Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(10) (2021) 657-660
DOI: 10.22060/mej.2019.15672.6181

Ultrasonic Guided Wave-Based Inspection of Straight Seam Welded Pipes

M. Asgari[1], F. Honarvar[1], M. Tabatabaeipour[2]*

[1] Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
[2] Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK

ABSTRACT: Low-pressure fluid transmission lines are largely manufactured by cold rolling of a plate followed by resistance welding of the two edges of the plate. Consequently, these pipes have a straight weld seam along their length. In this paper, a finite element method is used for simulating the propagation of symmetric guided wave modes L(0,2), L(0,1) and T(0,1) in straight seam welded pipes. A comparison is made between the propagation of these wave modes in seamless and seam welded pipes. Results indicate that the angular amplitude profiles of the L(0,2) and T(0,1) modes do not change much in the presence of the seam weld. However, the presence of the straight seam weld significantly affects the propagation of the L(0,1) mode along the pipe. While the angular displacement profile for the L(0,2) and T(0,1) modes are almost symmetric, for the L(0,1) mode, the angular displacement profile shows high asymmetry. This asymmetric behavior impairs the sensitivity of this mode to the detection of defects in the proximity of the weld line. As a result, the guided wave modes L(0,2) and T(0,1) are considered to be suitable for inspection of straight seam welded pipes but L(0,1) is not recommended for this purpose.

Review History:

Received: 26 Jan. 2019
Revised: 7 Apr. 2019
Accepted: 14 Apr. 2019
Available Online: 29 Apr. 2019

Keywords:

Ultrasonic guided wave
Longitudinal mode
Torsional mode
Straight weld-seam
Wave structure

1- Introduction

Guided wave ultrasonic testing of pipes has received much attention in recent years. Many variables influence the propagation of guided waves in pipes, including the geometry and boundary conditions of the waveguide. According to API 1104 standard, many of the pipes used for fluid transfer are straight seam weld pipes [1]. The straight seam weld makes the geometry of the pipe heterogeneous along with the thickness and affects the sensitivity of the guided wave ultrasonic testing of the pipe.

The inspection of pipes with guided waves dates back to several decades ago. Alleyne and Cawley [2] developed a system to produce an axisymmetric L(0,M) wave mode in a pipe. Zheng et al. [3] used finite element method (FEM) to investigate the propagation of symmetric guided waves and studies the mode conversion of these waves due to interaction with symmetrical grooves. Based on numerous studies, the guided waves are sensitive to geometric variations in the pipe and pipe boundary conditions. In this paper, the effect of straight weld seam on the propagation of three symmetric guided wave modes L(0,2), L(0,1) and T(0,1) is considered.

Table 1. Mechanical properties of a standard steel pipe

Young modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m^3)
209	0.3	7850

*Corresponding author's email: Morteza.tabatabaeipour@strath.ac.uk

2- Finite Element Method

A 3-Dimensional (3D) model of a pipe with a diameter of 220 mm and a wall thickness of 4.8 mm is modelled in Abaqus software. The pipe is modelled and evaluated initially as a seamless pipe and then as a pipe with a straight seam weld as shown in Fig. 1. The mechanical properties of the pipe are given in Table 1 [1].

The C3D8 type element is used in Abaqus to decrease the computational time. Furthermore, to mitigate the reflections from two extreme boundaries of the pipe, infinite elements of CIN3D8 are used in boundaries. The sample is then excited

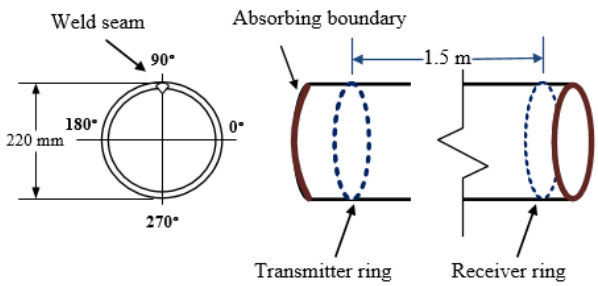


Fig. 1. A schematic of the simulated model in Abaqus software showing a transmitter ring consisting of 24 transducers generating the symmetrical wave modes of L(0,2), L(0,1) and T(0,1).

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

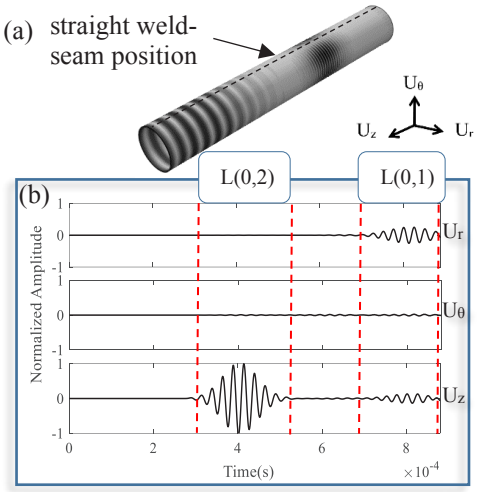


Fig. 2. (a) Propagation of longitudinal mode in the pipe, (b) typical received signal of L(0,2) and L(0,1)

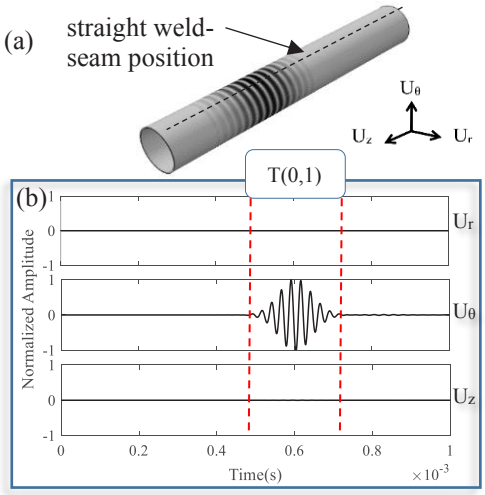


Fig. (a) Propagation of torsional mode in the pipe, (b) typical received signal of T(0,1) mode

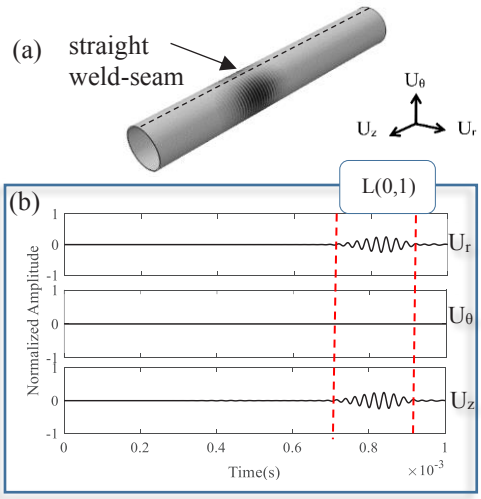


Fig. 3. (a) Propagation of longitudinal mode in the pipe, (b) typical received signal of L(0,1).

with a 10 cycles sine tone burst with a frequency of 40 kHz. To alleviate the generation of flexural modes, the number of transducers in a transmitter ring should be greater than the highest rank of flexural mode at that frequency. Therefore, the sample was symmetrically excited in 24 points around the pipe. Fig. 1 shows a schematic image of the simulated model in the software. The direction of loading for generating the L(0,2), L(0,1) and T(0.1) wave modes has been taken from [4, 5].

3- Results and Discussion

Both the geometry and material properties of a seam weld can affect the propagation of guided waves in a pipe. Figures 2, 3 and 4, respectively, show how each of the modes L(0,2), L(0,1) and T(0,1) propagate in a seam-welded pipe along with their corresponding signals. Note that all signals are measured at a distance of 1.5 meters from the transmitter ring. For further analysis and better understanding of how these modes propagate in a pipe, it is necessary to plot the angular displacement profile of each mode separately.

Symmetric modes have symmetric displacement profiles around the pipe which is a favorable characteristic of these

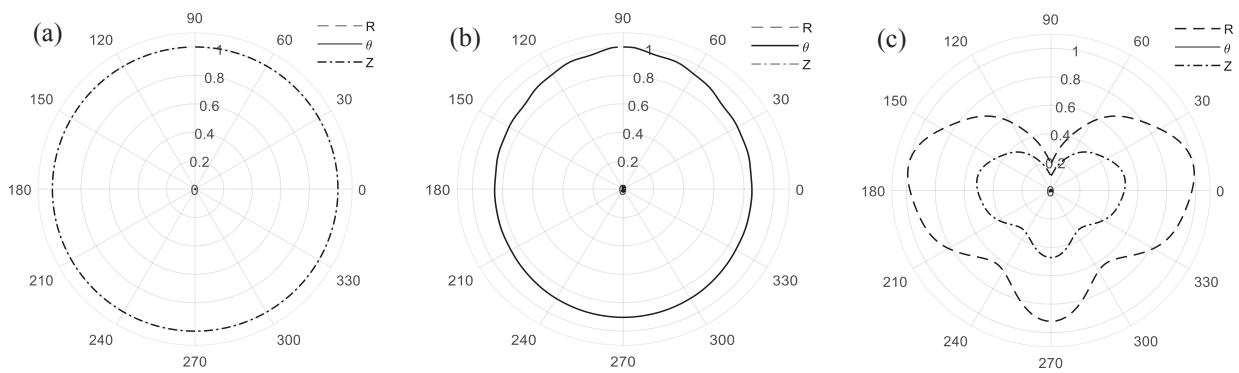


Fig. 5. Angular amplitude profile of (a) L(0,2) mode, (b) T(0,1) Mode and (c) L(0,1) Mode in a straight seam welded pipe. The weld line is at 90 degrees

modes [6]. Fig. 5a shows the angular profile of L(0,2) mode in a pipe with longitudinal seam weld. As seen in Fig. 5a, the existence of the weld seam does not affect the symmetry of this mode around the pipe and the distribution of wave amplitude around the pipe is uniform at all points. The angular profile of T(0,1) is shown in Fig. 5b around a seam welded pipe. The seam does not significantly affect the symmetry of angular distribution of this mode. For the L(0,1) mode, while the angular profile is symmetric around a seamless pipe, it loses its symmetry in the presence of a weld seam as shown in Fig. 5c. Consequently, the distribution of both U_r and U_z around the pipe is not symmetric anymore. The amplitudes of both U_r and U_z displacement components reach a minimum at the position of 90 degrees around the pipe.

4- Conclusions

In this paper, the effect of a weld seam line on the propagation of three guided wave modes in a seam welded pipe at a frequency of 40 kHz was investigated by finite element modeling. The angular profile of displacements around pipes with and without a seam weld was plotted. It was observed that the presence of the seam weld does not affect the displacement profile of the L(0,2) and T(0,1) modes. However, for the L(0,1) mode, the displacement profile is highly affected such that the displacement profile for both displacement components U_r and U_z become non-symmetric around the pipe. For this mode, the displacement amplitude at the seam weld significantly drops and this affects the sensitivity of defect detection at the weld. It can be concluded that the wave modes L(0,2) and T(0,1) are suitable for inspection of pipes having longitudinal weld seams.

References

[1] A.P. Institute, API Standard 1104: welding of pipelines and related facilities, American Petroleum Institute, 2005.

[2] D. Alleyne, P. Cawley, The excitation of Lamb waves in pipes using dry-coupled piezoelectric transducers, Journal of Nondestructive Evaluation, 15(1) (1996) 11-20.

[3] M.-f. Zheng, C. Lu, G.-z. Chen, P. Men, Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach, Physics procedia, 22 (2011) 112-118.

[4] P.S. Lowe, R.M. Sanderson, N.V. Boulgouris, A.G. Haig, W. Balachandran, Inspection of cylindrical structures using the first longitudinal guided wave mode in isolation for higher flaw sensitivity, IEEE Sensors Journal, 16(3) (2016) 706-714.

[5] F. Seco, J.M. Martín, A. Jiménez, J.L. Pons, L. Calderón, R. Ceres, PCDISP: a tool for the simulation of wave propagation in cylindrical waveguides, in: 9th International Congress on Sound and Vibration, 2002.

[6] S. Fateri, P.S. Lowe, B. Engineer, N.V. Boulgouris, Investigation of ultrasonic guided waves interacting with piezoelectric transducers, IEEE Sensors Journal, 15(8) (2015) 4319-4328.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۰، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۶۴۷ تا ۲۶۶۰
DOI: 10.22060/mej.2019.15672.6181

بررسی اثر درز جوش طولی لوله در هنگام بازرسی فراصوتی لوله با امواج هدایت‌شده متقارن

مجتبی عسگری[۱]، فرهنگ هنرور[۱]، سید مرتضی طباطبایی‌پور[۲*]

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
[۲] دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه استرثکلاید، گلاسگو، انگلستان

خلاصه: استفاده از امواج هدایت‌شده متقارن برای بازرسی غیرمخرب لوله‌ها، با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد این امواج، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. اغلب لوله‌های استفاده شده در خطوط انتقال سیالات فشار پایین دارای درز جوش طولی هستند. درز جوش طولی، ضخامت لوله را در ناحیه جوش نسبت به سایر نواحی غیریکنواخت می‌کند. در این مقاله، ابتدا انتشار مدهای متقارن طولی اول و دوم و مد متقارن پیچشی اول امواج هدایت‌شده در لوله با استفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی می‌شود و سپس اثر هندسه درز جوش طولی بر روی انتشار این مدها بررسی می‌گردد. بررسی انتشار موج مربوط به مد طولی دوم نشان می‌دهد که در اثر حضور درز جوش طولی، تقارن پروفیل زاویه‌ای مد طولی دوم تغییری نمی‌کند. همچنین، درز جوش، اثر ناچیزی بر روی انتشار مد پیچشی اول دارد. بیشترین اثر خط جوش بر روی انتشار مد طولی اول است، بطوری‌که پروفیل زاویه‌ای این مد در حضور خط جوش از حالت تقارن خارج شده و دامنه این مد در ناحیه خط جوش به شدت کاهش می‌یابد. همین امر حساسیت عیب‌یابی با این مد را در نواحی خط جوش کاهش می‌دهد. براساس نتایج بدست آمده، استفاده از دو مد طولی دوم و پیچشی اول برای بازرسی لوله‌های دارای درز جوش طولی مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹

کلمات کلیدی:
امواج فراصوتی هدایت‌شده
مد طولی و پیچشی متقارن
درز جوش طولی
ساختار موج
پروفیل زاویه‌ای

۱- مقدمه

امروزه میلیون‌ها کیلومتر خط لوله انتقال نفت و گاز در سراسر جهان به کار گرفته شده است. با گذشت زمان، این خطوط را گسترش عیب‌هایی مانند خوردگی، حفره و ترک در قسمت‌های جوشکاری شده و همچنین آسیب‌های ناشی از بلایای طبیعی و حفاری تهدید می‌کند. در نتیجه نیازی حیاتی به عیب‌یابی خطوط لوله برای اجتناب از خرابی‌های آن‌ها احساس می‌شود. روش‌هایی نظیر آزمون رادیوگرافی و فراصوتی سنتی برای بازرسی این خطوط مورد استفاده قرار می‌گیرد. که در این روش‌ها دسترسی به سطوح خارجی لوله باید امکان‌پذیر باشد و بدلیل انجام بازرسی نقطه به نقطه، بسیار کند و هزینه‌بر هستند. برای برطرف ساختن این مشکلات، تلاش‌های گسترده محققان و پژوهشگران باعث ایجاد و بکارگیری روش نوین بازرسی با کمک امواج فراصوتی هدایت‌شده[۱] شده است. این امواج در سازه‌هایی که خاصیت موجبری[۲] دارند، منتشر می‌شوند و توانایی انتشار تا مسافت‌های طولانی را دارند. علاوه بر این می‌توان لوله‌های مدفون در زیر خاک و خطوط لوله موجود در زیر آب را نیز بازسی کرد. بازرسی با امواج هدایت‌شده فراصوتی نیازمند داشتن دانش کافی درباره رفتار موج در سازه‌ها و عکس‌العمل آن در برخورد با ناپیوستگی‌های موجود در سازه است. متغیرهای بسیاری در انتشار امواج هدایت‌شده در لوله موثرند؛ از جمله آن‌ها می‌توان به هندسه و شرایط مرزی موجبر اشاره کرد. لوله‌های استفاده شده برای انتقال سیالات، با توجه به فرآیند ساخت و نصب، دارای خطوط جوش طولی، محیطی و یا مارپیچ هستند. لوله‌های دارای درز جوش طولی با استفاده از فرآیند جوشکاری مقاومتی[۳] تولید می‌شوند. در این نوع جوشکاری برخلاف روش جوشکاری زیرپودری[۴]، نیاز به مفتول پرکننده نیست [۱]. این لوله‌ها ابتدا به‌صورت ورق هستند که با استفاده از نورد سرد به شکل لوله در می‌آیند و سپس با اعمال ولتاژ فرکانس بالا، دمای لبه‌های ورق افزایش می‌یابد و لبه‌ها به صورت خمیری و یا مذاب در می‌آیند و در اثر فشار غلتک‌ها، به هم جوش داده می‌شوند. در حین اتصال، مقداری از مذاب به سطح داخلی و

1 Ultrasonic Guided Waves
2 Waveguide
3 Electrical Resistance Welding
4 SAW

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: morteza.tabatabaeipour@strath.ac.uk

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

خارجی لوله در ناحیه خط جوش جریان می‌یابد و گرده‌ای را در سطح داخلی و خارجی لوله ایجاد می‌کند. طی فرآیندی سطح خارجی لوله ماشینکاری شده و به دلیل عدم دسترسی به سطح داخلی لوله، گرده اضافه جوش در خط تماس دو لبه باقی می‌ماند. گرده داخلی هندسه لوله‌ها را در راستای ضخامت ناهمگن می‌کند و با توجه به حساسیت امواج هدایت‌شده به تغییر ضخامت دیواره لوله، انتشار امواج تحت تاثیر قرار می‌گیرد و تفسیر نتایج بازرسی را دشوار می‌سازد. طبق استاندارد آ.پی.آی ۱۱۰۴[1] بسیاری از لوله‌های استفاده شده در شرکت‌های گاز، دارای درز جوش طولی‌اند[2] [۲]؛ از این‌رو بررسی اثر هندسه خط جوش طولی اهمیت می‌یابد.

پیشینه بازرسی عیوب در لوله با امواج هدایت‌شده به چند دهه اخیر باز می‌گردد. در سال ۱۹۹۶ الین و کاولی [۳] برای تولید مد[3] متقارن محوری L (n,۰) در لوله از حلقه‌ای شامل تعدادی پیزوالکتریک پلاریزه[4] موج برشی استفاده کردند. در سال ۱۹۹۸ الین و همکاران [۴] با آزمایش و شبیه‌سازی، بازتابش موج از یک شیار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به‌منظور کاهش حجم محاسبات، از المان غشاء و مدل تقارن صفحه‌ای در آزمون‌های شبیه‌سازی خود استفاده کردند. کاولی و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۳ برای نخستین بار سیستمی طراحی کردند که بتواند مد پیچشی اول ((T(۰,۱)) را در لوله ایجاد کند. با توجه به غیر دیسپریو بودن مد پیچشی اول در تمام محدوده فرکانسی و بی‌تاثیر بودن اثر سیال داخل لوله بر روی این مد، ایده استفاده از آن برای بازرسی لوله‌های تحت سرویس، لوله‌های عایق‌دار و لوله‌های دفن شده در زیر خاک پیشنهاد شد. تحریک مد T(۰,۱) با ۹۰ درجه چرخاندن المان پیزوالکتریک برشی مورد استفاده در تولید مد طولی دوم ((L(۰,۲)) امکان‌پذیر است. ویلکاکس و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۱ اثر دیسپرژن[5] در بازرسی طول زیادی از لوله با استفاده از امواج هدایت‌شده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از حداقل و حداکثر سرعت دسته موج، میزان دیسپرژن موج را محاسبه کردند. دما و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۴ اثر پارامترهایی نظیر اندازه عیب، فرکانس، ابعاد لوله و موقعیت عیب در سطح مقطع لوله را در بازتابش مدهای(L(۰,۲ و T(۰,۱) مورد بررسی قرار دادند. ژنگ و همکاران [۸] با استفاده از روش اجزای محدود[6] به بررسی توزیع انرژی امواج هدایت‌شده متقارن و تغییر مدهای ایجاد شده در اثر برخورد امواج با ناپیوستگی‌ها پرداختند. آن‌ها با مدل‌سازی سه‌بعدی لوله و شبیه‌سازی انتشار مد(L (۰,۲ دریافتند که در حین برخورد این مد با شیار متقارن محوری علاوه بر دو پدیده انعکاس و عبور موج، مد جدیدی از این برخورد حاصل می‌شود که با توجه به سرعت و ساختارش، مد طولی اول ((L(۰,۱)) است. لئنو و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ تحقیقات جامعی را بر روی انتشار امواج هدایت‌شده در لوله‌های مدفون‌شده انجام دادند. در گزارش آن‌ها به‌دلیل جذب انرژی موج توسط خاک، انرژی موج در فرکانس‌های بالا به‌شدت کاهش می‌یافت و در نتیجه طول بازرسی نیز به میزان قابل ملاحظه‌ای کم می‌شد. در سال ۲۰۱۵ ژانگ و ژو [۱۰] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی انتشار امواج هدایت‌شده در خم لوله‌ها پرداختند. آن‌ها با استفاده از فرکانس بهینه اثر خم لوله را بر روی مد T(۰,۱) بررسی کردند. در سال ۲۰۱۶ لاو و همکاران [۱۱] با انجام آزمایش و شبیه‌سازی به بررسی و مقایسه حساسیت مدهای متقارن در تشخیص عیوب پرداختند. آن‌ها دریافتند که مد طولی L(۰,۱) به دلیل طول موج کوتاه خود، بیشترین حساسیت به عیب را نسبت به دو مد L(۰,۲) و T(۰,۱) دارد.

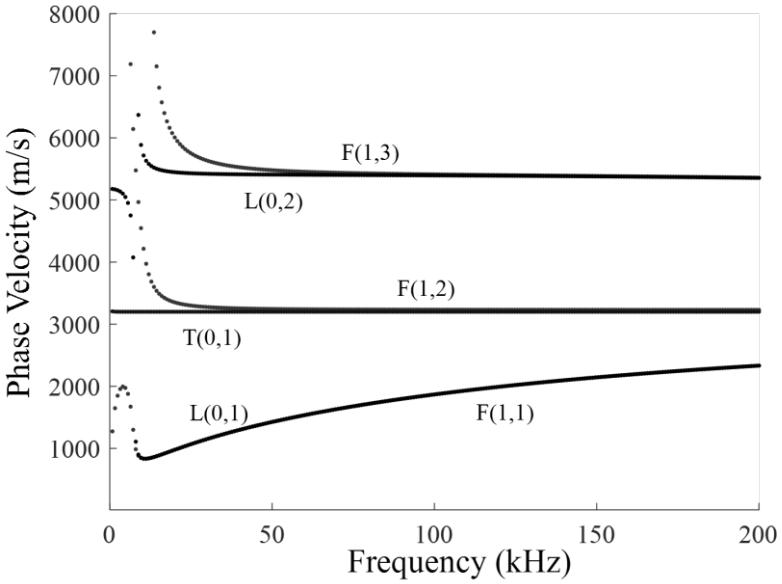
با توجه به پژوهش‌های انجام شده، امواج هدایت‌شده به تغییرات هندسی در لوله و شرایط مرزی آن حساس هستند؛ از این‌رو در این پژوهش، اثر درز جوش طولی در لوله‌های انتقال سیال بر روی انتشار سه مد متقارن L (۰,۲)، L(۰,۱) و T(۰,۱) بررسی می‌شود.

۲- امواج هدایت‌شده در لوله

انتشار امواج هدایت‌شده در لوله بسیار پیچیده‌تر از امواج در صفحات مسطح است. در لوله سه مد اصلی طولی، پیچشی و خمشی[7] وجود دارد که به ترتیب با L (۰, n) ، T (۰, n) و F(m,n) نشان داده می‌شوند. در این نامگذاری m بیانگر هارمونیک محیطی و n متغیر شمارنده است. حالت m =۰ معرف مدهای متقارن محوری L (۰,n) و T (۰, n) است که بیشترین کاربرد در آزمون فراصوتی لوله‌ها را دارند [۱۲].

مدهای طولی عمدتا در تمام فرکانس‌ها دارای جابجایی شعاعی و محوری هستند، در حالی‌که در ساختار مدهای پیچشی، مولفه جابجایی محیطی دامنه بیشتری دارد. نحوه نوسان ذرات در مدهای خمشی ترکیبی از مد طولی و پیچشی است و هر سه مولفه جابجایی طولی، شعاعی و محیطی را دارند [۱۳]. امواج هدایت‌شده در لوله بیشتر برای بازرسی غیرمخرب طول زیادی از لوله استفاده می‌شود. در بازرسی لوله‌ها با امواج هدایت‌شده در نظر گرفتن طول بازرسی، شرایط مرزی لوله (لوله عایق‌دار- مدفون شده- حاوی

1 API 1104
2 Straight Seam Welded Pipe
3 Mode
4 Polarized Piezoelectric
5 Dispersion
6 Finite Element
7 Longitudinal, Torsional and Flexural Modes



شکل ۱: منحنی دیسپرژن سرعت فاز لوله فولادی با قطر ۲۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر

Fig. 1. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

سیال) و نوع عیوب رایج موجود در لوله اهمیت زیادی دارد و با توجه به آن نقطه کاری (فرکانس و نوع مد) مناسب تعیین می‌شود [۶]. شکل ۱ منحنی دیسپرژن مربوط به لوله فولادی با قطر ۲۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار رابط گرافیکی کاربر رسم منحنی دیسپرژن امواج هدایت‌شده[1] ترسیم شده است [۱۴]. این نرم‌افزار براساس روش حل تحلیلی- عددی[2] متغیرهای میدان را محاسبه می‌کند.

منحنی‌های دیسپرژن از حل معادلات الاستیک امواج هدایت‌شده در استوانه‌های توخالی بدست می‌آیند. دیسپرژن پدیده‌ای است که سرعت موج را تابع فرکانس می‌کند و یکی از ویژگی‌های امواج هدایت‌شده است که بازرسی با این امواج را مشکل می‌سازد. موج دیسپرسیو در مسیر انتشار پهن می‌شود و دامنه آن کاهش می‌یابد؛ این امر باعث می‌شود که موج در مسافت‌های طولانی انرژی خود را از دست بدهد و حساسیت تشخیص عیب با آن کاهش یابد [۶]. از این‌رو انتخاب یک مد در محدوده‌ای معینی از فرکانس‌ها دیسپرسیو نباشد از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. استفاده از مدهای متقارن بخصوص L(۰,۲) و T(۰,۱) به‌دلیل ساختار موج و میدان انتشار ساده آن‌ها، تاثیر بسزایی در توسعه بازرسی غیرمخرب با استفاده از امواج هدایت‌شده فراصوتی داشته است. علاوه بر این، مد T(۰,۱) با توجه به غیردیسپرسیو بودن در تمام فرکانس‌ها و عدم حساسیت به شرایط مرزی برای بازرسی لوله‌های حاوی سیال بسیار مناسب است [۵]. مد طولی L(۰,۱) به‌دلیل کوتاه بودن طول موجش، حساسیت بیشتری در مقایسه با مدهای L(۰,۲) و T(۰,۱) از خود نشان می‌دهد [۱۱].

۳- روش تحلیل اجزای محدود

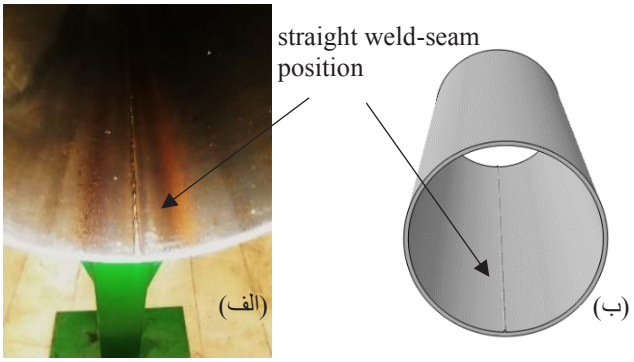
پیچیدگی معادلات حاکم بر امواج هدایت‌شده و دشواری حل آن‌ها در برخورد با ناپیوستگی‌ها، مطالعه تحلیلی انتشار امواج هدایت‌شده را مشکل می‌سازد [۱۲]؛ از طرفی نیز بررسی تجربی انتشار امواج هدایت‌شده در لوله، هزینه بالای تجهیزات را موجب می‌شود. یکی از راه‌های بررسی و حل چنین مسائلی، بکارگیری روش‌های عددی است. روش اجزای محدود یکی از روش‌های حل عددی است که در بسیاری از پژوهش‌ها [۵، ۱۵، ۱۶] از این روش به طور وسیعی برای بررسی انتشار امواج هدایت‌شده و تعامل اثر آن‌ها در برخورد با ناپیوستگی‌ها استفاده شده است. مدل‌های مختلفی برای تحلیل عددی انتشار امواج در لوله وجود دارد که هر یک با توجه به فیزیک مسئله (هندسه، شرایط اولیه و مرزی) کاربردها و محدودیت‌های خود را دارند. در زیر به طور مختصر درباره آن‌ها بحث خواهد شد.

مدل دوبعدی تقارن محوری[3] یکی از ساده‌ترین مدل‌های استفاده شده

1 Graphical User Interface for Guided Ultrasonic Waves (GUIGUW)

2 Semi Analytical Finite Element (SAFE)

3 2D Axisymmetric



شکل ۲: (الف) لوله استاندارد دارای درز جوش طولی و (ب) لوله مدل‌شده در نرم‌افزار

Fig. 2. (a) A typical seam welded pipe, (b) modeled pipe

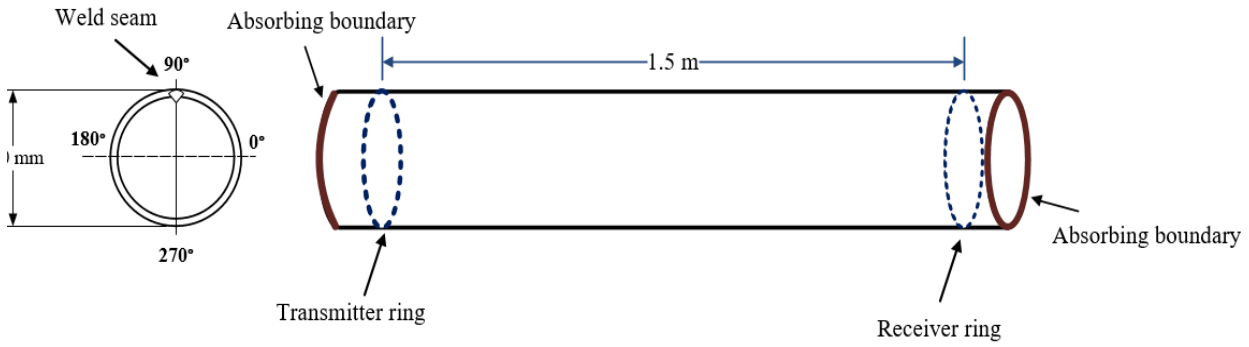
برای مطالعه انتشار امواج هدایت‌شده در لوله‌هاست که با توجه به دوبعدی بودن این مدل، فقط می‌توان انتشار مدهای طولی را شبیه‌سازی کرد. علاوه بر این، عیوب نامتقارن، درز جوش طولی و یا هر عامل نامتقارن دیگری را نمی‌توان با این این روش مدل کرد. در مدل تقارن صفحه‌ای[1] به‌جای مدل کامل لوله، نیمی از لوله به صورت یک نیم استوانه مدل می‌شود. درز جوش مارپیچ، عیوب مایل نسبت به محور طولی و خوردگی‌های با هندسه نامتقارن را نمی‌توان با این روش مدل‌سازی کرد [۵ و ۸]. مدل غشاء[2] یکی دیگر از روش‌های مدل‌سازی لوله است که در این روش، هندسه سه‌بعدی از لوله با ضخامت پوسته مدل می‌شود [۵ و ۱۶]. با استفاده از این روش عواملی مانند عیوب غیر راه‌بدر و خطوط جوش که بر روی ضخامت جداره لوله موثرند، را نمی‌توان مدل‌سازی کرد. مدل سه‌بعدی، جامع‌ترین و رایج‌ترین مدل مورد استفاده در بررسی انتشار امواج هدایت‌شده در لوله است. انتشار سه دسته مد طولی، پیچشی و خمشی با بارگذاری متقارن و نامتقارن با این روش امکان‌پذیر است. همچنین، انواع عیوب و ناپیوستگی‌های هندسی در لوله را با این روش می‌توان مدل کرد. نتایج بدست‌آمده از این مدل نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری دارد ولی حجم محاسبات و زمان تحلیل نیز بیشتر است [۵ و ۸].

۴- روش مدل‌سازی

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار تحلیل عددی آباکوس[3] مدل‌های جامد سه‌بعدی از لوله‌های استاندارد بدون درز جوش و دارای درز جوش طولی به قطر ۲۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر ایجاد شد. در شکل ۲، لوله دارای درز جوش و مدل آن در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. ابعاد و هندسه خط جوش در لوله مدل شده، مشابه لوله تولید شده طبق استاندارد آ.پی.آی ۱۱۰۴ است. جنس لوله، فولاد کربنی با مدول یانگ[4] ۲۰۹ گیگاپاسکال، ضریب پواسون[5] ۰/۳ و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است [۲ و ۱۷].

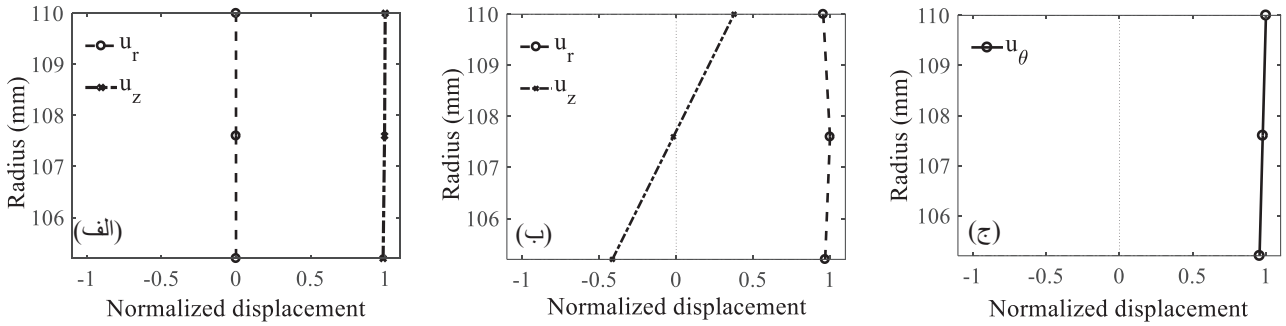
برای کاهش زمان محاسبات، از المان C۳D۸ استفاده شده است. استفاده از این نوع المان در پژوهش‌های پیشین [۱۱ و ۱۸] نیز انجام شده است. برای جلوگیری از انعکاس موج از دیواره لوله، از المان پیوسته بی‌نهایت CIN۳D۸ در مرز ابتدا و انتهای لوله استفاده شده است [۱۹]. به طور میانگین ۱۰ المان در یک طول موج مد L(۰,۱) در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی انتشار امواج فراصوتی، مستلزم مدل‌سازی تراگذارهای پیزوالکتریک و یا ایجاد اثر پیزوالکتریک از طریق اعمال پالس گذرا است [۸ و ۲۰]. در این پژوهش به‌جای مدل‌سازی پیزوالکتریک، اثر آن یعنی بارگذاری جابجایی با تابع تحریک موجود در مرجع [۸]، برای ایجاد موج استفاده شده است. در این روش امکان استفاده از قابلیت حل صریح نرم‌افزار آباکوس در تحلیل‌های دینامیکی نظیر انتشار امواج وجود دارد. تابع استفاده‌شده دارای فرکانس مرکزی ۴۰ کیلوهرتز و تعداد ۱۰ دوره سینوسی است. برای جلوگیری از ایجاد مدهای خمشی، تعداد نقاط متقارن بارگذاری با توجه به بالاترین مرتبه مد خمشی در فرکانس تحریک تعیین می‌شود. تعداد این نقاط باید بیشتر از بالاترین مرتبه مد خمشی ایجاد شده در فرکانس تحریک باشد. از این‌رو ۲۴ نقطه در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به شکل متقارن حول لوله بارگذاری شد. شکل ۳ شماتیک مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد. با توجه به مولفه غالب جابجایی در ساختار موج[6]، می‌توان راستای بارگذاری (راستای ارتعاش پیزوالکتریک) را تعیین کرد [۱۱]. راستای بارگذاری برای ایجاد مدهای L(۰,۲)، L(۰,۱) و T(۰,۱) در پژوهش‌های [۱۱ و ۲۱] آمده است.

1 Symmetric
2 Membrane
3 Abaqus/Explicit 6.14
4 Young's Modulus
5 Poisson Ratio
6 Wave Structure



شکل ۳: شماتیک مدل اجزای محدود آزمون ایجاد مدهای متقارن L (۰,۲)، L (۰,۲)، و T (۰,۱) با بارگذاری در ۲۴ نقطه حول لوله توسط حلقه فرستنده در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز

Fig. 3. A schematic of the simulated model in Abaqus software showing a transmitter ring consisting of 24 transducers generating the (symmetrical wave modes of L(0,2), L(0,1) and T(0,1



شکل ۴: ساختار موج مدهای متقارن (الف) L (۰,۲)، (ب) L (۰,۱)، و (ج) T (۰,۱) حاصل از نرم افزار رابط گرافیکی کاربر رسم منحنی دیسپرژن در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز

.(Fig. 4. Wave structure of symmetric modes at 40 kHz excitation frequency plotted by GUIGUW software, (a) L(0,2), (b) L(0,1), (c) T(0,1

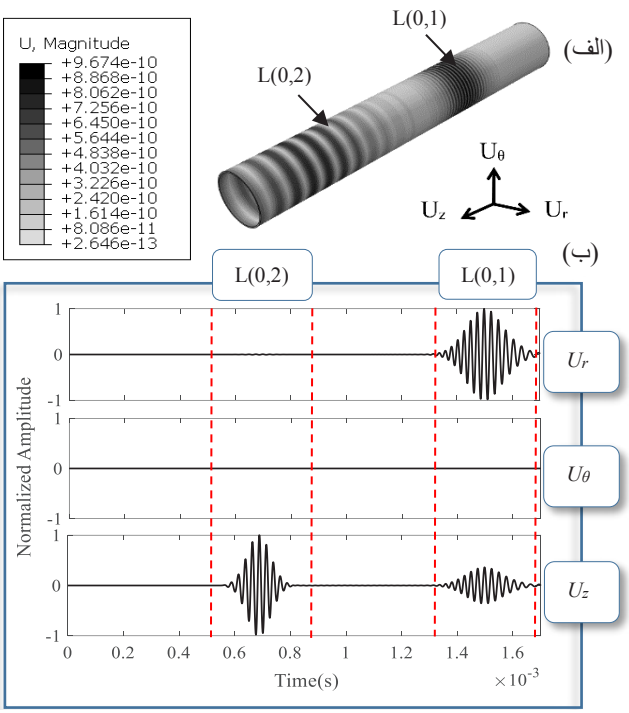
۵- بررسی و تحلیل نتایج

۵- ۱- نتایج انتشار مدهای متقارن L(۰,۲)، L(۰,۱) و T (۰,۱) در لوله بدون درز جوش طولی

ساختار موج، الگوی نوسانی ذرات ماده در راستای ضخامت موجبر را نشان می‌دهد. شکل ۴ (الف) ساختار موج مد L(۰,۲) حاصل از نرم‌افزار رسم منحنی دیسپرژن در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. این مد در این فرکانس فقط دارای مولفه جابجایی طولی است. شکل ۴(ب) ساختار موج مد L (۰,۱) در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. دو مولفه شعاعی و طولی، به ترتیب، مولفه‌های غالب جابجایی این مد هستند. با توجه به این‌که هر دو مد دارای جابجایی در راستای طولی‌اند، با بارگذاری ۲۴ نقطه با فاصله مساوی در دور لوله، امکان تحریک این دو مد وجود دارد.

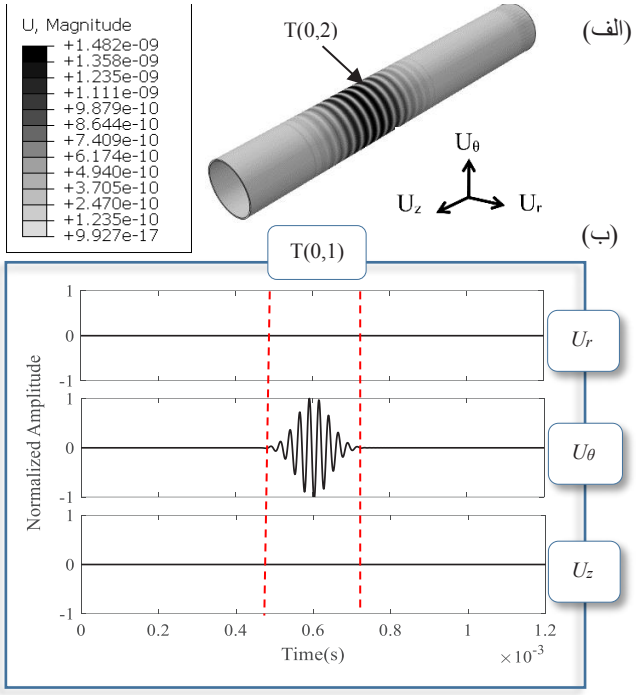
نتایج شبیه‌سازی حاصل از بارگذاری در راستای طولی در ۲۴ نقطه با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در شکل ۵ نشان داده شده است. دو مد طولی L(۰,۲) و L(۰,۱)، در این بارگذاری ایجاد شده‌اند. در این آزمایش طول مسیر انتشار موج ۳ متر است. با توجه به سرعت گروه این دو مد، سیگنال دریافتی در زمان ۵۵۶ میکروثانیه مربوط به مد L(۰,۲)، است. در سیگنال دریافتی این مد، مولفه جابجایی غالب، مولفه طولی (U_z) است. سیگنال دریافتی دوم، مربوط به مد L(۰,۱)، است. برای این مد دامنه هر دو مولفه شعاعی (U_r) و طولی (U_z) قابل توجه است. با اضافه کردن یک حلقه اضافه می‌توان از تحریک مد L(۰,۱)، جلوگیری کرد و این امر مستلزم هزینه استفاده از یک حلقه پیزوالکتریک دیگر در آزمون عملی است [۱۱].

شکل ۴ (ج) ساختار موج مد T(۰,۱) را در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز نشان می‌دهد. این مد در این فرکانس فقط دارای مولفه جابجایی محیطی است. بارگذاری در این راستا امکان ایجاد مد خالص T(۰,۱) را فراهم می‌کند. شکل



شکل ۵: (الف) انتشار موج طولی در لوله و (ب) سیگنال دریافتی مدهای (۰,۲) L و (۰,۱) L در فاصله ۳ متری از نقطه ارسال موج با بارگذاری در راستای طولی در لوله بدون درز جوش. در این شکل Ur مولفه جابجایی شعاعی، Uθ مولفه جابجایی محیطی و Uz مولفه جابجایی طولی را نشان می‌دهد.

Fig. 5. (a) Propagation of longitudinal mode in the pipe, (b) typical received signals from L(0,2) and L(0,1) modes in a seamless pipe at a distance of 3 m from the transmitter ring



شکل ۶: (الف) انتشار موج پیچشی درلوله و (ب) سیگنال دریافتی مد T (۰,۱) در فاصله ۱/۵ متری از نقطه ارسال موج با بارگذاری در راستای محیطی در لوله بدون درز جوش. این مد فقط دارای مولفه جابجایی محیطی است

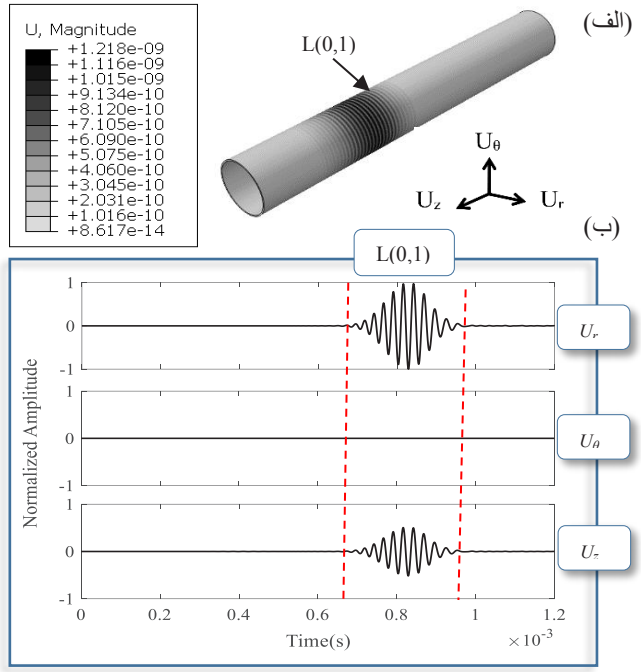
Fig. 6. (a) Propagation of torsional mode in the pipe, (b) typical received signal from the T(0,1) mode in a seamless pipe at a distance of 1.5 m from the transmitter ring

۶ نتایج انتشار و سیگنال دریافتی مد T(۰,۱) در فاصله ۱/۵ متری از نقطه تحریک را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که این مد فقط دارای مولفه جابجایی محیطی (U_θ) است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتشار مد L(۰,۱)، در شکل ۷ نشان داده شده است. سیگنال موج دریافتی در این بارگذاری، دارای دو مولفه طولی و شعاعی است.با توجه به ساختار موج این مد در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، مولفه غالب جابجایی این مد، مولفه شعاعی آن است. این مد به‌صورت خالص با بارگذاری در راستای شعاعی ایجاد شده است. همچنین امکان ایجاد این مد با بارگذاری در راستای طولی نیز وجود دارد؛ اما مطابق شکل ۵ در این حالت، یک مد خالص نخواهیم داشت.

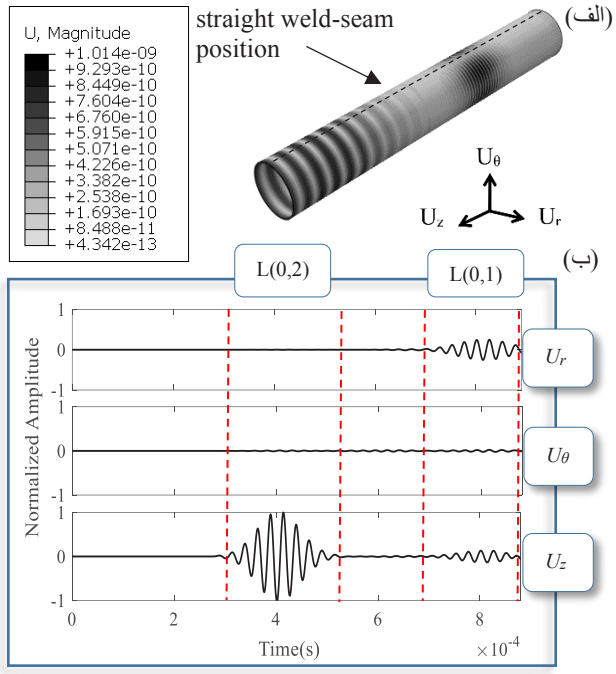
۵- ۲- ساختار موج مدهای متقارن L(۰,۲)، L(۰,۱) و T(۰,۱)

شکل‌های ۸ (الف) تا (ج) به ترتیب ساختار موج مدهای L(۰,۲)، L(۰,۱) و T(۰,۱) حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. این منحنی‌ها، حاصل دریافت امواج در ۲۰ نقطه در راستای ضخامت لوله هستند. با بررسی و مقایسه ساختار موج حاصل از شبیه‌سازی و ساختار موج بدست آمده از نرم‌افزار رسم منحنی دیسپرژن، تنها مولفه جابجایی مد L(۰,۲) مولفه طولی آن است و مد L(۰,۱) هر دو مولفه شعاعی و طولی را دارد. مد T(۰,۱) نیز فقط دارای مولفه جابجایی محیطی است. ساختار موج حاصل از شبیه‌سازی با ساختار موج بدست‌آمده از نرم‌افزار رابط کاربر گرافیکی رسم منحنی دیسپرژن، تطابق خوبی دارد. از طرفی دیگر با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتشار مدهای L(۰,۲)، T(۰,۱) و L(۰,۱) به ترتیب در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ با نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی مقاله [۱۱]، از صحت روش تحریک و انتشار مدهای متقارن در لوله بدون درز جوش می‌توان اطمینان حاصل کرد. پس از تصدیق صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتشار امواج در لوله بدون درز جوش، در بخش‌های بعدی انتشار امواج متقارن L(۰,۲)،T(۰,۱) و L(۰,۱) در لوله دارای درز جوش طولی بررسی می شود و اثر خط جوش طولی بر روی انتشار



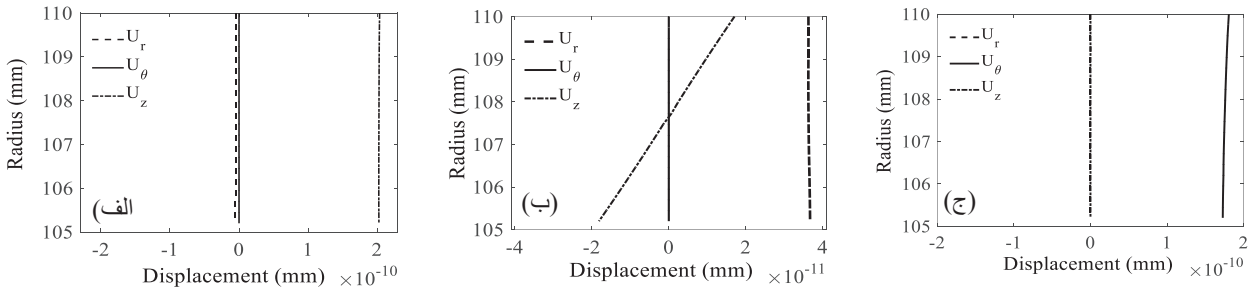
شکل ۷: (الف) انتشار موج طولی در لوله و (ب) سیگنال دریافتی از مد L(۰,۱) در فاصله ۱/۵ متری از نقطه ارسال موج با بارگذاری در راستای شعاعی در لوله بدون درز جوش. این مد دارای دو مولفه جابجایی طولی و شعاعی است.

Fig. 7. (a) Propagation of longitudinal mode in the pipe, (b) typical received signal of L(0,1) mode in a seamless pipe at a distance of 1.5 meters from the transmitter ring



شکل ۹: (الف) انتشار موج طولی در لوله و (ب) سیگنال دریافتی مد L(۰,۲) و L(۰,۱) در فاصله ۱/۵ متری از نقطه ارسال موج با بارگذاری در راستای طولی در لوله دارای درز جوش طولی

Fig. 9. (a) Propagation of longitudinal mode in the pipe, (b) typical received signal of L(0,2) and L(0,1) modes in a straight seam welded pipe at a distance of 1.5 meters from the transmission position



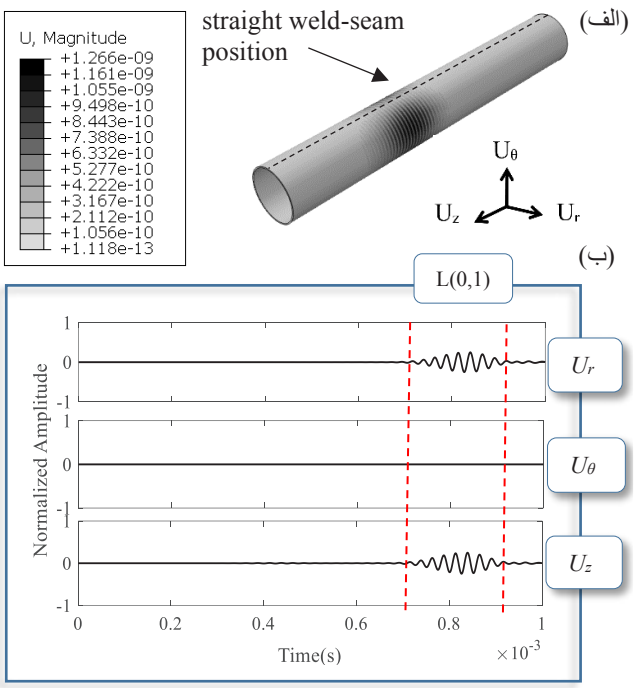
شکل ۸: منحنی دیسپرژن سرعت فاز لوله فولادی با قطر ۲۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر

Fig. 8. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

مدهای متقارن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

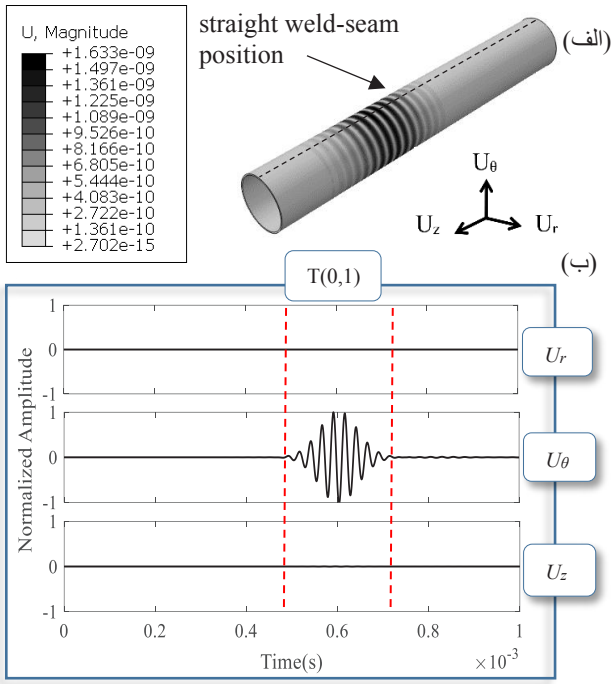
۵-۳- نتایج انتشار مدهای متقارن L(۰,۲)، L(۰,۱) و T(۰,۱) در لوله دارای درز جوش طولی

وجود درز جوش در لوله، هم از لحاظ هندسی و هم از لحاظ خواص ماده می‌تواند بر روی انتشار امواج هدایت‌شده تاثیر بگذارد. شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نحوه انتشار موج و سیگنال دریافتی مدهای L(۰,۲)، L(۰,۱) وT(۰,۱) در لوله دارای درز جوش طولی را نشان می‌دهد. موج در زاویه صفر درجه لوله مطابق مدل شکل ۳، در ناحیه درز جوش دریافت شده است. مسافت انتشار موج در این شبیه‌سازی ۱/۵ متر است. همانطور که در بخش



شکل ۱۰: (الف) انتشار موج طولی در لوله و (ب) سیگنال دریافتی مد L(۰,۱) در فاصله ۱/۵ متری از نقطه ارسال موج با بارگذاری در راستای شعاعی در لوله دارای درز جوش طولی

Fig. 10. (a) Propagation of longitudinal mode in the pipe, (b) typical received signal of L(0,1) mode in a straight seam welded pipe at a distance of 1.5 meters from the transmission position



شکل ۱۱: (الف) انتشار موج پیچشی در لوله و (ب) سیگنال دریافتی مد T(۰,۱) در فاصله ۱/۵ متری از نقطه ارسال موج با بارگذاری در راستای محیطی در لوله دارای درز جوش طولی

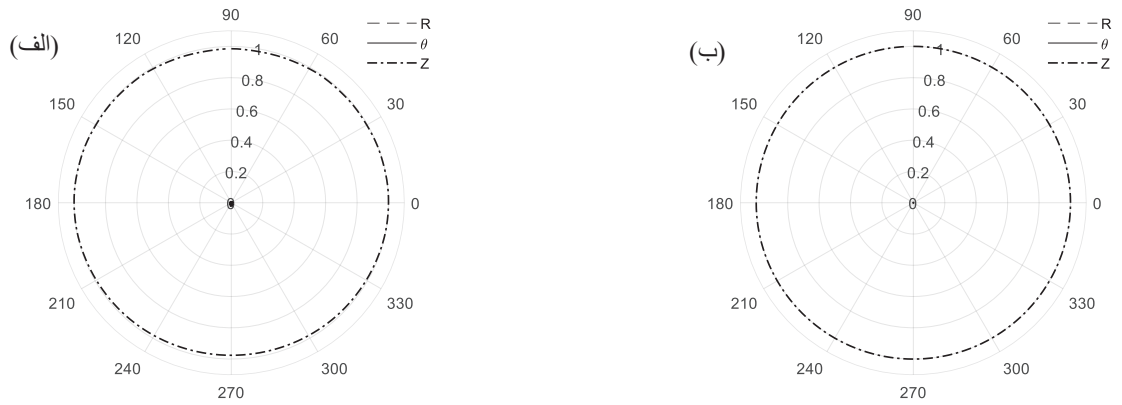
Fig. 11. (a) Propagation of torsional mode in the pipe, (b) typical received signal of T(0,1) mode in a straight seam welded pipe at a distance of 1.5 meters from the transmission position

۵-۱ اشاره شد؛ در بارگذاری طولی، دو مد L(۰,۲) و L(۰,۱) در لوله ایجاد می‌شود. شکل ۹ نتایج انتشار دو مد L(۰,۲) و L(۰,۱) در لوله دارای درز جوش را نشان می‌دهد. در مقایسه شکل‌های ۹ و ۵، مشاهده می‌شود که اثر درز جوش بر روی دامنه سیگنال دریافتی مد L(۰,۲) ناچیز است؛ اما دامنه سیگنال مد L(۰,۱) به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. مطابق شکل ۱۰ در بارگذاری شعاعی که امکان تحریک مد L(۰,۱) به‌صورت خالص وجود دارد، همانند بارگذاری طولی، اثر خط جوش باعث کاهش قابل توجه دامنه این مد در این ناحیه شده است. شکل ۱۱ انتشار موج و سیگنال دریافتی مد T(۰,۱)در لوله دارای درز جوش طولی را نشان می‌دهد. در مقایسه شکل‌های ۶ و ۱۱، ملاحظه می‌شود که تاثیر خط جوش بر روی دامنه سیگنال دریافتی در ناحیه خط جوش ناچیز است. برای بررسی دقیق‌تر اثر خط جوش بر روی انتشار امواج، توزیع دامنه مدها حول محیط لوله باید مورد مطالعه قرار گیرد که در بخش بعدی بطور مفصل به آن خواهیم پرداخت.

۵- ۴- مقایسه انتشار امواج در لوله بدون درزجوش و لوله دارای درز جوش

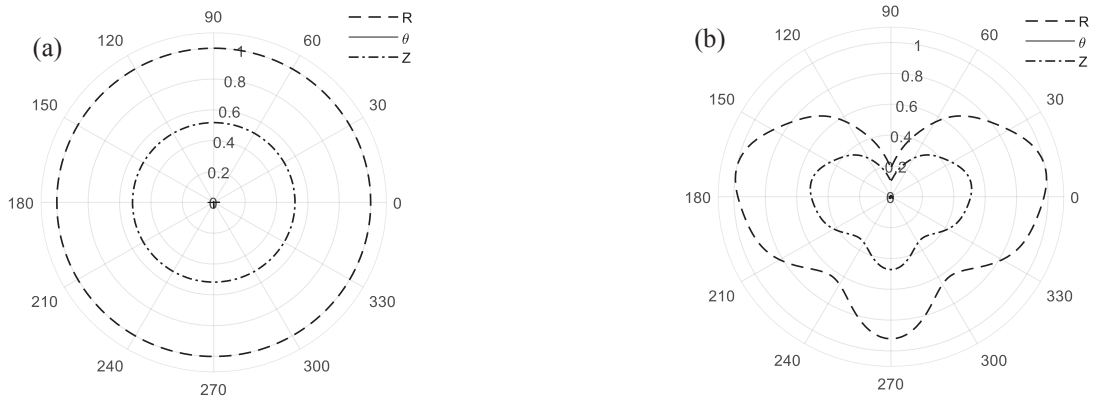
پروفیل زاویه‌ای[1] چگونگی توزیع دامنه موج حول محیط لوله را نشان می‌دهد. یکنواختی دامنه مدهای متقارن یکی از ویژگی‌های بسیار مطلوب این دسته از امواج نسبت به مدهای خمشی است [۱۵، ۲۲، ۲۳] ؛ به‌طوری‌که دامنه مدهای متقارن حول لوله یکسان است. برای درک بهتر اثر خط جوش بر روی انتشار مدهای L(۰,۲)، L(۰,۱) و T(۰,۱)، بررسی پروفیل زاویه‌ای این مدها به عنوان یک ابزار مناسب حائز اهمیت است. از طرفی ناحیه خط جوش در لوله، یکی از مستعدترین نواحی بروز عیوبی نظیر ترک طولی و خوردگی در ریشه جوش است [۲۴، ۲۵]. شکل ۱۲ پروفیل زاویه‌ای حاصل از شبیه‌سازی مد L(۰,۱) در لوله دارای درز جوش طولی و لوله بدون درز جوش در فاصله ۱/۵ متری از نقطه تحریک را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، خط جوش بر روی یکنواختی توزیع دامنه مد L(۰,۱) حول محیط لوله اثر ندارد و توزیع دامنه این مد حول محیط هر دو لوله یکسان است.

1 Angular Profile



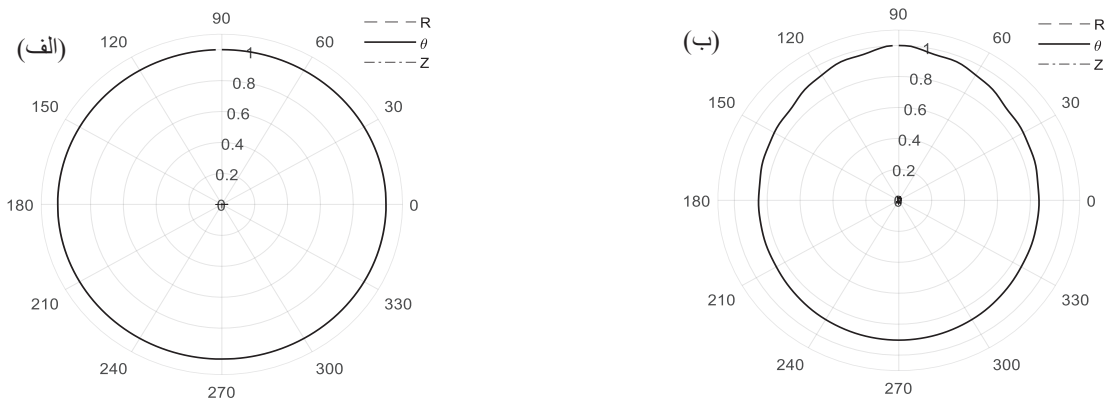
شکل ۱۲: پروفیل زاویه‌ای مد L(۰,۱) . (الف) لوله بدون درز جوش، (ب) لوله دارای درز جوش طولی درز جوش در زاویه ۹۰ درجه قرار دارد.

Fig. 12. Angular amplitude profile of L(0,2) mode in (a) seamless pipe and (b) straight seam welded pipe. The weld line is at 90 degrees.



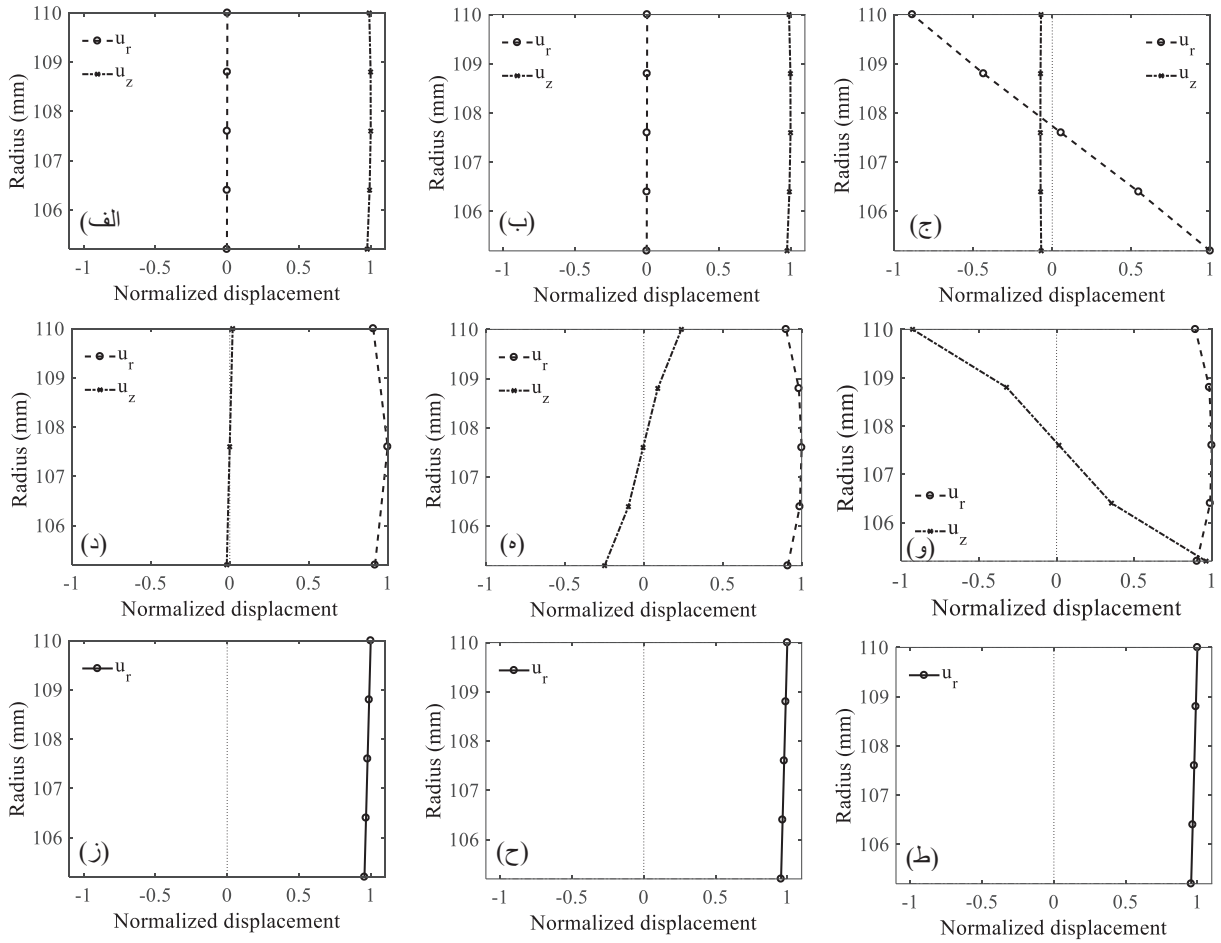
شکل ۱۳: پروفیل زاویه‌ای مدهای L(۰,۱)، (الف) لوله بدون درز جوش، (ب) لوله دارای درز جوش طولی. درز جوش در زاویه ۹۰ درجه قرار دارد

Fig. 13. Angular amplitude profile of L(0,1) mode in (a) seamless pipe and (b) straight seam welded pipe. The weld line is at 90 degrees



شکل ۱۴: پروفیل زاویه‌ای مدهای T(۰,۱) (ج) لوله بدون درز جوش، (ب) لوله دارای درز جوش طولی. درز جوش در زاویه ۹۰ درجه قرار دارد

Fig. 14. Angular amplitude profile of T(0,1) mode in (a) seamless pipe and (b) straight seam welded pipe. The weld line is at 90 degrees



شکل ۱۵: ساختار موج مد L(۰,۲) در فرکانس‌های (الف) ۱۰۰ کیلوهرتز، (ب) ۱۵۰ کیلوهرتز و (ج) ۱۸۰ کیلوهرتز. ساختار موج مد L(۰,۱) در فرکانس‌های (د) ۱۰۰ کیلوهرتز، (ه) ۱۵۰ کیلوهرتز و (و) ۱۸۰ کیلوهرتز. ساختار موج مد T(۰,۱) در فرکانس‌های (ز) ۱۰۰ کیلوهرتز، (ح) ۱۵۰ کیلوهرتز و (ط) ۱۸۰ کیلوهرتز

Fig. 15. Wave structure of L(0,2) mode at frequencies of (a) 100 kHz, (b) 150 kHz and (c) 180 kHz. Wave structure of L(0,1) mode at frequencies of (d) 100 kHz, (e) 150 kHz and (f) 180 kHz. Wave structure of T(0,1) mode at frequencies of (g) 100 kHz, (h) 150 kHz and (i) 180 kHz

مطابق شکل ۱۳ (الف) پروفیل زاویه‌ای مد L(۰,۱) در لوله بدون درز جوش کاملا متقارن است و هر دو مولفه جابجایی U_r و U_z دامنه یکنواختی حول محیط لوله دارند. مطابق شکل ۱۳(ب)، این پروفیل تحت اثر هندسه خط جوش، تقارن خود را از دست داده است و توزیع دامنه هر دو مولفه جابجایی U_r و U_z حول محیط لوله متغیر است. در زاویه ۹۰ درجه لوله (ناحیه خط جوش) دامنه این مد تحت اثر خط جوش به کمینه خود می‌رسد و می‌توان نتیجه گرفت که بازرسی ناحیه خط جوش به عنوان ناحیه حساس به عیب با مد L(۰,۱) مناسب نیست. شکل ۱۴ پروفیل زاویه‌ای مد T(۰,۱) در لوله بدون درز جوش و دارای درز جوش را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که توزیع دامنه موج در لوله بدون درز جوش کاملا یکنواخت و متقارن است. با مقایسه پروفیل زاویه‌ای لوله بدون درز جوش و دارای درز جوش مشاهده می‌شود که اثر خط جوش بر روی پروفیل این مد ناچیز است و تمرکز انرژی موج در ناحیه خط جوش بیشتر شده است.

با توجه به نتایج حاصل از انتشار مدهای T(۰,۱)، L(۰,۱) و L(۰,۲) در لوله دارای درز جوش و لوله بدون درز جوش و مقایسه پروفیل زاویه‌ای این سه مد، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین اثر خط جوش، بر روی انتشار مد

L(۰,۱) بوده است. خط جوش در راستای شعاعی، هندسه لوله را نامتقارن می‌کند و به‌نظر می‌رسد وجود مولفه جابجایی شعاعی در مد L(۰,۱) می‌تواند دلیل نامتقارن شدن پروفیل زاویه‌ای این مد باشد. از طرفی خط جوش طولی کمترین اثر را بر روی انتشار مد L(۰,۲) داشته است. همچنین خط جوش اثر چندانی بر روی انتشار مد T(۰,۱) نداشته است. به‌نظر می‌رسد، علت آن عدم وجود مولفه شعاعی در ساختار موج این دو مد باشد.

پروفیل زاویه‌ای امواج طولی و پیچشی در لوله‌های بدون درز جوش در تمام محدوده‌های فرکانسی متقارن است و ساختار موج به عنوان مشخصه اصلی، مدهای متقارن را از یکدیگر متمایز می‌کند؛ به عبارتی دیگر تفاوت در ساختار موج، علت تمایز این مدها از هم‌دیگر است؛ هر مدی دارای ساختار موج مشخصی است که با تغییرات فرکانس می‌تواند تغییر کند. شکل ۱۵ ساختار مدهای L(۰,۲)، L(۰,۱) و T(۰,۱) حاصل از نرم‌افزار رسم منحنی دیسپرژن در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد.

ساختار مد L(۰,۲) در لوله تحت آزمایش، از فرکانس ۲۰ تا ۱۶۰ کیلوهرتز ثابت است و فقط دارای مولفه طولی (U_z) است. شکل‌های ۱۵ (الف) تا (ج) به ترتیب ساختار موج مد L(۰,۲) در فرکانس‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. در فرکانس‌های بیشتر از ۱۶۰ کیلوهرتز ساختار موج تغییر می‌کند؛ بطوری‌که در فرکانس ۱۸۰ کیلوهرتز مولفه شعاعی U_r مولفه غالب جابجایی است (شکل ۱۵ (ج)). بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که تعامل اثر مد L(۰,۲) با درز جوش طولی در محدوده فرکانسی ۲۰-۱۶۰ کیلوهرتز بدلیل ساختار موج ثابت، همواره مشابه فرکانس ۴۰ کیلوهرتز است و درز جوش اثری بر روی انتشار مد L(۰,۲) در این محدوده فرکانسی ندارد. مد T(۰,۱) نیز دارای ساختار موج ثابتی در محدوده وسیعی از فرکانس است. شکل‌های ۱۵ (ز) تا (ط) به ترتیب ساختار موج مد T(۰,۱) در فرکانس‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد که فقط دارای مولفه محیطی U_θ است. از ثابت بودن ساختار موج این مد می‌توان نتیجه گرفت که اثر خط جوش بر روی انتشار مد T(۰,۱) همانند نتایج انتشار این مد در لوله دارای درز جوش طولی در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، ناچیز است. شکل‌های ۱۵ (د) تا (و) به‌ترتیب ساختار موج مد L(۰,۱) در فرکانس‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. ساختار موج این مد در فرکانس‌های مختلف، متفاوت است؛ اما همانند ساختار موج این مد در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، دارای مولفه جابجایی شعاعی برجسته‌ای است که می‌تواند بر روی انتشار این مد در لوله دارای درز جوش طولی در فرکانس‌های مختلف اثرگذار باشد.

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از مدهای متقارن به ویژه L (۰,۲) و T(۰,۱) به‌دلیل ساختار موج و میدان انتشار ساده، کاربرد وسیعی در بازرسی غیرمخرب با استفاده از امواج هدایت‌شده فراصوتی داشته است. مد طولی L (۰,۱) نیز حساسیت به عیب قابل قبولی را از خود نشان می‌دهد.

در این مقاله، در گام اول امکان ایجاد مدهای متقارن L(۰,۲)، L(۰,۱) و T(۰,۱) به ترتیب با بارگذاری در راستاهای طولی، شعاعی و محیطی بررسی شد. برای جلوگیری از تحریک مدهای خمشی، تعداد نقاط بارگذاری در یک حلقه باید بیشتر از بالاترین مرتبه مد خمشی در فرکانس تحریک باشد. برای ایجاد مد خالص L(۰,۲) نیاز به حلقه اضافه جهت حذف مد L(۰,۱) است. اما مد L(۰,۱) خالص با پیزوالکتریک‌های پلاریزه فشاری بدون نیاز به حلقه دوم ایجاد می‌شود. مد T(۰,۱) نیز با پیزوالکتریک‌های پلاریزه برشی با ارتعاش در راستای محیطی تحریک می‌شود. در مرحله دوم، اثر هندسه خط جوش طولی بر روی انتشار سه مد L(۰,۲)، L(۰,۱)، و T(۰,۱) بررسی شد. در فرکانس ۴۰ کیلو هرتز دامنه سیگنال دریافتی از مد L(۰,۱) در ناحیه خط جوش نسبت به نواحی مجاور به شدت کاهش پیدا می‌کند. اما این اثر برای دو مد دیگر مشاهده نشد. بررسی پروفیل زاویه‌ای نشان داد که در اثر حضور خط جوش، تقارن پروفیل مد L(۰,۲) در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز تغییری نمی‌کند؛ همچنین خط جوش اثر ناچیزی بر روی انتشار مد T(۰,۱) دارد. بیشترین اثر جوش بر روی انتشار مد L(۰,۱) است. پروفیل هر دو مولفه U_r و U_z این مد در حضور خط جوش نامتقارن می‌شود؛ بطوری‌که دامنه این مد در ناحیه خط جوش به شدت کاهش می‌یابد و حساسیت عیب‌یابی در این زاویه از لوله را کم می‌کند. ناحیه خط جوش در لوله، یکی از مستعدترین نواحی بروز عیوبی نظیر ترک طولی و خوردگی در ریشه جوش است؛ از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت برای بازرسی لوله‌های دارای درز جوش طولی دو مد L (۰,۲) و T(۰,۱) در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز مطلوب هستند. ساختار موج مد T(۰,۱) در لوله تحت آزمایش

در تمام محدوده فرکانسی ثابت است و فقط دارای مولفه محیطی است؛ از طرفی ساختار مد(۰,۲)L در محدوده فرکانسی ۱۶۰-۲۰ کیلوهرتز نیز ثابت است و فقط دارای جابجایی طولی است؛ با توجه به ثابت بودن ساختار موج دو مد(۰,۲)L و(۰,۱)T در فرکانس‌های مذکور، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج تعامل اثر خط جوش طولی بر روی انتشار این دو مد در این محدوده فرکانسی مشابه آن در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز است.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
m	هارمونیک محیطی
n	متغیر شمارنده
L(۰,۲)	مد طولی دوم
T(۰,۱)	مد پیچشی اول
L(۰,۱)	مد طولی اول
C۳D۸	نوع المان پیوسته سه‌بعدی خطی
CIN۳D۸	نوع المان پیوسته بی‌نهایت
U_θ	جابجایی در راستای محیطی
U_r	جابجایی در راستای شعاعی
U_z	جابجایی در راستای طولی

منابع

[1] K. Masamura, Y. Nagahama, Manufacturing processes and products of steel pipes and tubes in JFE steel, JFE technical report, 7 (2006) 1-6.

[2] A.P. Institute, API Standard 1104: welding of pipelines and related facilities, American Petroleum Institute, 2005.

[3] D. Alleyne, P. Cawley, The excitation of Lamb waves in pipes using dry-coupled piezoelectric transducers, Journal of Nondestructive Evaluation, 15(1) (1996) 11-20.

[4] M. Lowe, D. Alleyne, P. Cawley, The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in a pipe, Journal of Applied mechanics, 65(3) (1998) 649-656.

[5] A. Demma, P. Cawley, M. Lowe, A. Roosenbrand, The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes, The Journal of the Acoustical Society of America, 114(2) (2003) 611-625.

[6] P. Wilcox, M. Lowe, P. Cawley, Long range Lamb wave inspection: the effect of dispersion and modal selectivity, in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Springer, 1999, pp. 151-158.

[7] A. Demma, P. Cawley, M. Lowe, A. Roosenbrand, B. Pavlakovic, The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements, Ndt & E International, 37(3) (2004) 167-180.

[8] M.-f. Zheng, C. Lu, G.-z. Chen, P. Men, Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach, Physics procedia, 22 (2011) 112-118.

[9] E. Leinov, M.J. Lowe, P. Cawley, Investigation of guided wave propagation and attenuation in pipe buried in sand, Journal of Sound and Vibration, 347 (2015) 96-114.

[10] M. Qi, P. Zhang, J. Ni, S. Zhou, Experiment and numerical simulation of ultrasonic guided wave propagation in bent pipe, Procedia Engineering, 130 (2015) 1603-1611.

[11] P.S. Lowe, R.M. Sanderson, N.V. Boulgouris, A.G. Haig, W. Balachandran, Inspection of cylindrical structures using the first longitudinal guided wave mode in isolation for higher flaw sensitivity, IEEE Sensors Journal, 16(3) (2016) 706-714.

[12] F. Seco, J.M. Martín, A. Jiménez, J.L. Pons, L. Calderón, R. Ceres, PCDISP: a tool for the simulation of wave propagation in cylindrical waveguides, in: 9th International Congress on Sound and Vibration, 2002.

[13] Ş. Sorohan, N. Constantin, M. Găvan, V. Anghel, Extraction of dispersion curves for waves propagating

in free complex waveguides by standard finite element codes, Ultrasonics, 51(4) (2011) 503-515.

[14] P. Bocchini, A. Marzani, E. Viola, Graphical user interface for guided acoustic waves, Journal of Computing in Civil Engineering, 25(3) (2010) 202-210.

[15] S. Fateri, P.S. Lowe, B. Engineer, N.V. Boulgouris, Investigation of ultrasonic guided waves interacting with piezoelectric transducers, IEEE Sensors Journal, 15(8) (2015) 4319-4328.

[16] D. Alleyne, M. Lowe, P. Cawley, The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes, Journal of Applied mechanics, 65(3) (1998) 635-641.

[17] A. Marzani, Time–transient response for ultrasonic guided waves propagating in damped cylinders, International Journal of Solids and Structures, 45(25-26) (2008) 6347-6368.

[18] P. Lowe, R. Sanderson, S. Pedram, N. Boulgouris, P. Mudge, Inspection of pipelines using the first longitudinal guided wave mode, Physics Procedia, 70 (2015) 338-342.

[19] A. Version, 6.13 User's Manual, 2013, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA.

[20] M. Jing, Guided Wave Propagation and Focusing in Viscoelastic Multilayered Hollow Cylinders, Ph. D thesis, Engineering Mechanics, The Pennsylvania State University, 2008.

[21] T. Furukawa, I. Komura, Simulation and visualization of guided wave propagation by large-scale 3D FEM, EJ. Adv. Maint, 3 (2011) 92-101.

[22] J. Li, J.L. Rose, Natural beam focusing of non-axisymmetric guided waves in large-diameter pipes, Ultrasonics, 44(1) (2006) 35-45.

[23] X. Zhang, Z. Tang, F. Lü, X. Pan, Excitation of dominant flexural guided waves in elastic hollow cylinders using time delay circular array transducers, Wave Motion, 62 (2016) 41-54.

[24] M.H. El-Sayed, Grooving corrosion of seam welded oil pipelines, Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2(2) (2014) 84-90.

[25] M. Chapetti, J. Otegui, J. Motylicki, Fatigue assessment of an electrical resistance welded oil pipeline, International journal of fatigue, 24(1) (2002) 21-28.

این صفحه عمداً خالی است