http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

تیر ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ٤ ص‌ص ٤۶-۵۹

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۹/۲۹
تاریخ پذیرش ۹۱/۱۱/٤
ارائه در سایت ۹۲/۲/۳۰

هیدروفرمینگ لوله آلتراسونیک، بررسی تحلیلی و عددی

سید احسان افتخاری شهری[۱]، سید یوسف احمدی بروغنی[۲]، خلیل خلیلی[۳*]، بیم سو کنگ[۴]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند
۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
۴- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه ملی بوسان، کره جنوبی
* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، kkhalili@birjand.ac.ir

چکیده- در فرایند هیدروفرمینگ لوله، جریان نامناسب فلزی ناشی از شرایط اصطکاکی، سبب پر نشدن گوشه‌های قالب و نازک شدگی زیاد نواحی نزدیک به گوشه‌های قالب می‌شود. اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به بدنه قالب می‌تواند شرایط تماسی را بهبود بخشد. مقاله حاضر با هدف بهبود فرایند از لحاظ میزان شکل‌پذیری و همچنین به لحاظ یکنواختی ضخامت دیواره مقطع، به بررسی اثر اعمال ارتعاشات بر بدنه قالب هیدروفرم لوله پرداخته است. ابتدا یک مدل عددی بر اساس روابط هندسی و حالت تنش و کرنش بنا شده است که قادر است ضخامت دیواره و شعاع گوشه لوله را محاسبه نماید. در این مدل اثر ارتعاشات آلتراسونیک به صورت تغییر در شرایط اصطکاکی اعمال می‌شود. با مدل‌سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ آلتراسونیک لوله (فشار داخلی همراه با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک) و مقایسه آن با مدل اجزای محدود همین فرایند در حالت کلاسیک (تنها با فشار داخلی) امکان بررسی میزان بهبود فرایند با استفاده از ارتعاشات قالب فراهم شده است. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک، میزان پرشدگی گوشه‌های قالب افزایش قابل توجهی داشته و ضخامت دیواره لوله نیز یکنواخت‌تر خواهد بود.

کلیدواژگان: هیدروفرمینگ لوله، ارتعاشات آلتراسونیک، پرشدگی گوشه‌های قالب، یکنواختی ضخامت دیواره.

Ultrasonic tube hydroforming, a numerical and analytical study

S. E. Eftekhari Shahri[1], S. Y. Ahmadi Brooghani[2], K. Khalili[3*], B. S. Kang[4]

1- PhD. Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran.
2- Assis. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran.
3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran.
4- Prof., Aerospace Eng., Pusan National Univ., Busan, South Korea.
* P. O. B. 97175.615, Birjand, Iran. kkhalili@birjand.ac.ir

Abstract- In tube hydroforming process, due to friction condition, uniform wall thickness, as well as sharp corners may not be achieved. Use of ultrasonic vibration can improve the contact conditions at the tube-die interface. The current work studies the effect of applying ultrasonic vibration on wall thickness and corner filling of hydroformed tubes. Firstly, a numerical model based on geometric relationships and stress-strain state has been established by which wall thickness and corner radius of hydroformed tubes can be obtained. In this model, the ultrasonic vibrations affect the nonlinear friction conditions at the tube-die interface. By comparing the FEM models of tubes in two cases of with vibration and without vibration, it is possible to investigate the effects of vibration on wall thickness and corner filling. The results indicate superimposing ultrasonic vibrations to the process will increase corner filling ratio of the tube significantly, and more uniform tube wall thickness will be achieved.

Keywords: Tube Hydroforming, Ultrasonic Vibration, Corner Filling Ratio, Uniformity of Wall Thickness.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

۱- مقدمه

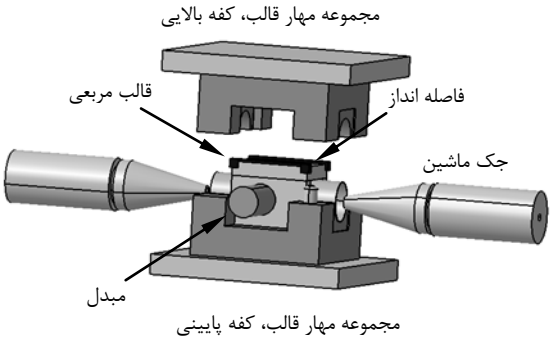
فرایند هیدروفرمینگ لوله فرایندی است که برای تولید قطعات یکپارچه و بدون درز با تعداد مراحل تولید کمتر و خواص مکانیکی مطلوب‌تر در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در این فرایند قطعات با اعمال فشار داخلی سیال شکل می‌گیرند و در بسیاری از قطعات جابجایی محوری که توسط دو جک به دو انتهای لوله وارد می‌شود، سبب تسهیل حرکت فلز می‌شود. با این وجود در برخی از فرایندهای هیدروفرمینگ، همچون قطعات مربعی که در آن از فشار سیال برای تبدیل قطعه‌کار به لوله با سطح مقطع مربعی استفاده می‌شود، جابجایی محوری اعمال نمی‌شود. لذا اصطکاک بین قطعه کار و ابزار، جریان فلزی را بسیار دشوار می‌سازد. اصطکاک بالا و غیریکنواخت ایجاد شده در سطح تماس سبب نازک‌شدگی بیش از حد در گوشه‌های قطعه شده و امکان افزایش فشار برای شکل‌دهی بیشتر و دستیابی به گوشه‌های تیز را ناممکن می‌سازد. از آنجا که بخش عمده‌ای از اصطکاک ایجاد شده ماهیت چسبنده دارد، لذا بهبود شرایط روانکاری که تنها مقدار ضریب اصطکاک لغزشی را کاهش می‌دهد، در فشارهای بالا چندان نمی‌تواند بر بهبود جریان فلزی مؤثر باشد.

برای غلبه بر این مشکلات، روش‌هایی توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است، از جمله تغییر در شرایط اصطکاکی با ایجاد حرکت نسبی بین سطح بیرونی لوله و دیواره قالب برای قطعه با سطح مقطع مربعی [۱] و قطعه لوله‌ای پله‌ای شکل [۲]. اما این روش‌ها عموماً برای هندسه‌های ساده و خاصی تدوین شده‌اند و امکان استفاده از آنها در قطعات پیچیده وجود ندارد. اگر چه در این تحقیق نیز اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر قطعه هیدروفرم مربعی بررسی شده است، اما می‌توان انتظار داشت با اثبات کارایی روش، امکان استفاده از آن برای دیگر قطعات مقدور باشد، بدون آنکه نیاز به تغییری در مکانیزم ماشین یا اصلاح قالب باشد.

شکل‌دهی فلزی آلتراسونیک فرایندی است که در آن علاوه بر بار مورد استفاده در فرایندهای کلاسیک، قالب با فرکانس بسیار بالای ارتعاشی تحریک می‌شود. پیش از این، برخی از محققان ارتعاشات مافوق صوت را در برخی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات مانند کشش عمیق، تست فشار و کشش، کشش سیم و اکستروژن استفاده کرده‌اند [۳-۸]. به عنوان نمونه می‌توان به اعمال ارتعاشات به نگهدارنده ورق و قالب در فرایند کشش عمیق [۳]، استفاده از ارتعاشات محوری و شعاعی در فرایند کشش سیم [۴] و استفاده از ارتعاشات در فرایند فشار [۵]، در فرایند اکستروژن مستقیم [۶]، میکرواکستروژن [۷] و فرایند فشار در ابعاد میکرو [۸] اشاره کرد.

در این تحقیق اثر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به بدنه قالب در فرایند هیدروفرمینگ لوله به صورت عددی و تحلیلی مطالعه شده است. دستاوردهای مطالعات تئوری و تجربی محققان اثرات مفید ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایندهای شکل‌دهی فلزات را نشان می‌دهد. از جمله اثرات ارتعاشات می‌توان به کاهش تنش سیلان و نیروی اصطکاک اشاره کرد که منجر به کاهش نیروی شکل‌دهی مورد نیاز می‌شوند. در مرجع [۹] این اثرات به دو گروه اثرات حجمی و اثرات سطحی تقسیم‌بندی شده است. اثرات سطحی عموماً مرتبط با تغییر در شرایط اصطکاکی در سطح مشترک لوله و قالب می‌باشد و اثرات حجمی شامل اثرات ارتعاشات بر استحکام تسلیم ماده است.

طرح‌واره فرایند هیدروفرمینگ آلتراسونیک در شکل ۱ نشان داده شده است. لوله درون قالب مربعی که هر ضلع آن برابر قطر خارجی لوله است قرار می‌گیرد. این قالب برای تبدیل لوله گرد به مقطع مربعی استفاده می‌شود. جک‌ها لوله را در جهت محوری مقید می‌کنند. سیال هیدرولیک از داخل یکی از جکها وارد لوله می‌شود. قالب مربعی در داخل مجموعه مهار کفشک قرار می‌گیرد و توسط فاصله اندازهای متصل به قالب داخل این مجموعه در هر سه جهت موقعیت دهی می‌شود. از یک جفت میل راهنما برای هم‌راستایی مجموعه مهار کفشک‌ها و یک جفت برای دو نیمه قالب مربعی استفاده می‌شود.



شکل ۱ طرح کلی برای فرایند هیدروفرمینگ لوله آلتزاسونیک

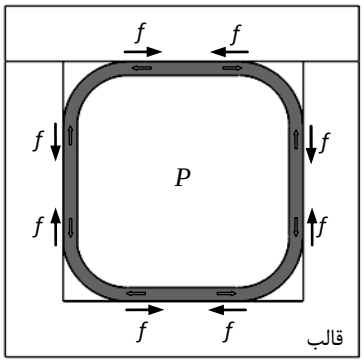
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

از آنجا که قالب در حین فرایند شکل‌دهی لوله، توسط مبدل آلتراسونیک مرتعش می‌شود، هدف از کاربرد فاصله انداز کاهش سطح تماس بین قالب و مجموعه مهار می‌باشد. به جز در محل فاصله‌اندازها، سایر نقاط قالب می‌توانند آزادانه نوسان کنند. مبدل از یک سو به قالب متصل است و از سوی دیگر آن در مجموعه آلتراسونیک مقید می‌باشد. مبدل به دلیل خاصیت پیزو الکتریک، با فرکانس آلتراسونیک تغییر طول می‌دهد و لذا در محل تماس، ارتعاشات را به قالب منتقل می‌کند.

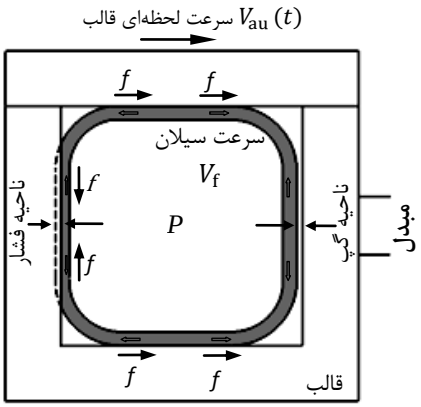
در شکل ۲ نیز فرایند هیدروفرمینگ کلاسیک و آلتراسونیک با هم مقایسه شده است. در فرایند هیدروفرمینگ کلاسیک، لوله اولیه تنها تحت فشار داخلی سیال به شکل حفره قالب هیدروفرم می‌شود، همان‌طور که در شکل ۲- الف نشان داده شده است. مطابق این شکل، نیروی اصطکاک قالب در هر یک از اضلاع در خلاف جهت حرکت لوله وارد شده و از جریان ماده ممانعت می‌کند.

در این تحقیق نوسانات به صورت شعاعی به مجموعه قالب وارد می‌شوند و همان‌گونه که در شکل ۲- ب نشان داده شده است، اثر اصطکاکی نوسانات در اضلاع قالب متفاوت خواهد بود. در دو ضلع عمود بر جهت نوسان قالب، فرکانس بسیار بالا و دامنه میکرونی قالب مرتعش سبب ایجاد درزهای محلی بسیار کوچک (گپ) در سطح مشترک لوله و قالب در یک زمان بسیار کوتاه می‌شود که در شکل ۲- ب به صورت اغراق‌آمیز نشان داده شده است. پس از حرکت قالب به سمت راست و ایجاد جدایشی در سطح لوله و قالب، اگر چه لوله تحت فشار داخلی است، اما به دلیل اینرسی ماده لوله، نمی‌تواند بلافاصله از حرکت قالب پیروی کند. بنابراین برای مدت زمان بسیار کوتاهی در سطح جدایش گپ ایجاد می‌شود. می‌توان انتظار داشت که در مدت زمان این گپ، مواد لوله تحت کشش ناشی از فشار داخلی، بسیار راحتتر جریان پیدا می‌کنند. در سمت چپ لوله نیز اگرچه قالب در حال فشردگی لوله است اما فشار آلتراسونیک در برابر فشار داخلی ناچیز است، بنابراین تأثیر چندانی بر روی شرایط اصطکاکی ندارد.

در اضلاع موازی با جهت نوسان، به دلیل تأثیر جهت و سرعت ارتعاشات قالب بر نیروی اصطکاک، سینماتیک لغزش در طول نوسان مرتباً تغییر می‌کند. مشابه آنچه که در مرجع [۶] برای فرایند اکستروژن بیان شده، سرعت نسبی بین لوله و دیواره قالب (V_{rel}) توسط سرعت سیلان ماده لوله (V_{f}) و سرعت ارتعاش قالب ($V_{\mathrm{au}}(t)$) تعریف می‌شود. به عبارت دیگر $[\vec{V}_{rel} = \vec{V}_{\mathrm{f}} - \vec{V}_{\mathrm{au}}(t)]$.



الف- هیدروفرمینگ کلاسیک



ب- هیدروفرمینگ آلتراسونیک

شکل ۲ طرح کلی برای فرایند هیدروفرمینگ لوله با مقطع مربعی در حالت کلاسیک و آلتراسونیک

در شکل۲- ب وضعیت لوله و قالب در قسمتی از سیکل ارتعاشی که قالب به سمت راست در حرکت است، نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در نیمه سمت چپ قالب که جهت سیلان ماده در خلاف جهت حرکت لحظه‌ای قالب است، نیروی اصطکاک دیواره قالب مشابه هیدروفرمینگ کلاسیک با حرکت لوله مقابله می‌کند، اما در مورد نیمه سمت راست چنانچه سرعت خطی حرکت نوسانی قالب از سرعت حرکت دیواره لوله روی سطح قالب بیشتر باشد، یعنی $V_{\mathrm{au}}(t) > V_{\mathrm{f}}$، جهت سرعت نسبی لوله نسبت به قالب (V_{rel}) در شکل ۲- ب به سمت چپ بوده و لذا در این حالت نیروی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

اصطکاک قالب در جهت سیلان اعمال شده و به شکل‌دهی کمک می‌کند. از آنجا که قالب نوسان می‌کند، بنابراین در نیمه دیگر دوره تناوب، قالب به سمت چپ حرکت خواهد کرد و در این حالت شرایط جدید اصطکاک، سبب بهبود شکل‌دهی در نیمه سمت چپ لوله می‌شود. در نتیجه اثرات اصطکاکی ارتعاشات به دو صورت متفاوت ظاهر شده است.

با این که در بیشتر تحقیقات به کاهش نیروی اصطکاک تحت تأثیر ارتعاش توجه شده است[۳-۸]، نتایج برخی تحقیقات در زمینه فرایندهای آلتراسونیک که در [۱۰،۱۱] به آن اشاره شده، نشان می‌دهد استفاده از ارتعاشات در حین اعمال نیروهای شکل‌دهی، همچنین سبب کاهش استحکام تسلیم ماده می‌شود.

اثر انرژی آلتراسونیک در کاهش استحکام تسلیم ماده مشابه اثر نرم‌کنندگی حرارتی است [۱۱]. با این وجود نتایج تحقیقات عملی در زمینه فرایندهای آلتراسونیک در [۱۲-۱۴] نشان داده که انرژی مورد نیاز برای تولید مقدار مشابه نرم‌کنندگی $۱۰^{۷}$ برابر کمتر از انرژی حرارتی مورد نیاز است. براساس مرجع [۱۰]، این کاهش به آن دلیل است که انرژی آلتراسونیک فقط در محل‌های موضعی جذب می‌شود، مانند جاهای خالی و نابجایی‌ها، در حالی که انرژی حرارتی در کل ماده جذب می‌شود. در این تحقیق، به منظور بررسی اثرات اصطکاک و اثرات نرم‌کنندگی ارتعاشات، مدل تحلیلی و مدل اجزای محدود توسعه داده شده است تا با مقایسه نتایج حاصل، اثرات ارتعاشات بر هیدروفرمینگ ارزیابی شود.

۲- مدل تحلیلی

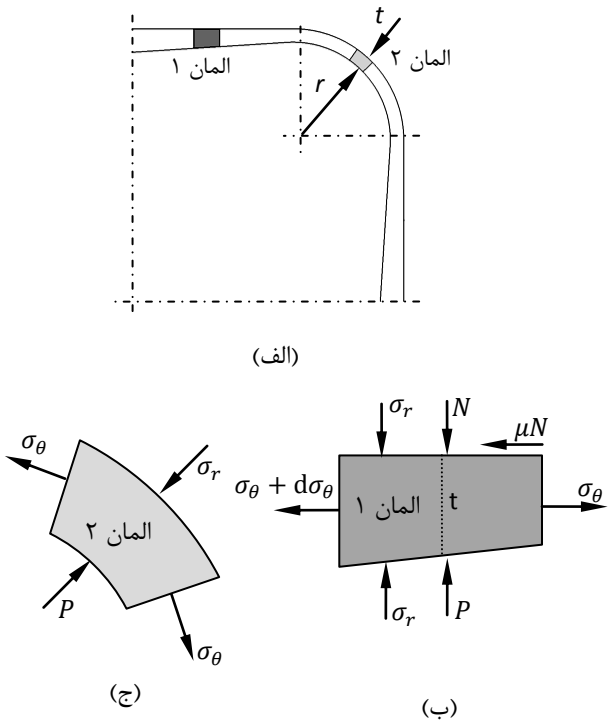
یک مدل تحلیلی برای پیش بینی میزان تغییر شکل در فرایند هیدروفرمینگ لوله با سطح مقطع مربعی در حالات کلاسیک و آلتراسونیک توسعه داده شده است. در استخراج این معادلات، فرضیاتی به کار گرفته شده که از جمله مهمترین آنها عبارتند از:

- لوله با دیواره نازک و با مقطع اولیه کاملاً دایروی است.
- ماده همسانگرد بوده و از معیار تسلیم فن میزز تبعیت می‌کند.
- لوله طویل بوده و میزان تغییر شکل لوله در جهت محوری ناچیز در نظر گرفته شده است. بنابراین تغییر شکل پلاستیک لوله تحت شرایط کرنش صفحه‌ای است.
- قالب به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته شده، بنابراین همه نقاط آن در حین نوسان جابجایی یکسان دارند.
- از مقاومت خمشی لوله در برابر شکل‌دهی صرف نظر شده است.

در حین انبساط لوله در قالب مربعی، دو ناحیه متفاوت در لوله شکل می‌گیرد. ناحیهٔ اول ناحیه مستقیم یا تماسی است که دارای ضخامت متغیر می‌باشد و دومی ناحیه انبساط آزاد است که فرض می‌شود در مدت فرایند به صورت دایروی باقی می‌ماند. این دو ناحیه در شکل ۳- الف نشان داده شده است.

دستگاه مختصات استوانه‌ای برای بیان مسأله استفاده می‌شود. سه جهت اصلی برای لوله عبارتند از جهت اول یا پیرامونی، جهت دوم یا شعاعی و جهت سوم یا محوری که در این تحقیق به ترتیب با علامت θ، r و z نشان داده شده‌اند.

برای تبیین یک مدل ریاضی، ابتدا وضعیت تنش و کرنش در دو ناحیه لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد و تنش و کرنش معادل برای هر ناحیه استخراج می‌شود (شکل ۳). در شکل ۳- ب حالت تنش یک جزء کوچک در ناحیه تماسی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، المان تحت فشار داخلی (P)، نیروی سطح (N)، تنش شعاعی (σ_r)، تنش محیطی (σ_θ) قرار دارد و تنش اصطکاکی مماسی (μN) نیز از حرکت ماده ممانعت می‌کند.



شکل ۳ الف- دو ناحیه متفاوت لوله در مدت انبساط و حالت تنش در ب- یک المان در منطقه تماسی ج- یک المان در منطقه انبساط آزاد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

نیروی سطح قالب در تعادل هستند، یعنی $P = N$. کرنش‌ها و تنش‌های اصلی در این ناحیه بر اساس جهات محورهای مختصات لوله، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس فرضیات مسأله، تغییر شکل به صورت کرنش صفحه‌ای است.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = -\varepsilon_r \, , \varepsilon_2 = \varepsilon_r = \ln\frac{t}{t_0} \, , \varepsilon_3 = \varepsilon_z = 0$$
$$\sigma_1 = \sigma_\theta \, , \sigma_2 = \sigma_r = -P \, ,$$
$$\sigma_3 = \sigma_z = \frac{1}{2}\,(\sigma_\theta + \sigma_r) = \frac{1}{2}\,(\sigma_\theta - P) \qquad (۱)$$

که در این رابطه $\sigma_1 \, , \sigma_2 \, , \sigma_3$ تنش‌های اصلی و $\varepsilon_1 \, , \varepsilon_2 \, , \varepsilon_3$ کرنش‌های اصلی هستند. t_0 ضخامت اولیه و t ضخامت لحظه‌ای لوله است که در نقاط مختلف سطح مقطع متفاوت می‌باشد. تنش و کرنش مؤثر فن میزز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}}\,\varepsilon_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}}(-\,\varepsilon_r) = \frac{2}{\sqrt{3}}\,\ln\frac{t_0}{t}$$
$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r) = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_\theta + P) \qquad (۲)$$

در شکل ۳-ج حالت تنش برای یک المان در منطقه انبساط آزاد نشان داده شده است. فرض شده است ضخامت در کل این ناحیه ثابت و برابر ضخامت در انتهای ناحیه تماسی است، لذا حالت تنش و کرنش نیز در این ناحیه یکسان خواهد بود. نحوه محاسبه کرنش مشابه ناحیه تماسی است، اما با توجه به ضخامت کم لوله و به منظور ساده‌سازی، تنش شعاعی در این ناحیه برابر میانگین مقادیر تنش در سطوح داخلی و خارجی در نظر گرفته می‌شود. لذا تنش‌های اصلی برابر است با:

$$\sigma_1 = \sigma_\theta \, , \sigma_2 = \sigma_r = \frac{-P + 0}{2} = \frac{-P}{2} \, ,$$
$$\sigma_3 = \sigma_z = \frac{1}{2}\,(\sigma_\theta + \sigma_r) = \frac{1}{2}\left(\sigma_\theta - \frac{P}{2}\right) \qquad (۳)$$

و تنش مؤثر فن میزز برای این ناحیه برابر است با:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r) = \frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sigma_\theta + \frac{P}{2}\right) \qquad (۴)$$

همان‌گونه که قبلاً عنوان شد، با افزایش فشار در حین فرایند، شرایط اصطکاک چسبنده بر قسمت زیادی از دیواره لوله حاکم خواهد شد. بنابراین در مدل تحلیلی باید شرایط اصطکاکی به صورت لغزنده- چسبنده لحاظ شود و منطقه با اصطکاک چسبنده از قسمت لغزنده متمایز شود. یک مدل با اصطکاک لغزنده- چسبنده در فرایند هیدروفرمینگ کلاسیک با مقطع مربعی در مرجع [۱۵] ارایه شده است. مدل تحلیلی هیدروفرمینگ آلتراسونیک بر اساس این مدل بنا شده است، که در اینجا به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

در این مدل انبساط لوله، به صورت تعداد بسیار زیادی از گام‌های کوچک فرایند در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴- الف)، که میزان تغییر شکل لوله و وضعیت قالب مرتعش در هر گام نسبت به نمو فشار ΔP معین می‌شود. الگوریتم حل مساله برای بدست آوردن میزان تغییر شکل در شکل ۵ ارایه شده است.

ابتدا داده‌های مسأله شامل داده‌های فرایند (فشار نهایی P_{final}، فرکانس F و ضریب اصطکاک μ)، داده‌های هندسی (شعاع اولیه R_0 و ضخامت اولیه t_0) و داده‌های مواد اولیه (ضریب کار سختی K و توان کارسختی n) وارد برنامه می‌شوند.

پس از آن مقادیر نموی افزایشی فشار ΔP و تعداد گام‌های فرایند ni محاسبه می‌شود. میزان افزایش فشار در هر گام، متناسب با فشار نهایی و فرکانس ارتعاش اعمالی انتخاب می‌شود. نحوه اعمال ارتعاش در مدل به صورت گامهای متوالی تماس و جدایش تعریف می‌شود. برای هر ارتعاش کامل قالب دو گام در نظر گرفته می‌شود، گام اول مربوط به نیمه اول زمان تناوب است که قالب کاملا در تماس با لوله است و در گام بعدی، در تمام فصل مشترک گپ ایجاد می‌شود. چنانچه زمان انجام فرایند ۱s در نظر گرفته شود، تعداد گامهای فرایند و مقدار نموی افزایشی فشار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ni = 2 \times F \, , \quad \Delta P = \frac{P_{\text{final}}}{ni} \qquad (۵)$$

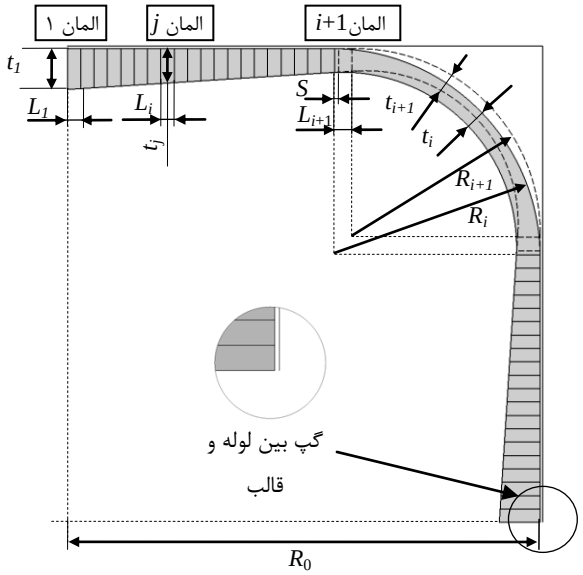
برای به دست آوردن مقادیر اولیه‌ای برای متغیرها، ابتدا تغییر شکل لوله پس از اولین مرحله شکل‌دهی محاسبه می‌شود و سپس تحلیل برای مراحل میانی فرایند ادامه می‌یابد. از آنجا که با توجه به فرض همسانگردی لوله و یکسان بودن شرایط مرزی در هر دو ضلع قالب، طول ناحیه تماسی در هر دو جهت، یعنی در مجاورت هر دو ضلع قالب در شکل ۴- الف برابر می‌باشد، لذا ناحیه انبساط آزاد در گوشه قالب همواره بصورت یک کمان دایره باقی می‌ماند.

با توجه به اینکه نسبت ضخامت به قطر لوله کمتر از ۰/۱ می‌باشد، تنش محیطی بصورت تابعی از فشار داخلی بر اساس تئوری دیواره نازک محاسبه می‌شود [۱۶]. در این تحلیل، از رفتار الاستیک ماده صرف‌نظر شده است.

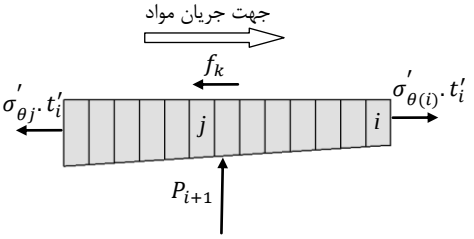
$$\sigma_\theta = \frac{(R - t)P}{t} \qquad (۶)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

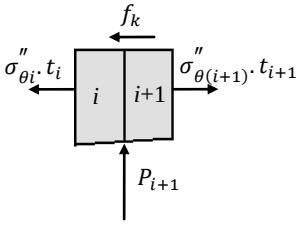
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]



الف- مدل هیدروفرمینگ آلتراسونیک



ب- حالت تنش در المان اختیاری j در منطقه تماس



ج- حالت تنش در المانهای i و $i+1$

شکل ۴ تحلیل مدل هیدروفرمینگ آلتراسونیک با تقسیم به گام‌های بسیار کوچک با نموی افزایش فشار ΔP

که در این فرمول R شعاع بیرونی لوله است. فشار داخلی لوله را می توان با جایگزینی تنش محیطی از رابطه ۶ در رابطه ۴ بدست آورد:

$$P = \frac{4}{\sqrt{3}}\,\bar{\sigma}\,\frac{t}{2R-t} \qquad (۷)$$

با فرض اینکه تغییر شکل پلاستیک ماده لوله از قانون توانی به صورت $\bar{\sigma}_f = K\bar{\varepsilon}^n$ پیروی می‌کند، چنانچه در رابطه ۷ مقدار تنش مؤثر سیلان $\bar{\sigma}_f$ قرار داده شود، فشار مورد نیاز برای تغییر شکل پلاستیک لوله P_f به دست خواهد آمد:

$$P_f = \frac{4}{\sqrt{3}}\,K\bar{\varepsilon}^n\,\frac{t}{2R-t} \qquad (۸)$$

در اولین مرحله شکل دهی با افزایش فشار داخلی به میزان ΔP اولین المان تماسی ایجاد می‌شود. این المان با طول L_1 و ضخامت t_1 در نظرگرفته می‌شود که با ایجاد این المان، شعاع کمان جدید برابر خواهد بود با $R_1 = R_0 - L_1$. با توجه به عدم تغییر طول لوله در جهت محوری، سطح مقطع ثابت می‌باشد. با برابر قرار دادن سطح مقطع پس از شکل‌گیری اولین المان با سطح مقطع اولیه، ضخامت کمان بدست می‌آید.

$$t_{f1} = R_1 + \frac{4}{\pi}L_1 - \sqrt{\left(R_1 + \frac{4}{\pi}L_1\right)^2 - \frac{4}{\pi}A_0} \qquad (۹)$$

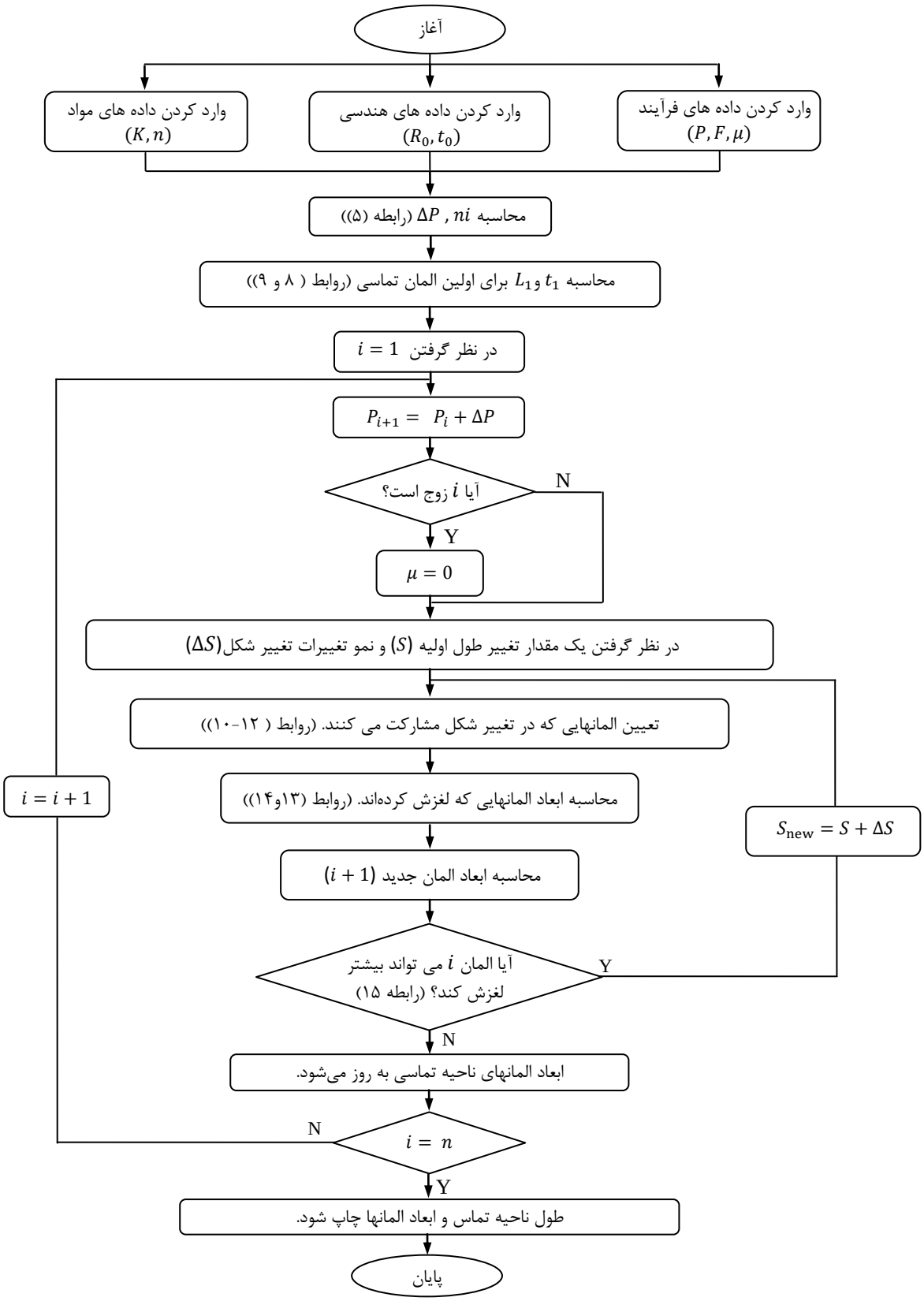
که t_{f1} برابر شعاع کمان در اولین مرحله شکل‌دهی است و با ضخامت اولین المان تماسی t_1 برابر است. میزان L_1 از یک حدس اولیه شروع می‌شود و به صورت متناوب، مقدار فشار اولیه در نظر گرفته شده $P_1 = \Delta P$ با فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی در اولین مرحله P_{1f} که از رابطه ۸ به دست آمده است مقایسه می‌شود. میزان حدس اولیه برای L_1 باید به گونه‌ای اصلاح شود که این دو فشار با هم برابر شوند. به عبارت دیگر فشار در این مرحله با فشار مورد نیاز برای دستیابی به کرنش معین، باید برابر شود، که این کار با اصلاح L_1 انجام می‌شود. با حل مسأله برای المان تماسی اول، مقادیر اولیه L_1 و t_1 محاسبه می‌شوند که در ادامه به عنوان مقادیر اولیه در حل مبتنی بر تکرار استفاده می‌شوند.

با افزایش فشار، شکل‌دهی در مراحل بعد ادامه می‌یابد. فرض می‌شود که فرایند انبساط برای مرحلهٔ iام تکمیل شده و برای گام بعد فشار داخلی بصورت $P_{i+1} = P_i + \Delta P$ انتخاب می‌شود. در هر نمو فشار، یک المان تماسی جدید از منطقه انبساط آزاد شکل می‌گیرد. علاوه بر آن المان‌های تماسی که در مراحل پیش شکل گرفته‌اند نیز می‌توانند تحت تأثیر نیروی کششی که از منطقه انبساط آزاد اعمال می‌شود، بلغزند و تغییر طول دهند.

میزان افزایش طول ناحیه تماسی در این مرحله شکل‌دهی (مرحله i)، و تحت تأثیر فشار اعمالی در این مرحله به صورت پارامتر S تخمین زده می‌شود.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]



شکل ۵ الگوریتم حل مدل هیدروفرمینگ لوله ارتعاشی در قالب مربعی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

مقدار S نیز از یک حدس اولیه شروع شده و با گام‌های کوچک افزایش می‌یابد و در هر مرحله صحت آن در انتهای الگوریتم بررسی می‌شود. در هر گام باید تعیین شود چه المان‌هایی در شکل‌دهی مشارکت می‌کنند، که این کار با بررسی المان اختیاری j در ناحیه تماسی انجام می‌شود. چنانچه تنش مؤثر فن میزز در هر المان از تنش حد سیلان ماده آن برای یک کرنش مشخص بیشتر باشد، المان افزایش طول خواهد داد. بنابراین تنش محیطی و مؤثر باید برای همه المانهای تماسی قبل از المان i محاسبه گردند. میزان تنش محیطی در المان j با نوشتن تعادل نیرویی برای المانهای در فاصله j تا i مطابق شکل ۴- ب انجام می‌شود. بر اساس مرجع [۱۵] چنانچه المانی تحت فشار داخلی تغییر شکل دهد، تمام المانهای واقع در سمت گوشه آن المان نیز لغزش خواهند کرد.

$$\sigma_{\theta j} = \sigma_{\theta(i)} \frac{t_i}{t_j} - \frac{1}{t_j} \sum_{l=j}^{i} \mu L_l P_{i+1} \quad (1 \le j \le i) \qquad (۱۰)$$

عبارت آخر در معادله بالا مقاومت اصطکاکی است که توسط همه المانهای واقع در سمت گوشه المان j در شکل ۴- ب ایجاد می‌شود. در گام جدایش در فرایند آلتراسونیک، با توجه به فرض عدم تماس لوله و قالب، ضریب اصطکاک برابر صفر بوده و این عبارت حذف می‌شود. از آنجا که المان j در ناحیه تماسی است، از رابطه ۲ میزان تنش مؤثر وارد بر المان j برابر است با:

$$\bar{\sigma}_j = \frac{\sqrt{3}}{2}\left(\sigma_{\theta j} + P_{i+1}\right) \qquad (1 \le j \le i) \qquad (۱۱)$$

این تنش با تنش حد سیلان برای المان که بر اساس قانون توانی و به صورت زیر بدست می‌آید، مقایسه می‌شود.

$$\bar{\sigma}_{fj} = K\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln\frac{t_0}{t_j}\right)^n \qquad (۱۲)$$

عبارت داخل پرانتز معادل کرنش مؤثر فون میزز است که از رابطه ۲ به دست می‌آید. اگر $\bar{\sigma}_j \ge \bar{\sigma}_{fj}$ باشد، المان j تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد و طول آن افزایش می‌یابد.

پس از آن ابعاد المانهایی که تغییر شکل داده‌اند محاسبه می‌شود. فرض می‌شود که تغییر طول هر المان شکل‌پذیر متناسب با طول آن قبل از تغییر طول است؛ به عبارت دیگر کرنش در تمام المانهای شکل‌پذیر یکسان است. با این فرض میزان تغییر طول هر المان برابر است با نسبت طول آن المان قبل از تغییر شکل، به طول تمامی المان‌هایی که در تغییر شکل مشارکت می‌کنند (نسبت b). لذا داریم:

$$L_{2j} = L_{1j} + b.S \quad (1 \le j \le i) \qquad (۱۳)$$

که L_{2j} طول المان j پس از انبساط است. از آنجا که مساحت کل سطح مقطع و تعداد المان‌ها بدون تغییر می‌باشد، ضخامت المان پس از تغییر شکل برابر است با:

$$t_{2j} = \frac{t_{1j} L_{1j}}{L_{2j}} \quad (1 \le j \le i) \qquad (۱۴)$$

در مرحلهٔ $i+1$ المان جدیدی با طول L_{i+1} شکل می‌گیرد. شعاع گوشه جدید برابر $R_{i+1} = R_i - L_{i+1} - S$ می‌باشد. در اینجا نیز مشابه با رابطه (۹) شرایط مساحت مقطع ثابت برای تعیین ضخامت المان جدید $i+1$ استفاده می‌شود. اندازه طول المان L_{i+1} نیز مشابه با المان L_1 با یک حدس اولیه شروع شده و تا برابر شدن فشار داخلی این مرحله P_{i+1} با فشار سیلان مورد نیاز در این مرحله $P_{(i+1)f}$ مرتباً اصلاح می‌شود.

پس از آن صحت S بررسی می‌شود. برای تایید، باید مطمئن شد که با مقدار در نظر گرفته شده برای S هیچ المانی افزایش طول بیشتری نخواهد داشت. بدین منظور لغزش المان i ارزیابی می‌شود؛ چرا که همان‌طور که عنوان شد، چنان‌چه المانی بلغزد، المانهای سمت گوشه آن المان نیز خواهند لغزید. میزان تنش محیطی برای المان i با بررسی تعادل نیروها برای دو المان آخر در جهت محیطی بصورت زیر بدست می‌آید (شکل ۴- ج).

$$\sigma_{\theta i} = \frac{t_{i+1}}{t_i}\sigma_{\theta(i+1)} - \frac{1}{t_i}\mu\left(L_i + L_{i+1}\right) P_{i+1} \qquad (۱۵)$$

سپس تنش معادل فون میزز و تنش حد سیلان، مشابه با محاسبات المان اول، برای المان i محاسبه می‌شود. چنانچه تنش معادل از تنش حد سیلان در این المان بیشتر شود، گواه آن است که المان i با تنش اعمالی دچار تغییر شکل پلاستیک بیشتری خواهد شد، لذا میزان S در نظر گرفته شده باید متناوباً اصلاح شود (افزایش یابد) تا مقدار تنش مؤثر وارد بر این المان پایین‌تر از حد تسلیم آن قرار گیرد.

با تعیین مقدار نهایی S مقادیر جدید المان‌های تماسی برای استفاده در مرحله بعد به روز می‌شود. پس از آن فرایند حل در گام بعدی با افزایش فشار ΔP ادامه خواهد یافت، تا زمانی که فشار به فشار نهایی برسد. همان‌گونه که اشاره شد، اعمال

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

ارتعاشات آلتراسونیک به صورت گام‌های جدایش و تماس است که در گام جدایش ضریب اصطکاک صفر می‌باشد.

برای حل این مدل تحلیلی یک کد عددی به زبان برنامه‌نویسی متلب[1] توسعه یافته است. این برنامه میزان تغییر شکل و به عبارتی شعاع گوشه، ضخامت در نقاط مختلف دیواره و توزیع تنش و کرنش تحت یک فشار معین برای حالت کلاسیک و آلتراسونیک را محاسبه می‌کند.

مدل تحلیلی ارایه شده برای هیدروفرمینگ آلتراسونیک، برای درک بهتر از مکانیزم تغییر شکل در فرایند هیدروفرمینگ لوله در قالب با مقطع مربعی توسعه داده شده است. در این حالت، ارتعاشات قالب سبب ایجاد پیچیدگی‌هایی در شکل‌دهی می‌شود که لحاظ آنها در یک مدل تحلیلی امکان‌پذیر نیست. لذا در مدل تحلیلی فرایند آلتراسونیک از ساده‌سازی‌های بیشتری نسبت به حالت کلاسیک استفاده شده است. در این مدل از دو پارامتر ارتعاشات، یعنی فرکانس و دامنه، تنها اثر فرکانس درنظر گرفته شده است. علاوه بر آن، تنها به اثر ارتعاشات در تشکیل گپ در سطح تماس توجه شده است. اما از آنجا که این تحقیق یک مطالعه اولیه در زمینه هیدروفرمینگ آلتراسونیک می‌باشد، توسعه مدل تحلیلی و قیاس نتایج آن با مدل اجزای محدود، به مطالعه بهتر اثر ارتعاشات بر فرایند شکل‌دهی کمک می‌کند.

۳- مدل اجزای محدود

برای مدل‌سازی فرایند از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس[2] و به صورت حل صریح[3] استفاده شده است. فشار سیال داخل لوله اعمال می‌شود و قالب مربعی توسط مجموعه گیره‌بندی قالب مهار می‌شود.

با توجه به اینکه فرایند کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده و قالب صلب می‌باشد، لذا مدل اجزای محدود متقارن می‌باشد و تنها یک چهارم قالب و لوله به صورت دوبعدی مدل‌سازی شده است. مدل اجزای محدود از سه قسمت تشکیل شده است، قالب و صفحات گیره‌بندی که صلب می‌باشند و لوله که شکل‌پذیر بوده و به صورت صفحه‌ای مدل‌سازی شده است. قطر خارجی و ضخامت لوله اولیه به ترتیب برابر ۲۶ و ۰/۵ میلی متر در نظر گرفته شده است.

ماده لوله که برای شبیه‌سازی استفاده شده فولاد SS316L بوده که قبلاً توسط محققان در مرجع [۲] برای هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استفاده شده است. خواص مکانیکی این ماده در جدول ۱ بیان شده است. رفتار پلاستیک ماده از قانون توانی به صورت $\sigma = 1415\varepsilon^{0.47}$ پیروی کند.

المان خطی CPE4R به صورت کرنش صفحه‌ای برای مش‌بندی لوله استفاده شده است. با توجه به شرایط پیچیده غیرخطی تماسی به منظور همگرایی مسأله و دستیابی به حل دقیق ۶ المان در راستای ضخامت لوله مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که زمان حل در روش صریح به شدت وابسته به اندازه المان است، اندازه المانها به صورت سعی و خطا تا اندازه‌ای کوچک شده، که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در دقت نتایج نداشته باشد. برای جلوگیری از خرابی مش‌ها در تغییر شکل زیاد، از روش مش انطباق پذیر[4] استفاده شده است.

در فرایند هیدروفرمینگ آلتراسونیک، فشار داخلی و ارتعاش قالب به صورت همزمان اعمال می‌شود. در این حالت مطابق با مدل تحلیلی فرض می‌شود تمام نقاط قالب در حین ارتعاش جابجایی یکسان دارند. مطابق شکل ۶- الف مبدل به قالب متصل است و سبب ارتعاش قالب در جهت محور افقی می‌شود. در جهت قائم نیز قالب توسط فشار گیره‌بندی مجموعه مهار کفشک‌ها مقید می‌شود. همان‌گونه که قبلاً عنوان شد، از آنجا که اصطکاک بین قالب مربعی و مجموعه مهار قالب، از حرکت ارتعاشی قالب ممانعت می‌کند، دلیل استفاده از فاصله‌انداز، کاهش سطح تماس قالب و این مجموعه می‌باشد. مشابه با مرجع [۱۷] تعداد زیادی از مراحل کوچک جابجایی- زمان در شبیه‌سازی استفاده شده است. جابجایی قالب در مدل اجزای محدود به شکل سینوسی بوده که در شکل ۶- ب به صورت نمونه برای دامنه ۳ میکرومتر و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز نشان داده شده است.

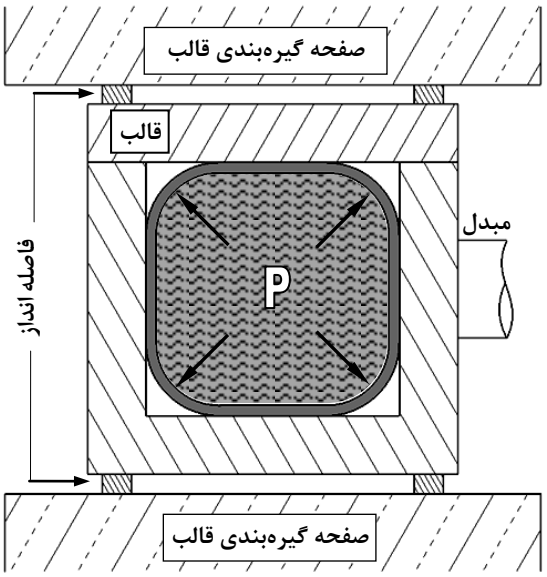
جدول ۱ خواص مکانیکی لوله اولیه در شبیه‌سازی [۲]

تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (MPa)	ضریب پواسان	چگالی (kgm^{-3})
۲۶۸	۲۱۰	۰/۳	۷۸۰۰

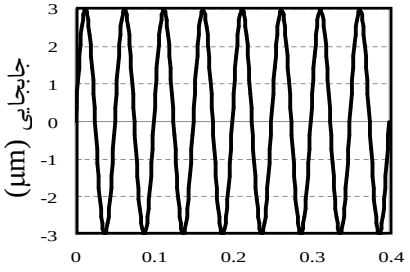
1. Matlab
2. ABAQUS
3. Explicit Solution
4. Adaptive Mesh

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]



(الف)



(ب)

شکل ۶ الف- تصویر کلی از هیدروفرمینگ لوله آلتراسونیک در قالب مربعی ب- جابجایی سینوسی قالب با فرکانس ۲۰kHz و دامنه ۳μm

محدوده تغییر پارامترهای نوسانی، یعنی فرکانس و دامنه، بر اساس تحقیقات انجام شده در زمینه فرایندهای شکل‌دهی آلتراسونیک انتخاب شده است. محدوده معمول فرکانس مورد استفاده توسط پژوهشگران عموماً بین ۱۹تا ۲۲ کیلوهرتز است و دامنه مورد استفاده نیز زیر ۱۰ میکرومتر می‌باشد [۳-۸]. پس از آن با تغییر دامنه نوسان، به صورت سعی و خطا اثر تغییر دامنه ارتعاش بررسی شده است. خاطر نشان می‌شود هدف این تحقیق، بررسی اثر اضافه شدن ارتعاشات به فرایند معمول هیدروفرمینگ لوله مدور، برای تبدیل به مقطع مربعی است و تعیین پارامترهای بهینه هدف نمی‌باشد.

شرایط غیرخطی تماسی به صورت اثر متقابل سطح لوله با سطح داخلی قالب و همچنین سطح مجموعه مهار قالب با سطح فاصله‌انداز متصل به قالب مربعی تعریف شده است. از ضریب اصطکاک کلمبی ۰/۱۵ در سطوح تماس استفاده شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقایسه نتایج مدل عددی و اجزای محدود

در قسمت‌های قبل با تعریف مدل تحلیلی و انجام شبیه‌سازی اجزای محدود، محاسبه تغییر شکل لوله تحت یک فشار داخلی معین توضیح داده شد. دو پارامتر مورد ارزیابی در این تحقیق میزان شکل‌پذیری و توزیع ضخامت دیواره لوله است.

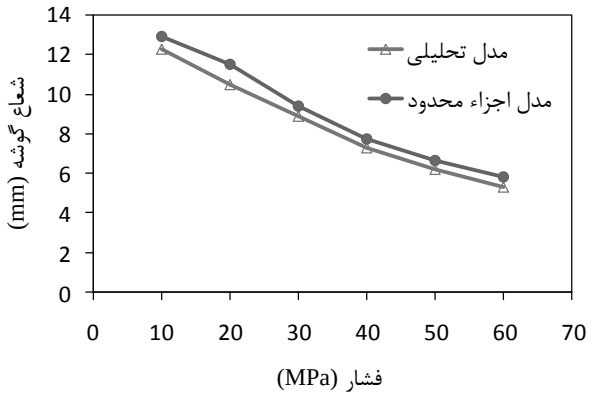
الف- بررسی حالت کلاسیک: در ابتدا هیدروفرمینگ کلاسیک مورد توجه قرار می‌گیرد. در شکل ۷ تغییر اندازه شعاع گوشه نسبت به فشار داخلی و در شکل ۸ نحوه توزیع ضخامت دیواره در ناحیه تماسی لوله در سطح بیرونی لوله نشان داده شده است.

شکل ۷ و ۸ انطباق خوب نتایج مدل اجزای محدود و مدل تحلیلی را برای حالت کلاسیک نشان می‌دهد. در نتایج به دست آمده در شکل ۷ میانگین اختلاف نسبی شعاع گوشه در نتایج شبیه‌سازی و کد تحلیلی برای نقاط نشان داده شده ٪۶/۸ می‌باشد. در شکل ۸ نیز اختلاف نسبی شعاع گوشه برای فشار ۴۰ و ۶۰ مگاپاسکال به ترتیب برابر ٪۰/۴۲ و ٪۰/۵۷ می‌باشد.

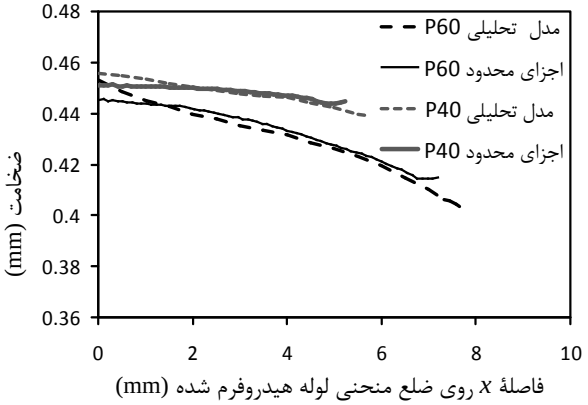
همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده، در مدل تحلیلی آخرین المان ناحیه تماسی و ناحیه انبساط آزاد دارای کمترین ضخامت در سطح مقطع است و با حرکت از وسط اضلاع به سمت گوشه‌ها، میزان ضخامت عموماً کاهش می‌یابد. اما در مدل اجزای محدود که براساس ساده‌سازی‌های کمتری بنا شده، کمترین ضخامت در المانهای نزدیک به انتهای ناحیه خطی است، و ضخامت دیواره در ناحیه انبساط آزاد به دلیل نبودن فشار تماسی سطح قالب، اندکی افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی برای نمودار ضخامت دیواره لوله در هیدروفرمیگ با مقطع مربعی در مرجع [۱۵] ارایه شده است.

ب- بررسی حالت آلتراسونیک: در این قسمت نتایج مدل تحلیلی و اجزای محدود در هیدروفرمینگ آلتراسونیک مقایسه - شده است. هدف از این قیاس، بررسی بهتر اثرات ارتعاشات بر فرایند هیدروفرمینگ مورد بحث در این تحقیق است. در این حالت در مدل تحلیلی و همچنین در شبیه‌سازی اجزای محدود، ارتعاشات به صورت حرکت قالب صلب تعریف شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]



شکل ۷ تغییرات شعاع گوشه نسبت به افزایش فشاردر مدل اجزاء محدود و مدل تحلیلی برای هیدروفرمینگ کلاسیک

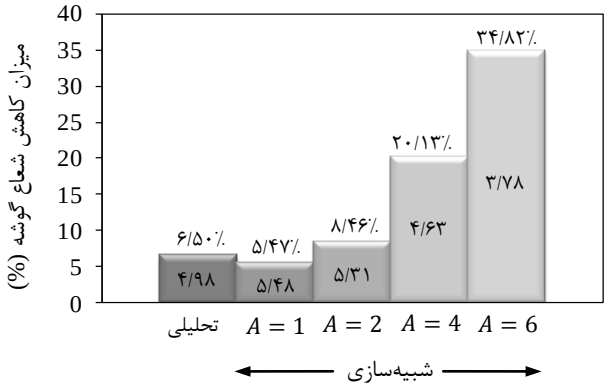


شکل ۸ تغییرات ضخامت دیواره در ناحیه تماس در مدل اجزاء محدود و مدل تحلیلی در هیدروفرمینگ کلاسیک

در مدل تحلیلی، در مدت زمان یک گام فرایند، که برابر نصف دوره تناوب ارتعاش است، تمام سطح قالب در تماس با لوله است و در گام بعد کاملاً جدا می‌شود. در نمودار ستونی شکل ۹ میزان کاهش درصدی شعاع گوشه لوله هیدروفرم شده (و در واقع میزان بهبود شکل‌دهی) در فشار ۶۰ مگاپاسکال نشان داده شده است. نتایج برای مدل تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود با دامنه‌های متفاوت ارایه شده است. حروف A و F و P در نمودارهای این تحقیق، به ترتیب برای نشان دادن دامنه ارتعاش به میکرومتر، فرکانس به کیلوهرتز و فشار به مگاپاسکال استفاده شده‌اند.

در این شکل اعداد داخل ستون‌ها، شعاع گوشه لوله به میلی‌متر، و اعداد بالای ستون‌ها میزان بهبود شکل‌دهی یا کاهش شعاع گوشه به درصد می‌باشد. شایان ذکر است که درصد بهبود شعاع گوشه برای مدل تحلیلی یا اجزای محدود، نسبت به نتایج همان مدل در حالت هیدروفرمینگ کلاسیک بیان شده است. میزان شعاع گوشه هیدروفرمینگ کلاسیک برای مدل تحلیلی و اجزای محدود به ترتیب برابر ۵/۳۳ و ۵/۸۰ میلی‌متر می‌باشد.

همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، درصد بهبود شعاع گوشه در مدل تحلیلی، بیشتر با نتایج شبیه‌سازی با دامنه کم ارتعاشی در حدود ۱ میکرومتر تطابق دارد. همان‌گونه که قبلاً نیز عنوان شد در مدل تحلیلی ارایه شده، اثر دامنه ارتعاش لحاظ نشده است و تنها به ایجاد گپ در نیمی از دوره نوسان در فصل مشترک لوله و قالب توجه شده است. به عبارت دیگر در این مدل، کاهش اصطکاک به دلیل جدایش به صورت کامل در نظر گرفته شده است، اما امکان لحاظ اثرات نرم‌کنندگی ارتعاشات، که بر اساس مراجع [۱۱،۱۰] با شدت آلتراسونیک (دامنه ارتعاشات) ارتباط مستقیم دارد، وجود نداشته است. لذا از آنجا که بر اساس شکل ۹ با افزایش دامنه، میزان تأثیر ارتعاشات بر شعاع گوشه افزایش قابل توجهی داشته است، می‌توان استنباط کرد که اثر ایجاد گپ بر بهبود فرایند نسبت به دیگر اثرات ارتعاشات کم اهمیت‌تر است. زیرا اثر تشکیل گپ به صورت کامل در مدل تحلیلی لحاظ شده است و افزایش دامنه نمی‌تواند بر کاهش اصطکاک به دلیل ایجاد گپ در سطح جدایش مؤثر باشد. لذا افزایش میزان شکل‌پذیری باید مرتبط با دیگر اثرات ارتعاشات باشد.



شکل ۹ درصد کاهش شعاع نسبت به حالت کلاسیک در هیدروفرمینگ آلتراسونیک (P = ۶۰ MPa و F=۲۰kHz)

در برخی از تحقیقات دیگر از جمله مراجع [۸] و [۱۸] نیز

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

غالب بودن اثر نرم کنندگی ارتعاشات آلتراسونیک در فرایندهای با ماهیت فشاری، نسبت به دیگر اثرات ارتعاشات نشان داده شده است. از آنجا که فرایند هیدروفرمینگ نیز ماهیت کششی-فشاری دارد، می‌توان نتایج نمودار ۹ را مرتبط با یافته‌های پیشین به این صورت بیان کرد که اثرات نرم‌کنندگی ارتعاشات و کاهش استحکام تسلیم ناشی از آن، از اثرات اصطکاکی در سطح بسیار بیشتر است. در قسمت‌های بعد، اثر استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک در فرایند هیدروفرمینگ به کمک مدل اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج هیدروفرمینگ کلاسیک مقایسه شده است.

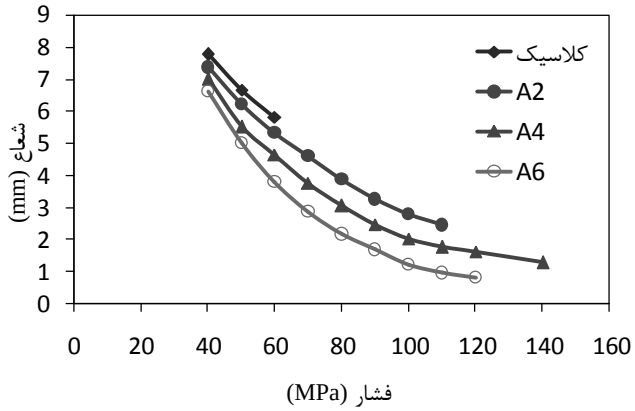
۴-۲- افزایش پرشدگی گوشه قالب با اعمال ارتعاشات

در فرایند هیدروفرمینگ کلاسیک با مقطع مربعی با افزایش فشار شکل‌دهی، میزان اصطکاک متناسب با فشار افزایش یافته و مساحت مناطقی که اصطکاک چسبنده داشته و امکان لغزش ندارند، رشد می‌کند. بنابراین با پیشرفت شکل‌دهی، جریان فلزی مشکل‌تر شده و امکان افزایش فشار برای شکل‌دهی بیشتر وجود ندارد. با توجه به نسبت پایین ضخامت دیواره به قطر لوله، نتایج اجزای محدود برای حل صریح مدل هیدرو فرمینگ کلاسیک، حد فشارتقریبی ۶۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد.

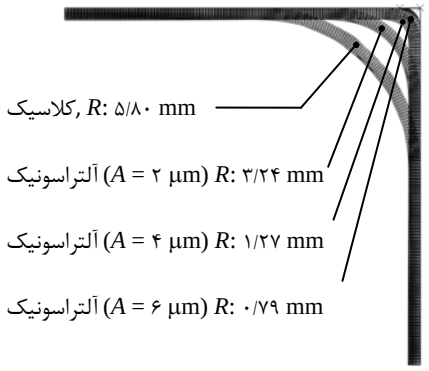
با بهره‌گیری از مزایای ارتعاشات قالب، شکل‌دهی تسهیل شده و امکان افزایش حد انبساط لوله و دستیابی به گوشه‌های تیزتر فراهم می‌گردد. در شکل ۱۰ نمودار تغییر شعاع گوشه لوله نسبت به افزایش فشار برای فرایند هیدروفرمینگ آلتراسونیک با دامنه‌های ارتعاشی متفاوت ارایه شده و با فرایند کلاسیک مقایسه شده است. تحلیل شبیه‌سازی با اعمال فشارهای مختلف با اندازه گامهای ۱۰ مگاپاسکال انجام شده تا حد فشار قابل اعمال برای هر فرایند به دست آید. در شکل ۱۱ نیز به صورت گرافیکی کوچکترین شعاع گوشه قابل حصول برای دامنه‌های ارتعاشی مختلف با هم مقایسه شده است.

از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان استنباط کرد که با افزایش بزرگی دامنه در یک فشار مشخص، مقدار شعاع گوشه کاهش می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش دامنه، بیشترین فشار قابل اعمال در فرایند افزایش می‌یابد.

در آزمایش با دامنه ۶ میکرومتر، به دلیل شعاع بسیار کم گوشه لوله و خرابی مش‌ها در آن ناحیه، امکان محاسبه میزان تغییر شکل در فشارهای بالاتر وجود ندارد. در جدول ۲ نیز بیشترین حد فشار و کمترین شعاع گوشه لوله به صورت عددی برای آزمایش‌های عددی متفاوت با هم مقایسه شده است. نسبت پر شدن گوشه قالب به صورت اختلاف نسبی شعاع گوشه در قیاس با شعاع لوله اولیه به دست آمده است.



شکل ۱۰ شعاع گوشه نسبت به فشار برای فرآیند آلتراسونیک با دامنه‌های مختلف (F=۲۰kHz) در مقایسه با حالت کلاسیک



شکل ۱۱ بیشترین حد شکل‌دهی لوله برای فرآیند آلتراسونیک با دامنه‌های مختلف (F =۲۰ kHz) در مقایسه با فرآیند کلاسیک

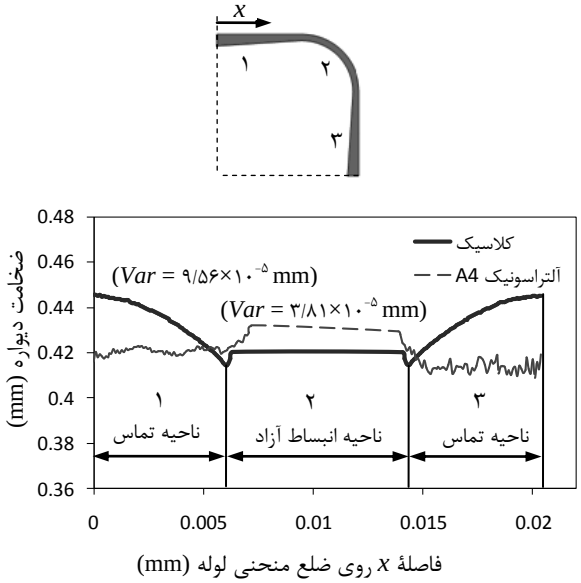
جدول ۲ قیاس حد انبساط در آزمایشات عددی اجراء شده

فرایند	بیشترین فشار قابل اعمال (MPa)	کمترین شعاع (mm)	نسبت پر شدن گوشه قالب
کلاسیک	۶۰	۵/۸۰	۵۵/۳۸٪
آلتراسونیک، A= ۲μm	۹۰	۳/۲۴	۷۵/۰۸٪
آلتراسونیک، A=۴ μm	۱۴۰	۱/۲۷	۹۰/۲۳٪
آلتراسونیک، A=۶ μm	۱۲۰	۰/۷۹	۹۳/۹۲٪

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

۴-۳- بهبود یکنواختی توزیع ضخامت دیواره

علاوه بر میزان انبساط لوله، توزیع ضخامت دیواره نیز با اعمال ارتعاشات به بدنه قالب تغییر می‌کند. به دلیل جریان غیر یکنواخت فلزی، توزیع نابرابر ضخامت دیواره در فرایند هیدروفرمینگ کلاسیک اجتناب ناپذیر می‌باشد. لذا انتظار می‌رود ارتعاشات قالب از آنجا که به جریان فلزی کمک می‌کند، کاهش غیر یکنواختی ضخامت دیواره را نیز سبب شود. نتایج تحلیل‌ها نشان داد میزان تأثیر ارتعاشات بر ضخامت دیواره وابسته به پارامترهای شکل‌دهی از جمله فشار داخلی و پارامترهای ارتعاشی از جمله دامنه ارتعاش می‌باشد. از میان آزمایش‌های عددی انجام شده با دامنه‌های ارتعاشی متفاوت، در شکل ۱۲ به عنوان نمونه، نحوه توزیع ضخامت دیواره برای مدل اجزای محدود هیدروفرمینگ آلتراسونیک با دامنه ۴ میکرومتر با مدل کلاسیک مقایسه شده است. مطابق شکل ۱۲ در هیدروفرمینگ کلاسیک، ضخامت دیواره دارای غیریکنواختی زیادی است. ناحیه وسط اضلاع ضخیم‌ترین قسمت بوده و با حرکت به سمت گوشه‌ها ضخامت به تدریج کاهش می‌یابد و نازکترین منطقه در نزدیکی ناحیه انبساط آزاد شکل می‌گیرد. در آزمایش‌های عملی و عددی ارایه شده در [۱۵] توزیع ضخامت مشابهی برای دیواره لوله حاصل شده است. تفاوت شرایط اصطکاکی در نقاط مختلف دیواره و بیشتر لغزیدن نواحی نزدیک به گوشه‌ها این توزیع غیر یکنواخت ضخامت را ایجاد کرده است.



شکل ۱۲ مقایسه توزیع ضخامت دیواره در هیدروفرمینگ آلتراسونیک و کلاسیک (F= ۲۰ kHz و A=۴ μm ، P=۶۰ MPa)

ارتعاشات اعمالی به قالب، این توزیع ضخامتی را کاملاً تغییر می‌دهد. برای فراهم کردن امکان مقایسه راحت‌تر، ضخامت بر اساس طول انحنایی لوله اولیه نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می شود در شکل‌دهی آلتراسونیک به دلیل تفاوت در عملکرد نیروی اصطکاک، شکل‌پذیری در دیواره‌های افقی و قائم یکسان نیست و لذا طول ناحیه تماسی در این دو ضلع و حتی ضخامت در ناحیه انبساط آزاد نیز متفاوت خواهد بود. علاوه بر آن حرکت ارتعاشی قالب، مطابق شکل ۱۲ سبب پرش‌های ریز زیادی در توزیع ضخامت بویژه در ناحیه ۳ یعنی ناحیه ایجاد گپ شده است. بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش فشار، نمودار ضخامت دیواره و محل پرش‌ها تغییر می‌کند. اگرچه ضخامت دیواره در عمل به دلیل پیوستگی ماده به صورت کامل از این الگو پیروی نخواهد کرد، اما وجود آنها می‌تواند نشان‌دهنده غیر یکنواختی ضخامت دیواره باشد [۱۱]. با افزایش دامنه اندازه پرش‌ها نیز افزایش می‌یابد. این مسأله مؤید آن است که دامنه ارتعاش نباید از یک حد مشخص افزایش یابد زیرا پس از آن جدایش زیاد بین قالب و دیواره سبب خراشیده شدن قطعه و مختل شدن شکل‌دهی می‌شود [۱۱،۴].

پراکندگی ضخامت دیواره بر روی شکل ۱۲ برای هر دو حالت آزمایش به کمک تابع واریانس نشان داده شده است. مقدار این تابع به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Var(\{t\}) = \frac{\sum(t-\bar{t})}{(n-1)} \qquad (۱۶)$$

در این فرمول t ضخامت در هر نقطه دیواره، $\bar{t}$ میانگین ضخامت نقاط و n تعداد نقاط آزمایش می‌باشد. همان‌طور که مقدار این تابع برای دو نمودار نشان می‌دهد، علی‌رغم وجود پرش در نمودار آلتراسونیک، توزیع ضخامت دیواره در این حالت تا بیش از ٪۵۸ یکنواخت‌تر شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش اعمال ارتعاشات به بدنه قالب در فرایند هیدروفرمینگ لوله با مقطع مربعی، برای بهبود جریان فلزی و افزایش حد انبساط پیشنهاد شد و مورد بررسی قرار گرفت. یک مدل تحلیلی بر اساس روابط هندسی و حالت تنش و کرنش در لوله تعریف شد که به کمک آن نحوه تغییر شکل لوله تحت تأثیر فشار داخلی، در دو حالت کلاسیک و همراه با ارتعاشات ارزیابی شد. با کد نویسی برای مدل عددی حاصل، مقدار تغییر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]

شکل لوله و ضخامت دیواره در نقاط مختلف استخراج شد.

با ایجاد یک مدل اجزای محدود برای فرایندهای هیدرفرمینگ کلاسیک و آلتراسونیک، امکان ارزیابی مدل تحلیلی فراهم شد. مقایسه نتایج مدل تحلیلی و مدل اجزای محدود به مطالعه بهتر اثرات ارتعاشات بر فرایند هیدروفرمینگ با قالب مربعی کمک می‌کند. نتایج مقایسه نشان داد اثر ارتعاشات قالب در کاهش استحکام تسلیم، نسبت به اثرات اصطکاکی آن که عموماً در فرایندهای شکل‌دهی آلتراسونیک مدنظر قرار می‌گیرد، بیشتر می‌باشد. علاوه بر آن نتایج دو مدل در هیدروفرمینگ کلاسیک از انطباق خوبی برخوردار بودند.

نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، افزایش حد انبساط لوله در هیدروفرمینگ لوله همراه با ارتعاشات آلتراسونیک را نشان می‌دهد. ارتعاشات با دامنه‌های متفاوت اعمال شده است. با افزایش دامنه، میزان حد انبساط افزایش یافته است، اگر چه افزایش بیش از حد دامنه فرایند شکل‌دهی را مختل می‌سازد. علاوه بر آن ارتعاشات سبب تغییر نمودار توزیع ضخامت می‌شود که چنان‌چه دامنه نوسانی مناسبی برای ارتعاش انتخاب شود، بهبود قابل توجه در یکنواختی ضخامت دیواره حاصل می‌شود.

اگرچه نتایج ارایه شده، اثر نوسان قالب بر بهبود عملکرد فرایند را نشان می‌دهد، اما بررسی انجام شده تنها یک مطالعه اولیه در زمینه هیدروفرمینگ آلتراسونیک و اثرات آن است. نتایج آزمایش‌های عملی نویسندگان، برای نشان دادن اثر ارتعاشات بر هیدروفرمینگ لوله برای تبدیل به مقطع مربع، در کارهای آینده گزارش خواهد شد.

۶- مراجع

[1] Nikhare C., Weiss M., Hodgson P.D., "FEA Comparison of High and Low Pressure Tube Hydroforming of TRIP steel", *Computational Materials Science*, Vol. 47, 2009, pp. 146-152.

[2] Elyasi M., Bakhshi-Jooybari M., Gorji A.H., A new Hydro forming Die Design for Improvement of Die Corner Filling of Stepped Tubes, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 3, 2010, pp. 87-98. (In Persian)

[3] Jimma T., Kasuga Y., Iwaki N., Miyazawa O., Mori E., Ito K., Hatano H., "An Application of Ultrasonic Vibration to the Deep Drawing Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80–81, 1998, pp. 406–412.

[4] Hayashi M., Jin M., Thipprakmas S., Murakawa M., Hung J. C., Tsai Y. C., Hung C. H., "Simulation of Ultrasonic-Vibration Drawing Using the Finite Element Method (FEM)", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, 2003, pp. 30-35.

[5] Hung J., Tsai Y., Hung C., "Frictional Effect of Ultrasonic-Vibration on Upsetting", *Ultrasonics*, Vol. 46, 2007, pp. 277-284.

[6] Akbari Mousavi S.A.A., Feizi H., Madoliat R., "Investigations on the Effects of Ultrasonic Vibrations in the Extrusion Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, 2007, pp. 657-661.

[7] Bunget C., Ngaile G., "Influence of Ultrasonic Vibration on Micro-Extrusion", *Ultrasonics*, Vol. 51, 2011, pp. 606–616.

[8] Yao Z., Kim G. Y., Faidley L., Zou Q., Mei D., Chen Z., "Effects of Superimposed High-Frequency Vibration on Deformation of Aluminum in Micro/Meso-Scale Upsetting", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, 2012, pp. 640- 646.

[9] Winsper C. E., Dawson G. R., Sansome D. H., "An Introduction to the Mechanics of Oscillatory Metalworking", *Metals and Materials*, 1970, pp. 158-162.

[10] Siddiq A., Sayed T. El., "Acoustic Softening in Metals during Ultrasonic Assisted Deformation via CP-FEM", *Materials Letters*, Vol. 65, 2011, pp. 356– 359.

[11] Siddiq A., Sayed T. El., "Ultrasonic-Assisted Manufacturing Processes: Variational Model and Numerical Simulations", *Ultrasonics*, Vol. 52, 2012, pp. 521– 529.

[12] Blaha F., Langenecker B., "Tensile Deformation of Zinc Crystal under Ultrasonic Vibration", *Naturwissenschaften*, Vol. 42, 1955, pp. 556.

[13] Langenecker B., "Work-Softening of Metal Crystals by Alternating the Rate of Glide Strain", *Acta Metallurgica*, Vol. 9, 1961, pp. 937- 940.

[14] Langenecker B., "Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals", *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, SU-13, 1966, pp. 1-8.

[15] Hwang Y., Chen W., "Analysis of Tube Hydroforming in a Square Cross-Sectional Die", *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, 2005, pp. 1815-1833.

[16] Beer F.P., Johnston E.R., *Mechanics of Materials*, Third Edition, New York, Tata McGraw-Hill Inc., 2004.

[17] Huang Z., Lucas M., Adams M. J., "Influence of Ultrasonics on Upsetting of a Model Paste", *Ultrasonics*, Vol. 40, 2002, pp. 43-48.

[18] Daud Y., Lucas M., Huang Z.H., "Modeling the Effects of Superimposed Ultrasonic Vibrations on Tension and Compression Tests of Aluminium", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, 2007, pp. 179-190.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.4.6.4]