگردی (مقدار r) برای لوله فولادی کم کربن از جنس STKMA11 بوسیله آزمایش کشش اندازه گیری شده است. نمونه های آزمون کشش، هم در ناحیه جوش و هم بیرون آن ناحیه، تهیه شده اند. این نمونه ها با استفاده از دستگاه آزمایش اونیورسال که در شکل (۳) نشان داده شد، تا حد پارگی کشیده شدند و منحنی نیرو- جابجایی مربوطه ثبت گردید. موقعیت خط جوش مطابق وضعیت آن در آزمایش های مربوطه، مدل سازی شد، به نحوی که جنس لوله برای ناحیه جوش و بیرون آن ناحیه متفاوت در نظر گرفته شد. عرض ناحیه جوش برابر با عرض نمونه آزمون کشش در ناحیه جوش فرض شد. معادله های ۲ و ۳ به ترتیب برنتایج به دست آمده برای تنش سیلان لوله و خط جوش برآزش شده است. از معیار تسلیم ناهمسانگردی هیل در تحلیل عددی فرایند استفاده شده است.

می باشد. نوع و تعداد المان استفاده شده برای لوله به ترتیب؛ S4R و ۳۴۰۰ می باشد. سطح قالب و سنبه ها با المان صلب از نوع R3D4 مدل سازی شده اند و از روش پنالتی برای مدل سازی رفتار تماس قالب و لوله استفاده شده است.

جدول ۱ شرایط استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود

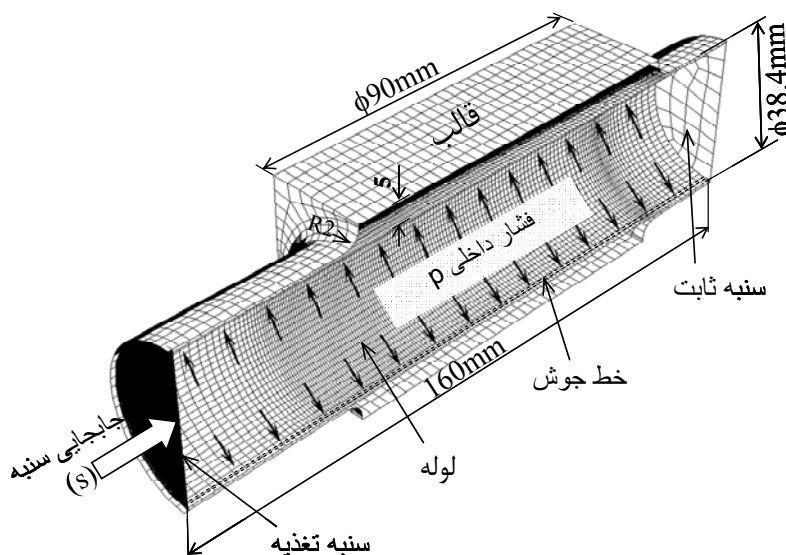
۲۱۰ GPa	مدول یانگ
۰/۳	ضریب پواسون
۲۹۰ MPa	تنش تسلیم
۳۵۰ MPa	مقاومت نهایی
۱/۶	مقدار r
۰/۱	ضریب اصطکاک
۳۸/۴ mm	قطر خارجی لوله
۱/۱ mm	ضخامت جداره ی لوله
۶۰ mm/min	سرعت سنبه

$$\sigma = 510 \varepsilon^{0.12} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

$$\sigma = 523 \varepsilon^{0.1} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

شرایط تعریف شده در شبیه سازی اجزای

محدود فرایند هیدروفورمینگ، در جدول (۱) آمده است.



شکل ۷ مدل اجزای محدود فرایند هیدروفورمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه ای

نتایج و بحث پیرامون آن

تأثیر فشار نوسانی بر تغییر شکل لوله. شکل (۸)، شبکه‌ی اجزای محدود تغییر شکل یافته را در لحظه‌ی تماس اولیه‌ی لوله و قالب و در پایان فرایند، برای سه مشخصه‌ی فشار: قله، نوسانی و میانگین نشان می‌دهد. شکل هندسی به دست آمده برای فشار نوسانی به صورت یک برآمدگی مسطح است؛ درحالی که برای فشارهای قله و میانگین، به ترتیب، برجستگی محدب و چروکیدگی اتفاق افتاده است. همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود، برای حالت فشار قله، لوله در تغذیه‌ی محوری کم‌تری ($s=1.0\text{mm}$) در مقایسه با دو مشخصه‌ی فشار دیگر با قالب تماس داشته است و همین امر، موجب تغذیه‌ی نامناسب ماده در انتهای فرایند هیدروفورمینگ و در نتیجه، تجمع مواد اضافی در گوشه‌ی قالب می‌شود شکل (۸-د). از طرف دیگر، مطابق شکل (۸-و) در مرحله‌ی پایانی فرایند، برای فشار میانگین، تغییر شکل کم‌تری نسبت به فشار نوسانی ملاحظه می‌شود.

شکل‌های (۹) و (۱۰) لوله‌های تغییر شکل یافته از آزمایش را به ترتیب برای لحظه‌ی تماس و پایان فرایند نمایش می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی مشابهت نتایج تجربی با نتایج به دست آمده از روش اجزای محدود است.

بردارهای جریان مواد مربوط به ناحیه‌ی تغییر شکل لوله در لحظه‌ی تماس اولیه‌ی لوله و قالب و همچنین در پایان فرایند برای سه مشخصه فشار: قله، نوسانی و میانگین، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. بردارهای جریان مواد در لحظه‌ی تماس برای فشار قله و متوسط، یکنواخت نیست؛ به گونه‌ای که بردارهای جریان مواد برای فشار قله در ناحیه‌ی مرکزی برآمدگی لوله، متمرکز شده و برای فشار میانگین، توزیع موجی شکلی را به وجود آورده است. این درحالی است که برای فشار نوسانی، بردارهای جریان مواد، نسبتاً یکنواخت است. در پایان تغذیه محوری ($s=2.0\text{mm}$)، بردارها برای فشار قله نسبت به فشار نوسانی در ناحیه‌ی ورودی قالب، تمرکز بیشتری دارد. علاوه بر این،

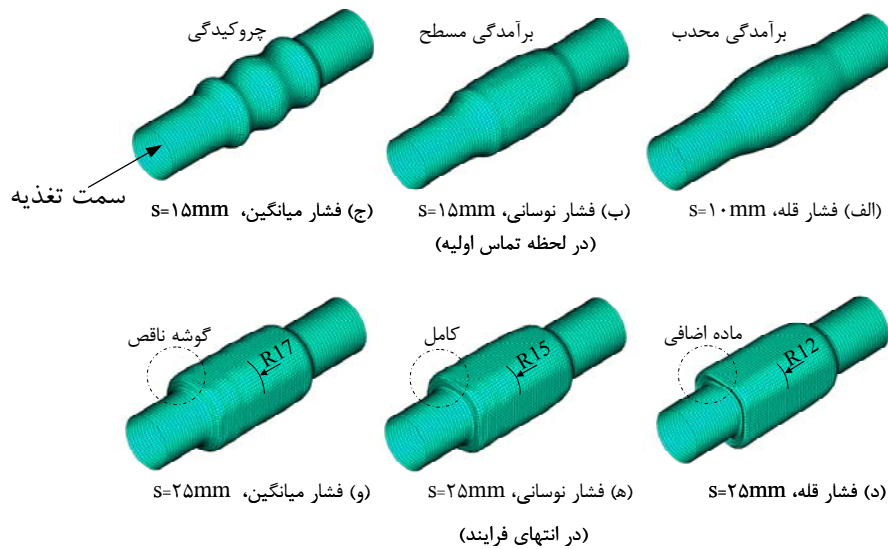
بزرگی بردارهای جریان مواد برای فشار میانگین در مقایسه با مقادیر آن برای فشار نوسانی، پایین تر است.

تأثیر فشار نوسانی بر ضخامت جداره‌ی لوله. نتایج حاصله از شبیه سازی و تجربه برای توزیع ضخامت جداره‌ی لوله‌ی تغییر شکل یافته در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. مطابق شکل، توزیع ضخامت لوله در مرحله‌ی بشکه‌ای شدن لوله ($s=1.0\text{mm}$) برای فشار قله، به‌طور قابل ملاحظه‌ای از مقدار آن برای فشار نوسانی پایین تر است و این امر باعث کاهش موضعی جداره‌ی لوله و در نهایت، موجب پارگی آن مطابق شکل (۱۰) می‌شود. به هر جهت همان‌طور که از شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود، اختلاف ضخامت در مرحله‌ی قبل از تماس لوله و قالب، برای فشارهای نوسانی و قله بیشتر از مقدار آن در پایان فرایند است و از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که اثر فشار نوسانی بر بهبود توزیع ضخامت قبل از مرحله‌ی تماس با قالب، بیشتر از زمانی است که لوله در تماس با سطح قالب شکل می‌گیرد. در نتیجه، کاهش اصطکاک در اثر فشار نوسانی نمی‌تواند عامل اصلی بهبود شکل دهی باشد؛ زیرا در مرحله‌ی قبل از تماس لوله و قالب، اصطکاک فقط در ناحیه‌ی تغذیه می‌تواند مؤثر باشد که با توجه به تحقیقات قبلی نگارندگان مقاله، فشار نوسانی بر اصطکاک این ناحیه نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد [5].

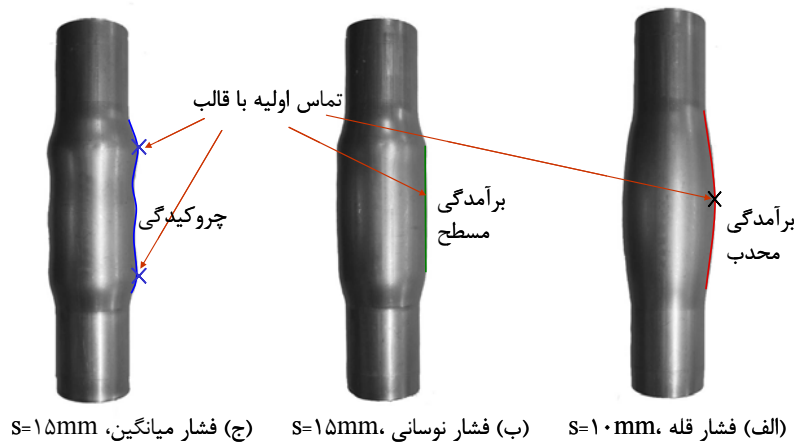
شکل (۱۳)، تغییرات ضخامت لوله را در حین انجام هیدروفورمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل، برای فشار قله و نوسانی نشان می‌دهد. برای فشار قله‌ی ضخامت لوله در ابتدای فرایند به سرعت کاهش می‌یابد؛ درحالی که برای فشار نوسانی، کاهش ضخامت لوله به صورت تدریجی و پله‌ای است. همان‌طور که قبلاً ملاحظه شد، در این‌جا نیز با افزایش تغذیه‌ی محوری و تماس لوله و قالب، اختلاف تغییرات ضخامت برای فشار نوسانی و فشار قله کاهش یافته است. به هر جهت، ضخامت جداره‌ی لوله برای

اندازه گیری ضخامت با امواج اولتراسونیک استفاده شد. با توجه به شکل های (۱۲) و (۱۳) می توان نتیجه گرفت که هم خوانی قابل قبولی بین نتایج حل اجزای محدود و نتایج تجربی وجود دارد.

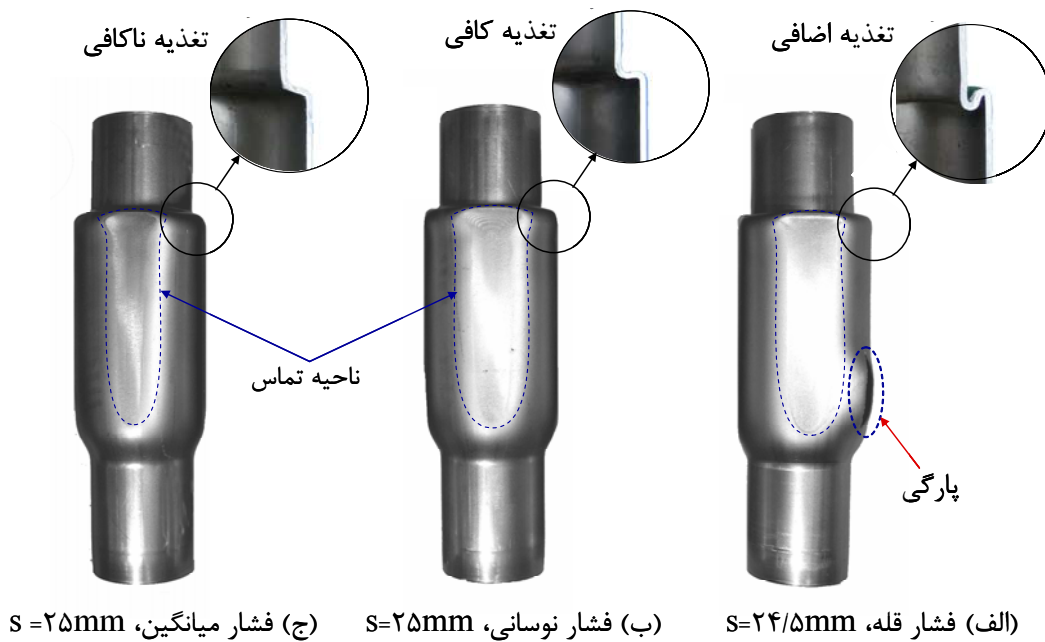
فشار نوسانی تا تغذیه ی محوری نهایی ($s=25mm$) به حد ضخامت پارگی نرسیده است؛ در حالی که برای فشار قله، کاهش ضخامت منجر به پارگی شده است. لازم به ذکر است که برای اندازه گیری ضخامت جداری قطعه در مراحل آزمایش از یک دستگاه



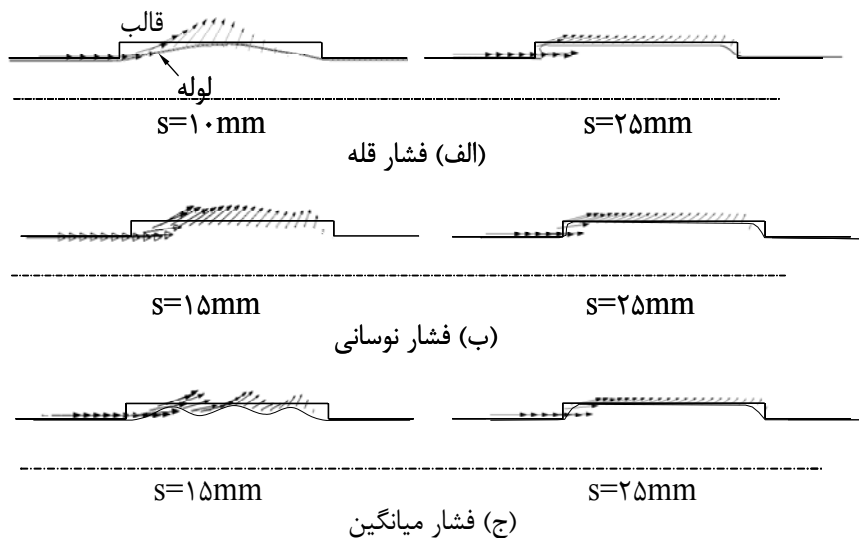
شکل ۸ تغییر شکل شبکه های اجزای محدود در لحظه ی تماس لوله و قالب و تغییر شکل نهایی؛ $s=$ جابه جایی سنبه



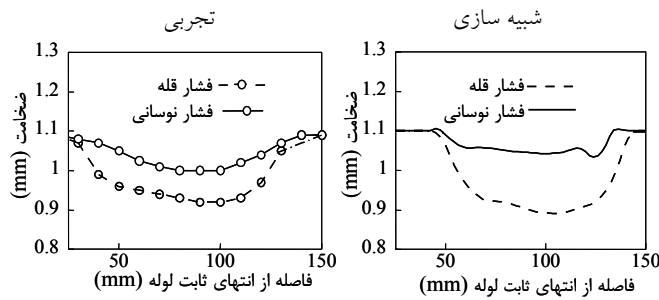
شکل ۹ تغییر شکل لوله در لحظه ی تماس با قالب



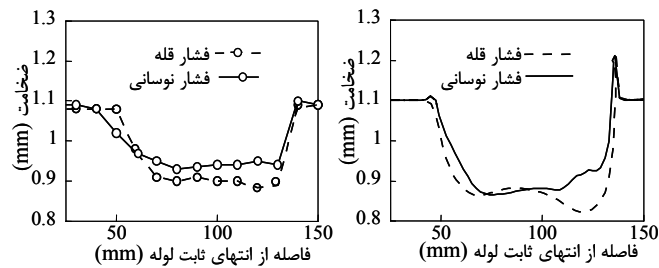
شکل ۱۰ تغییر شکل لوله در پایان فرایند



شکل ۱۱ بردار جریان مواد در لحظه‌ی تماس اولیه‌ی لوله و قالب، در پایان فرایند

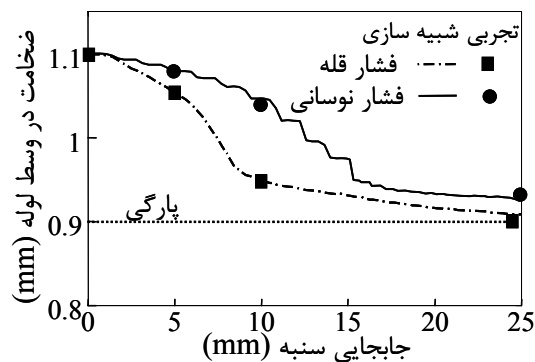


(الف) مرحله ی بشکهای شدن آزاد (s=10mm)



(ب) پایان فرایند (s=20mm)

شکل ۱۲ توزیع ضخامت لوله ی تغییر شکل یافته

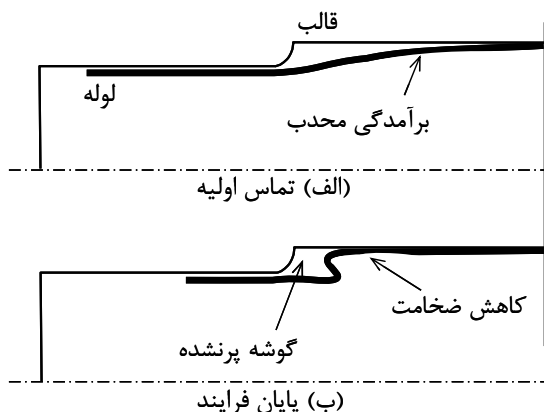


شکل ۱۳ تغییرات ضخامت لوله حین فرایند

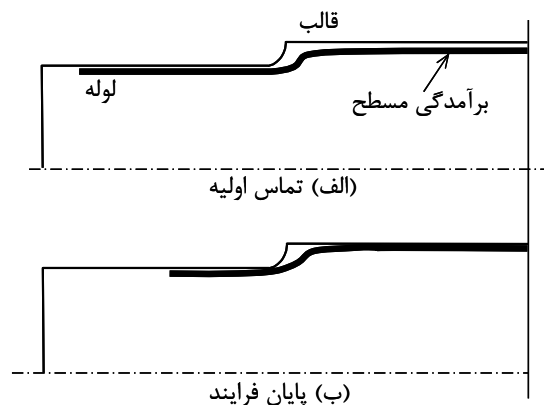
شکل (۱۴)، درصد پرشدگی گوشه ی قالب را برای سه نوع فشار: قله، نوسانی و میانگین که به کمک تحلیل اجزای محدود به دست آمده است، نشان می دهد. مطابق شکل با افزایش تغذیه ی محوری، مقدار پرشدگی گوشه نیز افزایش می یابد؛ اگرچه درحین فرایند هیدروفرمینگ در قالب جعبه ای، درصد پرشدگی گوشه

تأثیر فشار نوسانی بر درصد پرشدگی گوشه ی قالب. درصد پرشدگی گوشه ی قالب، مطابق رابطه ی (۴) تعریف می شود که در آن l_0 شعاع گوشه قالب و l فاصله ی گوشه ی لوله از مرکز گوشه ی قالب است.

$$\text{درصد پرشدگی گوشه} = 100 \times l/l_0 \quad (۴)$$



شکل ۱۵ تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه توسط فشار بالا



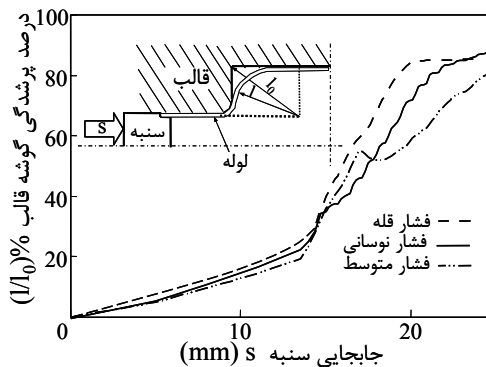
شکل ۱۶ تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه توسط فشار نوسانی

نتیجه گیری

تأثیر فشار نوسانی بر شکل پذیری و شکل هندسی در فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در یک قالب جعبه به وسیله روش اجزای محدود و هم چنین روش تجربی بررسی شد. نشان داده شده است که فشار نوسانی باعث بهبود شکل پذیری و پرشدگی گوشه های محصول هیدروفرم شده می شود. تغییر شکل لوله قبل از تماس با قالب برای فشار نوسانی، به وضوح با هندسه ی به دست آمده برای سایر مسیرهای فشار غیر نوسانی، متفاوت است. فشار نوسانی از طریق حذف

قالب برای فشار قله در مقایسه با دو مشخصه ی دیگر بیشتر است؛ اما روند افزایش درصد پرشدگی برای جابجایی سنبه در ۲۰ میلی متر، تقریباً متوقف شده و مطابق شکل (۱۰) به علت نازک شدن جداره ی لوله، پارگی اتفاق می افتد؛ درحالی که درصد پرشدگی برای فشار نوسانی تا آخرین مقادیر تغذیه ی محوری به صورت تدریجی و پله ای افزایش یافته و در نتیجه از پارگی لوله و یا تجمع نامناسب مواد در گوشه قالب، جلوگیری می شود. از سوی دیگر، درصد پرشدگی گوشه برای فشار نوسانی از مقدار آن برای فشار متوسط نیز بیشتر است.

در شکل (۱۵)، شماتیکی از تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل ترسیم شده است. مطابق شکل، به دلیل وجود و تمرکز اصطکاک در ناحیه ی شروع تماس لوله و قالب، مواد در قالب به دشواری حرکت می کند؛ این درحالی است که اگر تغذیه ی محوری برای جبران کاهش ضخامت لوله انجام شود با توجه به شکل محدب ایجاد شده در ناحیه ی تغییر شکل لوله، عیب چروکیدگی گوشه به وجود خواهد آمد. برای فشار نوسانی، همان طور که در بخش (۴-۱) نیز ملاحظه شد، تغییر شکل در ناحیه ی شکل دهی لوله به صورت یک برجستگی مسطح است که بدین وسیله در حرکت و تشکیل گوشه ی قطعه تسهیل شده است (شکل ۱۶).



شکل ۱۴ تغییرات درصد پرشدگی گوشه قالب به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود

غیر نوسانی متفاوت است. در شکل دهی با فشار بالا (قله)، مواد در لحظه‌ی تماس با قالب، تمرکز بیشتری در ناحیه‌ی مرکزی تغییر شکل دارند. با تمرکز مواد در ناحیه‌ی مرکزی در لحظه‌ی تماس، حرکت مواد به سمت گوشه‌های قالب به دلیل اصطکاک بیشتر در ناحیه‌ی مرکزی، محدود می‌شود؛ به طوری که حتی با تغذیه‌ی بیشتر مواد، گوشه‌ی قالب پر نشده و منجر به عیب روی هم افتادگی ورق می‌شود.

مکرر و تدریجی چروک‌های قابل برگشت که در اثر فشار نسبتاً پایین به وجود می‌آید، منجر به برجستگی مسطح لوله در ناحیه‌ی تغییر شکل آن می‌شود. برجستگی مسطح و یکنواخت لوله در ناحیه‌ی شکل دهی آن، باعث توزیع بهتر ضخامت و در نتیجه جلوگیری از پارگی لوله می‌شود.

به دلیل تغییر شکل مسطح لوله حین شکل دهی با فشار نوسانی، نحوه‌ی جریان یافتن ماده در قالب برای فشار نوسانی نیز با شکل جریان مواد برای فشارهای

مراجع

1. B, J. Mac Donald., and M, Hashmi., "Near-Net-Shape Manufacture of Engineering Components using Bulge-Forming Process", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 120, 341-347, (2002).
2. F, Dohmann., C, Hartl., "Tube hydroforming-research and practical application", *J. Mater. Process. Technol*, 71, 174-186, (1997).
3. M, Koc., and T, Altan., "Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process", *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 42, 123-138, (2002).
4. T, Pogo., M, Ito., and T, Mizuno., "Digital Meister System of Hammering Hydroforming", *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Japan, Vol. 45, No. 527, (2004).
5. K, Mori., T, Maeno., M, Bakhshi.Jooybari., and S, Maki., "Measurement of friction force in free bulging pulsating hydroforming of tubes", in: P.F. Bariani et al. (Ed.), *Advanced Technology of Plasticity 2005*, Edizioni Progetto Padova, Padova, CD-ROM, (2005).
6. K, Mori, A,U. Patwari and S, Maki, "Improvement of formability by Oscillation of Internal pressure in pulsating hydroforming of Tube", *Annals of the CIRP*, 53-1, 215-218, (2004).
7. Mori, K. Mori., T, Maeno., S, Maki., "Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tube", *Int. J. of Mach Tools and Manuf*, Vol. 47, 978-984, (2007).
8. T, Hama., M, Asakawa., H, Fukihara., and M, Makinouchi., "Finite Element Simulation of Hammering Hydroforming of an Automotive Component", *Proc. of the TUBEHYDRO 2003*, Aichi, Japan, 80-83, (2003).
9. M, Loh.Mousavi., K, Mori., K, Hayashi., S, Maki and M, Bakhshi., "3-D finite element simulation of pulsating T-shape hydroforming of tubes", *Key Eng. Mater.*, 353-358, 340 (2007).

10. M, Loh.Mousavi., K, Mori., K, Hayashi and M, Bakhshi., "Improvement of filling of die corners in box-shaped tube hydroforming by control of wrinkling", Key Eng. Mater, 461-467, 344 (2007).