

تحلیل عددی اثر فشارنوسانی بر بهبود شکل دهی در فرایند هیدروفرمینگ لوله‌های خمیده به روش اجزای محدود

امیر خورسندی^۱ محسن لوح موسوی^{۲*}

* نویسنده مسئول: loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

در این مقاله، فرایند هیدروفرمینگ لوله خمیده در قالب T شکل به روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده و در مسیر فشار نوسانی و غیرنوسانی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از نمودارهای حد شکل دهی (FLD) و نمودارهای توزیع ضخامت، تاثیر فشار نوسانی بر شکل دهی لوله بررسی شده و نتایج با نمونه‌های تجربی هیدروفرمینگ لوله‌های مستقیم مقایسه شده است. نشان داده شده برای لوله‌هایی باشعاع خم در حدود اندازه قطر لوله، بهبود شکل پذیری در مسیر فشار خطی، بالاتر از فشار نوسانی است و توزیع ضخامت یکنواخت در قسمت برآمده لوله را به همراه دارد. در عوض در شعاع خم بالاتر از قطر لوله، فشار نوسانی باعث بهبود پرشدگی گوشه‌های قالب می‌شود. از نتایج این تحقیق آن است که فشار نوسانی در همه حالات هیدروفرمینگ لوله‌های خمیده موثر نیست و فشار خطی می‌تواند به بهبود شکل دهی بالاتری منجر شود.

واژه‌های کلیدی: هیدروفرمینگ، لوله خمیده، روش اجزای محدود، فشار نوسانی، شکل پذیری.

۱- مدرس، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

۱- مقدمه

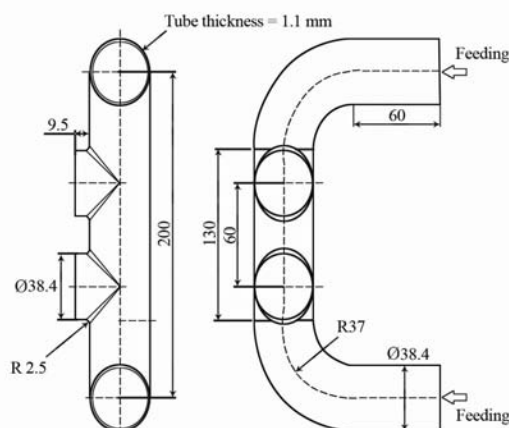
لوله‌ها با وجود وزن کم، مقاومت خمشی و پیچشی بالایی دارند. بنابراین فرایندهای شکل دهی لوله‌ها در صنایع بسیار حائز اهمیت است. فرایند هیدروفرمینگ لوله روش نسبتاً جدیدی برای شکل دادن لوله به منظور تولید قطعات توخالی پیچیده است. از مزایای اصلی این فرایند، کم کردن وزن قطعات و کم کردن عملیات جوشکاری است و به همین خاطر در سالهای اخیر مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است [۱]. در این روش از فشار سیال به جای سنبه برای شکل دهی درون قالب استفاده می‌شود. این روش برای تولید یکپارچه قطعاتی که در گذشته با مونتاژ چند قطعه پرسکاری شده تولید می‌شدند، کاربرد دارد. با استفاده از این روش به همراه استفاده از فولاد با استحکام بالاتر و ضخامت کمتر می‌توان به کاهش وزن قابل توجهی دست یافت. همچنین با حذف نقاط جوش به واسطه تولید قطعات یکپارچه، صلیبت قطعه افزایش می‌یابد. به دلیل پیچیدگی فرایند هیدروفرمینگ نیاز به شبیه‌سازی فرایند قبل از ساخت و طراحی قالب، بسیار مورد توجه است. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش سرعت محاسبات توسط رایانه، همچنین پیشرفت‌های به وجود آمده در این صنعت، استفاده از روش‌های عددی و در میان آنها روش اجزای محدود مورد توجه قرار گرفته است.

یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود فرایند هیدروفرمینگ لوله، استفاده از فشار نوسانی است [۲]. در این روش فشار داخلی بر حسب تغذیه محوری به صورت نوسانی اعمال می‌شود. موری و همکارانش در پژوهشی به بررسی تاثیر فشار نوسانی در بهبود شکل پذیری در هیدروفرمینگ لوله بصورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود پرداختند [۳]. پارامترهای مورد بررسی، میزان چروکیدگی و زمان پارگی در طول فرایند بود. نمونه‌های تجربی، نتایج شبیه‌سازی مبنی بر بهبود شکل‌پذیری، کاهش چروکیدگی لوله و جلوگیری از پارگی را تأیید کرد. لوح موسوی و همکارانش، شبیه‌سازی اجزای محدود سه بعدی فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله T شکل

را انجام دادند و با نمونه‌های تجربی مقایسه کردند [۴]. نتیجه این تحقیق بهبود شکل‌پذیری را با نوسانی کردن فشار نشان داد. استرانو و همکارانش به بررسی چروکیدگی در شبیه‌سازی اجزای محدود فرایندهای مختلف هیدروفرمینگ لوله از جمله هیدروفرمینگ لوله‌های خمیده پرداختند [۵]. ترانا فرایندهای خمش، شکل‌دهی اولیه و هیدروفرمینگ در یک لوله را شبیه‌سازی کرد و به بررسی تأثیر فرایندهای خمش و شکل‌دهی اولیه بر هیدروفرمینگ پرداخت [۶]. در پژوهش حاضر، برای نخستین بار شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله‌های خمیده در قالب T شکل انجام شده است و پیش بینی پارگی در فرایند با استفاده از نمودارهای حد شکل‌دهی (FLDs) انجام می‌شود.

۲- شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند

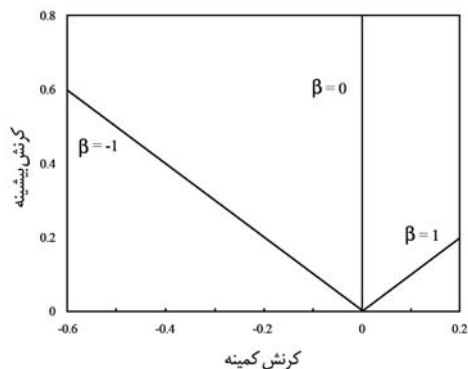
در شکل (۱) شماتیک قالب استفاده شده به همراه جزئیات و ابعاد هندسی مشاهده می‌شود. از این قالب جهت آزمایش تجربی استفاده می‌شود. شکل (۲) مدل اجزای محدود استفاده شده در فرایند در نرم افزار ABAQUS را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به دلیل تقارن، تنها نیمی از قالب شبیه‌سازی شده است.



شکل (۱) شماتیک قالب T شکل همراه با ابعاد مهم (ابعاد به میلی‌متر).

مقادیر ε_{minor} و ε_{major} که از آزمایش به دست آمده در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. در این تصویر خطوط، نمایانگر میزان کرنش مربوطه به هنگام گسیختگی ورق است [۸]. پارامتر β نشان‌دهنده‌ی نسبت تنش‌های مذکور است. این مقادیر در قسمت شکست نرم در نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی شکست بر اساس معیار FLD وارد می‌شود.

در این شبیه‌سازی با توجه به این که فرایند در حالت سرد صورت گرفته و تغییر شکل ماده نیز زیاد است و با در نظر گرفتن عدم حضور نرخ کرنش ($\dot{\varepsilon}$) و شبه استاتیکی بودن مسئله، از نوع حل صریح دینامیکی^۳ استفاده می‌شود. زمان انجام فرایند، ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

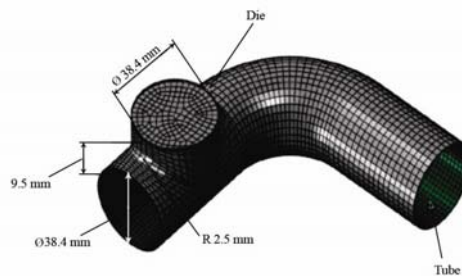


شکل (۴) نمودار حد شکل دهی خطی شده به دست آمده از آزمایش [۸].

شبکه‌بندی مدل به صورت یکنواخت صورت گرفته است. تعداد ۵۱۶۲ المان پوسته‌ای از نوع S4R برای لوله تعریف شد. برای شبکه‌بندی قالب صلب از المان صلب نوع R3D4 استفاده می‌شود که یک المان سه بعدی چهار گره‌ای صلب است.

۳- استفاده از فشار قله (Peak) در هیدروفرمینگ لوله خمیده

مطابق شکل (۳) در مرحله اول اعمال فشار، افزایش فشار باعث پر شدن لوله از سیال شده و تنش اعمالی بر لوله را تا حد تنش تسلیم لوله بالا می‌برد.



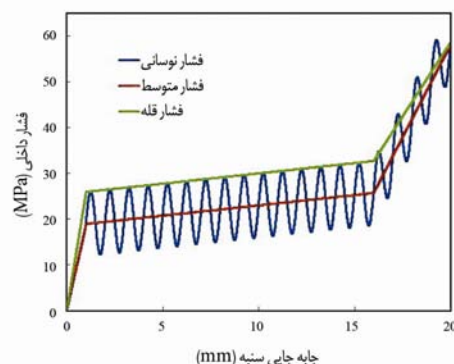
شکل (۲) مدل اجزای محدود قالب T شکل.

جنس فولاد به کار رفته STKM11A است که مشخصات آن در جدول (۱) نشان داده شده است [۴]. مدل اصطکاکی استفاده شده از نوع کولمب بوده و ضریب اصطکاکی معادل ۰/۰۵ بر اساس مدل مذکور و با توجه به مرجع [۷] در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی در سه مسیر فشار قله، نوسانی^۲ و متوسط (Mean) انجام می‌شود که این مسیرهای فشار در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول (۱) شرایط شبیه‌سازی [۴].

پارامتر	مقدار
مدول الاستیک (E)	۲۱۰ GPa
ضریب پواسون (ν)	۰/۳
تنش تسلیم (S _y)	۲۹۰ MPa
قطر خارجی لوله (D)	۳۸/۴ mm
ضخامت لوله (t)	۱/۱ mm
سرعت سنبه تغذیه (V)	۱ mm/s
تنش جاری شدن	$\sigma = 510 \cdot \varepsilon^{1/2} MPa$



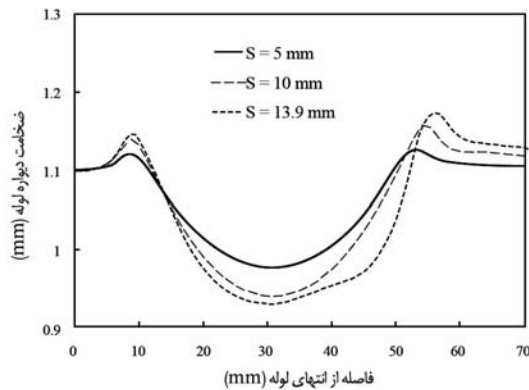
شکل (۳) مسیر فشار نوسانی و غیرنوسانی در نمونه شبیه‌سازی شده.

۱- Peak

۲- Pulsating

۳- Dynamic/Explicit

شکل (۶) نمودار توزیع ضخامت لوله در مسیر لبه تقارن میانی لوله در طول فرایند تا رسیدن به پارگی را نشان می‌دهد. S میزان کورس سنبه تغذیه محوری است.



شکل (۶) نمودار توزیع ضخامت لوله در مسیر لبه تقارن میانی لوله در شبیه سازی تحت فشار قله (Peak).

۴- استفاده از فشار نوسانی و متوسط در هیدروفرمینگ لوله خمیده

فرایند هیدروفرمینگ لوله خمیده در قالب T شکل، بار دیگر با استفاده از فشار نوسانی شبیه سازی شده است. فشار اعمال شده، به صورت زیر است:

$$P = \Delta P \sin[2\pi(S-1)] + (0.3S + 18/2) \quad (2)$$

که در آن P میزان فشار نوسانی اعمال شده در فرایند، ΔP دامنه سیکل فشار نوسانی، S میزان کورس سنبه تغذیه محوری است. پارامترهای فشار نوسانی مورد استفاده در رابطه (۲) به شرح زیر است:

$$P_0 = 19 \text{ MPa}$$

$$\Delta P = 7 \text{ MPa}$$

در شکل (۷) مدل شبیه سازی شده فشار نوسانی، در کورس تغذیه ۱۷/۲ میلی متر، نشان داده شده است. با توجه به شکل فرایند، در اثر فقدان تغذیه مناسب ناشی از چروکیدگی در خم لوله و در نهایت پارگی آن در قسمت میانی لوله، متوقف می‌شود و شکل پذیری مطلوبی ایجاد نمی‌شود.

حداقل فشار برای آغاز تسلیم در هیدروفرمینگ لوله‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید [۹]:

$$P_i = S_y \times \frac{2t}{(D-t)} \quad (1)$$

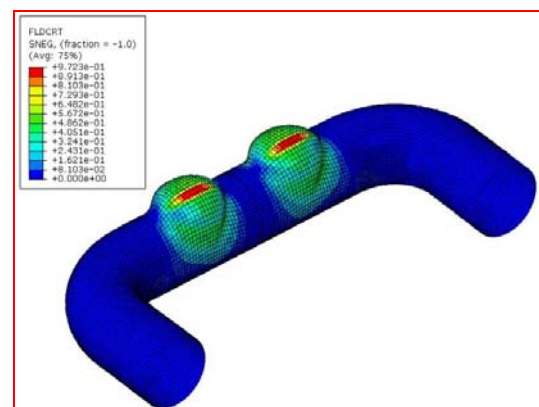
که در آن P_i فشار تسلیم، S_y تنش تسلیم، t ضخامت اولیه و D قطر خارجی لوله است. با در نظر گرفتن تنش‌های نهایی و تسلیم به ترتیب برابر 540 MPa و 290 MPa ، فشار حداقل و حداکثر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i(\text{min}) = 17 \text{ MPa}$$

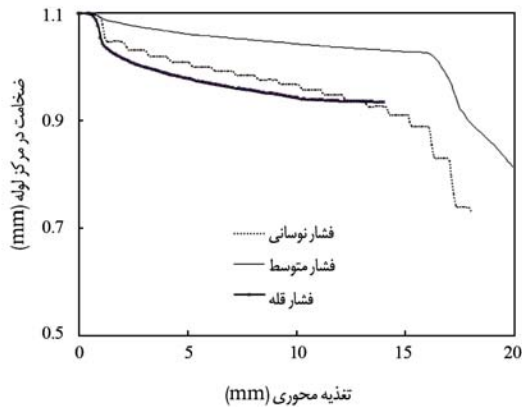
$$P_i(\text{max}) = 32 \text{ MPa}$$

در کلیه حالت‌های فرایند شکل دهی لوله خمیده در قالب T شکل (از نظر شیوه اعمال فشار) در این شبیه سازی، زمان کل فرایند شکل پذیری ۲۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. ولی فرایند در عمل، در حالت شکل دهی در فشار قله (Peak)، در کورس تغذیه ۱۳/۹ میلی متر به دلیل کم شدن ضخامت جداره لوله و در نهایت پارگی آن در قسمت میانی لوله، متوقف می‌شود.

در شکل (۵) مدل شبیه سازی شده لوله خمیده در لحظه پارگی نشان داده شده است. ناحیه پارگی و المان‌های بحرانی در این شکل توسط نرم افزار به خوبی نمایان است.

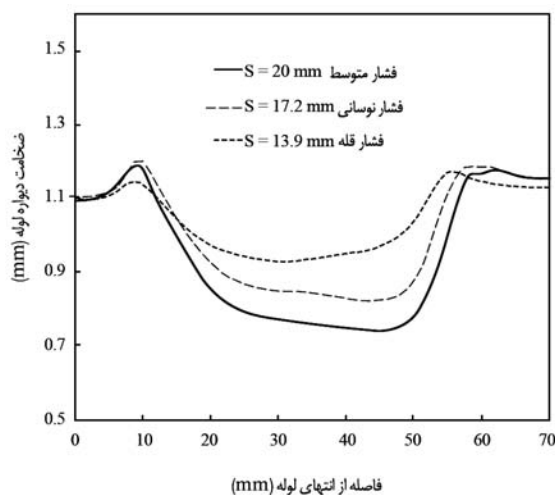


شکل (۵) لوله تغییر شکل یافته تحت فشار قله (Peak) در لحظه پارگی در کورس تغذیه ۱۳/۹ میلی متر.



شکل (۹) توزیع ضخامت مرکز لوله در هیدروفورمینگ لوله خمیده با فشار قله، نوسانی و متوسط.

در شکل (۱۰) توزیع ضخامت لوله در مسیر لبه تقارن میانی آن در نمونه شبیه سازی شده نشان داده شده است. این توزیع در وضعیت فشار قله و فشار نوسانی در لحظه پارگی و در پایان فرایند در وضعیت فشار متوسط نشان داده شده است.

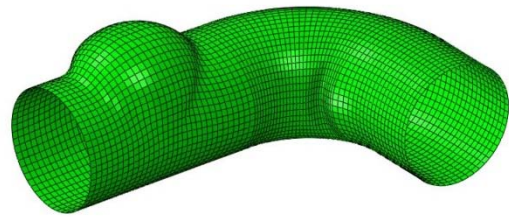


شکل (۱۰) توزیع ضخامت در مسیر لبه تقارن میانی لوله در پایان فرایند فشار متوسط و لحظه پارگی در فشار قله و نوسانی.

۶- پیش بینی پارگی در هیدروفورمینگ لوله خمیده

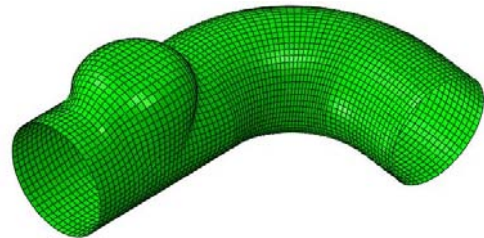
در این پژوهش پیش بینی پارگی در فرایند هیدروفورمینگ لوله خمیده در استفاده از نمودارهای حد شکل دهی (FLD) انجام می پذیرد. برای نمایش کانتور (FLD)، ثابت I به صورت زیر تعریف می شود:

$$I = \frac{\epsilon_{major} A}{\epsilon_{major} B} \quad (3)$$



شکل (۷) لوله تغییر شکل یافته شبیه سازی تحت فشار نوسانی در کورس تغذیه ۱۷/۲ میلی متر.

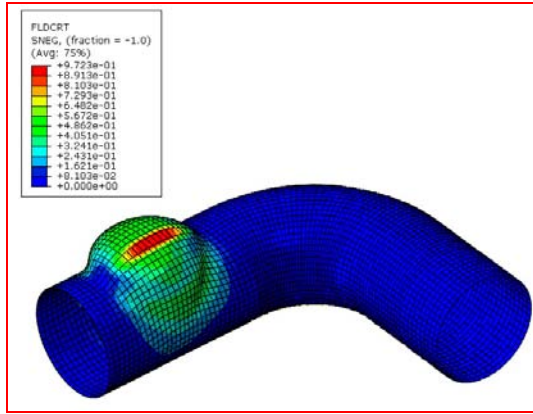
در شکل (۸) مدل شبیه سازی شده تحت فشار متوسط، در ثانیه ۲۰، نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، چروکیدگی در لوله رخ نداده و شکل پذیری مطلوبی ایجاد شده است.



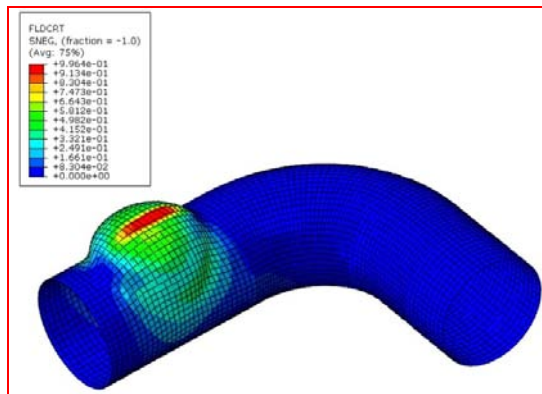
شکل (۸) لوله تغییر شکل یافته شبیه سازی تحت فشار متوسط در کورس تغذیه ۲۰ میلی متر.

۵- اثر فشار متوسط در شکل دهی و بهبود توزیع ضخامت در لوله

در شکل (۹) توزیع ضخامت در نقطه مرکز برآمدگی لوله، در طول فرایند در هر سه مسیر فشار دیده می شود. طبق شکل (۹) روند کاهش ضخامت در هر سه نمونه در ابتدا یکسان است. این اتفاق به دلیل اعمال فشار افزایشی اولیه است که در هر سه مسیر فشار یکسان است. سرعت کاهش ضخامت در فشار قله با شیب تندتری ادامه می یابد در صورتی که در فشار نوسانی این کاهش با شیب کمتر و به حالت نوسانی رخ می دهد و به حد ضخامت کمینه می رسد. در فشار متوسط بهترین توزیع ضخامت حاصل می شود و کاهش ضخامت با شیب ملایمی صورت می پذیرد.



(الف) فشار قله



(ب) فشار نوسانی

شکل (۱۲) کانتور توزیع I در لحظه پارگی در: (الف) فشار نوسانی و قله، (ب) فشار نوسانی.

۷- بررسی کیفیت شکل دهی در هندسه‌های مختلف لوله براساس شعاع خم

کیفیت شکل دهی در فرایند هیدروفرمینگ لوله‌های خمیده

در دو دسته هندسه لوله بر اساس شعاع خم بررسی می‌شود:

(۱) خم لوله با شعاعی کمتر از قطر لوله ($R < 38/4 mm$)

(۲) خم لوله با شعاعی بیشتر از قطر لوله ($R > 38/4 mm$)

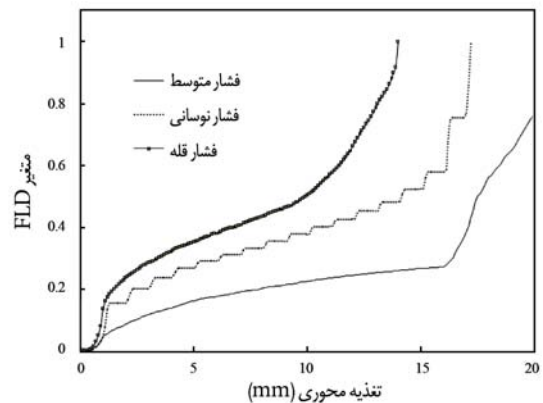
نتایج شبیه‌سازی مطابق شکل (۱۳) نشان می‌دهد که شکل دهی در شعاع‌های خم $R = 33/35 mm$ حتی در مسیر فشار متوسط به دلیل عدم سهولت تغذیه محوری مناسب به چروکیدگی منجر خواهد شد. از شعاع خم $R = 37 mm$ شکل دهی در فشار متوسط با موفقیت انجام می‌شود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت.

A) میزان کرنش بیشینه در حین فرایند و

B) میزان کرنش معادل در ϵ_{minor} مشابه، روی

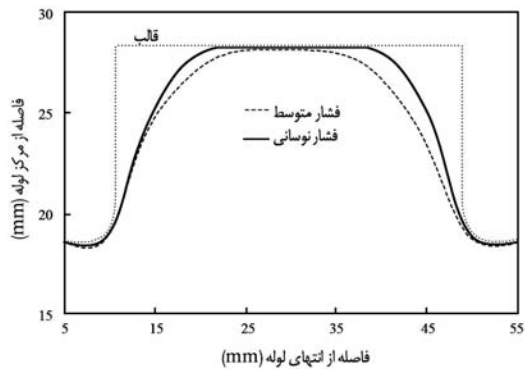
سطح نمودار تجربی است. طبق تعریف بالا، هنگامی که $I = 1$ شود، نشان دهنده لحظه پارگی است و در محلی از نمونه که میزان I بالاتر باشد، احتمال وقوع پارگی بیشتر است.

در شکل (۱۱) تغییرات FLD در نقطه میانی لوله در مسیر فشارهای مختلف در مدل شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است. در فشار قله این مسیر از نقطه صفر شروع شده و شروع به رشد می‌کند و سپس در کورس تغذیه ۱۳/۹ میلی‌متر به مقدار یک می‌رسد. در مورد فشار نوسانی نیز در کورس ۱۷/۲ میلی‌متر چنین اتفاقی می‌افتد.

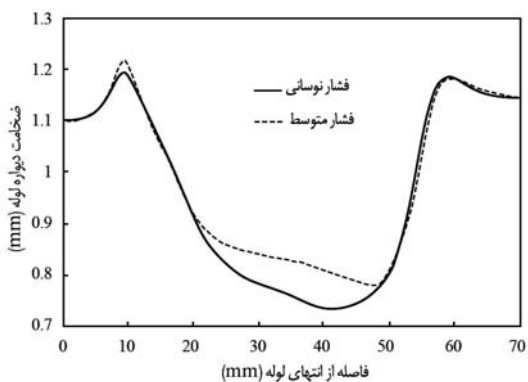


شکل (۱۱) تغییرات متغیر FLD در نقطه میانی لوله در فشار قله، نوسانی و متوسط.

همان‌گونه که گفته شد شکل پذیری در فشار متوسط بدون ایجاد پارگی و چروکیدگی تا پایان به طرز مطلوبی ایجاد می‌شود. به دلیل عدم ایجاد پارگی انتظار می‌رود مسیر FLD لوله، زیر مسیر سایر مسیرهای فشار قرار گیرد و میزان متغیر FLD نیز در تمامی نقاط بحرانی، کمتر باشد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود در وضعیت فشار متوسط تا انتهای فرایند، این مسیر پایین‌تر از سایر مسیرها بوده و شکل دهی لوله به طور مطلوب‌تری انجام می‌پذیرد. در شکل (۱۲) کانتور I در لحظه پارگی در قالب T شکل تحت فشار قله و نوسانی نشان داده شده است.



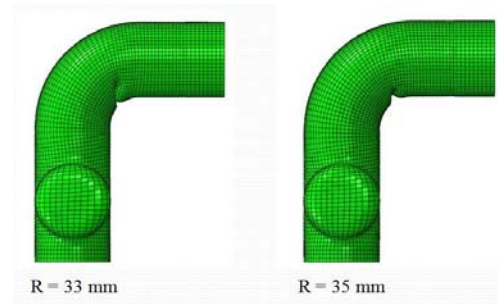
شکل (۱۵) مقایسه سطح مقطع قسمت برآمده لوله در فشار نوسانی و متوسط با شعاع خم ۵۵ میلی متر.



شکل (۱۶) مقایسه توزیع ضخامت در مسیر لبه تقارن میانی لوله در فشار متوسط و نوسانی با شعاع خم ۵۵ میلی متر.

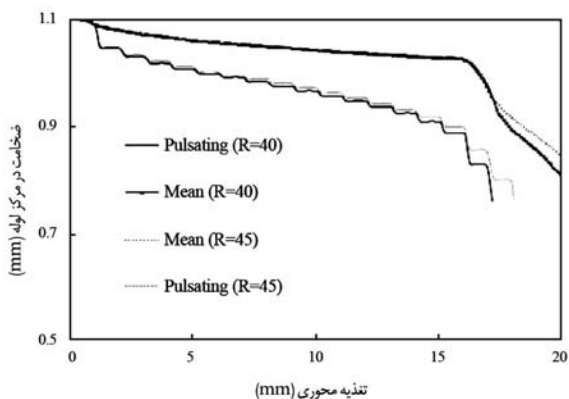
۸- نتایج تجربی و شبیه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ لوله مستقیم در قالب T شکل

در شکل (۱۷) هندسه مقاطع عرضی به دست آمده از روش اجزای محدود با هندسه به دست آمده از آزمایش برای هیدروفرمینگ لوله مستقیم مقایسه شده است [۴]. ملاحظه می‌شود که نتایج محاسبه شده از روش اجزای محدود برای هر دو مسیر فشار به خوبی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. شکل (۱۸) تغییرات ضخامت را در مرکز لوله برحسب جابه‌جایی سنبه برای فشار قله و نوسانی نشان می‌دهد.



شکل (۱۳) عدم شکل‌پذیری و ایجاد چروکیدگی در مدل شبیه‌سازی تحت فشار متوسط در شعاع‌های خم ۳۳ و ۳۵ میلی متر.

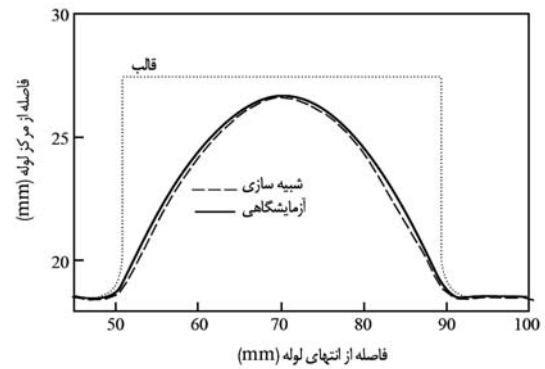
در شعاع‌های خم بالاتر از قطر لوله مانند $R = 40/45 mm$ ، مطابق شکل (۱۴) بهبود شکل‌پذیری و توزیع ضخامت در فشار متوسط و نوسانی به چشم می‌خورد. نمونه‌های شبیه‌سازی شده تحت فشار نوسانی با شعاع خم ۴۰ و ۴۵ میلی متر به ترتیب در کورس تغذیه $17/3$ و $18/1$ میلی متر دچار پارگی می‌شوند. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش شعاع خم، شبیه‌سازی با فشار نوسانی نیز به شکل دهی مطلوب لوله منجر شود. در شعاع‌های خم بالاتر، مانند $R = 55 mm$ ، شکل‌پذیری به‌طور مطلوب و بدون وقوع پارگی صورت می‌پذیرد. به دلیل سهولت تغذیه محوری، فشار نوسانی باعث بهبود شکل‌پذیری و پرشدگی بهتر گوشه‌های قالب نسبت به فشار متوسط می‌شود. به طوری که مطابق شکل‌های (۱۵) و (۱۶) فشار متوسط، توزیع ضخامت بهتر و فشار نوسانی، پرشدگی بهتر گوشه قالب را به همراه دارد.



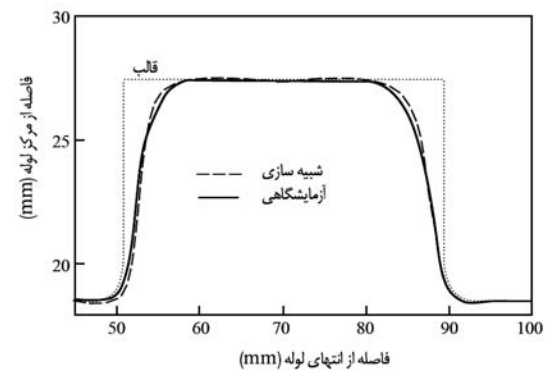
شکل (۱۴) توزیع ضخامت در نقطه مرکز لوله تحت فشارهای نوسانی و متوسط برای شعاع‌های خم ۴۰ و ۴۵ میلی متر.

حالت فشار قله و فشار نوسانی است. همچنین در این حالت توزیع یکنواخت ضخامت در قسمت برآمده لوله، عدم ایجاد چروکیدگی در خم لوله و عدم نازک‌شدگی در یک قسمت خاص را به همراه دارد. در عوض در شعاع‌های خم بالاتر از قطر لوله، فشار نوسانی بهتر از مسیر فشارهای دیگر ظاهر می‌شود و استفاده از این فشار در فرایند، پرشدن بهتر گوشه‌های قالب را به همراه دارد. فرایند تا پایان ادامه یافته و شکل‌پذیری مطلوبی ایجاد می‌شود.

از معیار FLD برای پیش‌بینی پارگی در فرایند در فشارهای نوسانی و غیر نوسانی استفاده شد. دیده شد که این معیار نتایج قابل قبولی را در پیش‌بینی زمان و محل ایجاد پارگی ارائه می‌دهد. در هر دو مسیر فشار، معیار FLD انطباق خوبی را با نتایج تجربی لوله‌های مستقیم نشان داد. با بررسی کانتور متغیر FLD و کانتور توزیع ضخامت دیده شد که احتمال پارگی در محلی بیشتر است که لوله ضخامت کمتری دارد.

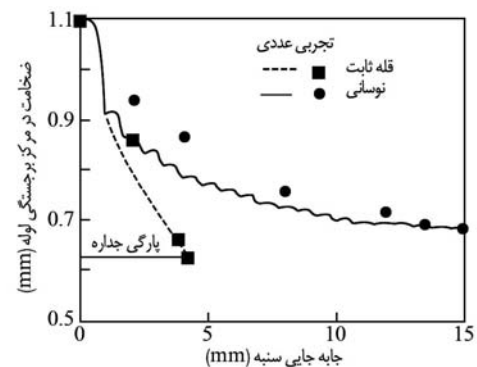


(الف) فشار ثابت



(ب) فشار نوسانی

شکل (۱۷) مقایسه هندسه‌های مقاطع عرضی بدست آمده از روش اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی [۴].



شکل (۱۸) تغییرات ضخامت در مرکز برجستگی لوله در فرایند [۴].

۹- نتیجه گیری

در این مقاله، شکل‌دهی در فرایند هیدروفورمینگ لوله خمیده در قالب T شکل شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی به روش اجزای محدود و در مسیر فشار نوسانی و غیر نوسانی انجام گرفت. مشاهده شد که در لوله‌هایی با شعاع خم در حدود اندازه قطر لوله، شکل‌پذیری در فشار متوسط بهتر از

فهرست علائم

E	مدول الاستیک
ν	ضریب پواسون
S_y	تنش تسلیم
μ	ضریب اصطکاک
D	قطر
t	ضخامت
V	سرعت
ϵ	کرنش حقیقی
σ	تنش حقیقی
P	فشار
S	جابجایی سنبه
$\&$	نرخ کرنش
β	نسبت کرنش
I	متغیر نمودارهای حد شکل‌دهی
R	شعاع خم

مراجع

- [1] Mac Donald B.J., Hashmi M., Near-Net-Shape Manufacture of Engineering Components using Bulge-Forming Process , *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 120, 2002, pp. 341-347.
- [2] www.opton.co.jp.
- [3] Mori K., Patwari A.U., Maki, S. , Improvement of formability by Oscillation of Internal pressure in pulsating hydroforming of Tube, *Annals of the CIRP*, 53-1 (2004), pp. 215-218.
- [4] Loh-Mousavi M., Bakhshi-Jooybari M., Mori K., Hyashi K., Improvement of formability in T-shape hydroforming of tubes by pulsating pressure, *Key Engineering Materials* , Vol. 222, 2008, pp. 1139-1146.
- [5] Strano M., Jirathearanat S., Altan T. , *Adaptive FEM Simulation for Tube Hydroforming: a Geometry-Based Approach for Wrinkle Detection*, The Ohio State University, Columbus, USA, 2001.
- [6] Trana K. , Finite element simulation of the tube hydroforming process – bending, performing and hydroforming , *Journal of Materials Processing Technology*, 127, 2002, pp. 401–408.
- [7] Loh-Mousavi M. ,Bakhshi-jooybari M., Mori K., Maeno T. , Farzin M., Hosseinipoor S.J. , 3-D Finite element simulation of pulsating free bulge hydroforming of tubes, *Iranian Journal of Science & Technology*, Vol. 32, No. B6, 2008, pp 611-618.
- [8] Kim J., Kim S.W., Song W. J., Kang B. S., Analytical and numerical approach to prediction of forming limit in tube hydroforming , *Int. J. of Mechanical Sciences*, Vol. 47, 2005, pp. 1023-1037.
- [9] Singh H., Fundamentals of hydroforming, Society of Manufacturing Engineers, 2003.