مجلهٔ فنی و مهندسی مدرس - مکانیک
شمارهٔ ۳۷، پاییز ۱۳۸۸

سازوکار بهبود پرشدگی گوشهٔ قالب در فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل 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 تویوهاشی ژاپن
٤- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
٥- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

***اصفهان - خمینی شهر صندوق پستی ۱۱۹-۸٤۱۷٥**
loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir
(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸٦، پذیرش مقاله: فروردین ۱۳۸۷)

چکیده- دراین تحقیق، فرایند هیدروفرمینگ لوله با فشار داخلی نوسانی در قالب جعبه‌ای‌شکل، به‌کمک روش اجزای محدود و به‌صورت سه‌بُعدی 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. به‌منظور افزایش بهبود میزان پرشدگی گوشه قالب، بر اساس سازوکار به‌دست آمده برای بهبود پرشدگی گوشه با فشار نوسانی، مسیر فشار داخلی نوسانی جدیدی پیشنهاد شده و به‌کمک 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: هیدروفرمینگ لوله، فشار نوسانی، شبیه‌سازی اجزای محدود، بهبود پرشدگی گوشه قالب.

۱- مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله روش نسبتاً جدیدی برای شکل‌دهی لوله به‌منظور تولید قطعات توخالی پیچیده است. از مزایای مهم این فرایند، کم کردن وزن قطعات و ساده‌سازی عملیات جوشکاری است و به‌همین دلیل در سالهای اخیر مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است [۱]. در این فرایند، لوله‌های مستقیم یا خمیده تحت فشار سیال به شکل موردنظر درمی‌آیند. با انبساط لوله در فشار بالا، ضخامت جدار آن کاهش می‌یابد. این در نهایت به پارگی لوله منجر می‌شود. برای اجتناب از کاهش

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 به‌وجود آمدن عیوب دیگری مانند چروکیدگی و کمانش لوله یا خالی ماندن گوشه‌های قالب می‌شود [۲]. به‌طور کلی برای تولید قطعه‌ای بی‌عیب با ابعاد و خطاهای موردنظر، 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 [٤]. در این روش، فشار داخلی بر حسب تغذیه محوری به‌صورت نوسانی اعمال می‌شود. سازوکار بهبود شکل‌پذیری به‌کمک این روش، با روش امواج فراصوتی که روشی برای کم کردن اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی است، تفاوت دارد، زیرا تعداد نوسانها در هیدروفرمینگ نوسانی به‌مراتب کمتر از فرکانس امواج فراصوتی است [۵].

موری و همکاران فرایند بشکه‌ای شدن آزاد لوله را تحت فشار نوسانی به‌کمک نوعی مدل اجزای محدود متقارن محوری بررسی کرده و سازوکار بهبود شکل‌پذیری به‌وسیله فشار داخلی نوسانی را در هیدروفرمینگ قالب باز لوله شرح داده‌اند [٦، ۷].

در پژوهشی دیگر [۸] نگارندگان مقاله، فرایند هیدروفرمینگ قالب بسته سه‌راهی با فشار داخلی نوسانی را به‌کمک 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 سه راهی بررسی کردند.

همچنین نگارندگان در [۱۰] با کنترل چروکیدگی لوله در حین فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل، 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 به‌صورت تجربی و عددی، بررسی و معرفی می‌شود. به این‌منظور، تأثیر فشار نوسانی بر شکل هندسی قطعه و بردار جریان مواد و ضخامت جدار لوله بررسی می‌شود. سپس، بر اساس سازوکار به‌دست 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 جعبه‌ای‌شکل با مسیر فشار داخلی نوسانی جدید، مجدداً انجام و نیز نتایج آنها ارائه می‌شود.

۲- هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل

۲-۱- روش آزمایشگاهی

مجموعه قالب جعبه‌ای‌شکل 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، به‌ترتیب برابر ۱٦۰، ۱/۱ و ۳۸/٤ میلی‌متر است. لوله، به‌وسیله 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، به‌منظور انجام مقایسه، دو نوع مسیر فشار غیرنوسانی با مقدار میانگین و با مقدار حداکثر (قله)

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 به‌ترتیب برابر ٤ مگاپاسکال و یک هرتز است.

$$p=\Delta p\sin 2\pi f(t-1) + (14+0/6t)\ \text{MPa} \qquad (1)$$

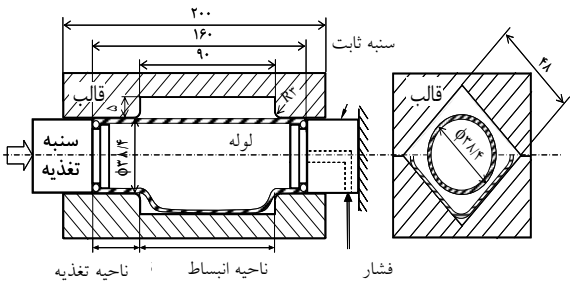
فشار میانگین بیانگر مقدار متوسط فشار نوسانی در طول انجام فرایند است، در حالی‌که فشار قله، معرف حداکثر مقدار فشار نوسانی است. از پمپ هیدرولیکی مجهز به شیر خودکار با کنترل کامپیوتری، برای اعمال فشار با سه نوع مسیر فشار مذکور استفاده شده است. سیال به‌کار رفته برای شکل‌دهی لوله، مخلوطی از روغن و آب است. 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 تویوهاشی، در کشور ژاپن انجام شده است. در انجام آزمایشها از تجهیزات زیر استفاده شده است:

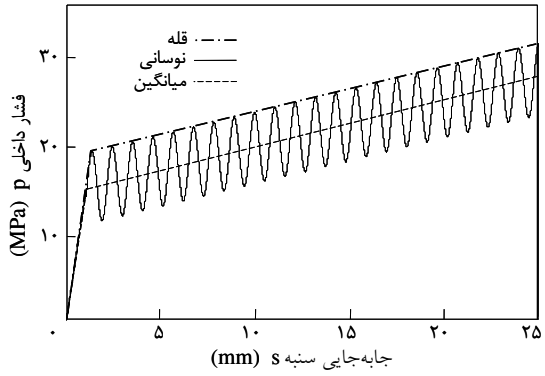
۱- دستگاه پرس اونیورسال با ظرفیت ۲۵ تن که برای تأمین تغذیه محوری و فشردن لوله به درون قالب، استفاده شده است. در شکل ۳ دستگاه مذکور همراه با یک مجموعه قالب نشان داده شده است. دستگاه، توسط کامپیوتر و رابط گرافیکی پیشرفته‌ای کنترل می‌شود که به‌سادگی کنترل سرعت و مقدار جابه‌جایی سنبه را میسر می‌سازد.

۲- دستگاه تولیدکننده فشار هیدرولیکی نوسانی در داخل لوله که در شکل ٤ نشان داده شده است. کامپیوتری که پرس اونیورسال را کنترل می‌کند، کنترل فشار هیدرولیکی را نیز بر عهده دارد. بدین‌ترتیب، مسیر فشار داخل لوله بر حسب مقدار جابه‌جایی و نیز سرعت سنبه 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 ٦ 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 به‌هم متصل شد. برای ساخت قالب جعبه‌ای‌شکل از دستگاه وایرکات استفاده شده تا حداکثر دقت در ساخت آن رعایت شود.



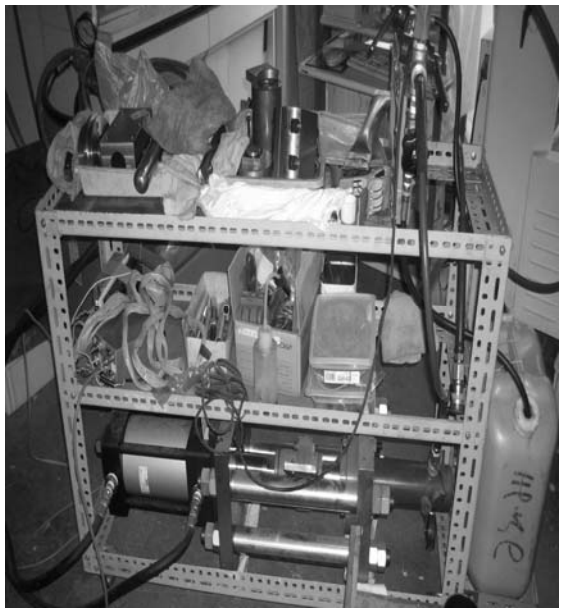
شکل ۱ اجزای مهم قالب و ابزار استفاده شده در هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل (ابعاد به میلی‌متر)



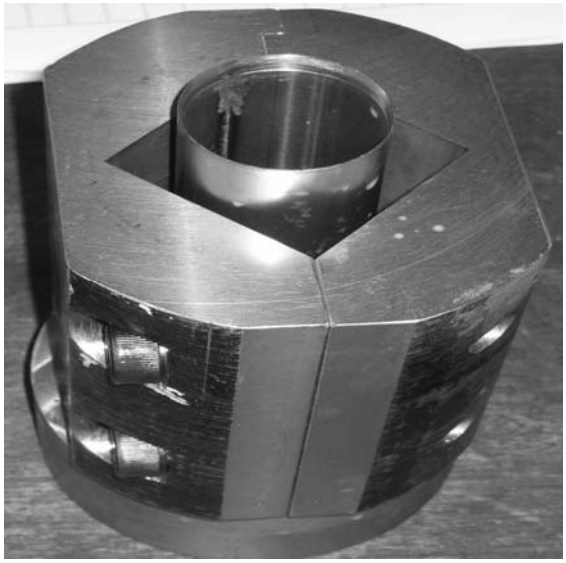
شکل ۲ مشخصه‌های فشار استفاده شده در شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایشها [۱۱]

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

شکل ۵ تصویر مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش



شکل ٤ دستگاه تولید کننده فشار هیدرولیکی نوسانی



شکل ٦ تصویر قالب و نمونه اولیه لوله استفاده شده در آزمایش هیدروفرمینگ انبساط لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل

۲-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل به‌کمک نرم‌افزار اجزای محدود صریح دینامیکی آباکوس[1] شبیه‌سازی شد. مطابق شکل ۷، به علت تغییرشکل 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 ۳٤۰۰ المان است. سطح قالب و سنبه‌ها با المان صلب از نوع R۳D۴ مدلسازی شده است. المانهای قالب و سنبه سمت راست شکل ۷ کاملاً مقید تعریف شده است در حالی‌که 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.

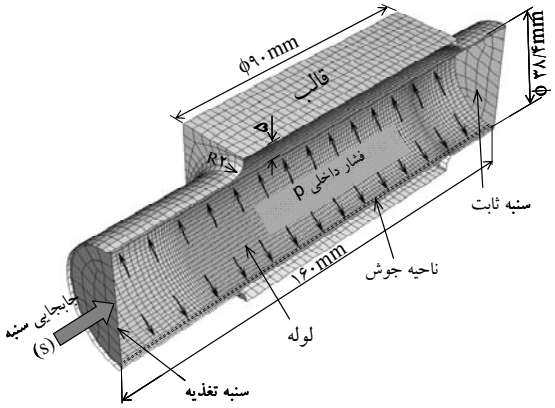
موقعیت خط جوش نیز مطابق وضعیت آن در آزمایشهای مربوطه مدلسازی شد. شرایط تعریف شده در شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ در جدول ۱ آورده شده است.

تنش سیلان و ضریب ناهمسانگردی متوسط (مقدار r) برای لوله فولادی با کربن متوسط از جنس STKM۱۱A توسط آزمایش کشش اندازه‌گیری شده است. معادله‌های (۲) و (۳) به‌ترتیب بر نتایج به‌دست 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.

$\sigma=۵۱۰\varepsilon^{۰/۱۲}$ [MPa] برای ماده لوله، (۲)

$\sigma=۵۲۳\varepsilon^{۰/۸}$ [MPa] برای ماده خط جوش، (۳)

1. ABAQUS



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

جدول ۱ شرایط تعریف شده در شبیه‌سازی اجزای محدود

مدول یانگ	۲۱۰GPa
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم	۲۹۰MPa
ضریب ناهمسانگردی متوسط	۲/۱
ضریب اصطکاک	۰/۱
قطر خارجی لوله	۳۸/٤mm
ضخامت جدار لوله	۱/۱mm
سرعت سنبه	٦۰mm/min

موقعیت خط جوش مطابق وضعیت آن در آزمایشهای مربوط، مدلسازی شد، به‌نحوی‌که 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 شکل‌یافته از آزمایش را به‌ترتیب برای لحظه تماس و پایان فرایند برای سه مشخصه

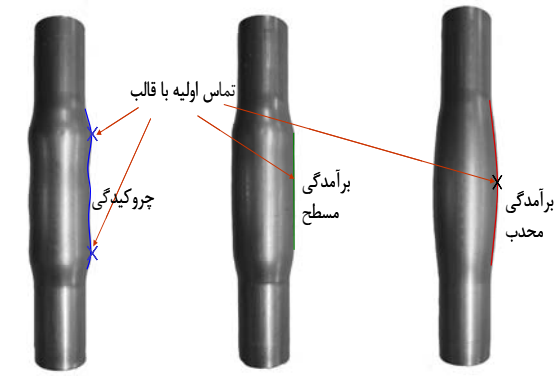
فشار قله، نوسانی و میانگین نشان می‌دهند. شکل ۱۰ شبکه اجزای محدود تغییرشکل یافته را در همان زمانها و برای سه مسیر فشار استفاده شده در آزمایشها، نشان می‌دهد. مطابق شکل (۹- الف)، در (s=۲٤/۵mm) برای فشار قله، پارگی جدار لوله اتفاق افتاده است، ضمن آنکه در گوشه قالب نیز تجمع مواد اضافی قابل مشاهده است. همچنین در شکل (۱۰- د) تشکیل گوشه نامطلوب در هیدروفرمینگ لوله با فشار غیرنوسانی قله به‌وسیله نتایج اجزای محدود نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، گوشه تشکیل شده به‌وسیله فشار نوسانی، شکل کاملتری نسبت به گوشه تشکیل یافته با فشارهای قله و میانگین دارد، ضمن آنکه ناحیهٔ 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 حالی‌که برای فشارهای قله و میانگین، به‌ترتیب برجستگی محدب و چروکیدگی اتفاق افتاده است. همانطور که از شکل پیداست، برای حالت فشار قله، به‌سبب ایجاد برجستگی محدب، لوله در مقایسه با فشار نوسانی در تغذیه محوری کمتری (s=۱۰mm) با قالب تماس یافته است.

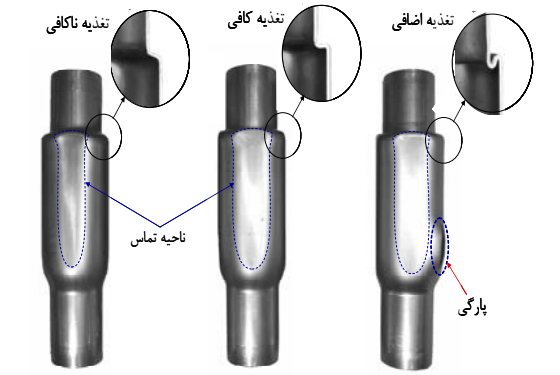
شکل ۱۱ تغییرات ضخامت لوله در حین انجام فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل را برای فشار قله و نوسانی نشان می‌دهد. برای فشار قله، ضخامت لوله در ابتدای فرایند به‌سرعت کاهش می‌یابد، در حالی‌که برای فشار نوسانی، کاهش ضخامت لوله به‌صورت تدریجی و پله‌ای است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پس از تماس لوله و قالب در هیدروفرمینگ با فشار نوسانی (s=۱۵mm)، اختلاف تغییرات ضخامت برای فشار نوسانی و فشار قله کاهش یافته است. در هر حال، ضخامت جدار لوله برای فشار نوسانی تا تغذیه محوری نهایی (s=۲۵mm) به حد ضخامت پارگی نرسیده است، در حالی‌که مطابق شکل ۹ برای فشار قله، کاهش ضخامت لوله، به پارگی جدار لوله در تغذیه محوری (s=۲٤/۵mm) منجر شده است.

همچنین با توجه به شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که همخوانی قابل‌قبولی بین نتایج حل اجزای محدود و نتایج تجربی وجود دارد.



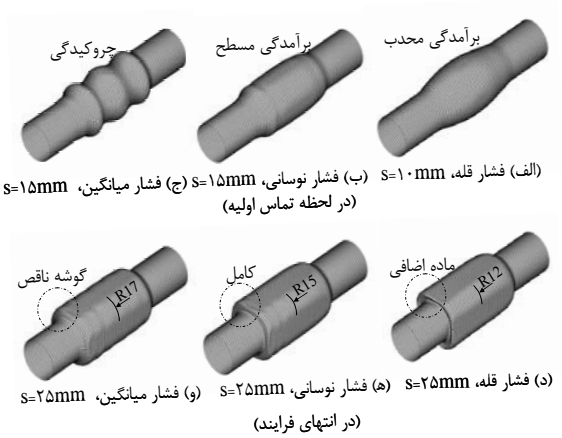
(الف) فشار قله، s=۱۰mm (ب) فشار نوسانی، s=۱۵mm (ج) فشار میانگین، s=۱۵mm

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

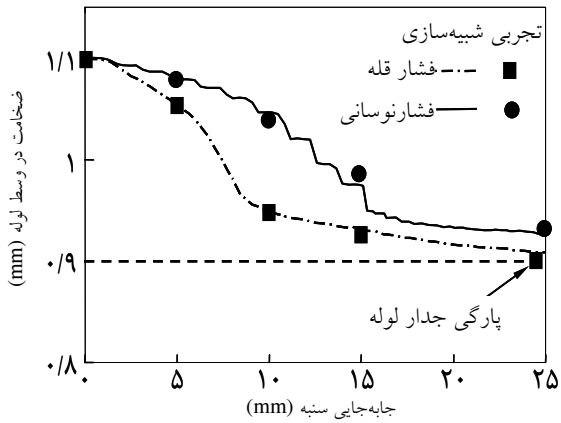


(الف) فشار قله، s=۲۴/۵mm (ب) فشار نوسانی، s=۲۵mm (ج) فشار میانگین، s =۲۵mm

شکل ۹ تغییر شکل لوله در پایان فرایند



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

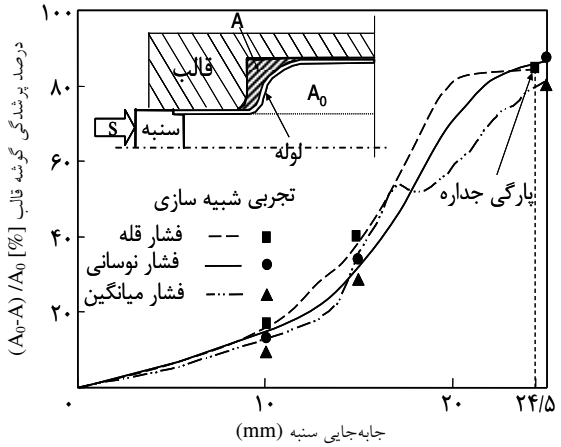
٤- تأثیر فشار نوسانی بر درصد پرشدگی گوشه قالب و نیروی شکل‌دهی

درصد پرشدگی گوشه قالب مطابق شکل ۱۲ با رابطه (٤) تعریف می‌شود که در آن A_0 مساحت گوشه قالب و A مساحت گوشه پر نشده قالب است.

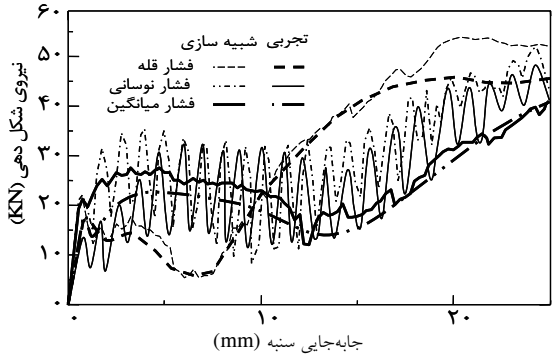
$$\text{درصدپرشدگی گوشه قالب} = (A_0-A)/A_0\times 100 \qquad (٤)$$

اگرچه در حین فرایند هیدروفرمینگ در قالب جعبه‌ای‌شکل، 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 ۱۳ تغییرات نیروی شکل‌دهی در طول انجام فرایند به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش

۵- سازوکار بهبود پرشدگی گوشه قالب

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

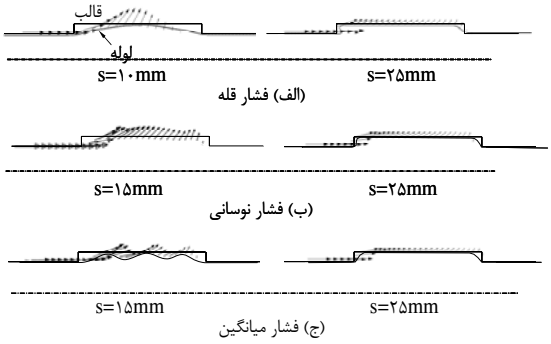
به‌کمک شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، بردارهای جریان مواد مربوط به ناحیه تغییرشکل لوله در لحظه تماس اولیه لوله و قالب و همچنین در پایان فرایند برای سه مسیر فشار قله، نوسانی و میانگین به‌دست آمد که در شکل ١٤ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ملاحظه می‌شود، بردارهای جریان مواد در لحظه تماس برای فشارهای قله و متوسط یکنواخت نیست به‌گونه‌ای که بردارهای جریان مواد برای فشار قله در ناحیه مرکز برآمدگی لوله متمرکز شده و برای فشار میانگین، توزیع موجی‌شکلی را به‌وجود آورده است. این در حالی است که برای فشار نوسانی، بردارهای جریان مواد نسبتاً یکنواخت است. علاوه بر این، بزرگی بردارهای جریان مواد، برای فشار میانگین در مقایسه با مقادیر آن برای فشار نوسانی، پایین‌تر است.

در شکل ۱۵ طرحواره‌ای از تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله با فشار قله نشان داده شده است. مطابق شکل، در ابتدای فرایند (s=۱۰mm)، شکل برجستگی لوله محدب است که در نتیجه به‌دلیل تمرکز جریان مواد در مرکز برجستگی و در پی آن با تمرکز اصطکاک در نقطه تماس لوله و قالب، مواد در قالب به‌سختی 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 تغییرشکل لوله، مطابق شکل (۱۵- ب) عیب چروکیدگی گوشه به‌وجود خواهد آمد.

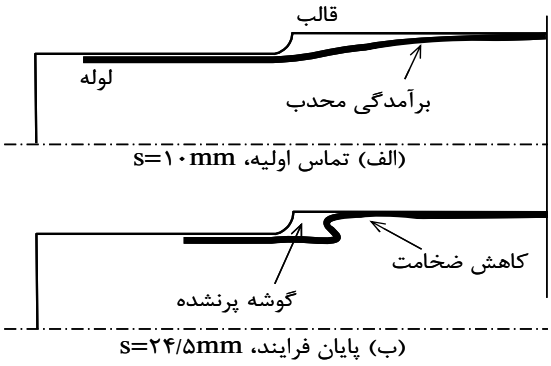
همانطور که در شکلهای ۸ و ۱۰ نشان داده شده، برای فشار نوسانی در مقایسه با فشار قله، لوله بعد از تغذیه محوری بیشتری (s=۱۵mm) با قالب تماس پیدا می‌کند. در نتیجه قبل از آنکه بر اثر اصطکاک بین لوله و قالب، مانعی در تغذیه محوری ایجاد شود، ماده بیشتری به ناحیه انبساط لوله وارد می‌شود، بدین‌ترتیب مطابق شکل ۱۱، ضمن آنکه از نازک شدن موضعی لوله و پارگی آن جلوگیری می‌شود، از تشکیل عیب چروکیدگی در گوشه نیز ممانعت به‌عمل می‌آید.

از سوی دیگر همانطور که در بخش (۳) نیز ملاحظه شد، در صورت استفاده از فشار داخلی نوسانی در لوله، تغییرشکل لوله قبل از تماس با قالب به‌صورت برجستگی مسطح است. بدین‌ترتیب از تمرکز نیروی اصطکاک در ناحیه مرکز برجستگی و به‌دنبال آن از کاهش موضعی

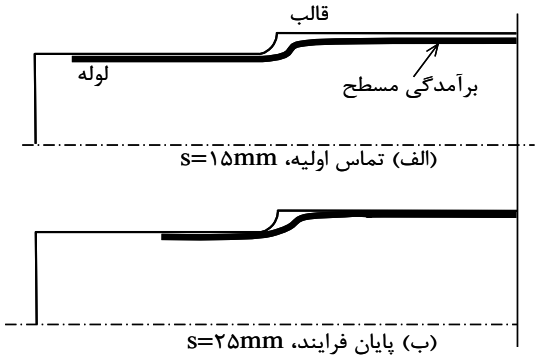
ضخامت جدار لوله جلوگیری می‌شود، ضمن آنکه مطابق شکل ۱۶ در حرکت و تشکیل گوشه قطعه تسهیل می‌شود.



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 جعبه‌ای توسط فشار قله



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

۶- اصلاح مسیر فشار نوسانی به‌منظور 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 می‌تواند 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 به‌گونه‌ای اصلاح شود که مقدار بیشتری از ماده به گوشه قالب هدایت شود.

به این‌منظور، 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، به‌منظور 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 به‌گونه‌ای 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 می‌یابد؛ از این‌رو، 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.

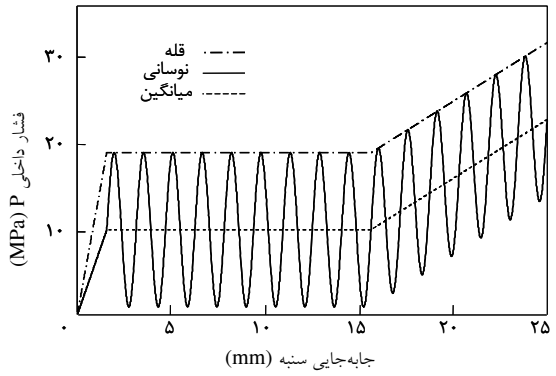
برای بررسی تأثیر مسیر فشار اصلاح شده بر میزان پرشدن گوشه قالب و تغییر شکل لوله، شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایشها مانند قبل انجام شد. لوله‌های تغییر شکل یافته با مسیر فشار نوسانی اصلاح شده برای دو مرحله میانی و پایانی فرایند در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همچنین تغییر شکل مربوط

به فشارهای قله و میانگین در این شکل آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود برای مسیر فشار نوسانی، گوشه قالب تقریباً به‌طور کامل پر شده، در حالی‌که گوشه قالب برای فشارهای غیرنوسانی قله و میانگین، خالی مانده و میزان پرشدگی گوشه برای مسیرهای فشار غیرنوسانی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای از میزان آن برای مسیر فشار نوسانی کمتر است. از طرف دیگر، در تغذیه محوری (s=۱۰mm) 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=۲۵mm) حذف شده است؛ در حالی‌که برای فشار میانگین، چروکیدگی لوله در گوشه قالب همچنان مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۱۸ نشان می‌دهد که برای فشار قله، در تغذیه محوری (s=۱۰mm) ناحیه تماس لوله و قالب به‌مراتب از مقدار آن برای فشار نوسانی و متوسط بیشتر است که در نتیجه به‌دلیل تغییر شکل زیاد و ناگهانی لوله در ابتدای فرایند و کاهش موضعی ضخامت جدار لوله، پارگی لوله در (s=۲۲/۵mm) اتفاق افتاده است.

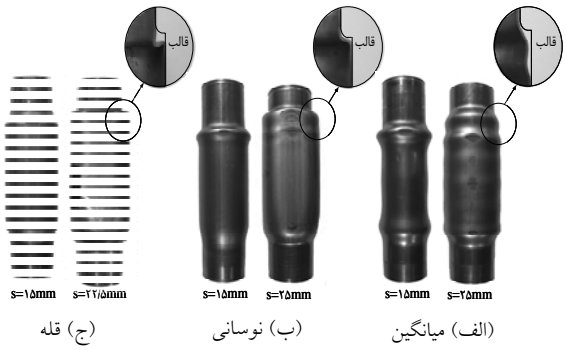
مقاطع گوشه شکل یافته در آزمایش هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای‌شکل برای مسیر فشار نوسانی اصلاح شده و مسیرهای فشار میانگین و قله معادل آن در تغذیه محوری (s=۲۲/۵mm) در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار پرشدگی گوشه برای فشار نوسانی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقدار آن برای فشارهای قله و میانگین است.

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

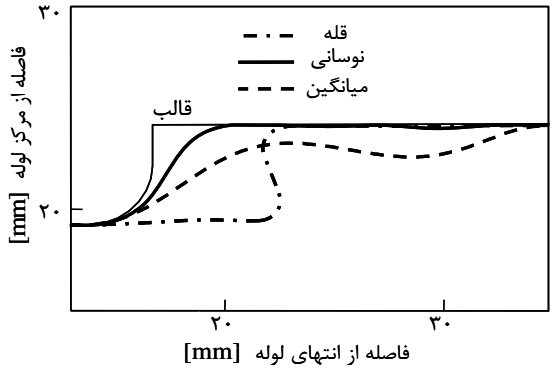
در شکل ۲۱ بردارهای جریان مواد به‌دست آمده از روش اجزای محدود برای سه مسیر فشار مندرج در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل پیداست، در ابتدای فرایند (s=۱۰mm) برای فشار نوسانی، جریان مواد به‌طور یکنواخت در طول ناحیه انبساط لوله توزیع شده و بردارهای جریان مواد در نزدیکی گوشه قالب تا حدودی بزرگتر است. از این‌رو در پایان فرایند، گوشه قالب بهتر پر می‌شود. مطابق شکل، برای فشار قله، جریان مواد در ابتدا در مرکز ناحیه انبساط متمرکز شده است، در نتیجه ماده در مراحل بعدی به اندازهٔ کافی و به‌طور مناسب به گوشه های قالب نمی‌رسد و گوشه قالب کاملاً پر نمی‌شود.



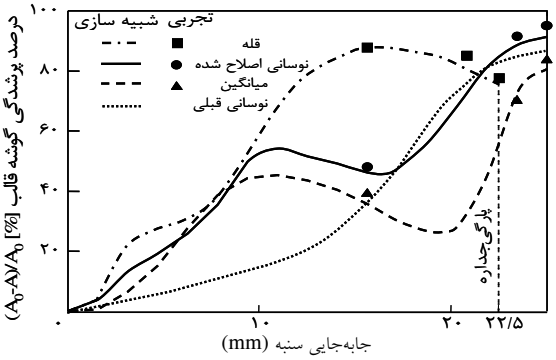
شکل ۱۷ مسیر فشار اصلاح شده همراه با مسیرهای فشار غیرنوسانی متناظر با آن



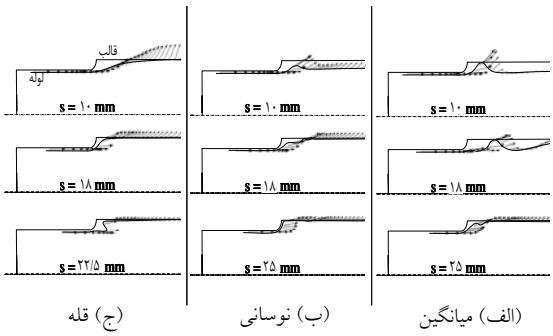
شکل ۱۸ قطعات شکل یافته در آزمایش هیدروفرمینگ لوله با فشار نوسانی اصلاح شده و فشارهای غیرنوسانی



شکل ۱۹ مقایسه گوشه قطعات هیدروفرم شده در تغذیه محوری (s=۲۲/۵mm) با فشارهای نوسانی و غیرنوسانی



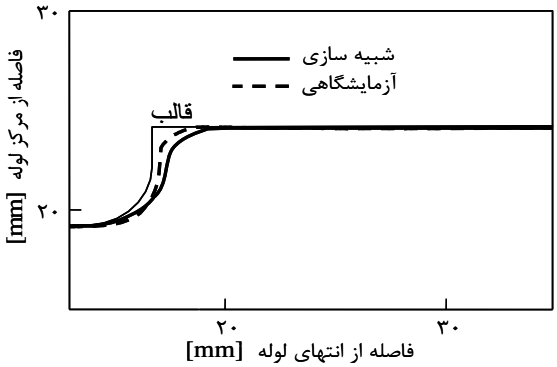
شکل ۲۰ مقایسه گوشه قطعه هیدروفرم شده توسط فشار نوسانی در پایان فرایند با نتیجه شبیه‌سازی عددی



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

از طرف دیگر، شکل ۲۱ نشان می‌دهد که برای فشار نوسانی، در مرحله انبساط آزاد لوله (s=۱۰mm)، چروکیدگی کوچکی در نزدیکی گوشه قالب به‌وجود می‌آید و به‌تدریج در مراحل میانی و پایانی، با افزایش فشار نوسانی حذف می‌شود، در حالی‌که برای فشار میانگین، چروکیدگی به‌وجود 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 به‌وسیله فشار نوسانی اصلاح شده

۷- نتیجه‌گیری

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

محوری در زمان شروع تماس لوله و قالب، بـر میـزان پر شدن گوشه قالب تأثیر دارد. فشار نوسانی بـا کنتـرل و حذف مکرر و تدریجی چروکیدگی لوله در حـین فراینـد هیدروفرمینگ باعث به‌وجود آمـدن برجـستگی مـسطح و تاخیر در شروع تماس لوله و قالب می‌شود کـه در نتیجـه موجب وارد شدن ماده بیشتری به ناحیه شکل‌دهی قبل از تماس لوله و قالب می‌شـود. عـلاوه بـر ایـن، برجـستگی مسطح و یکنواخت لوله در ناحیـه شـکل‌دهـی آن باعـث توزیع بهتر ضخامت و در نتیجه جلوگیری از پارگی لولـه در حین فرایند می‌شود. در شکل‌دهی با فشار غیرنوسـانی بالا (قله)، شکل هندسی لوله در لحظـه تمـاس بـا قالـب، محدب است و شروع تماس در مقایسه با فـشار نوسـانی سریعتر اتفاق می‌افتد.

بدین‌ترتیب، مـواد در لحظـه تمـاس بـا قالـب تمرکـز بیشتری در ناحیه مرکز برجستگی دارند تا در گوشه قالب. با تمرکز مواد در ناحیه مرکزی در لحظه تمـاس، حرکـت مواد به‌سمت گوشه‌های قالب به‌دلیل اصـطکاک بیـشتر در ناحیه مرکزی محدود شده و به نازک شدن جداره لولـه و پارگی آن منجر می‌شود. از طرف دیگـر، حتـی بـا تغذیـه بیشتر نیز گوشه قالب پر نمی‌شود بلکه باز هـم بـه عیـب رویهم افتادگی ورق منجر می‌شود.

در شـکل‌دهـی بـا فـشار غیرنوسـانی پـایین (میـانگین)، چروکیدگی‌های بزرگی در حین شکل‌دهی به‌وجود مـی‌آیـد که حتی با افزایش فشار در پایان فرایند نیز حذف نمی‌شـوند و در نتیجه قسمتی از گوشه قالب به‌طور کامل پر نمی‌شود.

در این پژوهش همچنین، بر اساس سـازوکار بـه‌دسـت آمده برای بهبود پرشدگی گوشه بـا فـشار نوسـانی، مـسیر فشار داخلی نوسانی اصلاح و به‌کمک روش اجزای محدود و آزمایش، نشان داده شد که درصد پرشدگی گوشـه قالـب با استفاده از مسیر فشار نوسانی جدید افزایش می‌یابد.

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

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.

[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.