مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۵، ص‌ص ۶۳-۷۲

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهبود شکل‌پذیری در فرایند هیدروفرمینگ لوله با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک

سید احسان افتخاری شهری[۱]، سید یوسف احمدی بروغنی[۲]، خلیل خلیلی[۳*]، امین اله محمدی[۴]

۱- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک ، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۴- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

* بیرجند، صندوق پستی۹۷۱۷۵/۶۱۵، kkhalili@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۲ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۷ آبان ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۳۱ خرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:

هیدروفرمینگ لوله

ارتعاشات آلتراسونیک

شکل‌پذیری

چکیده

در فرایند هیدروفرمینگ لوله، جریان نامناسب فلزی ناشی از شرایط اصطکاکی، سبب پر نشدن گوشه‌های قالب و ایجاد نازک شدگی بیش از حد در گوشه‌ها می‌گردد. در این مقاله با ارائه یک ایده نوین در فرایند هیدروفرمینگ، به بررسی تئوری و تجربی اثر اعمال ارتعاشات بر بدنه قالب هیدروفرم لوله پرداخته شده است. با مدل‌سازی اجزاء محدود فرایند هیدروفرمینگ آلتراسونیک لوله و مقایسه آن با مدل اجزاء محدود همین فرایند در حالت سنتی، امکان بررسی میزان بهبود فرایند با استفاده از ارتعاشات قالب فراهم شده است. علاوه‌بر آن، تحلیل اجزاء محدود مودال و هارمونیک برای طراحی مجموعه هیدروفرمینگ آلتراسونیک به‌کار رفته است، و به کمک این تحلیل‌ها شکل خاصی از متمرکز کننده پیشنهاد شده است. برای انجام شکل‌دهی، مکانیزم جدید ساده‌ای در این تحقیق معرفی شده که تولید کم هزینه قطعات را بدون نیاز به دستگاه هیدروفرمینگ امکان‌پذیر می‌سازد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد با استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک، میزان شکل‌پذیری و برگشت فنری بهبود داشته، و علاوه‌بر آن، ضخامت دیواره لوله نیز یکنواختی بیشتری دارد.

Improve the formability in tube Hydroforming process using ultrasonic vibrations

Seyed Ehsan Eftekhari Shahri[1], Seyed Yousef Ahmadi Brooghani[2], Khalil Khalili[3*], Aminollah Mohammadi[4]

1- Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.
3- Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.
4- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
* P.O.B. 97175/615 Birjand, kkhalili@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 September 2013
Accepted 29 October 2013
Available Online 21 June 2014

Keywords:
Tube Hydroforming
Ultrasonic Vibration
Tube Formability

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 radius of hydroformed tubes. 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 process. In addition, the finite element analysis, as the modal and harmonic analysis, are used to design a set of ultrasonic tube hydroforming. A simple mechanism introduced in this paper is used to form the tube. The results indicate superimposing ultrasonic vibrations to the process will improve formability and spring back of the, and more uniform tube wall thickness will be achieved.

۱- مقدمه

در این روزها، فرایندهای هیدروفرمینگ به‌صورت گسترده‌ای برای ساخت قطعات در زمینه‌های مختلف مانند صنایع اتومبیل، صنایع هواپیمایی و صنایع ساخت کشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل این امر افزایش تقاضا برای کاربرد قطعات سبک می‌باشد. به‌دلیل تولید یکپارچه قطعات با مقاطع پیچیده و حذف عملیات جانبی مانند جوشکاری در قطعات تولید شده به روش هیدروفرمینگ، وزن کلی قطعات کاهش یافته و استحکام قطعه افزایش می‌یابد[۱]. در این فرآیند قطعات با اعمال فشار یک سیال شکل حفره قالب را به خود می‌گیرند. علاوه‌بر آن در بسیاری از قطعات جابه‌جایی محوری که توسط دو جک به دو انتهای لوله وارد می‌شود، سبب تسهیل حرکت فلز می‌شود. با این وجود در برخی از فرآیندهای هیدروفرمینگ، همچون قطعات مربعی که در آن از فشار سیال برای تبدیل قطعه‌کار به لوله با سطح مقطع مربعی استفاده می‌شود، جابه‌جایی محوری اعمال نمی‌شود. لذا اصطکاک بین قطعه‌کار و ابزار، جریان فلزی را بسیار دشوار می‌سازد. اصطکاک بالا و غیریکنواخت ایجاد شده در سطح تماس سبب کاهش میزان تغییر

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S.E. Eftekhari Shahri, S.Y. Ahmadi Brooghani, Kh. Khalili, A. Mohammadi, Improve the formability in tube Hydroforming process using ultrasonic vibrations, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 63-72, 2014 (In Persian)

شکل لوله و نازک شدگی بیش از حد در گوشه‌های قطعه می‌شود[۲].

برای بهبود جریان فلزی در قالب مربعی، نیخاره[1][۳] روشی بر مبنای تغییر در شرایط اصطکاکی با ایجاد حرکت نسبی بین سطح بیرونی لوله و دیواره قالب برای قطعه با سطح مقطع مربعی ارائه داد. این روش، امکان تغییر شکل لوله با فشارهای کمتر را فراهم می‌آورد، اما تنها برای هندسه مربعی تدوین شده بود و امکان استفاده از آن‌ها در قطعات پیچیده وجود ندارد. همچنین موری و همکارانش[۴] برای بهبود شکل‌پذیری در فرایند هیدروفرمینگ، ایده استفاده از فشار نوسانی را مطرح کرد، که لوح موسوی و همکارانش در سال‌های بعد این روش را در تولید سه‌راهی T و پروفیل با مقطع مربع استفاده کردند[۵،۶].

انتخاب قطعه مربعی در این تحقیق، به‌دلیل تاثیر زیاد اصطکاک بر فرایند شکل‌دهی لوله در این قالب است. بخش زیادی از اصطکاک ایجاد شده، اصطکاک چسبنده است، و لذا استفاده از روانکار، تاثیر چندانی بر کاهش آن ندارد. بنابراین استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک می‌تواند بر بهبود شکل‌پذیری این قطعه بسیار موثر باشد.

شکل‌دهی آلتراسونیک فلزات به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن علاوه بر بار مورد استفاده در فرآیندهای سنتی، قالب با فرکانس بسیار بالای ارتعاشی تحریک می‌شود. پیش از این، برخی از محققان ارتعاشات مافوق صوت را در برخی از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات مانند کشش عمیق، تست فشار و کشش، کشش سیم و اکستروژن استفاده کرده‌اند. به‌عنوان نمونه می‌توان به اعمال ارتعاشات به نگهدارنده ورق و قالب در فرآیند کشش عمیق[۷]، استفاده از ارتعاشات محوری و شعاعی در فرآیند کشش سیم[۸] و استفاده از ارتعاشات در فرآیند فشار[۹]، در فرآیند اکستروژن مستقیم[۱۰]، میکرواکستروژن[۱۱] و فرآیند فشار در ابعاد میکرو[۱۲] اشاره کرد. با این وجود در زمینه فرایند هیدروفرمینگ، تحقیقی که نتایج بهبود فرایند با استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک را گزارش کند، منتشر نشده است. در کار قبلی مولفین اثر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به بدنه قالب در فرایند هیدروفرمینگ لوله فولادی، به‌صورت عددی و تحلیلی مطالعه شد[۱۳]. در تحقیق حاضر پس از تحلیل اجزای محدود، تلاش شده با استفاده از یک مجموعه ابتکاری برای هیدروفرمینگ سنتی و ارائه طرح جدیدی برای متمرکز کننده آلتراسونیک، اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایند به‌صورت عملی بررسی شود. گرچه در این تحقیق اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر قطعه مربعی بررسی شده، اما با اثبات کارایی روش، امکان استفاده از آن برای دیگر قطعات مقدور می باشد.

۲- مدل اجزای محدود

برای مدل‌سازی فرآیند از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس[2] در حالت حل صریح[3] استفاده شده است. شبیه‌سازی برای هیدروفرمینگ سنتی و آلتراسونیک توسعه یافته است. با توجه به اینکه فرآیند کرنش صفحه‌ای درنظر گرفته شده و قالب صلب می‌باشد، لذا مدل اجزای محدود متقارن بوده و تنها یک چهارم قالب و لوله به‌صورت دوبعدی مدل‌سازی شده است.

مدل اجزاء محدود فرایند از دو قسمت تشکیل شده است، قالب که به‌صورت صلب مدل شده و لوله شکل‌پذیر صفحه‌ای. جهت به‌دست آوردن خواص مکانیکی لوله‌های مسی آنیل مورد استفاده، آزمون کشش تک محوری بر روی نمونه‌های تهیه شده از لوله براساس استاندارد مربوط[4] انجام شده است. منحنی تنش (σ) و کرنش (ε) مهندسی و حقیقی در شکل ۱ نشان داده شده است.

خواص مکانیکی لوله که از نمودار تنش و کرنش به‌دست آمده و در شبیه‌سازی استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است. با برازش منحنی بر نمودار تنش و کرنش حقیقی، رابطه توانی به‌صورت $\sigma = 445.6\varepsilon^{0.405}$ می‌باشد. قطر خارجی و ضخامت لوله اولیه به‌ترتیب برابر ۳۵ و ۱/۱ میلی‌متر می‌باشد.

از ۶۶۵ المان خطی CPE4R به‌صورت کرنش صفحه‌ای برای مش‌بندی لوله استفاده شده است. اندازه المان‌ها تا اندازه‌ای کوچک درنظر گرفته شده که ریزتر شدن آن‌ها، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در دقت نتایج نداشته باشد.

چگونگی اعمال شرایط مرزی در مرجع [۱۳] توضیح داده شد. در فرآیند هیدروفرمینگ آلتراسونیک، اعمال فشار داخلی و ارتعاش قالب به‌صورت همزمان انجام می‌شود. در تحقیق حاضر، قالب با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳ میکرمتر حرکت نوسانی سینوسی دارد. هدف از این شبیه‌سازی، بررسی اثر ارتعاش قالب در حین فرایند، بر تغییر شکل لوله است. در واقع تغییر شکل قالب در اثر ارتعاش، با حرکت نوسانی قالب صلب، ساده‌سازی شده است و تعداد زیادی از مراحل کوچک جابه‌جایی-زمانی در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سطح خارجی لوله با سطح داخلی قالب در تماس است که با توجه به استفاده از نایلون به‌عنوان روانکار، از ضریب اصطکاک کلمبی ۰/۱۵ در سطوح تماس استفاده شده است.

۳- طراحی سیستم هیدروفرمینگ آلتراسونیک

چنانچه یک ذره از یک ماده مرتعش گردد، سبب ایجاد تنش الاستیک در ذرات مجاور آن در ماده می‌گردد[۱۴]. به همین ترتیب، ذرات مجاور آن نیز تنش را به ذرات مجاور خود منتقل می‌کنند و در اصلاح ارتعاش در ماده منتشر می‌شود. انتشار ارتعاشات در ماده به‌صورت یک موج خواهد بود. برای موجی که در ماده منتشر می‌شود، رابطه (۱) برای جابه‌جایی ذرات ماده در مکان‌ها و زمان‌های مختلف برقرار است.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱) u میزان جابه‌جایی ذره، x فاصله ذره از مبدا، و t زمان است. c نرخ انتشار موج در ماده می‌باشد که با مودول یانگ E و چگالی ماده ρ به‌دست می‌آید. یک حل ویژه برای معادله (۱) به‌صورت رابطه (۲) است.

$$u(x,t) = a\cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) \qquad (۲)$$

شکل ۱ نمودار تنش و کرنش مهندسی و حقیقی نمونه تهیه شده از لوله‌های مسی آنیل شده

1- Nikhare
2- ABAQUS
3- Explicit solution
4- ASTM A370

شکل ۲ جابه‌جایی ذرات ماده نسبت به فاصله از منبع موج

جدول ۱ خواص مکانیکی لوله‌ی مسی آنیل شده

تنش تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (٪)	مدول یانگ(GPa)	ضریب پواسان
۶۷/۸۵	۶۰/۸	۱۱۵	۰/۳۳

جدول ۲ خواص نشر موج در فولاد آلیاژی مولیبدن[۱۵]

طول موج (mm)	سرعت موج (m/s)	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسان
۲۵۵/۵۱	۵۱۱۰/۲۵	۷۸۵۰	۲۰۵	۰/۳

جدول ۳ خواص نشر موج آلومینیوم ۷۰۷۵[۱۶]

طول موج (mm)	سرعت موج (m/s)	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسان
۲۵۲/۰۰	۵۰۳۹/۶۹	۲۸۲۳	۷۱/۷	۰/۳۳

که در این رابطه ω فرکانس زاویه‌ای می‌باشد. در این رابطه تابع u براساس مکان و زمان بیان شده است. روابط مربوط به موج همچنین می‌تواند با استفاده از فرکانس f، طول موج λ، دوره تناوب T و نرخ انتشار c بیان گردد. رابطه (۳) ارتباط این متغیرها را نشان می‌دهد.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (۳)$$

با استفاده از این متغیرها، رابطه (۲) می‌تواند به‌صورت رابطه (۴) بیان گردد.

$$u(x,t) = a\cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct - x) \quad (۴)$$

براساس رابطه (۴)، میزان جابه‌جایی نقاط میله در حین انتشار ارتعاشات، در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل بیشترین مقادیر جابه‌جایی هر ذره از ماده را نشان می‌دهد، و هر ذره نسبت به زمان نیز نوسان دارد.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در $x = 0$ و هر مضرب صحیحی از $\lambda/2$ میزان دامنه ارتعاشی نقاط بیشینه است، این نقاط به‌عنوان شکم[1] شناخته می‌شوند. همچنین در نقاط $x = \lambda/4, 3\lambda/4, \dots, (2n+1)\lambda/4$ جابه‌جایی در هر لحظه برابر صفر است، که این نقاط به‌عنوان گره[2] شناخته می‌شوند. مفاهیم گره و شکم در طراحی سیستم آلتراسونیک بسیار اهمیت دارند. ابعاد اجزاء سیستم به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که ناحیه تغییر شکل، در نقاط شکم جابه‌جایی ابزار آلتراسونیک واقع شود، که دامنه ارتعاش ابزار در آن نقطه بیشترین مقدار می‌باشد. همچنین نقاط گیره‌بندی سیتم، باید در نقاط گرهی امواج درنظر گرفته شوند.

یک سیستم شکل‌دهی فلزات با کمک ارتعاشات آلتراسونیک، از یک مولد آلتراسونیک[3] (منبع تغذیه)، مبدل[4]، متمرکزکننده[5]، و واحد شکل‌دهی تشکیل شده است. همگی این اجزاء، یک مجموعه واحد را تشکیل می‌دهند که سیستم شکل‌دهی آلتراسونیک نام دارد. مولد آلتراسونیک، انرژی الکتریکی را به سیگنال الکتریکی با فرکانس بالا تبدیل کرده و به سمت مبدل هدایت می‌کند. مبدل آلتراسونیک انرژی الکتریکی مولد را به ارتعاشات مکانیکی با همان فرکانس تبدیل می‌کند. معمولاً مبدل از مواد پیزوالکتریک انتخاب می‌شود، که ویژگی فیزیکی آن‌ها تغییر طول به‌واسطه ولتاژ دریافتی است. متمرکز کننده که مهم‌ترین قطعه به لحاظ طراحی می‌باشد، باید ضمن تقویت دامنه ارتعاش، انرژی ارتعاشات را از مبدل به واحد تغییر شکل هدایت کند. به‌منظور طراحی یک سیستم با ویژگی‌های فوق، یک طرح پیشنهادی جدید در این تحقیق ارائه شده است.

۳-۱- طرح پیشنهادی

قابلیت سیستم آلتراسونیک و میزان اثرگذاری آن بر فرایند تغییر شکل، وابسته به پارامترهای ارتعاشات آلتراسونیک شامل دامنه و فرکانس است. قالب در اینجا بخشی از متمرکز کننده است که ضمن ایفای نقش معمول در شکل‌دهی لوله، ارتعاشات را از مبدل به منطقه تغییر شکل هدایت می‌کند.

متمرکز کننده در سیستم‌های ارتعاشاتی دو نقش دارد: اول انتقال ارتعاشات از مبدل و متمرکز کردن ارتعاشات بر ناحیه شکل‌دهی و دوم افزایش دامنه ارتعاش زمانی که انرژی ارتعاشات در حجم کوچکی متمرکز شده است. برای ایفای نقش اول، متمرکز کننده باید در فرکانس کاری مبدل تشدید شود. نقش دوم نیز زمانی محقق می‌گردد که سطح مقطع متمرکز کننده به سمت ناحیه شکل‌دهی کاهش یابد. شایان ذکر است هندسه قالب مربعی (متمرکزکننده) در تحقیق حاضر، امکان ایفای نقش دوم را فراهم نمی‌کند.

براساس قوانین انتشار موج، متمرکز کننده باید به‌گونه‌ای طراحی گردد که موج منتشر شده، در ناحیه تغییر شکل دارای بیشترین دامنه نوسانی باشد. از آنجا که ابعاد قالب در این تحقیق، براساس قطر لوله در هیدروفرمینگ سنتی طراحی شده، با اضافه کردن یک شیپوره در فاصله بین مبدل و قالب، نحوه انتشار موج در قالب کنترل می‌شود. شیپوره و سطح قالب در محل تماس، اتصال محکم و پایدار دارند که این اتصال در عمل به کمک رزوه ایجاد می‌شود. بدین ترتیب در اینجا از دو متمرکز کننده با جنس‌های متفاوت استفاده شده که به هم یکپارچه شده‌اند.

در این پژوهش، قالب از جنس فولاد آلیاژی مولیبدن است که خواص نشر موج در آن در جدول ۲ ارائه شده است. شیپوره نیز از جنس آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ است، که خواص نشر موج این آلیاژ نیز مطابق با جدول ۳ می‌باشد. طول موج در این جداول براساس فرکانس تحریک ۲۰ کیلوهرتز بیان شده، که در محدوده فرکانس معمول در فرایندهای شکل‌دهی آلتراسونیک می‌باشد.

براساس قوانین طراحی سیستم‌های شکل‌دهی آلتراسونیک، تغییر سطح مقطع در متمرکز کننده باید بسیار ملایم باشد، در غیر این صورت سبب عدم انتقال امواج و هدر رفتن انرژی می‌شود[۱۷]. از سوی دیگر، برای ایفای نقش دوم متمرکز کننده در افزایش توان، همان‌طور که در بالا اشاره شد، سطح مقطع شیپوره باید به سمت قالب کاهش یابد. اما با توجه به هندسه بلوکی قالب، این مساله سبب می‌شود ابعاد متمرکز کننده دوم (قالب) نسبت به متمرکز کننده اول (شیپوره)، در محل تماس این دو ناگهان افزایش می‌یابد. لذا شیپوره باید به نحوی طراحی شود تا سطح مقطع‌ها در مسیر انتقال امواج به آرامی تغییر کند. بدین منظور قطر شیپوره، مطابق شکل ۳-الف، به سمت دیواره قالب افزایش می‌یابد. بنابراین هندسه شیپوره نیز در این طرح، مانند قالب، امکان افزایش توان را فراهم نمی‌آورد.

همان‌طور که در شکل ۳-ب ملاحظه می‌شود، از آنجا که جنس دو متمرکز کننده متفاوت می‌باشد، سرعت انتشار امواج و طول موج در آن دو

1- Antinode
2- Node
3- Ultrasonic generator
4- Ultrasonic transducer
5- Ultrasonic concentrator

تغییر می‌کند. اندازه طول شیپوره، باید به‌گونه‌ای درنظر گرفته شود تا در ناحیه مرکزی قالب، بیشترین دامنه نوسانی ایجاد شود. معادله نوسان نقاط شیپوره در راستای محور آن به‌صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$u_l \qquad (۵)$$

که در رابطه (۵) A دامنه نوسان، λ_h طول موج در شیپوره آلومینیومی و x_h همان‌طور که شکل ۳-ب نشان داده شده است، فاصله محوری نقاط شیپوره از سطح تماس آن با مبدل می‌باشد. به همین ترتیب رابطه مشابه برای نوسان نقاط قالب در راستای محور شیپوره به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$u_d = A\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_d}x_d + \varphi\right) \qquad (۶)$$

در رابطه (۶) λ_d طول موج در قالب فولادی و x_d فاصله از لبه قالب و φ اختلاف فاز جابه‌جایی است. عرض کفه قالب، همان‌طور که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، ۴۲ میلی‌متر است که مطابق با جدول ۲ کمتر از یک‌چهارم طول موج در قالب فولادی می‌باشد. مطلوب طراحی آن است که مقدار دامنه نوسان در خط مرکزی قالب (صفحه n) برابر بیشترین مقدار، یعنی A باشد. لذا مقدار اختلاف فاز به‌صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$u_{d,n} = A\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_d}x_d + \varphi\right) = -A$$
$$\varphi = 0.671\pi \qquad (۷)$$

از آنجا که در لبه قالب مربعی در صفحه m، موج از یک قطعه وارد قطعه دیگر می‌شود، مقدار جابه‌جایی روی نقاط این صفحه، با استفاده از هر دو تابع برابر خواهد بود. لذا مقدار طول شیپوره l مطابق رابطه (۸) به‌دست خواهد آمد:

$$u_{d,0} = A\cos(0.671\pi)$$
$$u_{h,m} = A\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_h}l\right)$$
$$u_{h,m} = u_{d,0}\,, l = 84.57\text{mm} \qquad (۸)$$

بنابراین برای ایجاد شکم در مرکز ناحیه شکل‌دهی، برای مبدل با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، طول شیپوره باید برابر ۸۴/۶ میلی‌متر باشد.

۳-۲- استفاده از روش اجزاء محدود برای طراحی سیستم

متمرکز کننده آلتراسونیک و قیدهای آن، مهم‌ترین بخش طراحی یک سیستم شکل‌دهی آلتراسونیک می‌باشد. اگر چه برخی قوانین تحلیلی و یا تجربیات صنعتی برای طراحی اولیه ضروری است، اما با کمک هیچ یک از آن‌ها امکان پیش‌بینی شکل مد[1] و نحوه تغییر شکل قالب در حین ارتعاش وجود ندارد. لذا در این تحقیق بررسی طرح نهایی به کمک تحلیل دینامیکی اجزاء محدود انجام می‌شود. این تحلیل به دو شیوه می‌تواند به طراحی کمک کند:

الف) انتخاب یک طرح با فرکانس طبیعی در محدوده مورد نظر و با شکل مد مناسب برای شکل‌دهی، بدین منظور از تحلیل مودال استفاده می‌شود.

ب) تعیین شکل مدی که بیشترین دامنه نوسانی در منطقه تغییر شکل ایجاد کند. این امر می‌تواند با تحلیل پاسخ هارمونیک صورت پذیرد.

تحلیل مودال متمرکز کننده براساس طرح پیشنهادی انجام شده است. هندسه مدل در نرم‌افزار اجزاء محدود ایجاد شده است و از خواص مواد مندرج در جدول ۲ و جدول ۳ استفاده شده است. از المان خطی C3D4 برای مش‌بندی مدل قالب مربعی و شیپوره استفاده شده است.

با توجه به فرکانس‌های تحریک معمول در فرایندهای شکل‌دهی، محدودهٔ محاسبه فرکانس طبیعی بین ۱۹۰۰۰ تا ۲۳۰۰۰ هرتز درنظر گرفته می‌شود. حالت تحلیل، مودال و روش مورد استفاده، روش بلوک لانکزو[2] می‌باشد.

1- Mode shape
2- Block Lanczos

(الف)

(ب)

شکل ۳ الف) مجموعه قالب و شیپوره در طرح پیشنهادی ب) نحوه انتشار موج در قالب و شیپوره

شکل ۴ مدل تحلیل هارمونیک طرح پیشنهادی

پس از انجام تحلیل، نتایج به‌دست آمده برای نحوهٔ تغییر شکل قالب و شکل مدها به‌ویژه در اطراف منطقهٔ تغییر شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. از بین فرکانس‌های طبیعی به‌دست آمده فرکانس‌هایی انتخاب می‌شوند که شکل مد آن‌ها برای فرایند شکل‌دهی مفیدتر باشند.

مرحلهٔ بعدی برای طراحی متمرکز کننده، تحلیل پاسخ هارمونیک است که به‌منظور بررسی دامنه ارتعاش ذرات سیستم به‌ویژه در ناحیه شکل‌دهی انجام می‌شود. مطلوب آن است که دامنه ارتعاش در تمام سطوح حفره مربعی قالب تا حد امکان یکنواخت باشد. علاوه‌بر آن اندازه فاصله هوایی که به‌دلیل ارتعاش بین لوله و قالب در ناحیه تماس این دو ایجاد می‌شود، قابل ارزیابی است. تاثیر فاصله هوایی بر شکل‌دهی لوله در کار قبلی مولفین در مرجع [۱۳] بررسی شده است. فاصله هوایی ایجاد شده میان لوله و قالب باید به اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا امکان کاهش اصطکاک چسبنده در سطح تماس فراهم شود. همچنین فاصله هوایی مناسب، سبب جریان یافتن راحت‌تر روانکار بین لوله و قالب می‌شود. در عین حال اندازه فاصله هوایی بزرگ‌تر از حد نیز سبب ایجاد خراشیدگی و غیریکنواختی دیواره قطعه می‌گردد.

در تحلیل هارمونیک، بار به‌صورت هارمونیک (سینوسی و کسینوسی) اعمال می‌شود. در شکل ۴ چگونگی اعمال شرایط مرزی در تحلیل هارمونیک طرح پیشنهادی ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، ارتعاشات آلتراسونیک در محلی که مبدل به قالب متصل است، به‌صورت تابع سینوسی جابه‌جایی اعمال می‌شود، که A دامنه و ω فرکانس زاویه‌ای است. در تحلیل این مدل ارتعاشات با دامنه ۳ میکرومتر توسط مبدل به قالب اعمال می‌شود و ناحیه تماسی بین شیپوره و قالب، دایره‌ای با قطر ۱۵ میلی‌متر درنظر گرفته شده است.

شکل ۵ طرحواره هیدروفرمینگ با حرکت محوری آزاد لوله

شکل ۶ قالب هیدروفرمینگ، لوله و تجهیزات آب‌بندی

شکل ۷ مجموعه تجهیزات هیدروفرمینگ لوله مربعی

۴- آزمایش عملی

در این تحقیق یک مکانیزم ابتکاری برای هیدروفرمینگ لوله و تبدیل آن به پروفیل مربعی طرح‌ریزی شده است. آزمایش‌های عملی با استفاده از این مکانیزم اجرا شده‌اند که مزیت آن نسبت به کارهای مشابه، عدم نیاز به ماشین هیدروفرمینگ و تولید قطعه با هزینه کم‌تر است.

در این طرح جک‌هایی که در روش‌های متداول هیدروفرمینگ لوله برای تغذیه محوری استفاده می‌شوند، حذف شده‌اند و لوله فقط تحت فشار هیدرولیک داخلی تغییر شکل می‌یابد. با افزایش فشار، فلز در داخل حفره قالب جریان می‌یابد و لوله از دو انتها به داخل قالب کشیده می‌شود. در شکل ۵ طرحواره مکانیزم مورد استفاده نشان داده شده است.

آب‌بندی لوله به کمک دو آب‌بند گردگیر[1] در دو طرف انجام شده است، که آب‌بندهای متحرک می‌باشند. جنس آن‌ها از لاستیک طبیعی و مصنوعی و یا پلاستیک می‌باشد. از یک مجموعه میله و توپی برای مهار آب‌بندها استفاده شده است. توپی در یک سمت میله قرار گرفته و توسط یک مهره، مهار می‌گردد. روغن هیدرولیک از داخل میله وارد لوله می‌شود و حجم کمی از روغن، فضای بین میله و لوله را پر می‌کند. هوای به دام افتاده، به کمک پیچ هواگیری میله خارج می‌شود (خروج هوا در شکل ۵). پس از پر شدن لوله از روغن، فشار سیال افزایش می‌یابد و لوله شکل حفره قالب را به خود می‌گیرد.

براساس این مکانیزم، مجموعه‌ای برای هیدروفرمینگ لوله طراحی و پیاده‌سازی شده است. این مجموعه تجهیزات شامل یک پمپ فشارساز، قالب هیدروفرمینگ و یک مجموعه میله و توپی برای آب‌بندی لوله می‌باشد. پمپ فشارساز پدالی می‌تواند تا فشار ۷۰۰ بار را ایجاد کند. از دلایل انتخاب این پمپ، دبی پایین روغن است که امکان تغییر شکل با نرخ کرنش پایین را فراهم می‌آورد. قالب فولادی هیدروفرمینگ برای شکل‌دهی لوله مسی در شکل ۶ نشان داده شده است.

شش عدد پیچ استاندارد متریک ۱۲ میلی‌متر برای بستن دوکفه قالب استفاده شده است. قسمت میانی حفره قالب، برای تغییر شکل لوله به مربع، و دو قسمت جانبی در آب‌بندی لوله کاربرد دارد. ناحیه گذار بین این دو قسمت، با شعاع ۲ میلی‌متر، گرد[2] شده تا از بریدن لوله جلوگیری شود.

میله و توپی که در شکل ۶ نشان داده شده‌اند، سومین جزء این مجموعه تجهیزات می‌باشند. جنس میله از فولاد آلیاژی مولیبدن ۴۰ است که دارای استحکام تسلیم و مقاومت کششی بالایی است.

قطعه اولیه در این آزمایش‌ها، لوله مسی خالص ٪۹۹/۹۹ مورد استفاده در صنایع تبرید می‌باشد. این لوله‌ها با طول ۱۵۰ میلی‌متر و تلرانس ابعادی ۰/۱ میلی‌متر بریده شده و سپس با هدف افزایش شکل‌پذیری، لوله‌ها آنیل شده‌اند.

از نایلون برای روانکاری بین لوله و قالب استفاده شده است. مطابق شکل ۶، یک فشارسنج با دقت ۲۵ بار برای اندازه‌گیری فشار داخلی، بر روی پایه واسطه‌ای که بین شلنگ پمپ و میله آب‌بندی قرار دارد نصب شده است. مجموعه تجهیزات هیدروفرمینگ لوله برای تبدیل به پروفیل مربع، با استفاده از مکانیزم معرفی شده در این تحقیق، در شکل ۷ نشان داده شده است.

با کمک تجهیزات معرفی شده، قطعات متعددی با فشارهای مختلف تا ۵۵۰ بار هیدروفرمینگ شدند و نتایج آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. یکی از دلایل طراحی این واحد هیدروفرمینگ، امکان مونتاژ آن با مجموعه ارتعاشات آلتراسونیک است که در ادامه بررسی می‌شود.

تجهیزات آلتراسونیک شامل منبع تغذیه آلتراسونیک و مبدل پیزوالکتریک است. منبع تغذیه آلتراسونیک سیگنال الکتریکی با فرکانس بالا را به مبدل منتقل می‌کند. منبع تغذیه آلتراسونیک اِی‌ام‌ام‌ام[3] که از کنترل کامپیوتری فرمان می‌گیرد، تا توان حداکثر ۳ کیلووات را می‌تواند به مبدل منتقل کند. همچنین مبدل کیستلر[4] ۲۰ کیلو هرتز، با توان حداکثر ۹۰۰ وات، برای انجام آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

یکی از مشکلات عمده منابع تغذیه آلتراسونیک موجود، کم بودن دامنه فرکانس قابل اعمال و تاخیر در تطابق فرکانس بین منبع و سیستم است. اما منبع تغذیه مورد استفاده در این تحقیق، قادر است با تغییر شرایط کاری سیستم، فرکانس تشدید مجموعه را با سرعت ۱۰۰ بار در ثانیه اسکن نماید و با همان سرعت، فرکانس کاری خود را براساس آن تنظیم کند[۱۸]. در هر مرحله آزمایش، سیستم کنترل کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار گرافیکی لب‌ویو[5]، بازه فرکانسی انتخابی را اسکن کرده تا

1- Wiper seal

2- Fillet
3- AMMM Puls Generator
4- Kistler Piezoelectric Transducer
5- Labview

فرکانس تشدید در آن بازه تعیین گردد. گراف اسکن واحد کنترل برای یکی از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در شکل ۸ نشان داده شده است، که فرکانس ۲۲/۰۶ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این گراف مشاهده می‌شود، این فرکانس با فاز ۲/۵+ تطابق دارد (زاویه فاز بین ولتاژ و جریان وارد شده به مبدل).

آزمایش‌های هیدروفرمینگ آلتراسونیک براساس طرح معرفی شده در بخش قبل پایه‌ریزی شده است. از شیپوره برای انتقال ارتعاشات از مبدل به سطح قالب استفاده می‌شود. اتصال پیشانی شیپوره و سطح قالب، به‌منظور انتقال ارتعاشات، باید کاملاً پرداخت باشد و هیچ فاصله‌ای بین این دو نباشد. بدین منظور سطح قالب در محل اتصال به مبدل، به کمک دستگاه سنگ مغناطیس با عمق ۰/۱ میلی‌متر پرداخت شده است.

چگونگی انجام آزمایش هیدروفرمینگ آلتراسونیک در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش ۲-۱ توضیح داده شد، در این تحقیق سطح مقطع شیپوره در محل تماس با قالب بزرگترین مقدار است.

شکل ۸ اسکن واحد کنترل بر روی بازه فرکانسی و ایجاد گراف برای تشخیص فرکانس تشدید

شکل ۹ آزمایش هیدروفرمینگ لوله آلتراسونیک

شکل ۱۰ ارتباط شعاع گوشه با فشار شکل‌دهی در مدل اجزاء محدود در قیاس با قطعات عملی

ب) ۴۰ مگاپاسکال الف) ۳۰ مگاپاسکال

شکل ۱۱ لوله‌های برش خورده و تعیین نقاط با فاصله مساوی برای اندازه‌گیری ضخامت

همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، در این آزمایش شیپوره به سطح پشتی یکی از کفه‌های قالب، در سمت مقابل گل پیچ‌ها متصل است. اتصال شیپوره به قالب به کمک پیچ مغزی متریک ۸ میلی‌متر انجام می‌شود. سطح شیپوره به‌صورت مخروط با زاویه ۱۵ درجه به سمت قطعه کار افزایش می‌یابد. با این ویژگی، سطح بزرگی از شیپوره با قالب در تماس است و ارتعاشات را به قالب منتقل می‌کند.

نتیجه اسکن کنترل کننده برای مجموعه متمرکز کننده در شکل ۸ ارائه شد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، کنترل کننده، فرکانس تشدید ۲۲/۰۶ کیلوهرتز را تشخیص داده است. این فرکانس تنها فرکانس تشخیص داده شده در بازه اسکن شده ۱۹ تا ۲۲/۵ کیلوهرتز است.

۵- نتایج

در قسمت‌های قبل، به‌صورت تئوری و تجربی، تغییر شکل لوله، در هیدروفرمینگ سنتی و آلتراسونیک مطالعه شد. در این قسمت نتایج به‌دست آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱- هیدروفرمینگ سنتی

در آزمایش‌های عملی در تحقیق حاضر، دامنه وسیعی از فشار تا ۵۵ مگاپاسکال برای تولید پروفیل مربعی به‌کار گرفته شده است. میزان تغییر شکل لوله با اندازه‌گیری شعاع گوشه سنجیده شده است. نمودار شکل ۱۰ منحنی شعاع گوشه (r) نسبت به فشار (P) را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، با افزایش فشار، شعاع گوشه کاهش می‌یابد. نمودار شکل ۱۰ انطباق خوب نتایج مدل اجزای محدود و آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. میانگین اختلاف نسبی شعاع گوشه حاصل در شبیه‌سازی با قطعات هیدروفرم شده ٪۶/۹ بوده است. خطای ناچیز در اندازه‌گیری فشار در آزمایش عملی، تفاوت ضریب اصطکاک تئوری و تجربی، و برخی از ساده‌سازی‌ها در شبیه‌سازی سبب این اختلاف شده است.

شکل ۱۲ توزیع ضخامت دیواره مدل اجزای محدود در مقایسه با قطعه برش خورده، در دو فشار مختلف

(الف)

(ب)

شکل ۱۳ بررسی تئوری اثر ارتعاشات سینوسی قالب بر قطعه نهایی. الف) شعاع گوشه ب) یکنواختی ضخامت ($A = ۳$ m و $f = ۲۰$ kHz)

متغییر دیگری که مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، توزیع ضخامت دیواره لوله مربعی است. به‌دلیل وجود اصطکاک که از حرکت ماده جلوگیری می‌کند، ضخامت دیواره تولیدی متغیر خواهد بود[۱۳]. برای اندازه‌گیری ضخامت، لوله‌ها توسط وایرکات مطابق شکل ۱۱ از قسمت میانی برش خورده‌اند. اندازه‌گیری از نقطه وسط یک ضلع شروع شده و در فواصل دو میلی‌متر تا انتهای ناحیه تماسی ادامه داشته است. تغییرات ضخامت دیواره لوله (t) در امتداد محیطی (با فاصله x از مرکز لوله) در مدل اجزاء محدود، با نتایج اندازه‌گیری شده (آزمایش تجربی) در شکل ۱۲ مقایسه شده است. محور افقی در این شکل، معرف فاصله بر روی نصف ضلع مربع می‌باشد.

ضخامت قطعه تولیدی در دو ضلع اندازه‌گیری شده و نتایج نشان داده شده در شکل ۱۲، میانگین نتایج روی این دو ضلع می‌باشند. بر روی نمودارهای این شکل، شماره نقاط قطعه تولیدی متناظر با دیواره برش خورده قطعه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. اندازه‌گیری ضخامت به کمک کولیس با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر انجام شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با حرکت از مرکز هر ضلع به سمت گوشه‌ها، ضخامت سیر نزولی دارد. کمترین ضخامت در المان‌های نزدیک به انتهای ناحیه خطی است، و ضخامت دیواره در ناحیه انبساط آزاد به‌دلیل نبودن فشار تماسی سطح قالب، اندکی افزایش می‌یابد. نتایج مشابه برای نمودار ضخامت دیواره لوله در هیدروفرمیگ با مقطع مربعی در مرجع [۲] ارایه شده است. در فشار ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، میانگین اختلاف نسبی بین ضخامت دیواره لوله مربعی با نقاط متناظر روی نمودار مدل اجزای محدود به‌ترتیب ٪۱/۹ و ٪۷/۶ می‌باشد. مشاهده می‌شود که نتایج مربوط به ضخامت قطعه تولیدی، اختلاف کمی با نمودار اجزای محدود دارد.

۵-۲- هیدروفرمینگ آلتراسونیک

در این قسمت نتایج افزودن ارتعاشات به قالب هیدروفرمینگ لوله مطالعه می‌شود. در شبیه‌سازی اجزاء محدود، ارتعاشات قالب به‌صورت حرکت سینوسی قالب صلب تعریف می‌شود و هدف از آن بررسی اثر حرکت قالب بر نحوه تغییر شکل لوله و خصوصیات محصول نهایی است. ارتعاش سینوسی قالب صلب، همان‌طور که در کار قبلی مولفین در مرجع [۱۳] تشریح شد، اثرات سطحی مانند کاهش نیروی اصطکاک، و همچنین اثرات حجمی مانند نرم‌کنندگی فلزی را در پی خواهد داشت. اثر ارتعاشات در بهبود فرایند شکل‌دهی، با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود در شکل ۱۳ نشان داده شده است. میزان دامنه و فرکانس در منحنی آلتراسونیک این شکل به‌ترتیب، ۳ میکرومتر و ۲۰ کیلوهرتز است. در این شکل A، f و P به‌ترتیب برای نشان دادن دامنه ارتعاش به میکرومتر، فرکانس به کیلوهرتز و فشار به مگاپاسکال استفاده شده‌اند.

با دقت در شکل ۱۳-الف مشخص می‌شود که در فشار شکل‌دهی یکسان، میزان تغییر شکل لوله در هیدروفرمینگ آلتراسونیک بیشتر از هیدروفرمینگ سنتی است. با بهره‌گیری از مزایای ارتعاشات قالب، شکل‌دهی تسهیل شده و امکان دستیابی به گوشه‌های تیزتر فراهم می‌گردد. میزان کاهش شعاع گوشه با استفاده از ارتعاشات در فشارهای بالا افزایش می‌یابد و در فشار ۵۵ مگاپاسکال به ٪۱۳ می‌رسد. با افزایش فشار، اصطکاک چسبنده در دیواره لوله افزایش یافته و لذا میزان شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. بنابراین ارتعاشات در فشارهای بالاتر، تاثیر بیشتری بر افزایش شکل‌دهی دارند.

در شکل ۱۳-ب پراکندگی ضخامت (Var) در هیدروفرمینگ آلتراسونیک با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و با دامنه ۳ میکرومتر، نشان داده شده و با نتایج هیدروفرمینگ سنتی مقایسه شده است. پراکندگی ضخامت دیواره در این شکل با استفاده از تابع انحراف مقادیر[1] و به کمک رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{Var}(\{t\}) = \frac{\sum(t-\bar{t})}{(n-1)} \qquad (۹)$$

همان‌طور که در شکل ۱۳-ب نشان داده شده است، در هیدروفرمینگ سنتی با افزایش فشار، میزان غیر یکنواختی در ضخامت دیواره به‌دلیل تغییر شرایط اصطکاکی در نقاط مختلف دیواره، به شدت افزایش می‌یابد. این در حالی است که در هیدروفرمینگ آلتراسونیک میزان پراکندگی ضخامت دیواره مستقل از فشار است و با افزایش فشار همان‌طور که در شکل ۱۳-ب نشان داده شده است، مقدار آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند. افزایش یکنواختی در ضخامت دیواره در فرایند آلتراسونیک عمدتاً ناشی از اثر ارتعاشات آلتراسونیک

1- Variance function

بر اصطکاک می‌باشد. ایجاد جدایش در سطح مشترک لوله و قالب، از رشد اصطکاک چسبنده در فصل مشترک جلوگیری کرده و بنابراین با افزایش فشار، شرایط اصطکاکی تقریباً ثابت می‌ماند[۱۳]. در شکل ۱۴ چگونگی توزیع ضخامت دیواره در فرایند آلتراسونیک با فرایند سنتی در دو فشار مختلف مقایسه شده است. محور افقی در این شکل، مشابه شکل ۱۲ فاصله انحنایی روی دیواره پروفیل مربعی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشخص است ارتعاشات آلتراسونیک قالب، توزیع ضخامت را کاملاً تغییر می‌دهد، به‌گونه‌ای که نازک شدگی دیواره در نواحی نزدیک ناحیه انبساط آزاد از بین می‌رود و توزیع ضخامت یکنواخت‌تری به‌دست می‌آید. شکل ۱۴ بیانگر آن است که با افزایش فشار، ناحیه انبساط آزاد کوچکتر شده و به عبارتی میزان پرشدگی گوشه قالب افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه منحنی‌های آلتراسونیک و سنتی نشان می‌دهد که اعمال ارتعاشات آلتراسونیک نیز میزان پرشدگی را افزایش داده است. در منحنی آلتراسونیک تعدادی پرش در پروفیل قطعه مشاهده می شود که این پرش‌ها موجب غیر یکنواختی ضخامت دیواره می‌شوند[۱۳].

پس از بررسی چگونگی تاثیر ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایند، براساس مدل اجزاء محدود، در این قسمت نتایج تحلیل مودال و هارمونیک طرح پیشنهادی بررسی می‌شود. تحلیل مودال این طرح در محدود ۱۹ تا ۲۳ کیلوهرتز، سه فرکانس طبیعی را تشخیص می‌دهد. از آنجا که حرکت ارتعاشی مبدل به‌صورت طولی است، از بین شکل مدهای متناظر با فرکانس‌های به‌دست آمده، تنها شکل‌مدهایی قابل تحریک است که در آن‌ها، حرکت شیپوره به‌صورت طولی باشد. نتایج تحلیل مودال نشان می‌دهد که در این طرح، تنها یک شکل مد با فرکانسی نزدیک به فرکانس مبدل (۲۰ کیلوهرتز) امکان تحریک دارد. شکل مد منتخب برای این طرح در جدول ۴ ارائه شده است.

همان‌گونه که نتایج تحلیل مودال نشان می‌دهد، در فرکانسی نزدیک به فرکانس کاری مبدل، مجموعه متمرکز کننده تشدید شده است. همچنین شکل مد نشان داده شده، شامل ارتعاش طولی شیپوره و حرکت انتقالی مواد قالب، در جهت محور شیپوره می‌باشد.

جدول ۴ شکل مد منتخب قابل تحریک برای طرح پیشنهادی

فرکانس	ساختار تغییر شکل یافته (با بزرگنمایی) توالی جابه‌جایی	Z Y X
۲۰۵۱۸		

شکل ۱۴ توزیع ضخامت دیواره لوله نهایی در فرایند آلتراسونیک و سنتی در مدل اجزای محدود (f =۲۰ kHz وA = ۳μm)

جدول ۵ میانگین جابه‌جایی نودهای هر ضلع (میکرومتر)

فرکانس (هرتز)	پایین (-Y)	بالا (+Y)	راست (-X)	چپ (+X)
۲۰۵۱۸	۲۲/۰۶	۲۲/۳۲	۳۱/۳۲	۲۶/۷۴

ارتعاش قالب با این شکل مد، سبب ایجاد فاصله هوایی در مرکز اضلاع ناحیه شکل‌دهی می‌شود. ایجاد این فاصله هوایی همان‌طور که در مرجع [۱۳] نشان داده شد، موجب کاهش اصطکاک و از مهم‌ترین اثرات ارتعاشات بر شکل-پذیری لوله می‌باشد.

به کمک تحلیل هارمونیک می‌توان میزان جابه‌جایی نقاط ناحیه شکل-دهی را تحت تاثیر تحریک مبدل با دامنه مشخص تعیین کرد. در جدول ۵ میزان میانگین جابه‌جایی نودهای واقع بر هر یک از سطوح حفره مربعی قالب، برای تحریک ناحیه تماس مبدل و شیپوره با اندازه دامنه ۳ میکرومتر و فرکانس ۲۰۵۸۱ هرتز ارائه شده است. این مقادیر برای هر سطح در جهت عمود بر آن سطح اندازه‌گیری شده است. سطوح ذکر شده در جدول ۵ براساس شکل مد نشان داده شده در جدول ۴ بیان شده‌اند.

همان‌گونه که اعداد جدول نشان می‌دهد، در فرکانس تشدید اندازه متوسط دامنه ارتعاشی نقاط ناحیه شکل‌دهی در شکل مد منتخب، بسیار بیشتر از اندازه دامنه تحریک مبدل در مدل هارمونیک می‌باشد. علاوه‌بر آن، بیشترین مقدار اختلاف بین مقدار میانگین جابه‌جایی‌ها در سطوح مختلف، برابر ٪۲۹/۶ می‌باشد (اختلاف بین سطح راست و پایین). این میزان نشان دهنده مقدار غیر یکنواختی در تشکیل فاصله هوایی در سطوح مختلف و در نتیجه غیر یکنواختی شکل‌دهی است.

همان‌گونه که در قسمت آزمایش‌های عملی مطرح شد، اسکن مجموعه متمرکز کننده در آزمایش طرح دوم، فرکانس تشدید ۲۲۰۶۰ هرتز را تشخیص داد. حال آنکه براساس نتایج تحلیل مودال در متمرکز کننده طرح پیشنهادی در جدول ۴، فرکانس تشدید برابر ۲۰۵۱۸ است. با توجه به جهت ارتعاش شیپوره، تنها شکل مدهایی امکان تحریک در مدل هارمونیک دارند که ارتعاش شیپوره در آن‌ها در جهت طولی است. بنابراین از بین شکل مدهای این طرح در بازه فرکانس تعیین شده، تنها امکان تحریک یک شکل مد (شکل مد منتخب در جدول ۴) وجود دارد.

مقدار فرکانس طبیعی پیش‌بینی شده توسط مدل اجزاء محدود و مقدار به‌دست آمده در آزمایش عملی ٪۷ اختلاف دارد. دلیل این اختلاف فرکانس، می‌تواند ناشی از دو عامل باشد. اولین عامل، اختلاف خواص مواد با تئوری می‌باشد که به‌دلیل غیر دقیق بودن جنس مواد اولیه، از جمله آلیاژ آلومینیوم است. عامل بعدی، اتصال ضعیف شیپوره به سطح قالب با استفاده از پیچ متریک ۸ میلی‌متر است. صحت این مساله، با تغییر شکل پیچ به‌دلیل اعمال ارتعاشات، پس از دو بار آزمایش مشخص شد. اتصال ضعیف می‌تواند در بین دو پیشانی شیپوره و سطح قالب فاصله ایجاد کند و موجب جابه‌جایی فرکانس طبیعی شود.

فرایند هیدروفرمینگ آلتراسونیک به‌صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای تبدیل لوله مسی به پروفیل مربع اجرا شده است. در شکل ۱۵-الف اثر ارتعاشات بر لوله نهایی در شبیه‌سازی اجزاء محدود، و در شکل ۱۵-ب در آزمایش تجربی، برای فشار ۳۰ مگاپاسکال نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۵-ب مشاهده می‌شود، میزان طول ناحیه تماسی در شکل‌دهی همراه با آلتراسونیک افزایش یافته است. اما شایان ذکر است بخشی از این افزایش مربوط به بزرگتر شدن طول ضلع خارجی پروفیل مربعی لوله است. در فرایند هیدروفرمینگ سنتی، طول ضلع پروفیل بیرونی برابر با طول ضلع حفره قالب و برابر ۳۵/۳ با تلرانس ۰/۱ میلی‌متر است.

(الف)

(ب)

شکل ۱۵ تاثیر ارتعاشات آلتراسونیک بر فرایند هیدروفرمینگ الف) شبیه‌سازی، ب) آزمایش تجربی ($P = ۳۰\,\text{MPa}$ و $f = ۲۲/۰۶\,\text{kHz}$)

شکل ۱۶ ضخامت دیواره لوله مسی تغییر شکل یافته در آزمایش هیدروفرمینگ سنتی و آلتراسونیک ($P = ۳۰\,\text{MPa}$ و $f = ۲۲/۰۶\,\text{kHz}$)

جدول ۶ شعاع گوشه لوله مسی در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی ($F = ۲۲/۰۶\,\text{kHz}$ ،$P = ۳۰\,\text{MPa}$)

فرایند هیدروفرمینگ	سنتی (میلی‌متر)	آلتراسونیک (میلی‌متر)	بهبود در آلتراسونیک
شبیه‌سازی	۸/۴۹	۷/۷۰	۹/۳۲٪
آزمایش تجربی	۷/۵۶	۶/۰۵	۱۹/۹۷٪

جدول ۷ میزان پراکندگی ضخامت دیواره در فرایند هیدروفرمینگ آلتراسونیک و سنتی ($F = ۲۲/۰۶\,\text{kHz}$ ،$P = ۳۰\,\text{MPa}$)

فرایند هیدروفرمینگ	سنتی (میلی‌متر)	آلتراسونیک (میلی‌متر)	بهبود در آلتراسونیک
شبیه‌سازی	۰/۰۰۰۱۵۷	۰/۰۰۰۰۹۲۵	۴۱/۰۱٪
آزمایش تجربی	۰/۰۰۰۲۶۷	۰/۰۰۰۱۲	۵۵/۰۰٪

اما در قطعه آلتراسونیک، ارتعاشات قالب سبب افزایش قطر خارجی پروفیل به ۳۵/۵ و با تلرانس ۰/۳ میلی‌متر شده است. این افزایش متغیر قطر خارجی لوله نهایی می‌تواند ناشی از افزایش ابعاد حفره قالب در حین ارتعاش و همچنین کاهش مقدار برگشت فنری باشد. میزان کاهش شعاع گوشه در فرایند آلتراسونیک، در فشار ۳۰ مگاپاسکال و فرکانس تشدید ۲۲/۰۶ کیلوهرتز، برای مدل اجزای محدود و آزمایش عملی در جدول ۶ بیان شده است.

مطابق با نتایج جدول ۶ میزان بهبود فرایند و یا به‌عبارتی میزان کاهش شعاع گوشه با استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک، در آزمایش عملی و شبیه‌سازی اجزاء محدود متفاوت است. علت این مساله را می‌توان با چند عامل مرتبط دانست. اول آنکه در مدل اجزاء محدود هیدروفرمینگ آلتراسونیک لوله مسی، دامنه نوسان قالب ۳ میکرومتر درنظر گرفته شده است، حال آنکه در آزمایش عملی، به‌دلیل تشدید متمرکز کننده، میزان دامنه ارتعاشی در ناحیه شکل‌دهی متفاوت با دامنه تحریک مبدل می‌باشد. علاوه‌بر آن، با منبع تغذیه آلتراسونیک مورد استفاده، تنها امکان تغییر توان وجود دارد و به‌صورت مستقیم دامنه ارتعاش مبدل قابل تنظیم نمی‌باشد. لذا عملاً امکان مقایسه دقیق نتایج، در شرایط ارتعاشی یکسان وجود ندارد.

دوم آنکه نحوه تغییر شکل در مدل اجزاء محدود، به‌صورت حرکت قالب صلب است. اما در عمل مطابق با جدول ۴ تغییر شکل قالب در نقاط مختلف سطح حفره قالب متفاوت است و حالت پیچیده‌ای از حرکت نقاط سطح قالب، در محل تماس با لوله ایجاد می‌شود.

سوم آنکه همان‌گونه که اعداد جدول ۵ نشان می‌دهد، چنانچه مبدل و متمرکز کننده تشدید شوند، در شکل مد منتخب نشان داده شده در جدول ۴ عملاً مقدار دامنه نوسان سطوح حفره قالب، به مراتب بیش از دامنه تحریک مبدل است. مطابق با نتایج جدول ۶ میزان بهبود شعاع گوشه در آزمایش عملی بیشتر از شبیه‌سازی است. لذا با توجه به نتایج مرجع [۱۳] می‌توان تخمین زد که در عمل میزان دامنه ارتعاش در ناحیه شکل‌دهی بیشتر از ۳ میکرومتر است. در عین حال انتظار می‌رود مقدار دامنه در آزمایش عملی، به‌دلیل عملکرد غیر بهینه مبدل، کوچک‌تر از مقادیر حاصل از تحلیل هارمونیک باشد که در جدول ۵ ارائه شده است. مقادیر دامنه ذکر شده در این جدول زمانی محقق می‌گردد که متمرکز کننده و مبدل در فرکانس یکسانی تشدید شوند. اما فرکانس تشدید متمرکز کننده، ۲۰۶۰ هرتز بیشتر از مقدار فرکانس عملکرد بهینه مبدل، ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد.

در شکل ۱۶ توزیع ضخامت دیواره قطعه آلتراسونیک با قطعه در فشار ۳۰ مگاپاسکال مقایسه شده است. همانند شکل ۱۲ در این قسمت نیز ضخامت دیواره بر روی دو ضلع متعامد اندازه‌گیری شده است و نتایج نشان داده شده میانگین اندازه‌ها برای هر نقطه می‌باشد.

همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، توزیع ضخامت دیواره در قطعه آلتراسونیک متفاوت بوده و ضخامت در گوشه پروفیل مشابه با نتایج اجزا محدود در شکل ۱۴ بیشترین مقدار می‌باشد. سطح زیر نمودار ضخامت، معرف مساحت مقطع لوله در ناحیه تماسی است و لذا انتظار می‌رفت دو منحنی در شکل ۱۶ یکدیگر را قطع کنند (مشابه با شکل ۱۴). با توجه به نوسان فشار در حین آزمایش آلتراسونیک، به‌نظر می‌رسد عدم دقت در اندازه‌گیری فشار موجب شده تا لوله آزمایش آلتراسونیک در فشار کمتری شکل بگیرد، و ضخامت ناحیه تماسی در قطعه آلتراسونیک بیشتر باشد. در جدول ۷ پراکندگی ضخامت دیواره برای قطعه آلتراسونیک و سنتی در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی ارائه داده شده است.

همان‌گونه که اعداد جدول ۷ نشان می‌دهد، با استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک میزان یکنواختی توزیع ضخامت دیواره در مدل اجزاء محدود و در آزمایش تجربی بهبود یافته است. میزان بهبود در آزمایش تجربی بیشتر است، که دلیل این مساله از یک طرف اندازه بزرگتر دامنه در ناحیه شکل‌دهی است که سبب افزایش اثر ارتعاشات می‌شود، و از سوی دیگر تأثیر پرش‌هایی است که در دیواره قطعه در شبیه‌سازی هیدروفرمینگ آلتراسونیک ایجاد می‌شود[۱۳]، که در شکل ۱۴ نشان داده شد. این پرش‌ها میزان غیر یکنواختی ضخامت را افزایش می‌دهند.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روش ابتکاری اعمال ارتعاشات به بدنه قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله برای بهبود جریان فلزی و افزایش میزان شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج این تحقیق موارد زیر قابل توجه است:

- با ارزیابی نتایج مدل اجزای محدود، با نتایج آزمایش عملی لوله مسی، صحت و دقت روش مدل‌سازی تایید شد. با تایید نتایج این مدل، از نتایج تحلیل آن برای مطالعه اثر اضافه شدن ارتعاشات به قالب بر فرایند استفاده شد.

- در مدل اجزاء محدود، اثر ارتعاشات بر فرایند، به‌صورت حرکت نوسانی قالب صلب لحاظ می‌شود. نتایج تحلیل نشان می‌دهد ارتعاش قالب سبب افزایش میزان شکل‌دهی و بهبود یکنواختی ضخامت دیواره است.

- با بهره‌گیری از قوانین انتشار امواج و تحلیل‌های اجزاء محدود مودال و هارمونیک، طرح مجموعه شکل‌دهی آلتراسونیک ارزیابی شد. در اینجا هدف تحقیق، طراحی متمرکز کننده به‌گونه‌ای است که امکان استفاده از بیشترین اثرات مفید ارتعاشات در شکل‌دهی لوله فراهم شود. نتایج تحلیل مودال نشان داد که برای طرح پیشنهادی، با توجه به نحوه ارتعاش شیپوره، تنها یک امکان تحریک یک شکل مد وجود دارد. نتایج تحلیل هارمونیک نیز نشان داد که اندازه فاصله هوایی ایجاد شده، به اندازه کافی برای فرایند تغییر شکل مناسب است. میزانی از غیر یکنواختی نیز در ایجاد این فاصله‌های هوایی در سطوح مختلف قالب مشاهده شد.

- آزمایش عملی با استفاده از طرح پیشنهادی، قابلیت مجموعه متمرکز کننده با شیپوره سر پهن را نشان داد. با استفاده از این طرح، امکان انتقال ارتعاشات در مجموعه متمرکز کننده دو قسمتی قالب و شیپوره، و رسیدن به سطح تشدید وجود دارد.

- نتایج آزمایش عملی هیدروفرمینگ آلتراسونیک با استفاده از طرح پیشنهادی، حاکی از بهبود زیاد شکل‌پذیری لوله می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند ارتعاشات آلتراسونیک موجب افزایش نرخ شکل‌دهی و کاهش برگشت فنری می‌شود.

۷- قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر خود را از پارک علم و فن آوری خراسان جنوبی به‌دلیل حمایت‌های مالی و معنوی، و همچنین از آزمایشگاه آلتراسونیک دانشگاه صنعتی اصفهان، که در انجام آزمایش‌های عملی همکاری نمودند ابراز می‌دارند.

۸- مراجع

[1] S. M. H. Seyedkashi, H. Moslemi Naeini, G. H. Liaghat, M. Mosavi Mashadi, Y. H. Moon, Numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming aluminum tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 122-131, 2012. (In Persian)

[2] Y. Hwang, W. Chen, Analysis of tube hydroforming in a square cross-sectional die, *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, pp. 1815–1833, 2005.

[3] C. Nikhare, M. Weiss, P. D. Hodgson, FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel, *Computational Materials Science*, Vol. 47, 2009, pp. 146–152.

[4] K. Mori, T. Maeno, S. Maki, Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tube, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 978-984, 2007.

[5] M. Loh-Mousavi, M. Bakhshi-Jooybari, K. Mori, M. Farzinand , S. J. HossiniPour, Mechanism of filling of die corners in pulsating hydroforming of tube with box die, *Modares Mechanical Engineering*, No. 37, pp. 121-133, 2010. (In Persian)

[6] M. Loh-Mousavi, K. Mori, K. Hayashi, S. Maki, M. Bakhshi, 3-D finite element simulation of pulsating T-shape hydroforming of tubes, *Key Engineering Materials*, Vol. 340, pp. 353-358, 2007.

[7] T. vibration Jimma, Y. Kasuga, N. Iwaki, O. Miyazawa, E. Mori, K. Ito, H. Hatano, An application of ultrasonic to the deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80–81, pp. 406–412, 1998.

[8] M. Murakawa, M. Jin, The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 81-86, 2001.

[9] J. Hung, Y. Tsai, C. Hung, Frictional effect of ultrasonic-vibration on upsetting, *Ultrasonics*, Vol. 46, pp. 277–284, 2007.

[10] S. A. A. Akbari Mousavi, H. Feizi, R. Madoliat, Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187–188, pp. 657–661, 2007.

[11] C. Bunget, G. Ngaile, Influence of ultrasonic vibration on micro-extrusion, *Ultrasonics*, Vol. 51, pp. 606–616, 2011.

[12] Z. Yao, G. Y. Kim, L. Faidley, Q. Zou, D. Mei, Z. Chen, Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 640– 646, 2012.

[13] S. E. Eftekhari Shahri, S. Y. Ahmadi Brooghani, K. Khalili, B. S. Kang, Ultrasonic tube hydroforming, a numerical and analytical study, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 46-59, 2010. (In Persian)

[14] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, 1999.

[15] A. Valinejad, *Key to Steel*, 7th Ed., Tehran: Tarah, 2012. (In Persian)

[16] *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Vol. 2, 10th Ed., ASM International, 1990.

[17] C. F. Cheers, *Design and optimization of an ultrasonic die system for forming metal cans*, PhD dissertation, Loughborough University of Technology, 1995.

[18] *AMMM Generator manual*, *Swiss MPI Corporation*, Accessed 7 September 2011; www.mastersonics.com /documents/ mmm basics/mmm power supplies/AMMM/ammmsoftware/ammm generator manual latest.pdf.