

شبیه سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله با فشار نوسانی در قالب جعبه ای شکل

محسن لوح موسوی^۱، کن ایچیرو موری^۲، محمد بخشی جویباری^۳، محمود فرزین^۴ و سید جمال حسینی پور^۵
loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

در سال های 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 به این روش در حال گسترش است. یکی از روش های موثر 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 جعبه ای 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 حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و نشان داده شده است که بهبود شکل دهی در اثر فشار نوسانی در مرحله قبل از تماس لوله و قالب در ناحیه انبساط لوله اتفاق می افتد. از این رو، این نتیجه گیری به عمل آمده است که علت بهبود شکل دهی لوله به رفتار تغییر شکل آن به مرحله قبل از تماس مربوط می شود.

کلید واژه:

هیدروفرمینگ لوله- فشار نوسانی- شبیه سازی اجزای محدود- بهبود شکل پذیری لوله

-
- ۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر
 - ۲- استادیار دانشکده مهندسی سیستمهای تولیدی- دانشگاه صنعتی تبریز
 - ۳- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران
 - ۴- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
 - ۵- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران

۱- 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 [۱]. در این فرایند، لوله‌های مستقیم و یا خمیده تحت فشار سیال به اشکال مورد نظر در می‌آیند. با انبساط لوله تحت فشار بالا، ضخامت جداره آن کاهش می‌یابد. این امر، در نهایت منجر به پارگی لوله می‌شود. برای اجتناب از کاهش موضعی ضخامت جداره لوله، همزمان با اعمال فشار داخلی، لوله از یک سمت یا هر دو سمت تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرد تا ماده بیشتری در راستای محوری به ناحیه تغییر شکل تغذیه وارد شود. با این حال، تغذیه محوری نامناسب منجر به بوجود آمدن عیوب دیگری از قبیل چروکیدگی و کماتش لوله و یا خالی ماندن گوشه‌های قالب می‌شود [۲]. به طور کلی، برای تولید یک قطعه بی‌عیب با ابعاد و تolerانس‌های مورد نیاز، انتخاب مسیر فشار بر حسب تغذیه محوری بسیار مهم است [۳].

یکی از روش‌های موثر 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 بصورت 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 شکل دهی است، متفاوت می‌باشد، زیرا تعداد نوسانات در هیدروفرمینگ نوسانی به مراتب کمتر از فرکانس امواج اولتراسونیک می‌باشد [۵].

موری و همکارانش فرایند بشکه‌ای شدن آزاد لوله را تحت فشار نوسانی به کمک یک مدل اجزای محدود متقارن محوری بررسی کرده‌اند [۶ و ۷]. هاما و همکارانش تاثیر فشار نوسانی در بهبود فرایند هیدروفرمینگ یک قطعه خودرو را بوسیله روش اجزای محدود صریح استاتیکی شبیه سازی کرده و تاثیر فشار نوسانی را با اثر کاهش اصطکاک لوله و قالب در بهبود شکل پذیری، مقایسه کرده‌اند [۸].

نگارندگان مقاله [۹] در پژوهشی دیگر، ساز و کار بهبود شکل دهی 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 مرحله پایانی شکل دهی جلوگیری می‌شود.

همچنین نگارندگان مقاله [۱۰] 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 بسته جعبه‌ای شکل به صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود. هدف از این بررسی، مقایسه تاثیر فشار نوسانی در قبل و بعد از تماس لوله با قالب در ناحیه انبساط است. به عبارتی دیگر، هدف از این مطالعه پاسخ دادن به این سوال است که آیا تاثیر 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 مرحله تماس با قالب که بین لوله و جداره قالب اصطکاک وجود دارد؟

در ادامه، تاثیر فشار نوسانی بر شکل هندسی قطعه و بردار جریان مواد در لحظه تماس لوله و قالب و همچنین برای مرحله پایان شکل دهی بررسی می‌شوند. در نهایت، منحنی درصد پرشدگی گوشه قالب بر حسب تغذیه محوری برای فشارهای نوسانی و غیرنوسانی مقایسه می‌شوند.

۲- هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل

۲-۱- روش آزمایشگاهی

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 فولادی و با کم کربن بوده و طول، ضخامت و قطر خارجی آن، به ترتیب ۱۶۰، ۱ و ۳۸/۴ میلی‌متر است. لوله بوسیله سنبه تغذیه از یک طرف با سرعت یک میلی‌متر بر ثانیه فشرده می‌شود و سنبه طرف دیگر ثابت است. کل جابجایی سنبه تغذیه ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

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 نیز مسیر فشار ثابت با مقدار حداکثر (قله) نیز انتخاب گردیده‌اند. معادله (۱) بیانگر مسیر فشار نوسانی استفاده شده در آزمایش‌ها بر حسب زمان انجام فرایند می‌باشد. بزرگی دامنه (Δp) و فرکانس آن (f) فشار نوسانی اعمال شده به ترتیب برابر ۴ مگاپاسکال و یک هرتز است.

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

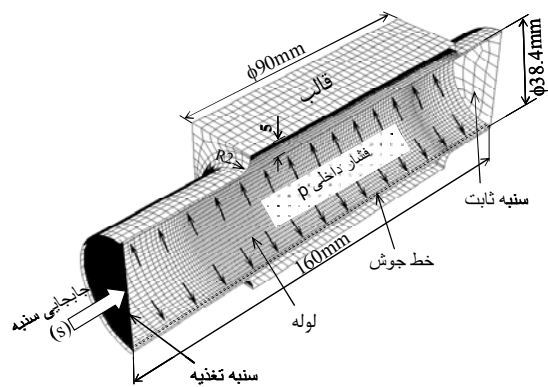
فشار میانگین بیانگر مقدار متوسط فشار نوسانی در طول انجام فرایند است در حالی که فشار قله، معرف حداکثر مقدار فشار نوسانی می‌باشد. از یک پمپ هیدرولیکی مجهز به شیر خودکار با کنترل کامپیوتری برای اعمال فشار با سه نوع مسیر بالا استفاده شده است. سیال به کار رفته جهت شکل دهی لوله، مخلوطی از روغن و آب می‌باشد. سطح خارجی لوله‌ها قبل از انجام هر آزمایش با روغن

می باشند. 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. موقعیت خط جوش مطابق وضعیت آن در آزمایش های مربوطه مدل سازی شد.

شرایط تعریف شده در شبیه سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ در جدول (۱) آمده است. تنش جریان و ضریب ناهمسانگردی (مقدار r) برای لوله فولادی با کربن متوسط از جنس STKMA11 بوسیله آزمایش کشش اندازه گیری شده است. معادله های (۳ و ۲) به ترتیب بر نتایج به دست آمده برای تنش سیلان لوله و خط جوش برازش شده است. از معیار تسلیم ناهمسانگردی هیل در تحلیل عددی فرایند استفاده شده است.

$$\sigma = 510\varepsilon^{0.12} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

$$\sigma = 523\varepsilon^{0.1} \text{ [MPa]} \quad (2)$$



شکل (۳): مدل اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه ای

۳- تاثیر فشار نوسانی بر بهبود شکل پذیری

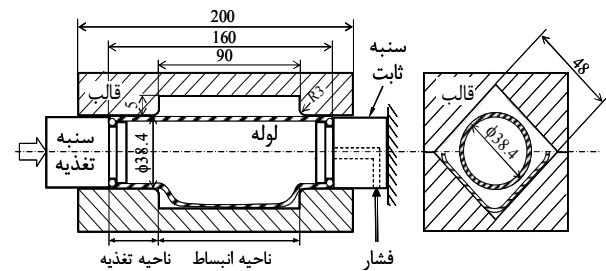
۳-۱- تاثیر فشار نوسانی بر تغییر شکل لوله

شکل (۴) شبکه اجزای محدود تغییر شکل یافته را در لحظه تماس اولیه لوله و قالب و در پایان فرایند، برای سه مشخصه فشار قله، نوسانی و میانگین نشان می دهد. شکل هندسی بدست 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 می شود، برای حالت فشار قله، لوله در تغذیه محوری کمتری ($s=10\text{mm}$) در مقایسه با دو مشخصه فشار دیگر با قالب تماس داشته است و همین امر موجب تغذیه نامناسب ماده در انتهای فرایند هیدروفرمینگ و

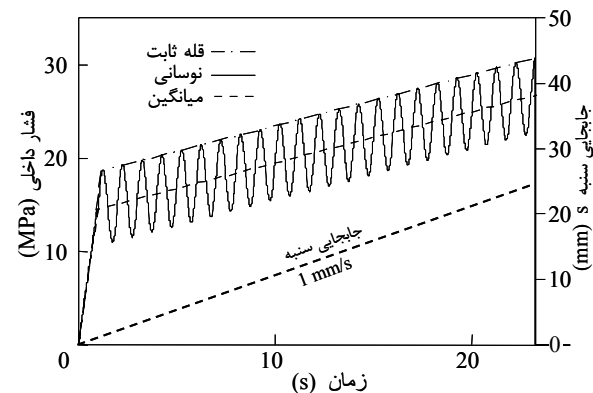
ماشین، روانکاری شده و در صورت بروز پدیده پارگی لوله در حین آزمایش، فشار داخلی و تغذیه محوری بلافاصله متوقف می شود.

جدول (۱): شرایط استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود

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



شکل (۱): اجزای مهم قالب و ابزار استفاده شده در هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه ای شکل



شکل (۲): مشخصه های فشار استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود و آزمایش ها

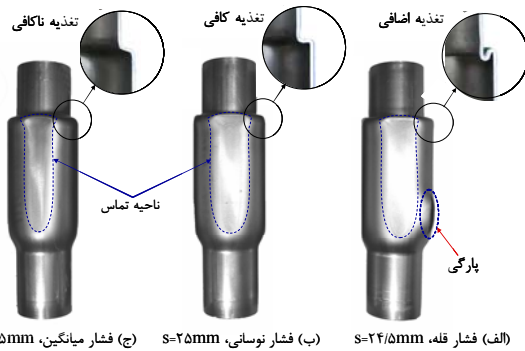
۲-۲- شبیه سازی اجزای محدود

فرایند هیدروفرمینگ لوله جعبه ای شکل در قالب بسته به کمک نرم افزار اجزای محدود صریح دینامیکی ABAQUS شبیه سازی شد. مطابق شکل (۳)، به خاطر تغییر شکل متقارن لوله، فقط نیمی از اجزای قالب و لوله توسط المان پوسته ای مدل سازی شده است. نوع و تعداد المان استفاده شده برای لوله به ترتیب S4R و ۳۴۰۰

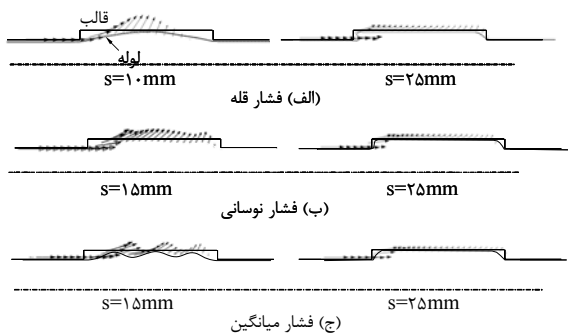
در نتیجه تجمع مواد اضافی در گوشه قالب می شود (شکل ۴-د). از طرف دیگر، مطابق شکل (۴-و) در مرحله پایانی فرایند برای فشار میانگین، تغییر شکل کمتری نسبت به فشار نوسانی ملاحظه می شود.

شکل های (۵ و ۶) لوله های تغییر شکل یافته از آزمایش را به ترتیب برای لحظه تماس و پایان فرایند نمایش می دهند که نشان دهنده مشابهت نتایج تجربی با نتایج بدست آمده از روش اجزای محدود است.

بردارهای جریان مواد مربوط به ناحیه تغییر شکل لوله در لحظه تماس اولیه لوله و قالب و همچنین در پایان فرایند برای سه مشخصه فشار قله، نوسانی و میانگین در شکل (۷) نشان داده شده است. بردارهای جریان مواد در لحظه تماس برای فشار قله و متوسط یکنواخت نیست به گونه ای 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 مواد نسبتاً یکنواخت است. در پایان تغذیه محوری ($S=25mm$)، بردارها برای فشار قله نسبت به فشار نوسانی در ناحیه 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.



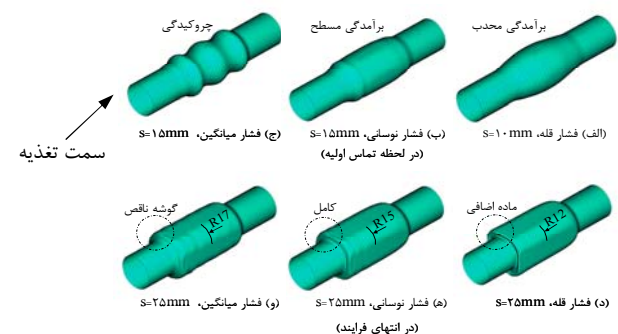
شکل (۶): تغییر شکل لوله در پایان فرایند



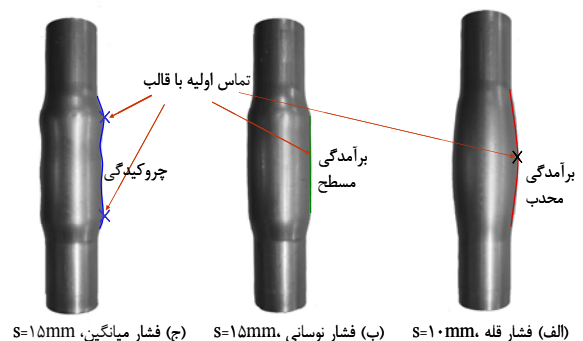
شکل (۷): بردار جریان مواد در لحظه تماس اولیه لوله و قالب و در پایان فرایند

۳-۲- تاثیر فشار نوسانی بر ضخامت جداره لوله

نتایج حاصل از شبیه سازی و تجربه برای توزیع ضخامت جداره لوله تغییر شکل یافته در شکل (۸) نمایش داده شده است. مطابق شکل، توزیع ضخامت لوله در مرحله بشکه ای شدن لوله ($S=10mm$) برای فشار قله بطور قابل ملاحظه ای از مقدار آن برای فشار نوسانی پایین تر است و این امر باعث کاهش موضعی جداره لوله و در نهایت موجب پارگی آن مطابق شکل (۶) می شود. به هر جهت همانطور که از شکل (۸) ملاحظه می شود، اختلاف ضخامت در مرحله قبل از تماس لوله و قالب برای فشارهای نوسانی و قله بیشتر از مقدار آن در پایان فرایند است و از این رو، می توان نتیجه گرفت که اثر فشار نوسانی بر بهبود توزیع ضخامت قبل از مرحله تماس با قالب بیشتر از زمانی است که لوله در تماس با سطح قالب شکل می گیرد. در نتیجه، کاهش اصطکاک در اثر فشار نوسانی، نمی تواند عامل اصلی بهبود شکل دهی باشد، زیرا در مرحله قبل از تماس لوله و قالب اصطکاک فقط در ناحیه تغذیه می تواند موثر باشد که با توجه به تحقیقات قبلی نگارندگان مقاله، فشار نوسانی بر اصطکاک این ناحیه نیز تاثیر قابل ملاحظه ای ندارد [۵].



شکل (۴): تغییر شکل شبکه های اجزای محدود در لحظه تماس لوله و قالب و تغییر شکل نهایی؛ $S=$ جابجایی سنبه



شکل (۵): تغییر شکل لوله در لحظه تماس با قالب

۳-۳- تاثیر فشار نوسانی بر درصد پرشدگی گوشه قالب

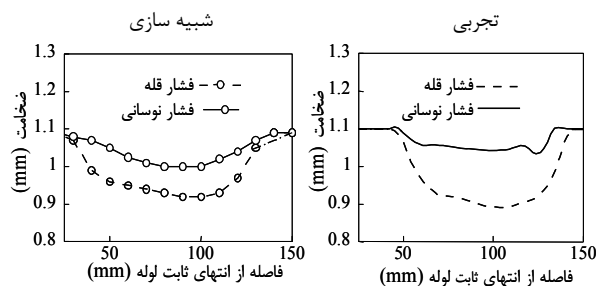
درصد پرشدگی گوشه قالب مطابق رابطه (۴) تعریف می شود که در آن I_0 شعاع گوشه قالب و l فاصله گوشه لوله از مرکز گوشه قالب است.

$$(4) \quad \text{درصد پرشدگی گوشه} = 100 \times l / I_0$$

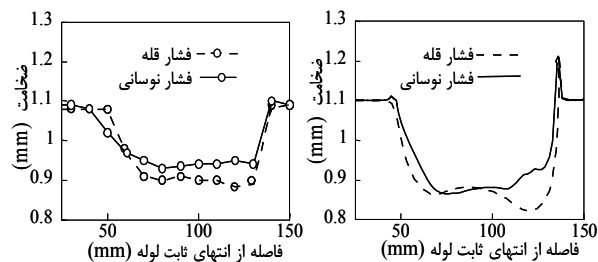
شکل (۱۰) درصد پرشدگی گوشه قالب را که برای سه نوع فشار قله، نوسانی و میانگین که به کمک تحلیل اجزای محدود بدست آمده است، نشان می دهد. مطابق شکل با افزایش تغذیه محوری، مقدار پرشدگی گوشه نیز افزایش می یابد. اگر چه در حین فرایند هیدروفرمینگ در قالب جعبه ای، درصد پرشدگی گوشه قالب برای فشار قله درمقایسه با دو مشخصه دیگر بیشتر است، اما روند افزایش درصد پرشدگی برای جابجایی سنبه در ۲۰ میلی متر تقریباً متوقف شده و مطابق شکل (۵) به علت نازک شدن جداره لوله، پارگی اتفاق می افتد درحالی که درصد پرشدگی برای فشار نوسانی تا آخرین مقادیر تغذیه 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 (۱۱) 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 شروع تماس لوله و قالب، مواد در قالب به دشواری حرکت می کنند. این درحالی است که اگر تغذیه محوری برای جبران کاهش ضخامت لوله انجام شود با توجه به شکل محدب ایجاد شده در ناحیه تغییر شکل لوله، عیب چروکیدگی گوشه بوجود خواهد آمد. برای فشار نوسانی، همانطور که در بخش (۱-۳) نیز ملاحظه شد تغییر شکل در ناحیه شکل دهی لوله به صورت یک برجستگی مسطح است که بدینوسیله در حرکت و تشکیل گوشه قطعه تسهیل شده است (شکل ۱۲).

شکل (۹) تغییرات ضخامت لوله را در حین انجام هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه ای شکل برای فشار قله و نوسانی نشان می دهد. برای فشار قله ضخامت لوله در ابتدای فرایند به سرعت کاهش می یابد، درحالی که برای فشار نوسانی، کاهش ضخامت لوله به صورت تدریجی و پله ای است. همانطور که قبلاً ملاحظه شد، در اینجا نیز با افزایش تغذیه محوری و تماس لوله و قالب، اختلاف تغییرات ضخامت برای فشار نوسانی و فشار قله کاهش یافته است. به هرجهت ضخامت جداره لوله برای فشار نوسانی تا تغذیه محوری نهایی ($S=25\text{mm}$) به حد ضخامت پارگی نرسیده است درحالی که برای فشار قله کاهش ضخامت منجر به پارگی شده است. با توجه به شکل های (۸) و (۹) می توان نتیجه گرفت که همخوانی قابل قبولی بین نتایج حل اجزای محدود و نتایج تجربی وجود دارد.

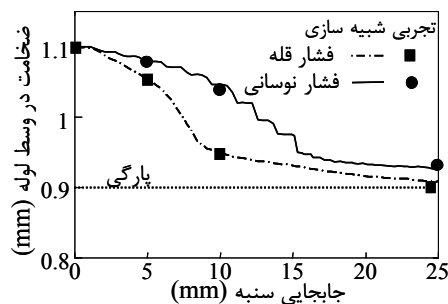


(الف) مرحله بشکه ای شدن آزاد ($S=10\text{mm}$)

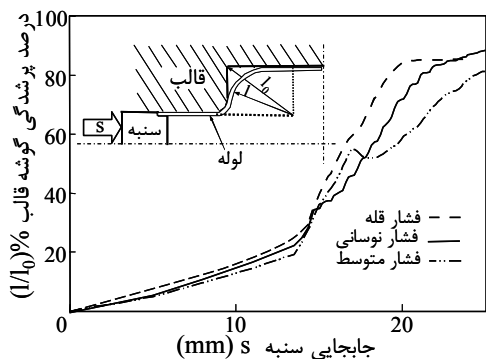


(ب) پایان فرایند ($S=25\text{mm}$)

شکل (۸): توزیع ضخامت لوله تغییر شکل یافته



شکل (۹): تغییرات ضخامت لوله حین فرایند

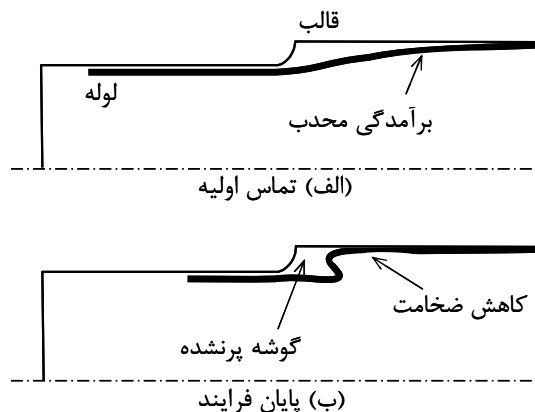


شکل (۱۰): تغییرات درصد پرشدگی گوشه قالب بدست آمده از شبیه سازی اجزای محدود

به دلیل تغییر شکل مسطح لوله حین شکل دهی با فشار نوسانی، نحوه جریان یافتن ماده در قالب برای فشار نوسانی نیز با شکل جریان مواد برای فشارهای غیر نوسانی متفاوت است. در شکل دهی با فشار بالا (قله)، مواد در لحظه تماس با قالب تمرکز بیشتری در ناحیه مرکزی تغییر شکل دارند. با تمرکز مواد در ناحیه مرکزی در لحظه تماس، حرکت مواد به سمت گوشه‌های قالب به دلیل اصطکاک بیشتر در ناحیه مرکزی محدود می شود، به طوری که حتی با تغذیه بیشتر مواد گوشه قالب پر نشده و منجر به عیب رویهم افتادگی ورق می شود.

۵- 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, pp.341-347, 2002.
- [2] F. Dohmann and C. Hartl, "Tube hydroforming— research and practical application", J. Mater. Process. Technol, 71, pp. 174-186, 1997.
- [3] M. Koc, T. Altan, "Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process", Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 42, pp.123-138, 2002.
- [4] <http://www.opton.co.jp>.
- [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, pp. 215-218, 2004.
- [7] K. Mori, T.Maeno and S.Maki, "Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tube", Int. J. of Mach Tools and Manuf., Vol. 47, pp. 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, pp. 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 Engin. Mater., 340, pp 353-358, 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 Engin. Mater., 344, pp. 461-467, 2007.



شکل (۱۱): تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه توسط فشار بالا



شکل (۱۲): تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه توسط فشار نوسانی

۴- نتیجه گیری

تأثیر فشار نوسانی بر شکل پذیری و شکل هندسی در فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در یک قالب جعبه بوسیله روش اجزای محدود بررسی شد. نشان داده شده است که فشار نوسانی باعث بهبود شکل پذیری و پرشدگی بهتر گوشه های محصول هیدروفرم شده می شود. تغییر شکل لوله قبل از تماس با قالب برای فشار نوسانی، به وضوح با هندسه بدست آمده برای سایر مسیرهای فشار غیر نوسانی، متفاوت است. فشار نوسانی از طریق حذف مکرر و تدریجی چروک‌های قابل برگشت که در اثر فشار نسبتاً پایین به وجود می آیند، منجر به برجستگی مسطح لوله در ناحیه تغییر شکل آن می شود. برجستگی مسطح و یکنواخت لوله در ناحیه شکل دهی آن باعث توزیع بهتر ضخامت و در نتیجه جلوگیری از پارگی لوله می شود.