

سازوکار بهبود پرشدگی گوشه قالب در فرایند هیدروفورمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل با اعمال فشار داخلی نوسانی

محسن لوح موسوی^{۱*}، محمد بخشی جویباری^۲، کن ایچیرو موری^۳، محمود فرزین^۴
سید جمال حسینی پور^۵

- ۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر
- ۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
- ۳- استاد، دانشکده مهندسی سیستم‌های تولید، دانشگاه صنعتی توپوهای ژاپن
- ۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۵- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

* اصفهان - خمینی شهر صندوق پستی ۸۴۱۷۵-۱۱۹

loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: فروردین ۱۳۸۷)

چکیده - در این تحقیق، فرایند هیدروفورمینگ لوله با فشار داخلی نوسانی در قالب جعبه‌ای شکل، به کمک روش اجزای محدود و به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و سازوکار بهبود پرشدگی گوشه قالب، تحلیل و بررسی شده است. همچنین جوابهای حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و درستی نتایج حاصل از روش اجزای محدود نشان داده شده است. به منظور افزایش بهبود میزان پرشدگی گوشه قالب، بر اساس سازوکار به دست آمده برای بهبود پرشدگی گوشه با فشار نوسانی، مسیر فشار داخلی نوسانی جدیدی پیشنهاد شده و به کمک روش اجزای محدود و در آزمایش‌ها، نشان داده شده است که درصد پرشدگی گوشه قالب با استفاده از مسیر فشار نوسانی جدید افزایش می‌یابد.

کلید واژگان: هیدروفورمینگ لوله، فشار نوسانی، شبیه‌سازی اجزای محدود، بهبود پرشدگی گوشه قالب.

۱- مقدمه

سالهای اخیر مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است [۱]. در این فرایند، لوله‌های مستقیم یا خمیده تحت فشار سیال به شکل مورد نظر درمی‌آیند. با انبساط لوله در فشار بالا، ضخامت جدار آن کاهش می‌یابد. این در نهایت به پارگی لوله منجر می‌شود. برای اجتناب از کاهش

فرایند هیدروفورمینگ لوله روش نسبتاً جدیدی برای شکل‌دهی لوله به منظور تولید قطعات توخالی پیچیده است. از مزایای مهم این فرایند، کم کردن وزن قطعات و ساده‌سازی عملیات جوشکاری است و به همین دلیل در

همچنین نگارندگان در [۱۰] با کنترل چروکیدگی لوله در حین فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل، مقدار پرشدگی قالب را بهبود دادند.

در این مقاله، سازوکار بهبود پرشدگی گوشه قالب در فرایند هیدروفرمینگ لوله با فشار داخلی نوسانی در قالب جعبه‌ای شکل به صورت تجربی و عددی، بررسی و معرفی می‌شود. به این منظور، تأثیر فشار نوسانی بر شکل هندسی قطعه و بردار جریان مواد و ضخامت جدار لوله بررسی می‌شود. سپس، بر اساس سازوکار به دست آمده برای بهبود پرشدگی گوشه با فشار نوسانی، مسیر فشار داخلی نوسانی جدیدی پیشنهاد می‌شود. شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های مربوط به فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل با مسیر فشار داخلی نوسانی جدید، مجدداً انجام و نیز نتایج آنها ارائه می‌شود.

۲- هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل

۲-۱- روش آزمایشگاهی

مجموعه قالب جعبه‌ای شکل استفاده شده برای آزمایشها و شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله، در شکل ۱ نشان داده شده است. جنس قالب از فولاد ابزار سرد کار و جنس لوله، فولاد کم کربن بوده و طول، ضخامت و قطر خارجی لوله، به ترتیب برابر ۱۶۰، ۱/۱ و ۳۸/۴ میلی‌متر است. لوله، به وسیله سنبه تغذیه از یک طرف با سرعت یک میلیمتر بر ثانیه فشرده می‌شود و سنبه طرف دیگر ثابت است. کل جابه‌جایی سنبه تغذیه برابر ۲۵ میلی‌متر است.

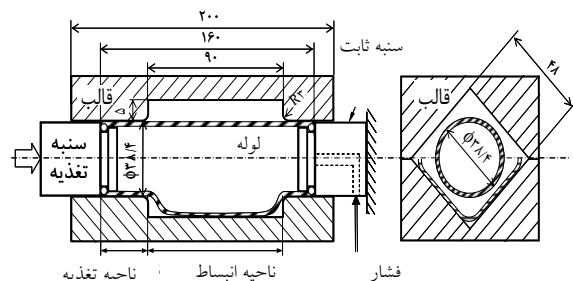
برای بررسی اثر فشار نوسانی بر توزیع ضخامت و تغییر شکل لوله، با توجه به [۱۱] مسیر فشار نوسانی نشان داده شده در شکل ۲ انتخاب شده است. علاوه بر این مسیر فشار، به منظور انجام مقایسه، دو نوع مسیر فشار غیرنوسانی با مقدار میانگین و با مقدار حداکثر (قله)

موضعی ضخامت جدار لوله، همزمان با اعمال فشار داخلی، لوله از یک سمت یا از هر دو سمت تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرد تا ماده بیشتری در راستای محوری، به ناحیه تغییر شکل تغذیه شود. با وجود این، تغذیه محوری نامناسب، موجب به وجود آمدن عیوب دیگری مانند چروکیدگی و کماتش لوله یا خالی ماندن گوشه‌های قالب می‌شود [۲]. به طور کلی برای تولید قطعه‌ای بی‌عیب با ابعاد و خطاهای مورد نظر، انتخاب مسیر فشار بر حسب تغذیه محوری بسیار مهم است [۳]. یکی از روشهای مؤثر برای بهبود فرایند هیدروفرمینگ لوله، استفاده از مسیر فشار نوسانی است که به آن هیدروفرمینگ نوسانی لوله گفته می‌شود [۴]. در این روش، فشار داخلی بر حسب تغذیه محوری به صورت نوسانی اعمال می‌شود. سازوکار بهبود شکل‌پذیری به کمک این روش، با روش امواج فراصوتی که روشی برای کم کردن اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی است، تفاوت دارد، زیرا تعداد نوسانها در هیدروفرمینگ نوسانی به مراتب کمتر از فرکانس امواج فراصوتی است [۵].

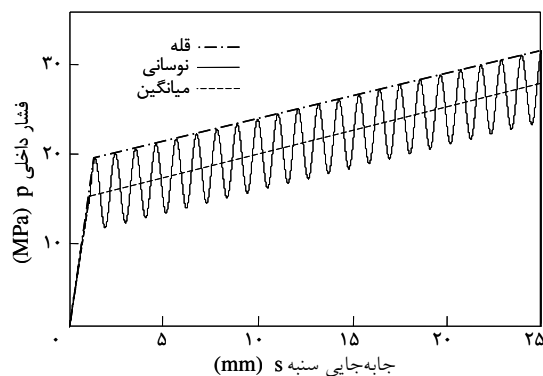
موری و همکاران فرایند بشکه‌ای شدن آزاد لوله را تحت فشار نوسانی به کمک نوعی مدل اجزای محدود متقارن محوری بررسی کرده و سازوکار بهبود شکل‌پذیری به وسیله فشار داخلی نوسانی را در هیدروفرمینگ قالب باز لوله شرح داده‌اند [۶، ۷]. در پژوهشی دیگر [۸] نگارندگان مقاله، فرایند هیدروفرمینگ قالب بسته سه‌راهی با فشار داخلی نوسانی را به کمک روش اجزای محدود صریح دینامیکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. بر اساس نتایج پژوهش مذکور، فشار نوسانی ضمن بهبود شکل‌پذیری، دقت ابعادی و هندسی قطعه را نیز بهبود می‌دهد. آنان در مقاله دیگری [۹] تأثیر دامنه و فرکانس فشار نوسانی بر بهبود پرشدگی گوشه قالب را در فرایند هیدروفرمینگ سه‌راهی بررسی کردند.

به‌طور همزمان قابل تعریف و کنترل است. حداکثر ظرفیت ایجاد فشار توسط این دستگاه ۷۰ مگاپاسکال است که برای تولید این فشار، از تشدیدکننده 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 شد. برای ساخت قالب جعبه‌ای شکل از دستگاه وایرکات استفاده شده تا حداکثر دقت در ساخت آن رعایت شود.



شکل ۱ اجزای مهم قالب و ابزار استفاده شده در هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه‌ای شکل (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۲ مشخصه‌های فشار استفاده شده در شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایشها [۱۱]

انتخاب شده است. معادله (۱) بیانگر مسیر فشار نوسانی استفاده شده در آزمایشها بر حسب زمان انجام فرایند است. بزرگی دامنه (Δp) و فرکانس (f) فشار نوسانی اعمال شده به ترتیب برابر ۴ مگاپاسکال و یک هرتز است.

$$p = \Delta p \sin 2\pi f(t-1) + (14 + 0.16t) \text{ MPa} \quad (1)$$

فشار میانگین بیانگر مقدار متوسط فشار نوسانی در طول انجام فرایند است، در حالی که فشار قله، معرف حداکثر مقدار فشار نوسانی است. از پمپ هیدرولیکی مجهز به شیر خودکار با کنترل کامپیوتری، برای اعمال فشار با سه نوع مسیر فشار مذکور استفاده شده است. سیال به کار رفته برای شکل‌دهی لوله، مخلوطی از روغن و آب است. سطح خارجی لوله‌ها قبل از هر آزمایش با روغن ماشین، روانکاری شده و در صورت بروز پدیده پارگی در لوله در حین آزمایش، فشار داخلی و تغذیه محوری بلافاصله متوقف شده است.

کلیه کارهای تجربی و مراحل آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه شکل‌دهی فلزهای دانشگاه صنعتی توپوهاشی، در کشور ژاپن انجام شده است. در انجام آزمایشها از تجهیزات زیر استفاده شده است:

۱- دستگاه پرس اونیورسال با ظرفیت ۲۵ تن که برای تأمین تغذیه محوری و فشردن لوله به درون قالب، استفاده شده است. در شکل ۳ دستگاه مذکور همراه با یک مجموعه قالب نشان داده شده است. دستگاه، توسط کامپیوتر و رابط گرافیکی پیشرفته‌ای کنترل می‌شود که به‌سادگی کنترل سرعت و مقدار جابه‌جایی سنبه را میسر می‌سازد.

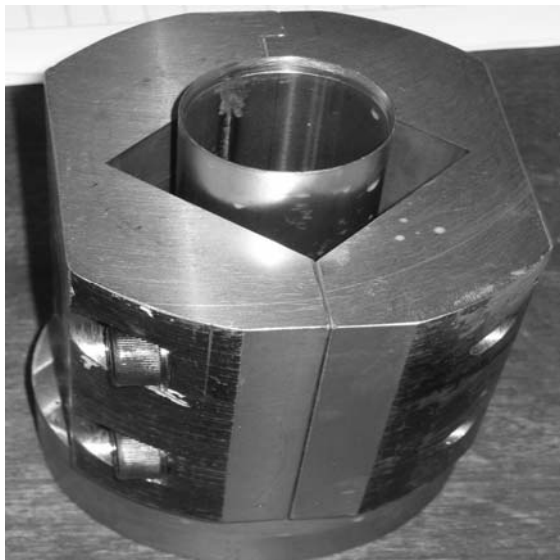
۲- دستگاه تولیدکننده فشار هیدرولیکی نوسانی در داخل لوله که در شکل ۴ نشان داده شده است. کامپیوتری که پرس اونیورسال را کنترل می‌کند، کنترل فشار هیدرولیکی را نیز بر عهده دارد. بدین ترتیب، مسیر فشار داخل لوله بر حسب مقدار جابه‌جایی و نیز سرعت سنبه



شکل ۵ تصویر مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش



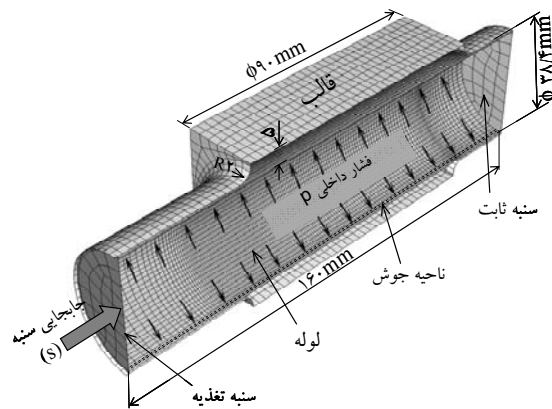
شکل ۳ دستگاه پرس اونیورسال استفاده شده در آزمایشها و مجموعه قالب نصب شده بر روی آن



شکل ۶ تصویر قالب و نمونه اولیه لوله استفاده شده در آزمایش هیدروفرمینگ انبساط لوله در قالب جعبه‌ای شکل



شکل ۴ دستگاه تولید کننده فشار هیدرولیکی نوسانی



شکل ۷ مدل اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه‌ای شکل

جدول ۱ شرایط تعریف شده در شبیه‌سازی اجزای محدود

۲۱۰ GPa	مدول یانگ
۰/۳	ضریب پواسون
۲۹۰ MPa	تنش تسلیم
۲/۱	ضریب ناهمسانگردی متوسط
۰/۱	ضریب اصطکاک
۳۸/۴ mm	قطر خارجی لوله
۱/۱ mm	ضخامت جدار لوله
۶۰ mm/min	سرعت سنبه

موقعیت خط جوش مطابق وضعیت آن در آزمایشهای مربوط، مدلسازی شد، به نحوی که جنس لوله برای ناحیه جوش و بیرون آن ناحیه متفاوت در نظر گرفته شد. عرض ناحیه جوش برابر عرض نمونه آزمون کشش در ناحیه جوش فرض شد. از معیار تسلیم ناهمسانگردی هیل در تحلیل عددی فرایند استفاده شده است.

۳- تأثیر فشار نوسانی بر تغییر شکل و ضخامت لوله

شکلهای [۸ و ۹] لوله‌های تغییر شکل یافته از آزمایش را به ترتیب برای لحظه تماس و پایان فرایند برای سه مشخصه

۲-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل به کمک نرم‌افزار اجزای محدود صریح دینامیکی آباکوس^۱ شبیه‌سازی شد. مطابق شکل ۷، به علت تغییر شکل متقارن لوله، فقط نیمی از اجزای قالب و لوله با المان پوسته‌ای مدل‌سازی شده است. المان استفاده شده برای لوله از نوع S۴R و تعداد آن ۳۴۰۰ المان است. سطح قالب و سنبه‌ها با المان صلب از نوع R۲D۴ مدل‌سازی شده است. المانهای قالب و سنبه سمت راست شکل ۷ کاملاً مقید تعریف شده است در حالی که المانهای سنبه طرف مقابل، فقط دارای جابه‌جایی محوری در امتداد لوله به اندازه ۲۵ میلی‌متر است. همچنین از روش پنالتی برای مدل‌سازی رفتار تماس قالب و لوله استفاده شده است، ضمن آنکه اصطکاک بین قالب و لوله از نوع کولمب با ضریب اصطکاک ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

موقعیت خط جوش نیز مطابق وضعیت آن در آزمایشهای مربوطه مدلسازی شد. شرایط تعریف شده در شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ در جدول ۱ آورده شده است.

تنش سیلان و ضریب ناهمسانگردی متوسط (مقدار $\bar{\epsilon}$) برای لوله فولادی با کربن متوسط از جنس STKM۱۱A توسط آزمایش کشش اندازه‌گیری شده است. معادله‌های (۲) و (۳) به ترتیب بر نتایج به دست آمده برای تنش سیلان لوله و خط جوش برازش شده است. نمونه‌های آزمون کشش، هم در ناحیه جوش و هم بیرون آن ناحیه، تهیه شده است. این نمونه‌ها تا حد پارگی کشیده شد و منحنی نیرو - جابه‌جایی مربوط ثبت گردید.

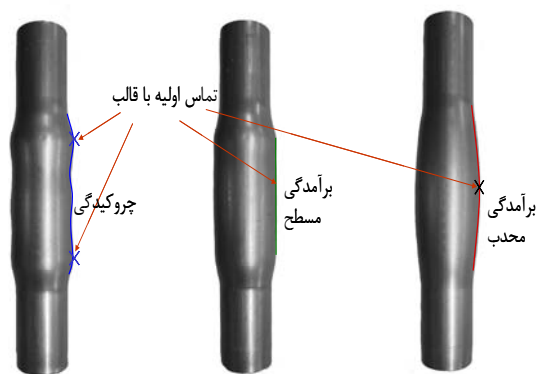
$$\sigma = 510.4^{\bar{\epsilon}/3} \text{ [MPa]} \quad (2) \quad \text{برای ماده لوله،}$$

$$\sigma = 523.4^{\bar{\epsilon}/3} \text{ [MPa]} \quad (3) \quad \text{برای ماده خط جوش،}$$

1. ABAQUS

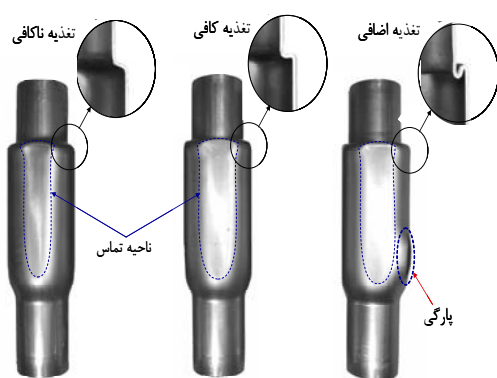
فشار قله، نوسانی و میانگین نشان می‌دهند. شکل ۱۰ شبکه اجزای محدود تغییر شکل یافته را در همان زمانها و برای سه مسیر فشار استفاده شده در آزمایشها، نشان می‌دهد. مطابق شکل (۹-الف)، در $(s=24/5mm)$ برای فشار قله، پارگی جدار لوله اتفاق افتاده است، ضمن آنکه در گوشه قالب نیز تجمع مواد اضافی قابل مشاهده است. همچنین در شکل (۱۰-د) تشکیل گوشه نامطلوب در هیدروفرمینگ لوله با فشار غیرنوسانی قله به وسیله نتایج اجزای محدود نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، گوشه تشکیل شده به وسیله فشار نوسانی، شکل کاملتری نسبت به گوشه تشکیل یافته با فشارهای قله و میانگین دارد، ضمن آنکه ناحیه تماس لوله و قالب نیز برای فشار نوسانی، از مقدار آن برای فشار میانگین بزرگتر است.



شکل ۸ تغییر شکل لوله در لحظه تماس با قالب؛ جابه‌جایی سنبه $S=10mm$ (الف) فشار قله، $S=15mm$ (ب) فشار نوسانی، $S=15mm$ (ج) فشار میانگین، $S=15mm$

شکل ۸ تغییر شکل لوله در لحظه تماس با قالب؛ جابه‌جایی سنبه $S=$



شکل ۹ تغییر شکل لوله در پایان فرایند $S=24/5mm$ (الف) فشار قله، $S=25mm$ (ب) فشار نوسانی، $S=25mm$ (ج) فشار میانگین، $S=25mm$

شکل ۹ تغییر شکل لوله در پایان فرایند

همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، گوشه تشکیل شده به وسیله فشار نوسانی، شکل کاملتری نسبت به گوشه تشکیل یافته با فشارهای قله و میانگین دارد، ضمن آنکه ناحیه تماس لوله و قالب نیز برای فشار نوسانی، از مقدار آن برای فشار میانگین بزرگتر است.

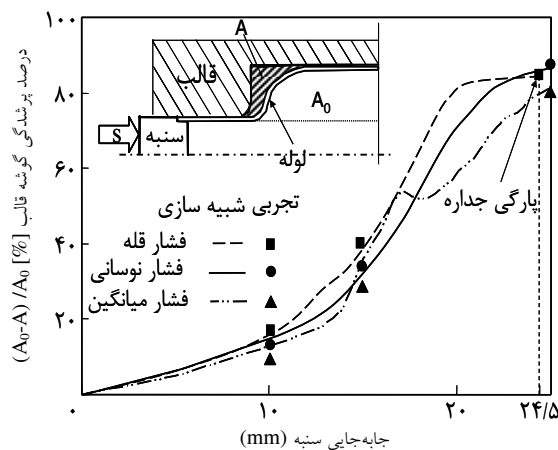
از شکلهای ۸ و ۱۰ ملاحظه می‌شود که هندسه برجستگی لوله در لحظه تماس با قالب، برای فشار نوسانی به شکل برآمدگی مسطح است، در حالی که برای فشارهای قله و میانگین، به ترتیب برجستگی محدب و چروکیدگی اتفاق افتاده است. همانطور که از شکل پیداست، برای حالت فشار قله، به سبب ایجاد برجستگی محدب، لوله در مقایسه با فشار نوسانی در تغذیه محوری کمتری ($s=10mm$) با قالب تماس یافته است.

شکل ۱۱ تغییرات ضخامت لوله در حین انجام فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل را برای فشار قله و نوسانی نشان می‌دهد. برای فشار قله، ضخامت لوله در ابتدای فرایند به سرعت کاهش می‌یابد، در حالی که برای فشار نوسانی، کاهش ضخامت لوله به صورت تدریجی و پله‌ای است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پس از تماس لوله و قالب در هیدروفرمینگ با فشار نوسانی

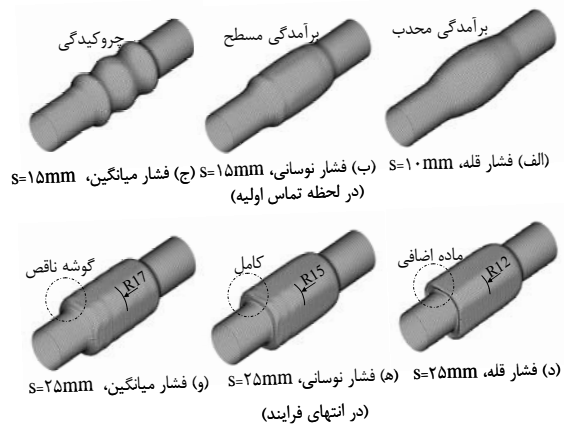
شکل ۱۱ تغییرات ضخامت لوله در حین انجام فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل را برای فشار قله و نوسانی نشان می‌دهد. برای فشار قله، ضخامت لوله در ابتدای فرایند به سرعت کاهش می‌یابد، در حالی که برای فشار نوسانی، کاهش ضخامت لوله به صورت تدریجی و پله‌ای است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پس از تماس لوله و قالب در هیدروفرمینگ با فشار نوسانی

اگرچه در حین فرایند هیدروفرمینگ در قالب جعبه‌ای شکل، درصد پرشدگی گوشه قالب برای فشار قله در مقایسه با دو مشخصه دیگر بیشتر است، اما روند افزایش درصد پرشدگی برای جابه‌جایی سنبه در ۲۰ میلی‌متر تقریباً متوقف شده و مطابق شکل ۵ به‌علت نازک شدن جدار لوله، پارگی اتفاق می‌افتد، در حالی‌که درصد پرشدگی برای فشار نوسانی تا آخرین مقادیر تغذیه محوری، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد و در نتیجه از پارگی لوله یا تجمع نامناسب مواد در گوشه قالب جلوگیری می‌شود. از سوی دیگر درصد پرشدگی گوشه برای فشار نوسانی از مقدار مشابه آن برای فشار متوسط بیشتر است.

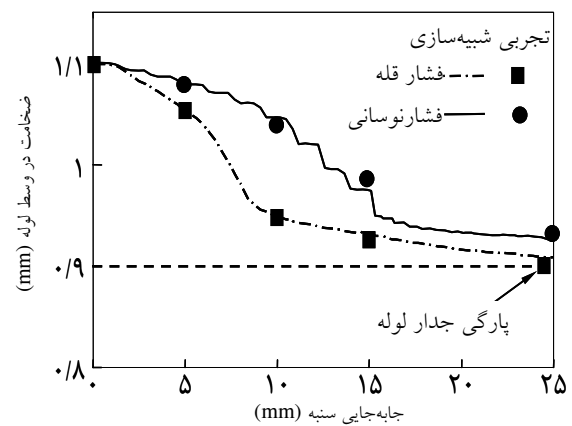
در شکل ۱۳ نیروی شکل‌دهی به‌دست آمده از روش اجزای محدود با نتایج تجربی به‌دست آمده از آزمایش مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که فشار نوسانی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نیروی نهایی شکل‌دهی نداشته، ضمن آنکه همخوانی قابل قبولی بین نتایج حل اجزای محدود و نتایج تجربی وجود دارد.



شکل ۱۲ تغییرات درصد پرشدگی گوشه قالب به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش



شکل ۱۰ تغییر شکل شبکه‌های اجزای محدود در لحظه تماس لوله و قالب و تغییر شکل نهایی



شکل ۱۱ تغییرات ضخامت لوله در حین فرایند

۴- تأثیر فشار نوسانی بر درصد پرشدگی گوشه قالب و نیروی شکل‌دهی

درصد پرشدگی گوشه قالب مطابق شکل ۱۲ با رابطه (۴) تعریف می‌شود که در آن A_0 مساحت گوشه قالب و A مساحت گوشه پر نشده قالب است.

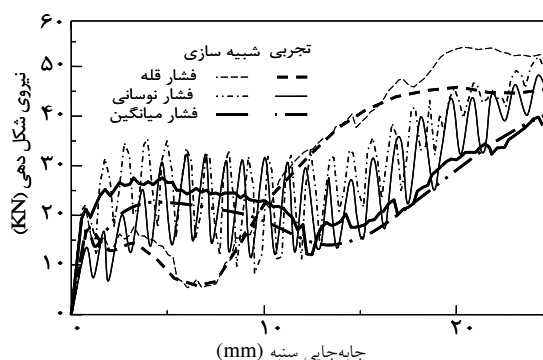
$$\text{درصد پرشدگی گوشه قالب} = \frac{(A_0 - A)}{A_0} \times 100 \quad (4)$$

مواد نسبتاً یکنواخت است. علاوه بر این، بزرگی بردارهای جریان مواد، برای فشار میانگین در مقایسه با مقادیر آن برای فشار نوسانی، پایین تر است.

در شکل ۱۵ طرحواره‌ای از تشکیل گوشه قطعه در هیدروفورمینگ لوله با فشار قله نشان داده شده است. مطابق شکل، در ابتدای فرایند ($s=10\text{mm}$)، شکل برجستگی لوله محدب است که در نتیجه به دلیل تمرکز جریان مواد در مرکز برجستگی و در پی آن با تمرکز اصطکاک در نقطه تماس لوله و قالب، مواد در قالب به سختی حرکت می‌کنند، در نتیجه، اندازه بردارهای جریان مواد در ناحیه تغییر شکل در انتهای فرایند در مقایسه با بردارهای جریان مواد برای فشار نوسانی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، اگر تغذیه محوری برای جبران کاهش ضخامت لوله انجام شود با توجه به شکل محدب ایجاد شده در ناحیه تغییر شکل لوله، مطابق شکل (۱۵-ب) عیب چروکیدگی گوشه به وجود خواهد آمد.

همانطور که در شکل‌های ۸ و ۱۰ نشان داده شده، برای فشار نوسانی در مقایسه با فشار قله، لوله بعد از تغذیه محوری بیشتری ($s=15\text{mm}$) با قالب تماس پیدا می‌کند. در نتیجه قبل از آنکه بر اثر اصطکاک بین لوله و قالب، مانعی در تغذیه محوری ایجاد شود، ماده بیشتری به ناحیه انبساط لوله وارد می‌شود، بدین ترتیب مطابق شکل ۱۱، ضمن آنکه از نازک شدن موضعی لوله و پارگی آن جلوگیری می‌شود، از تشکیل عیب چروکیدگی در گوشه نیز ممانعت به عمل می‌آید.

از سوی دیگر همانطور که در بخش (۳) نیز ملاحظه شد، در صورت استفاده از فشار داخلی نوسانی در لوله، تغییر شکل لوله قبل از تماس با قالب به صورت برجستگی مسطح است. بدین ترتیب از تمرکز نیروی اصطکاک در ناحیه مرکز برجستگی و به دنبال آن از کاهش موضعی



شکل ۱۳ تغییرات نیروی شکل دهی در طول انجام فرایند به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود و آزمایش

۵- سازوکار بهبود پرشدگی گوشه قالب

همانطور که در بخش‌های قبلی ملاحظه شد، میزان پرشدگی گوشه قالب در هیدروفورمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل با استفاده از فشار داخلی نوسانی در مقایسه با مسیرهای فشار داخلی غیرنوسانی افزایش یافت. در این قسمت، دلیل این افزایش به کمک نتایج حاصل از روش اجزای محدود، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

به کمک شبیه سازی اجزای محدود فرایند هیدروفورمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل و با استفاده از نرم افزار آباکوس، بردارهای جریان مواد مربوط به ناحیه تغییر شکل لوله در لحظه تماس اولیه لوله و قالب و همچنین در پایان فرایند برای سه مسیر فشار قله، نوسانی و میانگین به دست آمد که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ملاحظه می‌شود، بردارهای جریان مواد در لحظه تماس برای فشارهای قله و متوسط یکنواخت نیست به گونه‌ای که بردارهای جریان مواد برای فشار قله در ناحیه مرکز برآمدگی لوله متمرکز شده و برای فشار میانگین، توزیع موجی شکلی را به وجود آورده است. این در حالی است که برای فشار نوسانی، بردارهای جریان

۶- اصلاح مسیر فشار نوسانی به منظور افزایش پرشدگی گوشه قالب

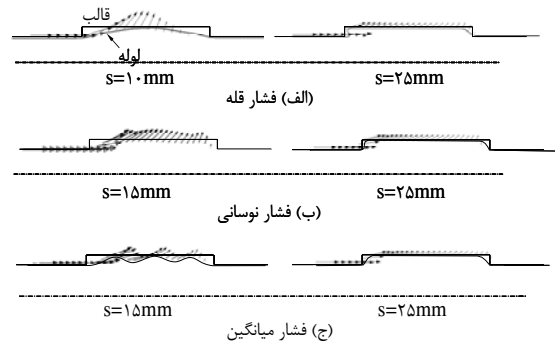
در قسمتهای قبلی نشان داده شد که فشار نوسانی، با کنترل کردن جریان مواد و شکل هندسی لوله در حین فرایند هیدروفرمینگ می تواند باعث بهبود میزان پر شدن گوشه قالب شود. بر این اساس و با توجه به سازوکار بهبود پرشدگی گوشه قالب که در قسمت قبل بررسی شد، سعی شد با کنترل رفتار تغییر شکل لوله در حین فرایند، مسیر فشار نوسانی به گونه ای اصلاح شود که مقدار بیشتری از ماده به گوشه قالب هدایت شود.

به این منظور، مسیر فشار نوسانی نشان داده شده در شکل ۱۷ استفاده شد. همچنین مطابق شکل، مسیرهای فشار غیرنوسانی قله و میانگین نیز برای مقایسه نتایج در نظر گرفته شد. از طرف دیگر، به منظور مقایسه مسیر فشار نوسانی جدید با مسیر فشار قبلی و بررسی تاثیر آنها بر پرشدگی گوشه قالب، حداکثر فشار نوسانی اعمال شده در پایان فرایند، یکسان و برابر ۳۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

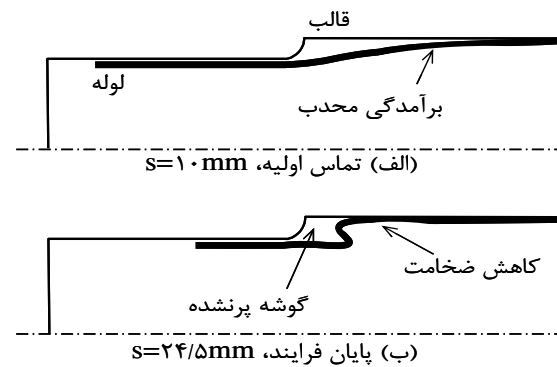
مطابق شکل ۱۷ مسیر فشار به گونه ای طراحی شده که در ابتدا، مقدار متوسط فشار نوسانی تا حد ممکن کم باشد تا میزان انبساط لوله در ابتدای فرایند کمتر شود و در نتیجه زمان تماس لوله و قالب به تعویق افتد. این در حالی است که با کاهش فشار، احتمال چروکیدگی لوله افزایش می یابد؛ از این رو، برای کنترل چروکیدگی لوله در حین فرایند هیدروفرمینگ، دامنه فشار نوسانی تا حد امکان افزایش یافته تا از بروز چروکیدگی دائمی در لوله جلوگیری شود.

برای بررسی تاثیر مسیر فشار اصلاح شده بر میزان پرشدن گوشه قالب و تغییر شکل لوله، شبیه سازی اجزای محدود و آزمایشها مانند قبل انجام شد. لوله های تغییر شکل یافته با مسیر فشار نوسانی اصلاح شده برای دو مرحله میانی و پایانی فرایند در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همچنین تغییر شکل مربوط

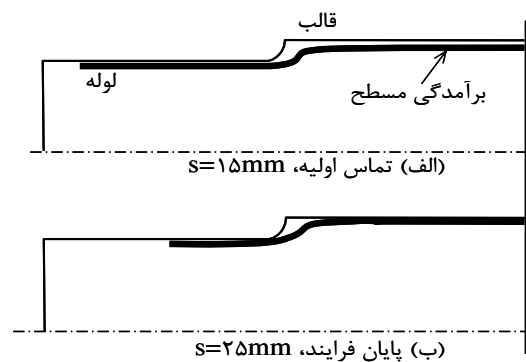
ضخامت جدار لوله جلوگیری می شود، ضمن آنکه مطابق شکل ۱۶ در حرکت و تشکیل گوشه قطعه تسهیل می شود.



شکل ۱۴ بردار جریان مواد در لحظه تماس اولیه لوله و قالب و در پایان فرایند

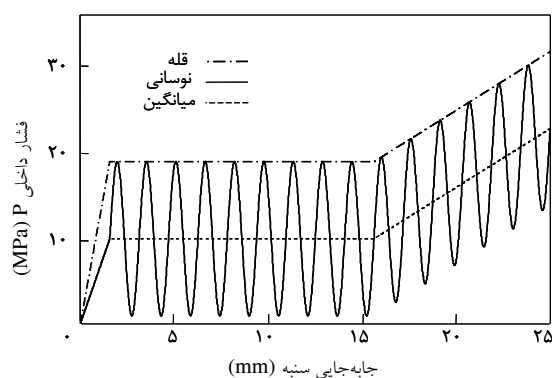


شکل ۱۵ تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای توسط فشار قله

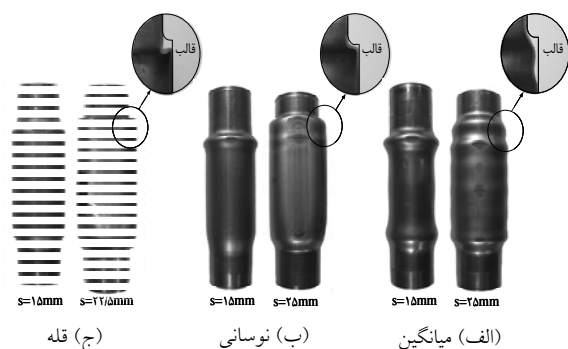


شکل ۱۶ تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل توسط فشار نوسانی

۱۷ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل پیداست، در ابتدای فرایند ($s=1.0\text{mm}$) برای فشار نوسانی، جریان مواد به طور یکنواخت در طول ناحیه انبساط لوله توزیع شده و بردارهای جریان مواد در نزدیکی گوشه قالب تا حدودی بزرگتر است. از این رو در پایان فرایند، گوشه قالب بهتر می شود. مطابق شکل، برای فشار قله، جریان مواد در ابتدا در مرکز ناحیه انبساط متمرکز شده است، در نتیجه ماده در مراحل بعدی به اندازه کافی و به طور مناسب به گوشه های قالب نمی رسد و گوشه قالب کاملاً پر نمی شود.



شکل ۱۷ مسیر فشار اصلاح شده همراه با مسیرهای فشار غیرنوسانی متناظر با آن



شکل ۱۸ قطعات شکل یافته در آزمایش هیدروفورمینگ لوله با فشار نوسانی اصلاح شده و فشارهای غیرنوسانی

به فشارهای قله و میانگین در این شکل آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود برای مسیر فشار نوسانی، گوشه قالب تقریباً به طور کامل پر شده، در حالی که گوشه قالب برای فشارهای غیرنوسانی قله و میانگین، خالی مانده و میزان پرشدگی گوشه برای مسیرهای فشار غیرنوسانی به طور قابل ملاحظه ای از میزان آن برای مسیر فشار نوسانی کمتر است. از طرف دیگر، در تغذیه محوری ($s=1.0\text{mm}$) برای هر دو مسیر فشار نوسانی و غیرنوسانی میانگین، چروکیدگی در لوله اتفاق افتاده است. با وجود این، برای فشار نوسانی چروکیدگی لوله در پایان فرایند ($s=2.5\text{mm}$) حذف شده است؛ در حالی که برای فشار میانگین، چروکیدگی لوله در گوشه قالب همچنان مشاهده می شود. همچنین شکل ۱۸ نشان می دهد که برای فشار قله، در تغذیه محوری ($s=1.0\text{mm}$) ناحیه تماس لوله و قالب به مراتب از مقدار آن برای فشار نوسانی و متوسط بیشتر است که در نتیجه به دلیل تغییر شکل زیاد و ناگهانی لوله در ابتدای فرایند و کاهش موضعی ضخامت جدار لوله، پارگی لوله در ($s=2.2/5\text{mm}$) اتفاق افتاده است.

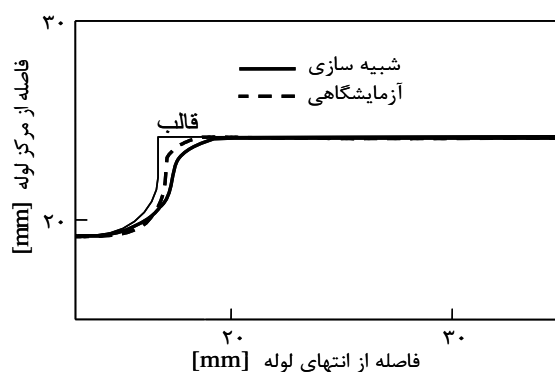
مقاطع گوشه شکل یافته در آزمایش هیدروفورمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل برای مسیر فشار نوسانی اصلاح شده و مسیرهای فشار میانگین و قله معادل آن در تغذیه محوری ($s=2.2/5\text{mm}$) در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود مقدار پرشدگی گوشه برای فشار نوسانی به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از مقدار آن برای فشارهای قله و میانگین است.

در شکل ۲۰ مقطع گوشه قطعه هیدروفورم شده توسط فشار نوسانی در پایان فرایند با نتیجه به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود مقایسه شده است. همانگونه که از شکل پیداست، همخوانی مناسبی بین جواب حاصل از روش اجزای محدود با نتیجه آزمایشگاهی وجود دارد.

در شکل ۲۱ بردارهای جریان مواد به دست آمده از روش اجزای محدود برای سه مسیر فشار مندرج در شکل

از طرف دیگر، شکل ۲۱ نشان می‌دهد که برای فشار نوسانی، در مرحله انبساط آزاد لوله ($s=10\text{mm}$)، چروکیدگی کوچکی در نزدیکی گوشه قالب به وجود می‌آید و به تدریج در مراحل میانی و پایانی، با افزایش فشار نوسانی حذف می‌شود، در حالی که برای فشار میانگین، چروکیدگی به وجود آمده در مراحل ابتدایی، در مراحل پایانی حذف نمی‌شود.

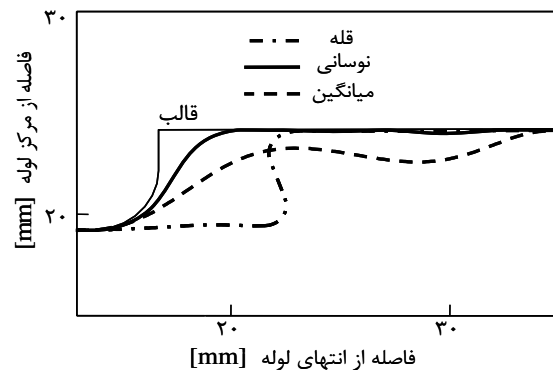
در شکل ۲۲ تغییرات درصد پرشدگی گوشه قالب بر حسب تغذیه محوری برای مسیرهای فشار نوسانی اصلاح شده، میانگین و قله، با تغییرات درصد پرشدگی گوشه برای مسیر فشار نوسانی قبلی نشان داده شده در شکل ۲ مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که درصد پرشدگی گوشه برای فشار نوسانی اصلاح شده در مقایسه با مقدار آن برای فشار نوسانی قبلی افزایش یافته است.



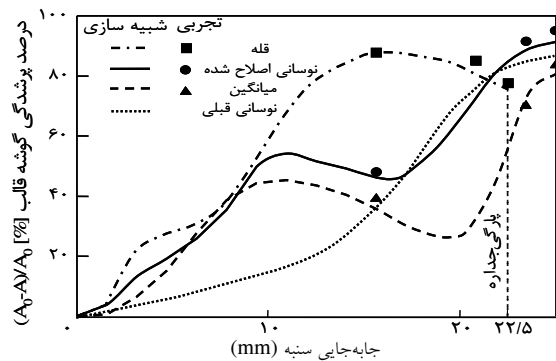
شکل ۲۲ بهبود درصد پرشدگی گوشه قالب به وسیله فشار نوسانی اصلاح شده

۷- نتیجه گیری

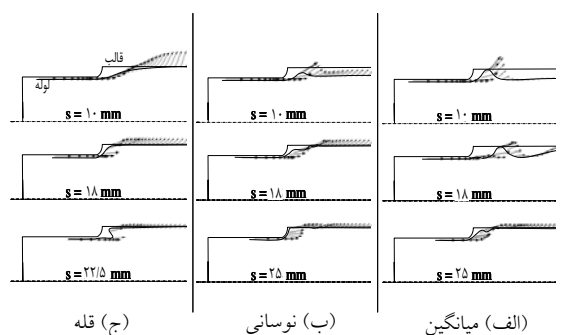
در این مقاله سازوکار بهبود پرشدگی گوشه قالب در هیدروفورمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل با فشار داخلی نوسانی، به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود و روش تجربی، تحلیل و بررسی شده نشان داده شد که شکل هندسی لوله در حین فرایند و همچنین میزان تغذیه



شکل ۱۹ مقایسه گوشه قطعات هیدروفورم شده در تغذیه محوری با فشارهای نوسانی و غیرنوسانی ($s=22/5\text{mm}$)



شکل ۲۰ مقایسه گوشه قطعه هیدروفورم شده توسط فشار نوسانی در پایان فرایند با نتیجه شبیه‌سازی عددی



شکل ۲۱ نمایش سازوکار بهبود پرشدگی گوشه قالب با فشار نوسانی اصلاح شده به وسیله بردارهای جریان مواد به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود

۸- منابع

- [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, 2002, pp. 341-347.
- [2] F. Dohmann, C. Hartl, Tube hydroforming-research and practical application, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 71, 1997, pp. 174-186.
- [3] M. Koc and T. Altan, "Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 42, 2002, pp. 123-138. <http://www.opton.co.jp>.
- [4] K. Mori, T. Maeno, M. Bakhshi-Jooybari, 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, 2005, CD-ROM.
- [5] 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, 2004, pp. 215-218.
- [6] K. Mori, T. Maeno, S. Maki, "Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of

محوری در زمان شروع تماس لوله و قالب، بر میزان پر شدن گوشه قالب تأثیر دارد. فشار نوسانی با کنترل و حذف مکرر و تدریجی چروکیدگی لوله در حین فرایند هیدروفورمینگ باعث به وجود آمدن برجستگی مسطح و تاخیر در شروع تماس لوله و قالب می شود که در نتیجه موجب وارد شدن ماده بیشتری به ناحیه شکل دهی قبل از تماس لوله و قالب می شود. علاوه بر این، برجستگی مسطح و یکنواخت لوله در ناحیه شکل دهی آن باعث توزیع بهتر ضخامت و در نتیجه جلوگیری از پارگی لوله در حین فرایند می شود. در شکل دهی با فشار غیرنوسانی بالا (قله)، شکل هندسی لوله در لحظه تماس با قالب، محدب است و شروع تماس در مقایسه با فشار نوسانی سریعتر اتفاق می افتد.

بدین ترتیب، مواد در لحظه تماس با قالب تمرکز بیشتری در ناحیه مرکز برجستگی دارند تا در گوشه قالب. با تمرکز مواد در ناحیه مرکزی در لحظه تماس، حرکت مواد به سمت گوشه های قالب به دلیل اصطکاک بیشتر در ناحیه مرکزی محدود شده و به نازک شدن جداره لوله و پارگی آن منجر می شود. از طرف دیگر، حتی با تغذیه بیشتر نیز گوشه قالب پر نمی شود بلکه باز هم به عیب رویهم افتادگی ورق منجر می شود.

در شکل دهی با فشار غیرنوسانی پایین (میانگین)، چروکیدگی های بزرگی در حین شکل دهی به وجود می آید که حتی با افزایش فشار در پایان فرایند نیز حذف نمی شوند و در نتیجه قسمتی از گوشه قالب به طور کامل پر نمی شود.

در این پژوهش همچنین، بر اساس سازوکار به دست آمده برای بهبود پرشدگی گوشه با فشار نوسانی، مسیر فشار داخلی نوسانی اصلاح و به کمک روش اجزای محدود و آزمایش، نشان داده شد که درصد پرشدگی گوشه قالب با استفاده از مسیر فشار نوسانی جدید افزایش می یابد.

- [9] 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 Engineering Materials*, Vol. 344, 2007, pp. 461-467.
- [10] M. Loh-Mousavi, K. Mori, K. Hayashi and M. Bakhshi, Mechanism of improvement and shape accuracy in pulsating hydroforming of tube with box die, *The proceedings of the 2006 Japanese spring conference for the technology of plasticity*, Tokyo, Japan, 2006, pp. 7.
- tube”, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 47, 2007, pp. 978-984.
- [7] 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 Engineering Materials*, Vol. 340, 2007, pp. 353-358.
- [8] M. Loh-Mousavi, K. Mori and M. Bakhshi, Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of T-shape tubes, *Proceeding of 15th Annual Conference (International) on mechanical Engineering*, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, 2007, CD-ROM.