



طراحی سیستم هیدروفرمینگ لوله همراه با ارتعاشاتอัลتراسونیک قالب

سید احسان افتخاری شهری^{۱*}، سید یوسف احمدی بروغنی^۲ و خلیل خلیلی^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

^۲ دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱/۱۱/۱۳۹۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۲۵

چکیده

تغییر شکل لوله استوانه‌ای به لوله با مقاطع چندوجهی با فرایند هیدروفرمینگ لوله، از جمله فرایندهای مهم شکل‌دهی است. به دلیل وجود اصطکاک چسبنده، جریان فلزی کاهش یافته و این امر منجر به پر نشدن گوشه‌های قالب و ایجاد نازک شدگی زیاد در گوشه‌های لوله می‌گردد. اعمال ارتعاشات فراصوت 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 تئوری و آزمایشگاهی اثر اعمال ارتعاشات بر بدنه قالب هیدروفرم لوله پرداخته است. با مدلسازی اجزاء محدود فرایند هیدروفرمینگ فراصوت لوله (فشار داخلی همراه با اعمال ارتعاشات فراصوت) و مقایسه آن با مدل اجزاء محدود همین فرایند در حالت کلاسیک (تنها با فشار داخلی) امکان بررسی میزان بهبود فرایند با استفاده از ارتعاشات قالب فراهم شده است. علاوه بر آن، تحلیل اجزاء محدود مودال و هارمونیک برای طراحی مجموعه‌ی هیدروفرمینگ فراصوت بکار رفته است. با کمک این تحلیل‌ها دو طرح پیشنهادی برای هیدروفرمینگ لوله فراصوت ارائه و مورد آزمایش تجربی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از متمرکزکننده طرح دوم، میزان شکل‌پذیری و یکنواختی ضخامت دیواره به مقدار بیشتری بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: هیدروفرمینگ لوله؛ ارتعاشات فراصوت؛ شکل‌پذیری.

Designing Approach for the Ultrasonic Tube Hydroforming System

S. E. Eftekhari Shahri^{1,*}, S. Y. Ahmadi Brooghani², K. Khalili³

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.

^{2,3} Assoc. Prof., Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.

Abstract

Hydroforming of a cylindrical tube to a tube with polyhedral section is considered as one of the important metal forming process. In this process, due to sticking friction, uniform wall thickness as well as sharp corners may not be achieved. Superimposition of ultrasonic vibration to the die can improve the contact conditions. In the current work the effects of ultrasonic vibration have been theoretically and experimentally studied on the formability of hydroformed tubes. Using the FEM models of the process, it is possible to investigate the effects of vibration on the final tube. In addition, the finite element analysis, as the modal and harmonic analysis, are used to design a set of ultrasonic tube hydroforming. Two designs have been proposed for ultrasonic tube hydroforming system, which are evaluated by finite element analysis and experiment. The results indicate using the second proposed design will result to the more formability and more uniform tube wall thickness.

Keywords: Tube Hydroforming, Ultrasonic Vibration, Formability.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۶-۳۲۲۵۲۳۶۶؛ فکس: ۰۵۶-۳۲۲۵۲۰۲۵

آدرس پست الکترونیک: eh.eftekhari@gmail.com

۱- مقدمه

در این روزها، فرایندهای هیدروفرمینگ به صورت گسترده‌ای در صنایع مختلف استفاده می‌شود. در این فرایند به دلیل تولید یکپارچه قطعات با مقاطع پیچیده و حذف عملیات جانبی مانند جوشکاری، وزن کلی قطعات کاهش یافته و استحکام قطعه افزایش می‌یابد [۱].

با افزایش فشار در این فرایند، میزان اصطکاک در دیواره قطعه افزایش قابل توجهی یافته و جریان فلزی را بسیار دشوار می‌سازد. در هیدروفرمینگ لوله برای تبدیل به پروفیل مربعی، اصطکاک بالا و غیریکنواخت ایجاد شده در سطح تماس، سبب کاهش میزان تغییر شکل لوله و نازک‌شدگی بیش از حد در گوشه‌های قطعه می‌شود [۲].

برای بهبود جریان فلزی در قالب مربعی، نیخاره روشی بر مبنای تغییر در شرایط اصطکاکی با ایجاد حرکت نسبی بین سطح بیرونی لوله و دیواره قالب برای قطعه با سطح مقطع مربعی [۳] ارائه داد. این روش، امکان تغییر شکل با فشارهای کمتر را فراهم می‌آورد، اما تنها برای هندسه مربعی تدوین شده بود و امکان استفاده از آن در قطعات پیچیده وجود نداشت. اگر چه در این تحقیق نیز اثر ارتعاشات فراصوت بر قطعه مربعی بررسی شده است، اما می‌توان انتظار داشت، با اثبات کارایی روش، امکان استفاده از آن برای دیگر قطعات مقدور باشد.

شکل‌دهی فلزی فراصوت به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن علاوه بر بار مورد استفاده در فرآیندهای کلاسیک، قالب با فرکانس بسیار بالای ارتعاشی تحریک می‌شود. پیش از این، برخی از محققان ارتعاشات فراصوت را در برخی از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات مانند کشش عمیق، تست فشار و کشش، کشش سیم و اکستروژن استفاده کرده‌اند. به عنوان نمونه جیمی [۴] ارتعاشات فراصوت را در فرآیند کشش عمیق یکبار به نگهدارنده ورق و یکبار به قالب اعمال کرد. همچنین موسوی و همکارانش [۵] به صورت عددی، اثر ارتعاشات فراصوت را بر فرآیند اکستروژن مستقیم بررسی کردند. یائو و همکارانش [۶] نیز به بررسی فرآیند فشار در ابعاد میکرو همراه با ارتعاشات فراصوت پرداختند.

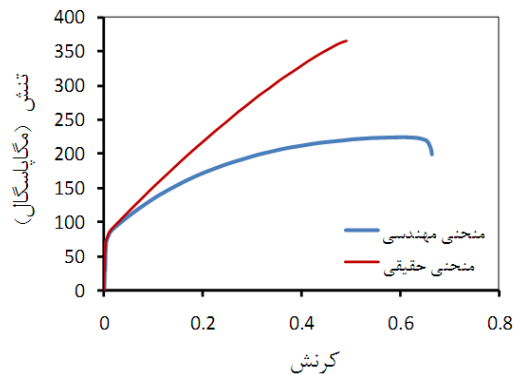
در کار قبلی مولفین اثر اعمال ارتعاشات فراصوت به بدنه قالب در فرایند هیدروفرمینگ لوله فولادی، به صورت عددی و تحلیلی مطالعه شد [۷]. در تحقیق حاضر با استفاده از یک

مجموعه ابتکاری آزمایش هیدروفرمینگ فراصوت لوله برای دو طرح پیشنهادی اجرا شده و تاثیر ارتعاشات بر این فرایند مطالعه شده است.

۲- مدل اجزای محدود

برای مدلسازی فرآیند از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس^۱ در حالت حل صریح^۲ استفاده شده است. شبیه‌سازی برای هیدروفرمینگ کلاسیک و فراصوت توسعه یافته است. با توجه به اینکه فرآیند کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده و قالب صلب می‌باشد، لذا مدل اجزای محدود متقارن بوده و تنها یک چهارم قالب و لوله به صورت دو بعدی مدلسازی شده است.

مدل اجزاء محدود فرایند از دو قسمت تشکیل شده است، قالب که به صورت صلب مدل شده و لوله شکل‌پذیر صفحه‌ای. جهت بدست آوردن خواص مکانیکی لوله‌های مسی آنیل مورد استفاده، آزمون کشش تک محوری بر روی نمونه‌های تهیه شده از لوله، طبق استاندارد ASTM A370 انجام شده است [۸]. طول نمونه‌ها ۲۰ سانتی‌متر بوده و از دستگاه آزمایش کشش زوییک ۶۰ تن^۳ برای کشش آن‌ها استفاده شده است. منحنی تنش و کرنش مهندسی و حقیقی در شکل ۱ نشان داده شده است.



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

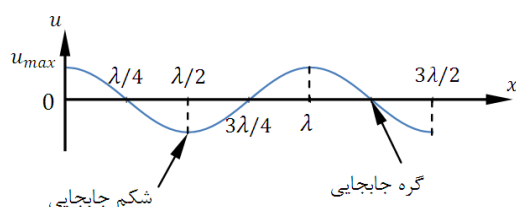
^۱ ABAQUS

^۲ Explicit Solution

^۳ Zwick 60 Ton

$$u(x, t) = a \cos \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x), \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

که در این رابطه u میزان جابجایی ذره، x فاصله ذره از مبدأ، و t زمان است. c نرخ انتشار موج در ماده می‌باشد که با مودول یانگ E و چگالی ماده ρ بدست می‌آید. λ طول موج و a دامنه نوسان است. در این رابطه تابع u بر اساس مکان و زمان بیان شده است. بر اساس این رابطه، میزان جابجایی نقاط ماده در حین انتشار ارتعاشات، در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل بیشترین مقادیر جابجایی هر ذره از ماده را نشان می‌دهد، و هر ذره نسبت به زمان نیز نوسان دارد.



شکل ۲- جابجایی ذرات ماده نسبت به فاصله از منبع موج

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در $x = 0$ و هر مضرب صحیحی از $\lambda/2$ میزان دامنه ارتعاشی نقاط بیشینه است، این نقاط به عنوان شکم^۱ شناخته می‌شوند. همچنین در نقاط $x = \lambda/4, 3\lambda/4, \dots, (2n+1)\lambda/4$ جابجایی در هر لحظه برابر صفر است، که این نقاط به عنوان گره^۲ شناخته می‌شوند. مفاهیم گره و شکم در طراحی سامانه فراصوت بسیار اهمیت دارند. ابعاد اجزاء سامانه به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که ناحیه تغییر شکل، در نقاط شکم جابجایی ابزار فراصوت واقع شود، که دامنه ارتعاش ابزار در آن نقطه بیشترین مقدار می‌باشد. همچنین نقاط گیره‌بندی سامانه، باید در نقاط گرهی امواج در نظر گرفته شوند.

علاوه بر آن، بیشترین کارایی مجموعه فراصوت زمانی است که شکل‌دهی در وضعیت تشدید انجام شود [۱۱]. این

خواص مکانیکی لوله که از نمودار تنش و کرنش به دست آمده و در شبیه‌سازی استفاده شده، در جدول ۱ ارائه شده است. با برآزش منحنی بر نمودار تنش و کرنش حقیقی، رابطه توانی به صورت $\sigma = 445.6\varepsilon^{0.405}$ می‌باشد. قطر خارجی و ضخامت لوله اولیه به ترتیب برابر ۳۵ و ۱/۱ میلی‌متر، می‌باشد. از ۶۶۵ المان خطی CPE4R به صورت کرنش صفحه‌ای برای مش‌بندی لوله استفاده شده است. اندازه المان‌ها تا اندازه‌ای کوچک در نظر گرفته شده، که ریزتر شدن آنها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در دقت نتایج نداشته باشد.

جدول ۱- خواص مکانیکی لوله مسی (آزمایش مهندسی)

تنش تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسان
۶۸	۶۱	۱۱۵	۰/۳۳

شرایط غیرخطی تماسی به صورت اثر متقابل سطح لوله با سطح داخلی قالب تعریف شده است. با توجه به استفاده از نایلون به عنوان روانکار بین لوله و قالب، از ضریب اصطکاک ۰/۰۷ برای سطوح تماس استفاده شده است [۹].

در فرآیند هیدروفورمینگ فراصوت، اعمال فشار داخلی و ارتعاش قالب به صورت همزمان انجام می‌شود. فشار داخلی به صورت خطی افزایش می‌یابد. ارتعاش قالب نیز به صورت حرکت ارتعاشی قالب صلب است. در تحقیق حاضر، قالب با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۳ میکرومتر 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 حین فرایند، با حرکت ارتعاشی قالب صلب، ساده‌سازی شده است. از تعداد زیادی از مراحل کوچک جابجایی- زمانی در شبیه‌سازی استفاده شده است.

۳- طراحی سامانه هیدروفورمینگ فراصوت

چنانچه یک ذره از یک ماده مرتعش گردد، سبب ایجاد تنش الاستیک در ذرات مجاور آن در ماده می‌گردد [۱۰]. 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 به صورت یک موج خواهد بود. برای موجی که در ماده منتشر می‌شود، رابطه زیر برای جابجایی ذرات ماده در مکان‌ها و زمان‌های مختلف برقرار است.

^۱ Antinode

^۲ Node

یابد. لازم به ذکر است هندسه‌ی قالب مربعی (متمرکزکننده) در تحقیق حاضر، امکان ایفای نقش دوم را فراهم نمی‌کند. از آنجا که ابعاد قالب در این تحقیق، بر اساس قطر لوله در هیدروفورمینگ کلاسیک طراحی شده، با اضافه کردن یک شیپوره در فاصله‌ی بین مبدل و قالب، نحوه‌ی 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 متمرکزکننده با جنس‌های متفاوت استفاده شده که به هم یکپارچه شده‌اند. قالب از جنس فولاد آلیاژی مولیبدن با شماره DIN1.7225 است که خواص نشر موج در آن در جدول ۲ ارائه شد. 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 بر اساس فرکانس تحریک ۲۰ کیلوهرتز بیان شده، که در محدوده فرکانس معمول در فرایندهای شکل‌دهی فراصوت می‌باشد.

جدول ۲- خواص مکانیکی و خواص نشر موج در فولاد آلیاژی

مولیبدن [۱۲]

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

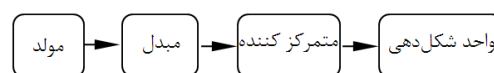
جدول ۳- خواص مکانیکی و خواص نشر موج در آلومینیوم

آلیاژی ۷۰۷۵ [۱۳]

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

در این تحقیق بر اساس هندسه‌ی شیپوره، دو طرح متفاوت در نظر گرفته شده است. در طرح اول مطابق با شکل ۴-الف، به منظور افزایش توان ارتعاش در حین انتقال، سطح مقطع شیپوره به سمت قالب کاهش می‌یابد. بر اساس مقدار طول موج، برای ایجاد بیشترین دامنه ارتعاش در محل اتصال شیپوره به قالب، طول شیپوره برابر ۲۵۲ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. چگونگی انتقال امواج در قالب و شیپوره در شکل ۴-ب نشان داده شده است.

هدف زمانی محقق می‌گردد که همه اجزاء سامانه به گونه‌ای طراحی شوند که تحت فرکانس تحریک، تشدید گردند. یک مجموعه شکل‌دهی فلزات با کمک ارتعاشات فراصوت، از یک مولد فراصوت^۱، مبدل^۲، متمرکزکننده^۳، و واحد شکل‌دهی تشکیل شده است. همگی این اجزاء، یک مجموعه‌ی واحد را تشکیل می‌دهند که مطابق با شکل ۳ سامانه شکل‌دهی فراصوت نام دارد.



شکل ۳- دیاگرام سامانه شکل‌دهی فراصوت

مولد فراصوت، انرژی الکتریکی را به سیگنال الکتریکی با فرکانس بالا تبدیل کرده و به سمت مبدل هدایت می‌کند. مبدل انرژی الکتریکی مولد را به ارتعاشات مکانیکی با همان فرکانس تبدیل می‌کند. متمرکزکننده که مهمترین قطعه به لحاظ طراحی می‌باشد، باید ضمن تقویت دامنه ارتعاش، انرژی ارتعاشات را از مبدل به واحد تغییر شکل هدایت کند. در این تحقیق دو طرح برای مجموعه هیدروفورمینگ فراصوت پیشنهاد شده است که در ادامه مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

۳-۱- طرح‌های پیشنهادی

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

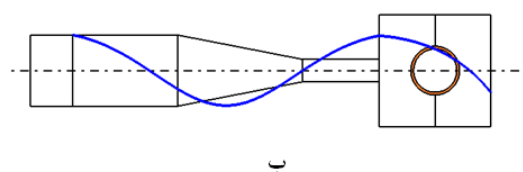
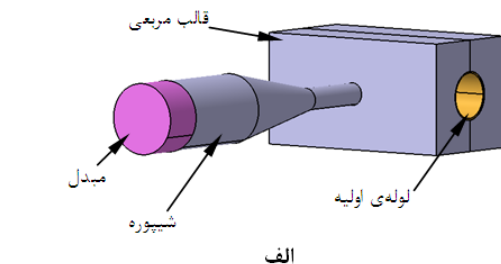
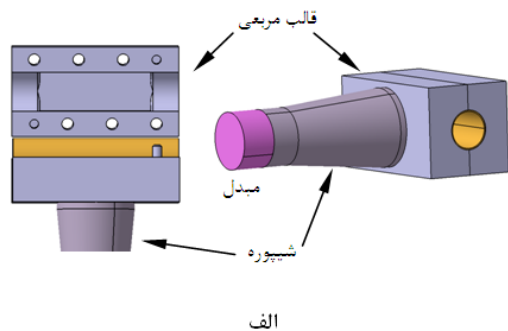
متمرکزکننده در سامانه‌های ارتعاشاتی دو نقش دارد: اول انتقال ارتعاشات از مبدل و متمرکز کردن ارتعاشات بر ناحیه شکل‌دهی و دوم افزایش دامنه ارتعاش زمانی که انرژی ارتعاشات در حجم کوچکی متمرکز شده است [۱۱]. برای ایفای نقش اول، متمرکزکننده باید در فرکانس کاری مبدل تشدید شود. نقش دوم نیز زمانی محقق می‌گردد که سطح مقطع متمرکزکننده به سمت ناحیه‌ی شکل‌دهی کاهش

^۱ Ultrasonic Generator

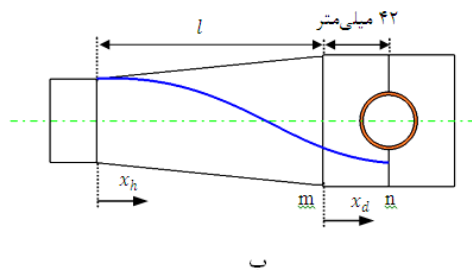
^۲ Ultrasonic Transducer

^۳ Ultrasonic Concentrator

$$u_h = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_h} x_h\right) = A \cos\left(\frac{2\pi}{252} x_h\right) \quad (2)$$



شکل ۴- الف) مجموعه قالب و شیپوره در طرح پیشنهادی اول، ب) نحوه انتشار موج در قالب و شیپوره



شکل ۵- الف) مجموعه قالب و شیپوره در طرح پیشنهادی دوم، ب) نحوه انتشار موج در قالب و شیپوره

که در معادله بالا A دامنه نوسان، λ_h طول موج در شیپوره آلومینیومی و x_h همانطور که شکل ۵-ب نشان داده شده است، فاصله محوری نقاط شیپوره از سطح تماس آن با میدل می‌باشد. به همین ترتیب رابطه‌ی مشابهی برای نوسان نقاط قالب در راستای محور شیپوره تعریف می‌شود:

$$u_d = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_d} x_d + \varphi\right) \quad (3)$$

در معادله بالا، λ_d طول موج در قالب فولادی و x_d فاصله از لبه قالب و φ اختلاف فاز جابجایی است. عرض کفه‌ی قالب همانطور که در شکل ۵-ب نشان داده شده است، ۴۲ میلی‌متر است که مطابق با جدول ۲ **Error! Reference source not found.** کمتر از یک چهارم طول موج در قالب فولادی می‌باشد. مطلوب طراحی آن است که مقدار دامنه‌ی نوسان در خط مرکزی قالب (صفحه‌ی n) برابر بیشترین مقدار، یعنی A باشد. لذا بر این اساس مقدار اختلاف فاز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

همانطور که در این شکل نشان داده شده است، در محل تماس میدل و شیپوره شکم ایجاد می‌شود. از آنجا که جنس دو متمرکز کننده متفاوت می‌باشد، سرعت انتشار امواج طول موج در آن دو تغییر می‌کند. مشکل این طرح انتقال امواج در محل تماس شیپوره و دیواره قالب می‌باشد که ابعاد متمرکز کننده دوم (قالب) نسبت به متمرکز کننده اول (شیپوره)، در محل تماس این دو ناگهان افزایش می‌یابد. بر اساس قوانین طراحی سامانه‌های شکل‌دهی فراصوت، که در مرجع [۱۱] بیان شده، تغییر سطح مقطع در متمرکز کننده باید بسیار ملایم باشد، در غیر این صورت سبب عدم انتقال امواج و هدر رفتن انرژی می‌شود.

در طراحی دوم، طرح شیپوره اصلاح شده تا سطح مقطع‌ها در مسیر انتقال امواج به آرامی تغییر کند، به گونه‌ای که انتقال امواج به قالب تسهیل گردد. بدین منظور قطر شیپوره، همانطور که در شکل ۵-الف نشان داده شده است، به سمت دیواره قالب افزایش می‌یابد. لذا از تغییر ناگهانی سطح مقاطع، در محل تماس شیپوره و قالب جلوگیری می‌شود.

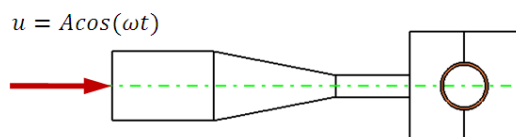
اصلاح دیگری که در طرح دوم نسبت به اول ایجاد شده، تغییر اندازه طول شیپوره بوده به گونه‌ای که در ناحیه مرکزی قالب، بیشترین دامنه‌ی نوسانی ایجاد شود. معادله نوسان نقاط شیپوره در راستای محور آن به صورت زیر بیان می‌شود:

محدود ایجاد شده است و از خواص مواد مندرج در جدول ۲ و 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، محدوده محاسبه فرکانس طبیعی بین ۱۹۰۰۰ تا ۲۳۰۰۰ هرتز در نظر گرفته می‌شود. حالت تحلیل، مودال و روش مورد استفاده، روش بلوک لانکوز^۲ می‌باشد.

پس از انجام تحلیل، نتایج بدست آمده برای نحوه تغییر شکل قالب و شکل مدها بویژه در اطراف منطقه تغییر شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. از بین فرکانس‌های طبیعی به دست آمده، فرکانس‌هایی انتخاب می‌شوند که شکل مد آنها برای فرایند شکل‌دهی مفیدتر باشند.

مرحله بعدی برای طراحی متمرکز کننده، تحلیل پاسخ هارمونیک است که به منظور بررسی دامنه ارتعاش ذرات سامانه بویژه در ناحیه شکل‌دهی انجام می‌شود. مطلوب آن است که دامنه ارتعاش در تمام سطوح حفره مربعی قالب تا حد امکان یکنواخت باشد. علاوه بر آن اندازه فاصله‌ی هوایی ایجاد شده بین لوله و قالب در ناحیه تماس این دو، در مدت زمان شکل‌دهی لوله قابل ارزیابی است. در مدت شکل‌دهی فاصله‌ی هوایی ایجاد شده میان لوله و قالب باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا امکان کاهش اصطکاک چسبنده در سطح تماس فراهم شود. درعین حال اندازه فاصله‌ی هوایی بزرگ‌تر از حد نیز همانطور که در مرجع [۷] نشان داده شد، سبب ایجاد خراشیدگی و غیریکنواختی دیواره قطعه می‌گردد. در این تحلیل اعمال بار دارای شکل هارمونیک (سینوسی و کسینوسی) می‌باشد. در شکل ۶ چگونگی اعمال شرایط مرزی در تحلیل هارمونیک طرح اول نشان داده شده است.



شکل ۶- مدل تحلیل هارمونیک طرح اول

$$u_{d,n} = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_d} x_d + \varphi\right) = -A \quad (۴)$$

$$\varphi = 0.671\pi$$

از آنجا که در لبه قالب مربعی در صفحه‌ی m ، موج از یک قطعه وارد قطعه دیگر می‌شود، مقدار جابجایی روی نقاط این صفحه، با استفاده از هر دو تابع برابر خواهد بود. بنابراین مقدار طول شیپوره l به دست خواهد آمد:

$$u_{d,0} = A \cos(0.671\pi)$$

$$u_{h,m} = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_h} l\right) \quad (۵)$$

$$u_{h,m} = u_{d,0} \quad , \quad l = 84.57 \text{ mm}$$

بنابراین برای ایجاد شکم در مرکز ناحیه شکل‌دهی، برای مبدل با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، طول شیپوره می‌بایست برابر ۸۴/۵۷ میلی‌متر باشد.

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

متمرکزکننده فراصوت و قیدهای آن، مهمترین بخش طراحی یک سامانه شکل‌دهی فراصوت می‌باشد. اگرچه برخی قوانین تحلیلی و یا تجربیات صنعتی برای طراحی اولیه ضروری است، اما با کمک هیچ یک از آنها امکان پیش‌بینی شکل مد^۱ و نحوه تغییر شکل قالب در حین ارتعاش وجود ندارد. لذا در این تحقیق تصمیم‌گیری در مورد طرح نهایی پس از 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.

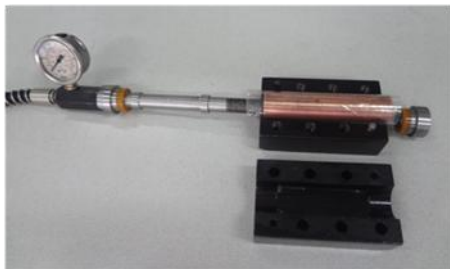
ب) تعیین طرح بهینه‌ای که بیشترین دامنه نوسانی در منطقه تغییر شکل ایجاد شود. این امر می‌تواند با تحلیل پاسخ هارمونیک صورت پذیرد.

تحلیل مودال متمرکز کننده بر اساس دو طرح پیشنهادی انجام شده است. هندسه مدل در نرم‌افزار اجزاء

^۲ Block Lanczos

^۱ Mode shape

فشارساز، قالب هیدروفرمینگ و یک مجموعه میله و توپی برای آب‌بندی لوله می‌باشد. پمپ فشارساز پدالی می‌تواند فشار بیشینه تا ۷۰۰ بار را ایجاد کند. از دلایل انتخاب این پمپ، دبی پایین روغن است که می‌تواند به آهستگی لایه نازکی از روغن به ضخامت حداکثر ۷/۷ میلی‌متر در فضای بین میله و لوله انباشته کند و با نرخ کرنش پایین عمل انبساط لوله را انجام دهد. قالب فولادی هیدروفرمینگ برای شکل‌دهی لوله، میله و توپی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- قالب هیدروفرمینگ، لوله و تجهیزات آب‌بندی

دو کفه قالب توسط میل راهنما با قطر ۸ میلی‌متر نسبت به هم موقعیت دهی می‌شوند. همچنین شش عدد پیچ استاندارد متریکی ۱۲ میلی‌متر^۲ برای بستن دو کفه قالب استفاده شده است. قسمت میانی حفره قالب، برای تغییر شکل لوله به مربع، و دو قسمت جانبی در آب‌بندی لوله کاربرد دارد.

قطعه اولیه در این آزمایش‌های، لوله مسی مورد استفاده در صنایع تبرید می‌باشد. این لوله‌ها با طول ۱۵۰ میلی‌متر و تیرانس ابعادی ۰/۱ میلی‌متر بریده شده و دو طرف آن به منظور تسهیل در جا زدن گردگیرها پخ زده می‌شود. سپس با هدف افزایش شکل‌پذیری، لوله‌ها آنیل شده‌اند.

از نایلون همراه با گریس برای روانکاری بین لوله و قالب استفاده شده است. برای اندازه‌گیری فشار داخلی نیز مطابق با شکل ۷ **Error! Reference source not found.** فشارسنج با دقت ۲۵ بار بر روی پایه‌ی واسطه‌ای که بین شلنگ پمپ و میله آب‌بندی قرار دارد، نصب شده است. با کمک تجهیزات معرفی شده، آزمایش‌های هیدروفرمینگ انجام شد. یکی از دلایل طراحی این واحد

همانطور که در شکل نشان داده شده است، ارتعاشات فراصوت در محلی که مبدل به قالب متصل است، به صورت تابع سینوسی جابجایی اعمال می‌شود، که A دامنه و ω فرکانس زاویه‌ایست. در تحلیل این مدل ارتعاشات با دامنه ۳ میکرومتر توسط مبدل به قالب اعمال می‌شود و ناحیه تماسی بین مبدل و قالب دایره‌ای با قطر ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

تحلیل هارمونیک برای هر یک از مدهای ارتعاشی طرح-های پیشنهادی انجام گرفته که هدف از آن، تحلیل سطح مقطع مربعی قالب و تعیین میزان جابجایی نقاط گرهی منتخب آن بوده است. تحلیل هارمونیک با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است.

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 کلاسیک هیدروفرمینگ لوله برای تغذیه محوری خارجی استفاده می‌شوند، حذف شده‌اند و لوله فقط تحت فشار هیدرولیک داخلی قرار می‌گیرد. با افزایش فشار داخلی، لوله تغییر شکل می‌یابد و فلز در داخل حفره قالب جریان پیدا می‌کند. با حرکت ماده به داخل حفره، لوله از دو انتها به داخل قالب کشیده می‌شود. آب‌بندی لوله به کمک دو آب‌بند گردگیر^۱ در دو طرف انجام شده است. گردگیرها آب‌بندهای متحرکی هستند که برای آب‌بندی پیستون‌ها و شافت پمپ‌ها استفاده می‌شوند. از یک مجموعه میله و توپی برای مهار آب‌بندها استفاده شده است. آب‌بندها بر روی نشیمن‌گاهی که بر روی میله و توپی به اندازه قطر داخلی آنها تراشیده شده سوار می‌شوند. از توپی به منظور بستن یک سمت لوله استفاده می‌شود.

بر اساس این مکانیزم، مجموعه‌ای برای هیدروفرمینگ لوله و تبدیل آن به پروفیل با مقطع مربع طراحی و پیاده‌سازی شده است. این مجموعه تجهیزات شامل یک پمپ

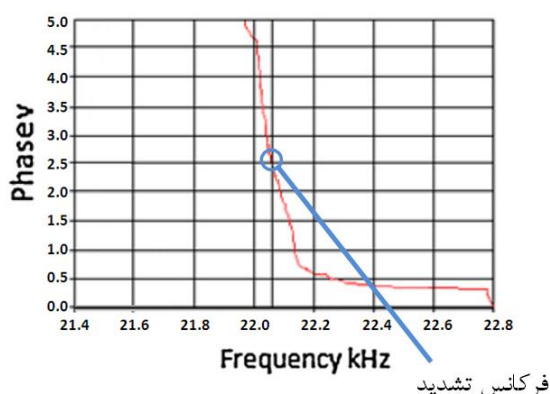
² M12

¹ Wiper Seal

تماس با قالب بزرگترین مقدار است (شکل ۹ Error! Reference source not found. ب).



الف



ب

شکل ۸- الف) اسکن واحد کنترل بر روی بازه فرکانسی ب) ایجاد گراف برای تشخیص فرکانس تشدید

همانطور که در این شکل نشان داده شده است، در این آزمایش‌های 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 می‌باشد. در آزمایش طرح اول در شکل ۹ Error! Reference source not found. الف، با توجه به طول زیاد، شیپوره در نقطه اول گرهی که در شکل ۴-ب نشان داده شده است، بر روی پایه قرار گرفته است. بدین منظور در هنگام تراشکاری شیپوره، باریکه‌ای برای این منظور در نظر گرفته شده، که پایه شیپوره به آن پیچ می‌شود. بخشی از شیپوره به همراه مبدل در داخل پوشش محافظ استوانه‌ای قرار می‌گیرند، که به کمک هوا خنک‌کاری می‌شود. در آزمایش هیدروفرمینگ فراصوت با

هیدروفرمینگ، امکان مونتاژ آن با مجموعه ارتعاشات فراصوت است.

تجهیزات فراصوت شامل منبع تغذیه فراصوت و مبدل پیزوالکتریک است. منبع تغذیه فراصوت ای‌ام‌ام^۱ که از کنترل کامپیوتری فرمان می‌گیرد، تا توان حداکثر ۳ کیلووات را می‌تواند به مبدل منتقل کند. مبدل کیستلر^۲ ۲۰ کیلوهرتز، با توان حداکثر ۹۰۰ وات، برای انجام آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

منبع تغذیه مورد استفاده در این تحقیق، قادر است با تغییر شرایط کاری سامانه، فرکانس تشدید مجموعه را با سرعت ۱۰۰ بار در ثانیه اسکن نماید و با همان سرعت، فرکانس کاری خود را بر اساس آن تنظیم کند [۱۴]. در هر مرحله آزمایش، سامانه کنترل کامپیوتری با استفاده از نرم-افزار گرافیکی لب‌ویو^۳، بازه فرکانسی انتخابی را اسکن کرده تا 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 فراصوت بر اساس دو مدل 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، به منظور 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 فراصوت در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که بخش ۳-۱ توضیح داده شد، در این تحقیق دو شیپوره مورد استفاده قرار گرفته است. در طرح اول سطح مقطع شیپوره به سمت قالب کاهش می‌یابد (شکل ۹-الف)، و در طرح دوم سطح مقطع شیپوره در محل

^۱ AMMM Puls Generator

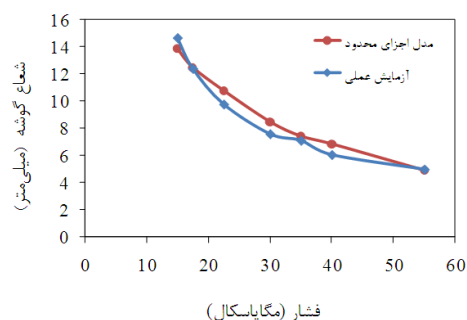
^۲ Kistler Piezoelectric Transducer

^۳ Labview

دامنه وسیعی از فشار در آزمایش‌های عملی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱۰ قطعات هیدروفرم شده با فشارهای مختلف نشان داده شده است. نمودار شکل ۱۱ نیز منحنی تغییر شکل لوله نسبت به فشار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- قطعات نهایی هیدروفرم شده با فشارهای مختلف



شکل ۱۱- ارتباط شعاع گوشه با فشار شکل‌دهی در مدل اجزاء محدود در قیاس با قطعات عملی

میزان تغییر شکل لوله با اندازه‌گیری طول ناحیه تماسی لوله سنجیده شده است. شعاع گوشه نیز با کسر ناحیه تماسی از طول لوله اولیه اندازه‌گیری می‌شود. هر چه شعاع گوشه کوچک‌تر باشد، میزان تغییر شکل لوله در هیدروفرمینگ بیشتر است. همانطور که در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده است، با افزایش فشار، طول ناحیه تماسی لوله در منطقه با سطح مقطع مربع، افزایش یافته و شعاع گوشه لوله کاهش می‌یابد. نمودار **Error! Reference source not found.** ۱۱ انطباق خوب نتایج مدل اجزای محدود و آزمایش عملی 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

شیپوره طرح اول، اسکن واحد کنترل روی مجموعه‌ی متمرکز کننده هیچ فرکانس تشدید را نشان نمی‌دهد. به نظر می‌رسد، به دلیل تغییر ناگهانی سطح مقطع در محل تماس شیپوره و قالب، امکان انتقال ارتعاشات و تحریک شکل مد وجود ندارد.



الف



ب

شکل ۹- آزمایش هیدروفرمینگ لوله فراصوت (الف) طرح اول (ب) طرح دوم

در آزمایش طرح دوم در شکل ۹-ب سطح شیپوره به صورت مخروط با زاویه ۱۵ درجه به سمت قطعه کار افزایش می‌یابد. با این اصلاح در شیپوره، سطحی از شیپوره که با قالب در تماس است و ارتعاشات را به قالب منتقل می‌کند افزایش می‌یابد.

نتیجه اسکن کنترل‌کننده برای آزمایش طرح دوم در شکل ۸ ارائه شد. همانگونه که در این شکل مشخص است کنترل‌کننده در این حالت، فرکانس تشدید ۲۲/۰۶ کیلوهرتز را تشخیص داده است. این فرکانس تنها فرکانس تشخیص داده شده در بازه اسکن شده‌ی ۱۹ تا ۲۲/۵ کیلوهرتز است.

۵- نتایج

اندکی افزایش می‌یابد [۷]. نتایج مشابهی برای نمودار ضخامت دیواره لوله در هیدروفورمینگ با مقطع مربعی در مرجع [۲] ارائه شده است.

در فشار ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، میانگین اختلاف نسبی بین ضخامت لوله مربعی با نقاط متناظر روی نمودار مدل اجزای محدود به ترتیب ۱/۹٪ و ۷/۶٪ می‌باشد. مشاهده می‌شود که تغییرات نمودار عملی در هر دو فشار، مشابه با نمودار اجزای محدود است، اما پایین‌تر از آنها قرار گرفته است. مهمترین دلیلی که برای توجیه این رفتار می‌توان در نظر گرفت، ضخامت لوله اولیه است که به دلیل غیریکنواختی، در بیشتر نقاط کمتر از اندازه اسمی یعنی ۱/۱ میلی‌متر می‌باشد. در ادامه نتایج افزودن ارتعاشات به قالب هیدروفورمینگ لوله مطالعه می‌شود. در شبیه‌سازی اجزاء محدود، ارتعاشات قالب به صورت حرکت سینوسی قالب صلب تعریف می‌شود که 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 مؤلفین در مرجع [۷] تشریح شد، سبب ایجاد اثرات سطحی، از جمله کاهش نیروی اصطکاک، ایجاد اصطکاک مفید برای شکل‌دهی و همچنین اثرات حجمی مانند نرم‌کنندگی فلزی خواهد شد. اثر ارتعاشات در بهبود فرایند شکل‌دهی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این شکل با مقایسه نتایج مدل اجزای محدود فرایند در حالت کلاسیک و فراصوت به دست آمده است.

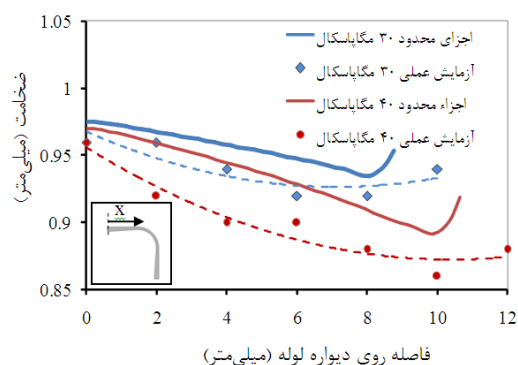
با دقت در شکل ۱۳-الف مشخص می‌شود که در فشار شکل‌دهی یکسان، میزان تغییر شکل لوله در هیدروفورمینگ فراصوت بیشتر از هیدروفورمینگ کلاسیک است. با بهره‌گیری از مزایای ارتعاشات قالب، شکل‌دهی تسهیل شده و امکان دستیابی به گوشه‌های تیزتر فراهم می‌گردد. میزان کاهش شعاع گوشه با استفاده از ارتعاشات در فشارهای بالا 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 فراصوت در فشارهای بالاتر، تأثیر بیشتری بر افزایش شکل‌دهی دارد.

پراکندگی ضخامت دیواره در شکل ۱۳-ب با استفاده از تابع انحراف مقادیر^۲ و به کمک رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود.

عملی، و برخی از ساده‌سازی‌ها در شبیه‌سازی، سبب این اختلاف شده است.

متغیر دیگری که برای صحت سنجی نتایج اجزاء محدود، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، توزیع ضخامت دیواره لوله مربعی است. بدلیل وجود اصطکاک که از حرکت ماده جلوگیری می‌کند، ضخامت دیواره تولیدی متغیر خواهد بود. برای اندازه‌گیری ضخامت دیواره، لوله‌ها از قسمت میانی برش خورده است. تغییرات ضخامت دیواره لوله در امتداد محیطی (پیرامونی) در لوله اجزاء محدود، با نتایج اندازه‌گیری شده (آزمایش تجربی)، در شکل ۱۲ مقایسه شده است. محور افقی نمودار، معرف فاصله بر روی نصف یک ضلع مربع می‌باشد.

ضخامت قطعه تولیدی در دو ضلع اندازه‌گیری شده و نتایج شکل ۱۲. **Error! Reference source not found.** میانگین نتایج روی این دو ضلع می‌باشند. اندازه‌گیری ضخامت به کمک کولیس با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر انجام شده است. از آنجا که اندازه‌گیری ضخامت بر روی دیواره در نقاط نشان داده شده، با خطا همراه بوده است، در اینجا یک منحنی درجه ۲ بر نقاط برازش^۱ شده است.



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

مطابق با شکل ۱۲ هم در مدل‌های تئوری و هم در آزمایش عملی، 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 به دلیل نبودن فشار تماسی سطح قالب،

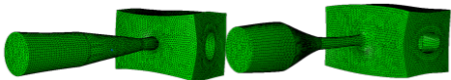
^۲ Variance Function

^۱ Curve Fitting

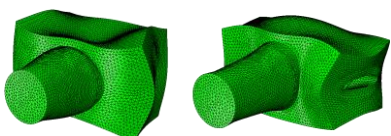
فصل مشترک جلوگیری کرده و بنابراین با افزایش فشار، شرایط اصطکاکی تقریباً ثابت می‌ماند.

پس از بررسی چگونگی تأثیر ارتعاشات فراصوت بر فرایند، بر اساس مدل اجزاء محدود، در این قسمت نتایج تحلیل مودال و هارمونیک دو طرح پیشنهادی بررسی می‌شود. نتایج تحلیل مودال در محدوده ۱۹ تا ۲۳ کیلوهرتز، برای طرح اول ۶ فرکانس طبیعی و برای طرح دوم ۳ فرکانس طبیعی تشخیص می‌دهد. از آنجا که حرکت ارتعاشی مبدل به صورت طولی است، از بین شکل مدهای متناظر با فرکانس-های بدست آمده، تنها شکل مدهایی قابل تحریک است که در آنها، حرکت شیپوره به صورت طولی باشد. نتایج تحلیل مودال نشان می‌دهد که در هر یک از این دو مدل، تنها یک شکل مد، با فرکانسی نزدیک به فرکانس مبدل (۲۰ کیلوهرتز) امکان تحریک دارند. شکل مد منتخب برای طرح اول در جدول ۴ و برای طرح دوم در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- شکل مد منتخب قابل تحریک برای طرح اول

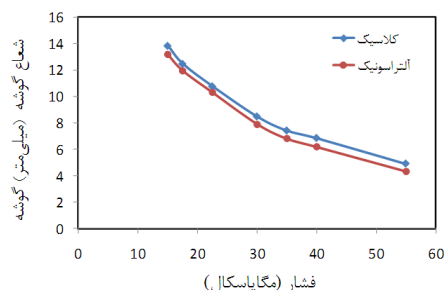
فرکانس (Hz)	ساختار تغییر شکل یافته (با بزرگنمایی)، توالی جابجایی	Y X Z
۲۰۶۳۵		

جدول ۵- شکل مد منتخب قابل تحریک برای طرح دوم

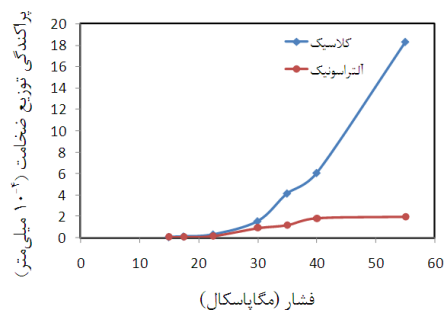
فرکانس (Hz)	ساختار تغییر شکل یافته (با بزرگنمایی)، توالی جابجایی	Y X Z
۲۰۵۱۸		

همانگونه که نتایج تحلیل مودال در جدول ۴ و جدول ۵ نشان می‌دهد، برای هر دو طرح، در فرکانسی نزدیک به فرکانس کاری مبدل، مجموعه‌ای متمرکز کننده تشدید شده است. در هر دو طرح نیز شکل مد نشان داده شده شامل ارتعاش طولی شیپوره و حرکت انتقالی مواد در قالب، در جهت محور شیپوره می‌باشد. ارتعاش قالب با این شکل مد،

$$Var(\{t\}) = \frac{\sum(t - \bar{t})}{(n - 1)} \quad (۶)$$



الف

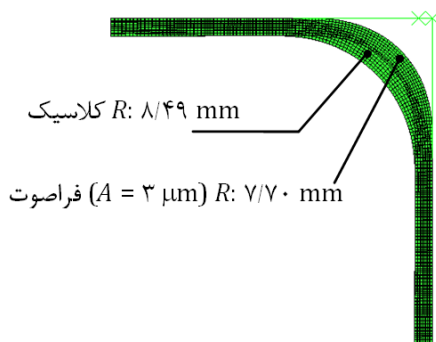


ب

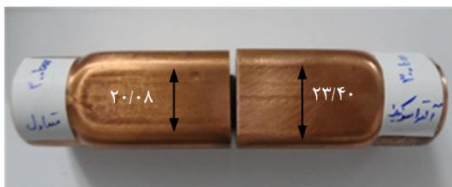
شکل ۱۳- بررسی تئوری اثر ارتعاشات در بهبود فرایند (الف) میزان تغییر شکل، (ب) یکنواختی ضخامت

در شکل ۱۳-ب پراکندگی ضخامت دیواره در هیدروفورمینگ فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و با دامنه ۳ میکرومتر، نشان داده شده و با نتایج هیدروفورمینگ کلاسیک مقایسه شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، در هیدروفورمینگ کلاسیک با افزایش فشار، میزان غیریکنواختی در ضخامت دیواره، به دلیل تغییر شرایط اصطکاکی در نقاط مختلف دیواره، به شدت افزایش می‌یابد. این در حالی است که در هیدروفورمینگ فراصوت 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 فراصوت عمدتاً ناشی از اثر ارتعاشات فراصوت بر اصطکاک می‌باشد [۷]. ایجاد جدایش در سطح مشترک لوله و قالب، از رشد اصطکاک چسبیده در

داشت که در این آزمایش، تنها امکان تحریک شکل مد منتخب در جدول ۵ وجود دارد. مقدار فرکانس طبیعی پیش-بینی شده توسط مدل اجزاء محدود و مقدار بدست 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 به دلیل غیر دقیق بودن جنس مواد اولیه، از جمله آلیاژ آلومینیوم است. عامل بعدی، اتصال ضعیف شیپوره به سطح قالب با استفاده از پیچ متریکی ۸ میلی‌متر است. اتصال ضعیف می‌تواند در بین دو پیشانی شیپوره و سطح قالب فاصله ایجاد کند و به نظر می‌رسد که این عامل یکی از دلایل جابجایی فرکانس طبیعی بوده است. فرایند هیدروفرمینگ فراصوت به صورت آزمایشگاهی برای تبدیل لوله مسی به پروفیل مربع انجام شده است. در شکل ۱۴-الف اثر ارتعاشات فراصوت بر لوله‌ی نهایی در شبیه‌سازی اجزاء محدود، و در شکل ۱۴-الف **Error! Reference source not found.** در آزمایش تجربی بر اساس طرح دوم، برای فشار ۳۰ مگاپاسکال نشان داده شده است.



الف) شبیه‌سازی حرکت سینوسی قالب



ب) آزمایش تجربی بر اساس طرح دوم

شکل ۱۴- تاثیر ارتعاشات فراصوت بر هیدروفرمینگ در فشار ۳۰ مگاپاسکال و فرکانس ۲۲/۰۶ کیلوهرتز

سبب ایجاد فاصله هوایی در مرکز اضلاع ناحیه شکل‌دهی می‌شود. ایجاد این فاصله‌ی هوایی همانطور که در مرجع [۷] نشان داده شد، موجب کاهش اصطکاک و از مهمترین اثرات ارتعاشات بر شکل‌پذیری لوله می‌باشد. به کمک تحلیل هارمونیک می‌توان میزان جابجایی نقاط ناحیه شکل‌دهی را تحت تأثیر تحریک مبدل تعیین کرد. در جدول ۶ میزان میانگین جابجایی گره‌های واقع بر هر یک از سطوح حفره مربعی قالب برای شکل مد منتخب هر طرح ارائه شده است. این مقادیر برای هر سطح در جهت عمود بر آن سطح اندازه‌گیری شده است. مقدار جابجایی گره‌ها در این جدول برای اندازه دامنه ۳ میکرومتر و فرکانس تشدید هر طرح مطابق با جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۶- میانگین جابجایی گره‌های هر ضلع (میلی‌متر)

طرح	پایین (۰-۷)	بالا (۰+۷)	راست (۰-X)	چپ (X+)
طرح اول	۲۰/۸۷	۲۰/۸۷	۶۵/۶۷	۶۴/۸۴
طرح دوم	۲۲/۰۶	۲۲/۳۲	۳۱/۳۲	۲۶/۷۴

همانگونه که اعداد جدول نشان می‌دهد، در فرکانس تشدید اندازه متوسط دامنه ارتعاشی نقاط ناحیه‌ی شکل‌دهی در شکل مدهای منتخب، بسیار بیشتر از اندازه دامنه‌ی تحریک مبدل در مدل هارمونیک می‌باشد. است. در مد ارتعاشی متناظر با فرکانس ۲۰۶۳۵ در طرح اول، اندازه فاصله‌ی هوایی متوسط شکل‌گرفته در سطوح چپ و راست قالب، چند برابر دو سطح بالا و پایین قالب می‌باشد، که نشان دهنده حرکت انتقالی ماده در راستای انتشار موج می‌باشد. در طرح دوم، مقدار بیشترین جابجایی در سطوح بالا و پایین با کمترین مقدار آن در سطح چپ، ۲۹/۶٪ اختلاف دارد، که نشان دهنده یکنواختی بیشتر شکل‌دهی لوله در سطوح مختلف قالب برای این طرح است.

در قسمت آزمایش‌های عملی مطرح شد که اسکن مجموعه متمرکز کننده در آزمایش تجربی طرح اول نتیجه‌ای در بر نداشت. اما در آزمایش طرح دوم، فرکانس تشدید ۲۲۰۶۰ هرتز تشخیص داده شد. حال آنکه بر اساس نتایج تحلیل مودال در متمرکز کننده طرح دوم در جدول ۵، فرکانس تشدید برابر ۲۰۵۱۸ است. از آنجا که در شکل مدهای دیگر، ارتعاش شیپوره طولی نیست، می‌توان اطمینان

تحریک مبدل است. مطابق با نتایج جدول ۷، 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، به دلیل عملکرد غیر بهینه مبدل، کوچک‌تر از مقادیر حاصل از تحلیل هارمونیک باشد که در جدول ۶ 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 فرکانس عملکرد بهینه مبدل است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روش نوین 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 را تأیید می‌شود. با تأیید نتایج این مدل، می‌توان از نتایج تحلیل آن برای مطالعه اثر اضافه شدن ارتعاشات به قالب بر فرآیند استفاده کرد.

- در مدل اجزاء محدود، اثر ارتعاشات بر فرآیند، به صورت 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 اجزای محدود، مجموعه مولد و متمرکز کننده آلتراسونیک طراحی شد. در اینجا هدف تحقیق، طراحی متمرکز کننده به گونه‌ایست که امکان استفاده از بیشترین اثرات مفید ارتعاشات در شکل‌دهی لوله فراهم شود. نتایج تحلیل مودال نشان داد که برای هر یک از دو طرح پیشنهادی، یک شکل مد با توجه به نحوه ارتعاش شیپوره امکان تحریک دارد.

- از میان دو طرح پیشنهادی، نتایج اسکن واحد کنترل روی مجموعه متمرکز کننده، نشان داد که طرح دوم کارایی بالاتری در انتقال ارتعاشات و رسیدن به سطح تشدید دارد، که دلیل آن سطح تماس وسیع‌تر شیپوره و سطح قالب می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۴-ب مشاهده می‌شود، در آزمایش تجربی، میزان طول ناحیه تماسی در شکل‌دهی همراه با فراصوت افزایش یافته است. اما لازم به ذکر است بخشی از این افزایش مربوط به بزرگتر شدن طول ضلع خارجی پروفیل مربعی لوله است. در فرآیند هیدروفرمینگ کلاسیک، طول ضلع پروفیل بیرونی برابر با طول ضلع حفره قالب حفره قالب و برابر $35/3$ با تolerانس $0/1$ میلی‌متر است. اما در قطعه فراصوت، ارتعاشات قالب سبب افزایش قطر خارجی پروفیل به $35/5$ و با تolerانس $0/3$ میلی‌متر شده است. این افزایش قطر خارجی لوله نهایی می‌تواند ناشی از افزایش ابعاد حفره قالب در حین ارتعاش و همچنین کاهش مقدار برگشت فتری باشد. میزان کاهش شعاع گوشه در فرآیند فراصوت نسبت به فرآیند کلاسیک در فشار 30 مگاپاسکال، برای آزمایش عملی و شبیه‌سازی اجزاء محدود در جدول ۷ بیان شده است.

جدول ۷- شعاع گوشه لوله مسی

$$(f = 22/06 \text{ kHz}, P = 30 \text{ MPa})$$

فرآیند	کلاسیک	فراصوت	بهبود در
هیدروفرمینگ	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	فراصوت
شبیه‌سازی	۶/۸۵	۶/۱۷	۱۰/۰۰٪
آزمایش تجربی	۶/۰۳	۵/۶۵	۶/۲۲٪

مطابق با نتایج جدول ۷ میزان بهبود فرآیند و یا عبارتی میزان کاهش شعاع گوشه با استفاده از ارتعاشات فراصوت، 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 فراصوت لوله مسی، دامنه نوسان قالب ۳ میکرومتر در نظر گرفته شده است، حال آنکه در آزمایش عملی، به دلیل تشدید متمرکز کننده، میزان دامنه‌ی ارتعاشی در ناحیه‌ی شکل‌دهی متفاوت با دامنه تحریک مبدل می‌باشد. دوم آنکه نحوه تغییر شکل در مدل اجزاء محدود، به صورت حرکت قالب صلب است. اما در عمل مطابق با جدول ۵ تغییر شکل قالب در نقاط مختلف سطح حفره قالب متفاوت است. سوم آنکه همانگونه که اعداد جدول ۶ نشان می‌دهد، چنانچه مبدل و متمرکز کننده تشدید شوند، در شکل مد منتخب نشان داده شده در جدول ۵ عملاً مقدار دامنه نوسان سطوح حفره قالب، به مراتب بیش از دامنه

[۱۲] ولی‌نژاد عبدالله (۱۳۹۱) کلید فولاد. ویرایش هفتم، نشر طراح. تهران.

[13] Metals Handbook, Vol. 2 (1990) Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International 10th ed.

[14] AMMM Generator manual. Swiss MPI Corporation, (2011) www.mastersonics.com/documents/mmm_basics/mmm_power_supplies/AMMM/ammmsoftware/ammm_generator_manual_latest.pdf.

- نتایج آزمایش عملی هیدروفرمینگ فراصوت با استفاده از متمرکز کننده طرح دوم، حاکی از بهبود شکل‌پذیری نسبت به هیدروفرمینگ کلاسیک می‌باشد.

مراجع

- [1] Dohmann F., Hartl Ch. (1996) Hydroforming – a method to manufacture lightweight parts. *Journal of Materials Processing Technology* 60: 669–676.
- [2] Hwang Y., Chen W. (2005) Analysis of tube hydroforming in a square cross-sectional die. *International Journal of Plasticity* 21: 1815–1833.
- [3] Nihare C., Weiss M., Hodgson P.D. (2009) FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel. *Computational Materials Science* 47: 146–152.
- [4] Jimma T., Kasuga Y., Iwaki N., Miyazawa O., Mori E., Ito K., Hatano H. (1998) An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology* 80–81: 406–412.
- [5] Akbari Mousavi S.A.A., Feizi H., Madoliat R. (2007) Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process. *Journal of Materials Processing Technology* 187–188: 657–661.
- [6] Yao Z., Kim G. -Y., Faidley L., Zou Q., Mei D., Chen Z. (2012) Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting. *Journal of Materials Processing Technology* 212: 640–646.
- [۷] افتخاری شهری سید احسان، احمدی بروغنی سید یوسف، خلیلی خلیل، کنگ بیم سو (۱۳۹۲) هیدروفرمینگ لوله فراصوت، بررسی تحلیلی و عددی. *مجله فنی و مهندسی مدرس- مهندسی مکانیک* ۱۳(۴): ۴۶–۵۹.
- [8] ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- [9] Meriam J. L., Kraige L. G, Palm W. J. (2002) *Engineering Mechanics: Dynamics*. 5th edn. John Wiley & Sons Inc. New York.
- [10] Rose J.L. (1999) *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press.
- [11] Cheers C.F. (1995) Design and optimization of an ultrasonic die system for forming metal cans. PhD dissertation. Loughborough University of Technology.