



بازرسی لوله‌های چند لایه به کمک امواج هدایت شده پیچشی

محمد پورمنصوری¹، رضا مسلمانی^{2*}، امین یاقوتیان³، افشین قنبر زاده⁴

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

* اهواز، صندوق پستی 61357-83151، mosalmani@scu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/07/19
 پذیرش: 1400/09/16
کلیدواژگان
 موج پیچشی هدایت‌شده، انتشار موج، لوله چندلایه، روش المان محدود، نمودار دیسپرژن

کاربرد لوله‌های چندلایه به دلیل مزیت‌های مکانیکی و شیمیایی آن‌ها به‌عنوان جایگزین لوله‌های همگن جهت انتقال نفت، گاز و مواد پتروشیمی در حال افزایش است. جهت جلوگیری از مسدود شدن خطوط انتقال و زیان وارده از آن می‌بایست که بازرسی‌ها و آزمون‌های غیر مخرب مانند آزمون‌های فراصوت برای اطمینان از صحت کارکرد آن‌ها به‌صورت مداوم انجام گیرند. از این رو در این تحقیق، ابتدا معادلات انتشار موج پیچشی در لوله چندلایه مورد بررسی قرار گرفته و روابط میدان‌های جابجایی و تنش‌های دینامیکی در لوله چندلایه استخراج شده است؛ سپس نمودارهای دیسپرژن و سرعت گروه برای لوله چندلایه با توجه به شرایط مرزی مسئله رسم شده است. همچنین، انتشار موج پیچشی در لوله چندلایه با استفاده از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. با مقایسه نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی عددی مشاهده می‌شود که نتایج کامل با یکدیگر تطابق داشته و مدل‌سازی به درستی انجام گرفته است. در انتها نیز تأثیر عوامل مؤثر بر انتشار موج پیچشی در لوله‌های دولایه و سه لایه بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که ضخامت لایه‌ها، ترتیب لایه‌ها و جنس تشکیل‌دهنده لایه‌های لوله بر سرعت انتشار موج پیچشی در لوله‌های چندلایه تأثیرگذار است.

Inspection of Multilayer Pipes Using Torsional Guided Waves

Mohammad Pourmansouri¹, Reza Mosalmani^{1*}, Amin Yaghootian¹, Afshin Ghanbarzadeh¹

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* P.O.B. 61357-83151, Ahvaz, Iran, mosalmani@scu.ac.ir

Keywords

Torsional guided waves, Wave propagation, Multilayer pipes, Finite element method, Dispersion curve

Abstract

The use of multilayer pipes has increased recently thanks to their superior mechanical and chemical properties as a replacement of homogeneous single-layer pipes. Therefore, applicable inspections and non-destructive tests for multilayer pipes should be investigated. In this study, the governing equations of torsional wave propagation in the multilayer pipe were initially developed, and the relations between the displacement fields and dynamic stresses in the multilayer pipe were calculated. Then, the dispersion curves and group velocity for the multilayer pipe are plotted according to the boundary conditions. The torsional wave propagation in the multilayer pipe was also simulated using the finite element method via ABAQUS software. By comparing the analytical results and the numerical simulations, a complete agreement was observed between the results. Finally, the influence of effective parameters on torsional wave propagation in two- and three-layer pipes was investigated. The obtained results showed how the thickness, lay-up, and mechanical properties of the layers could affect the velocity of torsional wave propagation in the multilayer pipes.

1- مقدمه

به‌صورت مداوم انجام گیرند. خطوط لوله که عمدتاً به‌صورت مدفون در خاک و یا در زیر آب استفاده می‌شوند، همواره با مشکلات متعددی از نظر حفظ و نگهداری روبرو هستند، به همین دلیل بازرسی، بازسازی و تعمیر خطوط لوله از نظر اقتصادی و فنی اهمیت فراوانی دارد. از جمله آزمون‌های غیر مخرب متداول، می‌توان به آزمون امواج هدایت‌شده فراصوت اشاره کرد. امواج هدایت‌شده فراصوت در اجسام استوانه‌ای شکل در راستای محوری به‌صورت طولی و پیچشی منتشر می‌شوند.

استفاده از لوله‌های چندلایه در شرایط ویژه مکانیکی، شیمیایی و حرارتی، با توجه به رفتار مکانیکی خاص آن‌ها، در صنایع مختلف روبه گسترش است. مزایای این لوله نسبت به لوله‌های تک لایه همسانگرد را می‌توان به مقاومت به خوردگی بالا، خصوصیات مکانیکی بالا و دمای کاری بالا اشاره کرد. جهت جلوگیری از مسدود شدن خطوط انتقال و زیان وارده از آن می‌بایست که بازرسی‌ها و آزمون‌های غیر مخرب برای اطمینان از صحت کارکرد آن‌ها

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Pourmansouri, M., Mosalmani, R., Yaghootian, A., Ghanbarzadeh, A., "Inspection of Multilayer Pipes Using Torsional Guided Waves", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1603-1611, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.540289.1751>

خاردار⁶ [23, 24] استفاده می‌شود. میائو و همکاران [25] نحوه شبیه‌سازی و تحریک موج پیچشی $T(0,1)$ با استفاده از یک حلقه ترنسدیوسر پیزوالکتریک را ارائه کرده و مدل به کمک نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است [25]. ژو [26] به کمک یک مدل ترنسدیوسر موج هدایت‌شده (آرایه‌های حلقه‌ای با تأخیر زمانی دوره‌ای) مدهای تقارن محوری را در استوانه‌ی توخالی منتشر کرده است و نتایج را با شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی مقایسه کرده است. ژو [27] همچنین عیب خوردگی در لوله‌ها را با استفاده از انتشار امواج فراصوت بصورت عددی بررسی کرده است. جهت دست‌یابی به میزان قابلیت استفاده از مود دوم موج هدایت‌شده طولی در بازرسی لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا مطالعه عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است [28].

همچنین دمما [29] ضرایب بازگشتی موج پیچشی و عرضی از عیب‌های ناچ و ترک را به کمک مدل المان محدود و تجربی برای دو لوله تک لایه با شعاع متفاوت مورد مطالعه قرار داده است. فورکوا و کمورا [30] موج طولی و پیچشی را با مدل‌سازی پراب در لوله همگن به‌صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی منتشر کرده و مشاهده کردند پس از عبور جبهه موج طولی از زانویی، موج طولی تغییر مود می‌دهد و باعث تغییر سرعت و ساختار موج می‌شود، در حالی موج پیچشی تغییر مود نداده و تنها مدهای بالاتر تولید می‌شوند. تأثیر مدهای پیچشی $T(0,1)$ و طولی $L(0,2)$ در تشخیص بریدگی دورانی⁷ نزدیک به جوش زانویی مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به اینکه موج پیچشی در مدهای مرتبه بالاتر تغییر کمتری می‌کند، به موج طولی ترجیح داده شده است [31]. ژانگ و همکاران [32] پراش موج عرضی پیچشی از عیوب دایروی در استوانه‌های توخالی را به کمک شبیه‌سازی المان محدود و نتایج آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. مدلی جهت بررسی پراش بازگشتی از چند عیب هم‌زمان تصادفی در مرجع [33] ارائه و مشاهده شده است که ضریب بازگشت برای مود $T(0,1)$ مستقل از موقعیت دورانی عیب سوراخ دایره‌ای می‌باشد.

در مطالعات مرور شده عدم بررسی انتشار موج پیچشی هدایت‌شده در لوله‌های چندلایه مشاهده می‌شود. همچنین جهت صرفه‌جویی در هزینه و زمان، شبیه‌سازی المان محدود می‌تواند نقش مهمی در بررسی مسائل و عوامل مختلف کمک بسزایی ایفاء نماید. بنابراین در این تحقیق ابتدا معادلات حاکم بر انتشار موج پیچشی در استوانه توخالی چندلایه متشکل از مواد همگن و همسانگرد استخراج شده و با توجه به شرایط مرزی، نمودار دیسپرزین رسم می‌شود و سرعت انتشار موج به دست می‌آید. سپس نحوه شبیه‌سازی موج پیچشی در لوله و جزییات مربوط به مدل‌سازی مورد بحث قرار می‌گیرد. در انتها پس از اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج تحلیلی، عوامل مؤثر بر انتشار موج پیچشی در لوله چندلایه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

2- معادلات حاکم

همانند شکل 1، در ابتدا لوله‌ای متشکل از دو ماده همگن در نظر گرفته می‌شود. محور z منطبق بر محور استوانه قرار دارد که راستای انتشار موج را مشخص می‌کند. r_1 ، r_2 و r_3 به ترتیب شعاع داخلی، شعاع صفحه میانی و شعاع بیرونی لوله را مشخص می‌کنند. $\lambda^{(1)}$ ، $\mu^{(1)}$ ، $\rho^{(1)}$ و $\lambda^{(2)}$ ، $\mu^{(2)}$ ، $\rho^{(2)}$ به ترتیب نشان‌دهنده چگالی و ضرایب لامه در لایه‌های داخلی و خارجی لوله می‌باشند. سطوح لوله بدون تنش در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، معادلات حاکم ناوبر برای انتشار موج هدایت‌شده را برای هر یک از مواد می‌توان به‌صورت رابطه (1) نوشت [1]:

امواج پیچشی به‌اختصار به فرم $T(m, n)$ و امواج طولی به فرم $L(m, n)$ نمایش داده می‌شوند که m عددی صحیح است که نشان‌دهنده مرتبه دورانی مود می‌باشد و n عددی صحیح است که بیان‌کننده مرتبه گروه مود می‌باشد. برای مود متقارن m برابر صفر است [11]. موج پیچشی در مقایسه با موج طولی دارای مزیت‌هایی می‌باشد از جمله اینکه سرعت فاز مود اول موج پیچشی مستقل از فرکانس می‌باشد. به همین دلیل موج پیچشی در مقایسه با موج طولی کمتر تغییر مود می‌دهد. از طرفی دیگر در صورت وجود خمیدگی در لوله و عبور موج از آن، تغییرات کمتر حالت مود موج پیچشی، شرایط را برای تشخیص عیوب فراهم می‌کند و امکان بازرسی موارد پیچیده‌تر را افزایش می‌دهد [2].

مطابق مطالعات انجام گرفته در خصوص انتشار امواج فراصوت، گازیس [3]، انتشار امواج در سیلندرهای توخالی دایروی را به‌صورت تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار داده است. در مرجع [11] موج طولی و پیچشی در لوله تک‌لایه همگن، به روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته و نمودار دیسپرزین ارائه شده است. وابستگی امواج طولی به فرکانس در یک استوانه‌ی توخالی به کمک استخراج معادلات و نمودار دیسپرزین مورد بحث قرار گرفته است و مشاهده شده است که مود طولی انتشار موج هدایت‌شده در استوانه توخالی وابسته به فرکانس است [5]. مولگتن [6] تئوری انتشار موج پیچشی در لوله همگن مدفون در خاک را مورد بررسی قرار داده و نمودار دیسپرزین را برای آن رسم کرد. در مراجع [7, 8] معادلات موج طولی، پیچشی و عرضی برای یک میله استوانه‌ای توپر متشکل از دو لایه ماده الاستیک و با فرض اتصال کامل بین لایه‌ها، استخراج شده است. وایترو جونز [9] با استفاده از تئوری خطی الاستیسیته، انتشار موج طولی متقارن نسبت به محور در یک استوانه توخالی دو لایه با لایه‌های همگن و همسانگرد را مورد بررسی قرار داده و نمودار دیسپرزین و فرکانس برحسب عدد موج را برای موج طولی استخراج کردند.

سان و دو [10] یک روش مبتنی بر اندازه‌گیری میدان¹ جهت محاسبه نمودار دیسپرزین موج هدایت‌شده برای یک لوله را ارائه دادند. روش پیشنهادی به کمک شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. با استفاده از تئوری موج الاستیک در اجسامی که تحت تنش اولیه قرار گرفته‌اند، نمودار دیسپرزین موج پیچشی برای سیلندر توخالی متشکل از سه لایه با مواد همگن و همسانگرد با فرض کرنش اولیه در استوانه به دست آمده است [11, 12]. دین [13] نمودار دیسپرزین موج پیچشی را برای یک استوانه با هسته تشکیل‌شده از ماده FGM^2 را به دست آورده و تغییرات فرکانس را برای تشخیص اتصال ناقص موجود بین هسته و لایه بیرونی بررسی کرده است. انتشار موج پیچشی و طولی برای لوله تک لایه همگن دارای روکش ویسکوالاستیک به کمک روش تحلیلی و عددی، با در نظر گرفتن میرایی روکش مورد مطالعه قرار گرفته است [14-16]. کستینگز و بیکن [17] مدهای موج پیچشی را در لوله‌هایی با مواد جاذب مانند اپوکسی مورد بررسی قرار داده‌اند. چن و همکاران [18] به‌صورت تحلیلی تغییر مود موج‌های مایکرو در عبور از زانویی را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با شبیه‌سازی عددی اعتبارسنجی کردند.

جهت تولید و انتشار امواج هدایت‌شده در لوله‌ها از انواع مختلف ترنسدیوسرها مانند ترنسدیوسرهای پیزوالکتریک خشک³ [19]، حسگر کروی مغناطیسی⁴ [20]، ترنسدیوسرهای انعطاف‌پذیر و بدون تماس موج هدایت‌شده⁵ [21]، ترنسدیوسرهای فراصوت پیزوالکتریک مستقیم [22] و ترنسدیوسرهای

⁵ Flexible and noncontact guided-wave transducers

⁶ Comb type transducers

⁷ Circumferential cut

¹ Field-measurement-based method

² Functionally graded material

³ Dry-coupled piezoelectric transducers

⁴ Spherical magnetic sensors

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{c_1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{c_2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (8)$$

C_1 و C_2 به ترتیب سرعت موج طولی حجمی و سرعت موج عرضی حجمی می‌باشند که به صورت رابطه (9) تعریف می‌شوند:

$$C_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, C_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (9)$$

همچنین عبارات $\nabla^2 \varphi$ و $\nabla^2 \vec{H}$ در مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (10) و رابطه (11) تعریف می‌شوند:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{H} &= \nabla^2 (H_r \vec{e}_r + H_\theta \vec{e}_\theta + H_z \vec{e}_z) \\ &= \left(\nabla^2 H_r - \frac{1}{r^2} H_r \right. \\ &\quad \left. - 2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} \right) \vec{e}_r + (\nabla^2 H_\theta \\ &\quad - \frac{1}{r^2} H_\theta - 2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial H_r}{\partial \theta}) \vec{e}_\theta \\ &\quad + \nabla^2 H_z \vec{e}_z \end{aligned} \quad (11)$$

برای حل معادله (1) برای مود موج پیچشی، توابع زیر برای φ, H_r, H_θ و H_z پیشنهاد شده است [1]:

$$\begin{aligned} \varphi &= f(r) \sin(m\theta) e^{i(kz - \omega t)} \\ H_r &= h_r(r) \cos(m\theta) e^{i(kz - \omega t)} \\ H_\theta &= h_\theta(r) \sin(m\theta) e^{i(kz - \omega t)} \\ H_z &= h_z(r) \cos(m\theta) e^{i(kz - \omega t)} \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن ω بیانگر فرکانس زاویه‌ای و m یک عدد صحیح است که مرتبه دورانی مود موج را نشان می‌دهد. k نیز بیانگر عدد موج است که به صورت رابطه (13) تعریف می‌شود:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_p} \quad (13)$$

که در آن λ طول موج و c_p سرعت فاز می‌باشد. با جایگذاری توابع (12) در معادلات (7) و (8) نتیجه می‌شود که:

$$\begin{aligned} r^2 f'' + r f' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 \right) r^2 - m^2 \right] f &= 0 \\ r^2 h_r'' + r h_r' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - (m^2 + 1) \right] h_r \\ - 2 m h_\theta &= 0 \\ r^2 h_\theta'' + r h_\theta' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - (m^2 + 1) \right] h_\theta \\ - 2 m h_r &= 0 \\ r^2 h_z'' + r h_z' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - m^2 \right] h_z &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

با فرض $h_3 = h_z + 2h_2 = h_r + h_\theta, 2h_1 = h_r - h_\theta$ اعمال آن در معادلات (14) نتیجه می‌شود که:

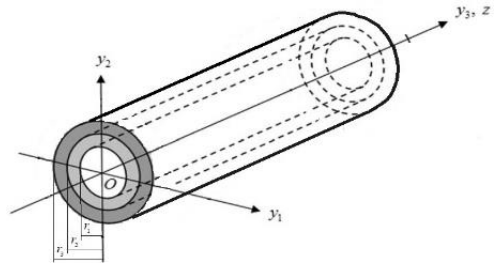


Fig. 1 A two-layer hollow cylinder consisting of two homogeneous materials

شکل 1 استوانه توخالی دولایه متشکل از دو ماده همگن

$$\mu^{(1)} \nabla^2 \vec{U}^{(1)} + (\mu^{(1)} + \lambda^{(1)}) \nabla \nabla \cdot \vec{U}^{(1)} = \rho \left(\frac{\partial^2 \vec{U}^{(1)}}{\partial t^2} \right) \quad (الف-1)$$

$$\mu^{(2)} \nabla^2 \vec{U}^{(2)} + (\mu^{(2)} + \lambda^{(2)}) \nabla \nabla \cdot \vec{U}^{(2)} = \rho \left(\frac{\partial^2 \vec{U}^{(2)}}{\partial t^2} \right) \quad (ب-1)$$

که در آن t نشانگر زمان و \vec{U} میدان جابجایی در مختصات استوانه‌ای می‌باشد. هر یک از روابط (1) به صورت مجزا قابل حل می‌باشند. برای حل معادله ناوبر از توابع پتانسیل برای تجزیه میدان جابجایی استفاده می‌شود. به دلیل آنکه سیلندر همگن در نظر گرفته شده است، میدان جابجایی را می‌توان به شکل رابطه (2) نوشت:

$$\vec{U}^{(i)} = \nabla \varphi + \nabla \times \vec{H} \quad (2)$$

φ کمیت اسکالر پتانسیل مرتبط به امواج طولی و \vec{H} کمیت برداری پتانسیل مرتبط با امواج عرضی می‌باشند که برای تعریف میدان جابجایی بکار برده شده‌اند. در رابطه (2)، \vec{H} به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$\vec{H} = H_r \vec{e}_r + H_\theta \vec{e}_\theta + H_z \vec{e}_z \quad (3)$$

در این رابطه (3)، اندیس‌های r, θ و z مربوط به مختصات استوانه‌ای می‌باشند. همچنین عبارات $\nabla \varphi$ و $\nabla \times \vec{H}$ در مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (4) و رابطه (5) بیان می‌گردند:

$$\nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \hat{z} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial z} \right) \hat{r} + \left(\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \hat{\theta} \\ &\quad + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(\rho H_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right) \hat{z} \end{aligned} \quad (5)$$

شرایط مرزی باید در معادلات حاکم صدق نماید. برای ساده‌سازی شرایط مرزی، فرض می‌شود که طول استوانه توخالی بی‌نهایت است. همچنین ناوردایی اندازه¹ به صورت رابطه (6) مطرح می‌شود. شرط ناوردایی اندازه که در اینجا به نام شرط حجم ثابت نیز شناخته می‌شود، بدان معنی است که حجم سازه ثابت است.

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (6)$$

با در نظر گرفتن شرط فوق، مسئله بدون در نظر گرفتن شرایط مرزی دو سر استوانه توخالی قابل حل است [1]. با جایگذاری معادله (2) در معادله (1) به دست می‌آید که:

¹ Gauge invariance

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_2^{(i)2}} - k^2}$$

$$Z_1(\alpha_i r) = \begin{cases} J_1(\alpha_i r) \rightarrow \text{if } \alpha_i \geq 0 \\ I_1(\alpha_i r) \rightarrow \text{if } \alpha_i < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$W_1(\alpha_i r) = \begin{cases} Y_1(\alpha_i r) \rightarrow \text{if } \alpha_i \geq 0 \\ K_1(\alpha_i r) \rightarrow \text{if } \alpha_i < 0 \end{cases}$$

با در اختیار داشتن میدان جابجایی و به کمک تئوری کلاسیک الاستیسیته می‌توان میدان تنش را به دست آورد. با توجه به این که سطوح بیرونی و داخلی لوله بدون تنش و اتصال بین لایه‌ها کامل در نظر گرفته شده است، شرایط مرزی به صورت رابطه (21) اعمال می‌گردند:

$$\sigma_r^{(1)} = \sigma_{r\theta}^{(1)} = \sigma_{rz}^{(1)} = 0 \quad \text{at } r = r_1$$

$$\sigma_{jr}^{(1)} = \sigma_{jr}^{(2)} \quad U_j^{(1)} = U_j^{(2)}, j = r, \theta, z \quad \text{at } r = r_2 \quad (21)$$

$$\sigma_r^{(2)} = \sigma_{r\theta}^{(2)} = \sigma_{rz}^{(2)} = 0 \quad \text{at } r = r_3$$

با توجه به آنکه موج پیچشی نسبت به محور لوله متقارن است ($m = 0$)، بنابراین شرایط مرزی به روابط (22) تقلیل پیدا می‌کنند:

$$\sigma_{r\theta}^{(1)} = 0 \quad \text{at } r = r_1$$

$$\sigma_{\theta r}^{(1)} = \sigma_{\theta r}^{(2)} \quad U_\theta^{(1)} = U_\theta^{(2)}, j = r, \theta, z \quad \text{at } r = r_2 \quad (22)$$

$$\sigma_{r\theta}^{(2)} = 0 \quad \text{at } r = r_3$$

با داشتن 4 معادله شرایط مرزی فوق و همچنین 4 معادله از شرط نوردایی اندازه جمعاً 8 معادله شرایط مرزی موجود است که می‌توان ماتریس $[C]$ را تشکیل داد.

$$[C] \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ \vdots \\ C_2 \\ D_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

با حل معادله $\det(C) = 0$ در بازه‌ی فرکانسی مورد نظر، نمودار دیسپرز برای لوله‌ی دولایه به دست می‌آید. مشابه روش گفته‌شده در این بخش، می‌توان معادلات حاکم بر انتشار موج پیچشی در لوله‌های n لایه را استخراج نمود و با تعریف شرایط مرزی مشابه، نمودار دیسپرز رسم شود.

3- مدل‌سازی عددی

در این بخش مدل‌سازی عددی انتشار موج پیچشی در لوله چندلایه با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس [35] جهت شبیه‌سازی انتشار موج پیچشی استفاده شده است. اندازه المان‌ها با توجه طول موج منتشرشده در جسم تعیین می‌شود، به طوری که بایستی انتشار موج در طول المان به صورت کامل مشاهده شود. رابطه‌ی (24) برای تعیین طول المان ارائه شده است [36]:

$$\frac{\lambda}{20} < l_{element} < \frac{\lambda}{10} \quad (24)$$

که در آن $l_{element}$ طول المان و λ طول موج منتشرشده است و به صورت رابطه (25) تعریف می‌شود:

$$r^2 f'' + r f' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 \right) r^2 - m^2 \right] f = 0$$

$$r^2 h_1'' + r h_1' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - (m-1)^2 \right] h_1 = 0$$

$$r^2 h_2'' + r h_2' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - (m+1)^2 \right] h_2 = 0$$

$$r^2 h_3'' + r h_3' + \left[\left(\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \right) r^2 - m^2 \right] h_3 = 0 \quad (15)$$

معادلات (15) مشابه معادله مرتبه اول تابع بسل می‌باشند. بنابراین با توجه به حل جامع توابع بسل، می‌توان نوشت:

$$f = AZ_m(\alpha r) + BW_m(\alpha r)$$

$$h_1 = A_1 Z_{m-1}(\beta r) + B_1 W_{m-1}(\beta r)$$

$$h_2 = A_2 Z_{m+1}(\beta r) + B_2 W_{m+1}(\beta r) \quad (16)$$

$$h_3 = A_3 Z_m(\beta r) + B_3 W_m(\beta r)$$

که در آن A_i و B_i ضرایب ثابت هستند و Z_m و W_m مرتبه m از توابع بسل می‌باشند که به صورت رابطه (17) تعیین می‌شوند [34]:

$$Z_m(\alpha r) = \begin{cases} J_m(\alpha r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 \geq 0 \\ I_m(\alpha r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 < 0 \end{cases}$$

$$W_m(\alpha r) = \begin{cases} K_m(\alpha r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 \geq 0 \\ Y_m(\alpha r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$Z_m(\beta r) = \begin{cases} J_m(\beta r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \geq 0 \\ I_m(\beta r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 < 0 \end{cases}$$

$$W_m(\beta r) = \begin{cases} K_m(\beta r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 \geq 0 \\ Y_m(\beta r) \rightarrow \text{if } \frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 < 0 \end{cases}$$

همچنین α و β در روابط فوق برابرند با:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2} \quad (18)$$

برای لوله دولایه می‌توان نتیجه گرفت که میدان جابجایی برای موج پیچشی متقارن نسبت به محور لوله ($m = 0$) با استفاده از روابط (16) و (2) به فرم رابطه (19) استخراج می‌شود:

$$U_r^{(i)} = U_z^{(i)} = 0$$

$$U_\theta^{(i)} = \{ I_i K [A_i Z_1(\alpha_i r) + B_i W_1(\alpha_i r)] + \alpha [C_i Z_1(\alpha_i r) + D_i W_1(\alpha_i r)] \} e^{I(Kz - \omega t)} \quad (19)$$

که در آن A_i, B_i, C_i و D_i ضرایب نامعلوم می‌باشند که در آن اندیس i برابر (1) و (2) می‌باشد که به ترتیب برای ماده‌ی داخلی و خارجی استفاده شده‌اند. همچنین Z و W نیز به صورت رابطه (20) تعریف می‌شوند:

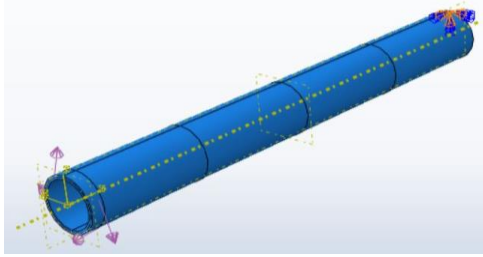


Fig. 3 Boundary conditions of the model for torsional wave $T(0,1)$ mode propagation in the two-layer pipe

شکل 3 شرایط مرزی مدل جهت انتشار موج پیشی $T(0,1)$ در لوله دولایه

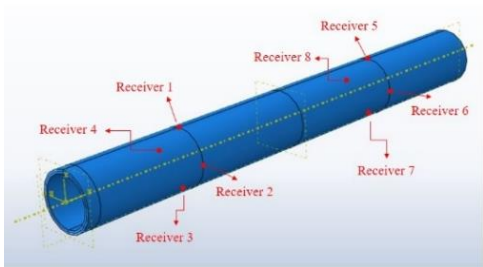


Fig. 4 Position of the defined receivers

شکل 4 موقعیت مکانی دریافت‌کننده‌ها

جهت بررسی وابستگی اندازه‌ی مدل شبیه‌سازی‌شده، در فرکانس ثابت، انرژی کرنشی برای اندازه‌های المان متفاوت محاسبه شده است (شکل 5). با همگرا شدن انرژی کرنشی، اندازه‌ی المان مناسب تشخیص داده می‌شود. با توجه به رابطه (24) و شکل 5، در این تحقیق برای موج با فرکانس 100 کیلوهرتز طول بیشینه المان 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

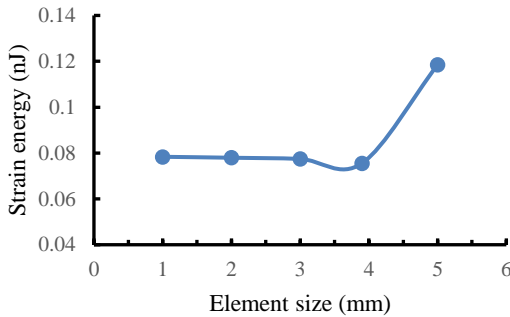


Fig. 5 Investigation of the element size independence of the simulation model at a frequency of 100 kHz

شکل 5 بررسی وابستگی اندازه‌ی المان مدل شبیه‌سازی‌شده در فرکانس 100 کیلوهرتز

4- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا جهت بررسی دقت مدل‌سازی عددی، تطابق نتایج عددی و تحلیلی با یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن انتشار موج پیشی در لوله‌های دولایه و سه لایه و عوامل مؤثر بر آن، بررسی می‌شود.

4-1- صحت سنجی مدل عددی

هندسه و خصوصیات لوله دولایه مورد مطالعه در جدول 1 نشان داده شده است. جنس لایه داخلی آلومینیومی و بیرونی فولاد و ضخامت لایه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادلات (22) نمودارهای دیسپرزین سرعت فاز و سرعت گروه برای مود متقارن مرتبه اول موج پیشی $T(0,1)$ برای لوله دولایه با خصوصیات ذکر شده در جدول 1، به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 ارائه

$$\lambda = \frac{c_2}{f} \quad (25)$$

به صورتی c_2 که سرعت موج عرضی در ماده و f فرکانس موج منتشرشده می‌باشد. مش‌بندی انجام‌شده بر روی مدل در شکل 2 نمایش داده شده است. المان سه‌بعدی C3D8R یک المان خطی مکعبی با 8 گره و با یک نقطه یکپارچه‌سازی¹ است [35]. برای آنکه شرط نامتناهی بودن لوله برقرار شود می‌بایست طول لوله بسیار بزرگ‌تر از قطر و ضخامت لوله باشد. از این‌رو طول لوله برابر 80 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

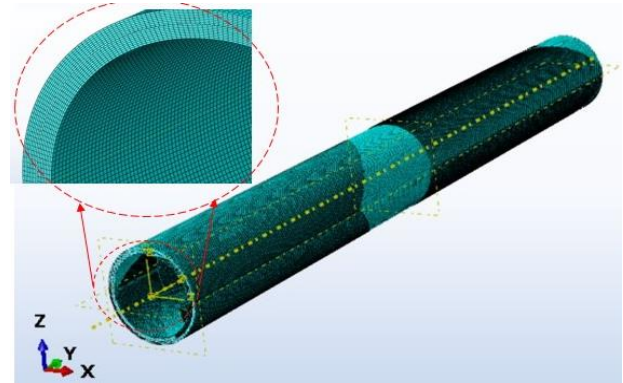


Fig. 2 The meshed model of a two-layer pipe

شکل 2 مش‌بندی مدل لوله دولایه

در عمل جهت تحریک موج اولیه از روش‌های مختلفی همچون ترنس‌دیوسرهای الکترومغناطیس، پیزوالکتریک و لیزر استفاده می‌شود. در این پژوهش از ترنس‌دیوسرهای پیزوالکتریک جهت تحریک موج اولیه استفاده شده است. جهت مدل‌سازی پیزوالکتریک و تحریک موج، نیروی دورانی ابتدا روی سطح بیرونی لوله به طول 2 سانتی‌متر آن جهت شبیه‌سازی حلقه ترنس‌دیوسر اعمال می‌شود. از رابطه (26) برای تعیین پالس نیروی دورانی تحریک استفاده شده است که در آن f فرکانس موج تحریک ترنس‌دیوسر، N تعداد سیکل‌های پالس اعمالی است و A_0 دامنه موج تحریک می‌باشد.

$$A(t) = \begin{cases} A_0 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{N}t\right) \right] \cos(2\pi f t) & , 0 < t < \frac{N}{f} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

همچنین جهت جلوگیری از حرکت ناچیز لوله، روی یک نقطه در انتهای لوله تمام جابجایی‌های آن صفر شده‌اند. برای مدل‌سازی لوله چندلایه، جهت ایجاد اتصال کامل بین لایه‌ها از قید Tie استفاده شده است. هندسه و شرایط مرزی مدل جهت انتشار موج پیشی $T(0,1)$ در لوله دولایه در شکل 3 نشان داده شده است.

چهار دریافت‌کننده² همانند شکل 4 در فاصله 20 سانتی‌متری از ابتدای لوله و چهار دریافت‌کننده دیگر در فاصله 60 سانتی‌متری از ابتدای لوله با اختلاف زاویه‌ای 90 درجه، برای تحلیل تغییرات جابجایی امواج دریافتی مدل شده‌اند. همچنین جهت دست‌یابی به ساختار موج منتشرشده در سطح مقطع لوله 9 دریافت‌کننده در هر لایه در راستای ضخامت تعریف می‌شوند.

² Receiver

¹ Integration

با توجه به شبیه‌سازی انجام‌شده، نحوه انتشار موج پیچشی $T(0,1)$ در لوله دولایه با خصوصیات ذکرشده در جدول 1، در شکل 10 ارائه شده است. با بررسی تغییرات جابجایی 2 دریافت‌کننده یک و پنج (شکل 8) و با اطلاع از مسافت مابین دریافت‌کننده یک و پنج، سرعت گروه موج منتشرشده قابل استخراج است. در جدول 2 نتایج مدل عددی با نتایج تحلیلی برای لوله دولایه مقایسه شده‌اند. درصد خطای سرعت گروه مدل شبیه‌سازی شده برابر 0.12 درصد است که تطابق بسیار خوبی با نتایج تحلیلی دارد. ساختار موج پیچشی $T(0,1)$ برای لوله دولایه در شکل 9 نشان داده شده است. با توجه شکل 9 و جدول 2، دقت بالایی در شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج تحلیل را می‌توان مشاهده کرد.

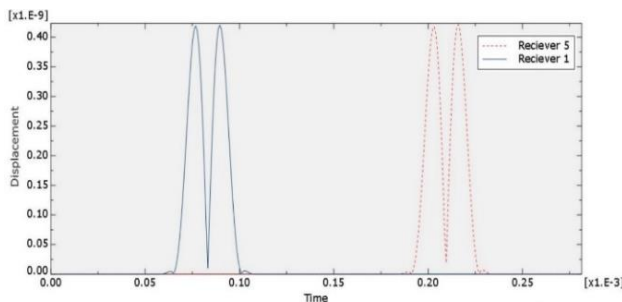


Fig. 8 Displacement changes at 50 kHz in the first and fifth receivers in the two-layer pipe

شکل 8 تغییرات جابجایی برای فرکانس 50 کیلوهرتز در دو دریافت‌کننده یک و پنج برای لوله دولایه

جدول 2 مقایسه سرعت گروه به‌دست‌آمده از مدل عددی با مدل تحلیلی برای لوله دولایه در فرکانس 50 کیلوهرتز

Table 2 Comparison of the group velocity obtained from the numerical model with the analytical model for a two-layer pipe at 50 kHz

| خطای نسبی (%) | سرعت گروه (m/s) | |
|---------------|-----------------|--------|
| | عددی | تحلیلی |
| 0.21 | 3164.05 | 3171 |

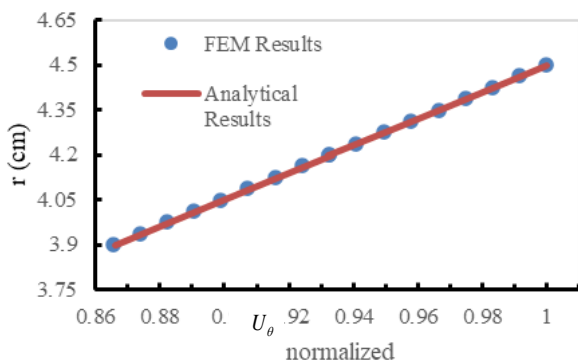


Fig. 9 Torsional wave $T(0,1)$ mode structure through the pipe thickness for a two-layer pipe at 50 kHz

شکل 9 ساختار موج پیچشی $T(0,1)$ برای لوله دولایه در فرکانس 50 کیلوهرتز

2-4- بررسی تأثیر تعداد لایه‌ها

از سری عوامل مؤثر، ابتدا تأثیر تعداد لایه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این‌رو 2 لوله با ضخامت یکسان ولی با تعداد لایه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. خصوصیات لوله دولایه در جدول 1 ذکر شده است. شعاع داخلی لوله سه لایه برابر 3.9 سانتی‌متر

شده است. برای صحت‌سنجی نمودارهای بدست آمده، نمودارهای دیسپرز به کمک نرم‌افزار GUIGUW برای مودهای مختلف (پیچشی، طولی و خمشی) نیز ترسیم شده‌اند. در این نمودارها، حروف L، T و F به ترتیب دلالت بر انواع مود طولی، پیچشی و خمشی دارند. همانطور که از شکل‌های 6 و 7 مشخص است مودهای مختلفی از امواج هدایت شده قادر به پدیدار شدن در محیط انتشار لوله می‌باشند، همچنین نمودارهای مربوط به مود $T(0,1)$ حاصل از معادلات ارائه شده و نرم‌افزار GUIGUW انطباق کامل دارند. با توجه به شکل‌های 6 و 7 واضح است که در تمامی مودها بجز مود متقارن مرتبه اول موج پیچشی $T(0,1)$ ، سرعت فاز و گروه به فرکانس بستگی دارد. به عبارت دیگر سرعت مود اول متقارن موج پیچشی برای لوله دولایه همانند لوله تک لایه، مستقل از فرکانس بوده و با تغییر فرکانس سرعت فاز و گروه ثابت می‌ماند و این مود غیردیسپرسیو گفته می‌شود.

جدول 1 خصوصیات مکانیکی و هندسی لوله دولایه مورد استفاده در شبیه‌سازی المان محدود

Table 1 Mechanical and geometrical properties of two-layer pipe used in the simulation model

| لایه | مدول یانگ (GPa) | ضریب پواسون | چگالی (kg/m^3) | شعاع داخلی لایه (cm) | ضخامت (cm) |
|--------|-----------------|-------------|--------------------|----------------------|------------|
| داخلی | 70 | 0.33 | 2700 | 3.9 | 0.3 |
| بیرونی | 207 | 0.3 | 7800 | 4.2 | 0.3 |

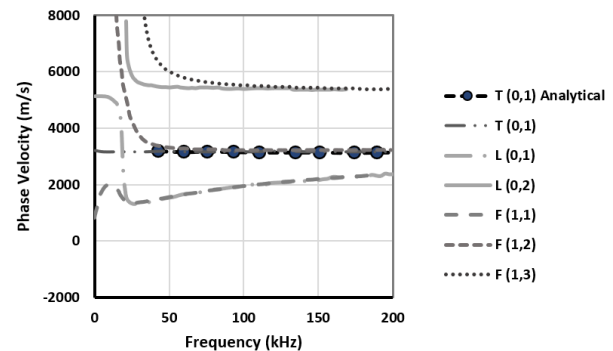


Fig. 6 The phase velocity dispersion curves for the two-layer pipe with the properties listed in Table 1

شکل 6 نمودارهای دیسپرز سرعت فاز برای لوله دولایه با خصوصیات ذکرشده در جدول 1

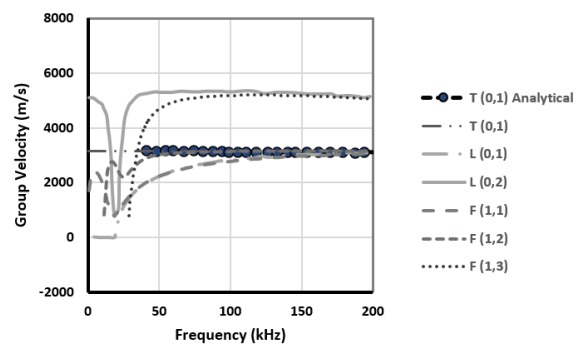


Fig. 7 The group velocity dispersion curves of the torsional wave for the two-layer pipe with the properties listed in Table 1

شکل 7 نمودار دیسپرز سرعت گروه موج پیچشی برای لوله دولایه با خصوصیات ذکرشده در جدول 1

فرکانس ثابت 50 کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش ضخامت سرعت انتشار موج می‌تواند حدود 50 mm/μsec افزایش یابد که مقدار قابل توجهی می‌باشد (شکل 11).

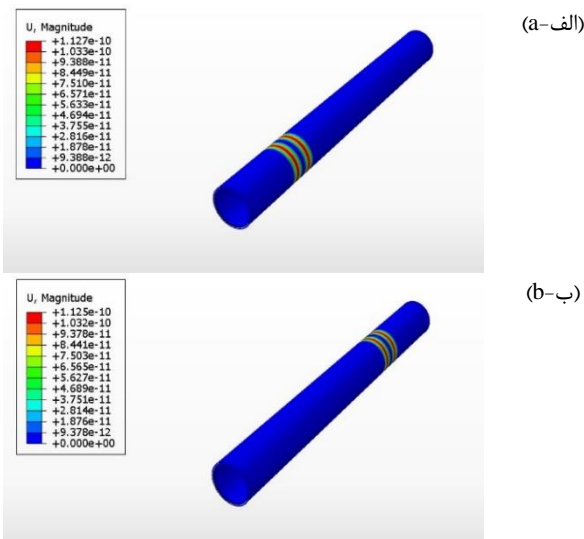


Fig. 10 Torsional wave propagation in the two-layer pipe at 50 kHz (a) 66.06 μsec (b) 192.09 μsec

شکل 10 انتشار موج پیشی در لوله دولایه در فرکانس 50 کیلوهرتز (الف) زمان 66.06 میکروثانیه (ب) زمان 192.09 میکروثانیه

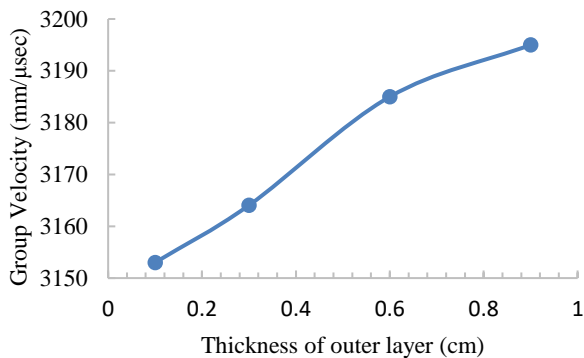


Fig. 11 Group velocity variation of the torsional wave propagation in terms of the thickness of the outer layer

شکل 11 تغییرات سرعت گروه انتشار موج پیشی بر حسب ضخامت لایه خارجی

4-5- بررسی تأثیر خواص مکانیکی لایه‌ها

سه لوله دولایه با خواص مکانیکی متفاوت جهت بررسی تأثیر خواص مکانیکی بر سرعت انتشار موج مورد مطالعه قرار گرفتند. مختصات هندسی سه لوله دولایه در جدول 1 ذکر شده است. جنس لایه داخلی ثابت و آلومینیوم در نظر گرفته شده است و لایه بیرونی فولاد، مس و قلع قرار داده شده است. مدول یانگ قلع برابر 50 گیگا پاسکال و چگالی آن برابر 7635 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. در فرکانس 100 کیلوهرتز سرعت انتشار موج در لوله تشکیل شده از آلومینیوم و فولاد برابر 3123 متر بر ثانیه، در لوله تشکیل شده از آلومینیوم و مس برابر 2138 متر بر ثانیه و در لوله تشکیل شده از آلومینیوم و قلع برابر 1563 متر بر ثانیه محاسبه شده است (جدول 6). نتایج نشان می‌دهد که سرعت انتشار موج پیشی در لوله دولایه وابسته به خصوصیات مکانیکی مواد لایه‌های تشکیل‌دهنده لوله می‌باشد.

و ضخامت هریک از لایه‌ها برابر 2 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جنس لایه داخلی، میانی و بیرونی به ترتیب آلومینیوم، فولاد و آلومینیوم در نظر گرفته شده است. سرعت انتشار مود اول متقارن موج پیشی در لوله دولایه برابر 3168.05 متر بر ثانیه محاسبه شده است. درحالی‌که سرعت انتشار در لوله سه‌لایه برابر 3164.85 متر بر ثانیه به‌دست آمده است. اگرچه این مقادیر تفاوت ناچیزی دارند، با این حال در صورت وجود عیب، جهت تشخیص دقیق محل آن می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

4-3- بررسی تأثیر ترتیب لایه‌ها

جهت بررسی تأثیر ترتیب لایه‌ها در لوله‌های دولایه، با جابجایی جنس لایه‌های لوله ذکر شده در جدول 1، نتایج مورد بررسی قرار داده شده است (جدول 3). همچنین برای لوله‌های سه لایه تأثیر ترتیب لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. خصوصیات هندسی لوله سه لایه در بخش 2-4 ذکر شده است. همچنین خصوصیات مکانیکی جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 3 بررسی تأثیر ترتیب لایه‌ها در لوله‌های دولایه در فرکانس 50 کیلوهرتز

| جنس لایه داخلی (%) | سرعت گروه (m/s) | | جنس لایه بیرونی | جنس لایه داخلی |
|--------------------|-----------------|---------|-----------------|----------------|
| | تحلیلی | عددی | | |
| 0.0019 | 3164 | 3164.04 | آلومینیوم | فولاد |
| 0.18 | 3171 | 3168.05 | فولاد | آلومینیوم |

جدول 4 خواص مکانیکی لوله سه لایه

| ماده | مدول یانگ (GPa) | ضریب پواسون | چگالی (kg/m ³) |
|-----------|-----------------|-------------|----------------------------|
| آلومینیوم | 70 | 0.3 | 2700 |
| فولاد | 207 | 0.3 | 7800 |
| مس | 110 | 0.343 | 8930 |

جدول 5 بررسی تأثیر ترتیب لایه‌ها در لوله‌های سه لایه

Table 5 Effect of arrangement of layers in three-layer pipes at 50 kHz

| جنس لایه داخلی (%) | سرعت گروه (m/s) | | جنس لایه میانی | جنس لایه بیرونی | جنس لایه داخلی |
|--------------------|-----------------|---------|----------------|-----------------|----------------|
| | تحلیلی | عددی | | | |
| 0.008 | 3164 | 3164.85 | آلومینیوم | فولاد | آلومینیوم |
| 0.18 | 3171 | 3168.05 | فولاد | آلومینیوم | فولاد |
| 1.21 | 2662.2 | 2694.62 | آلومینیوم | فولاد | مس |
| 1.77 | 2742.52 | 2791.28 | مس | فولاد | آلومینیوم |

از جدول 3 و جدول 5 نتیجه می‌شود که سرعت گروه با تغییر ترتیب لایه‌ها، تغییر کرده است. با تغییر ترتیب لایه‌ها در لوله دولایه مشاهده می‌شود سرعت گروه تا 7 متر بر ثانیه (0.22 درصد) تغییر می‌کند (جدول 3). همچنین برای لوله سه لایه متشکل از مس، فولاد و آلومینیوم با تغییر چینش لایه‌ها سرعت گروه به میزان 80 متر بر ثانیه (3.01 درصد) تغییر می‌کند (جدول 5) که برای تشخیص دقیق محل عیب احتمالی می‌بایست مورد توجه بازرسان قرار گیرد.

4-4- بررسی تأثیر ضخامت لایه‌ها

جهت بررسی تأثیر ضخامت بر روی سرعت انتشار موج پیشی تقارن محوری، ضخامت لایه بیرونی لوله دولایه ذکر شده در جدول 1 به‌عنوان متغیر مسئله تغییر داده شده است. از این رو ضخامت‌های 0.1، 0.3، 0.6 و 0.9 سانتی‌متر در

[9] Whittier, J. S. and Jones, J. P., "Axially Symmetric Wave Propagation in a Two-Layered Cylinder," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 3, No. 4, pp. 657-675, 1967.

[10] Sun, Z. and Du, H., "Estimation of the Dispersion Curves of Pipe Guided Waves by Field Measurement," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 140, pp. 106693, 2020.

[11] Akbarov, S., Kepceler, T. and Egilmez, M. M., "Torsional Wave Dispersion in a Finitely Pre-Strained Hollow Sandwich Circular Cylinder," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 18-19, pp. 4519-4537, 2011.

[12] Guz, A. N., "Elastic Waves in Bodies with Initial (Residual) Stresses," *International Applied Mechanics*, Vol. 38, No. 1, pp. 23-59, 2002.

[13] Dean, M., "Torsional Wave Dispersion in a Composite Cylinder with a Functionally Graded Core and an Imperfect Interface," Thesis, The Ohio State University, USA, 2013.

[14] Hua, J. and Rose, J., "Guided Wave Inspection Penetration Power in Viscoelastic Coated Pipes," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 52, no. 4, pp. 195-205, 2010.

[15] Luo, W., "Ultrasonic Guided Waves and Wave Scattering in Viscoelastic Coated Hollow Cylinders," PhD Thesis, The Pennsylvania State University, USA, 2005.

[16] Mu, J., "Guided Wave Propagation and Focusing in Viscoelastic Multilayered Hollow Cylinders," PhD Thesis, The Pennsylvania State University, USA, 2008.

[17] Castaings, M. and Bacon, C., "Finite Element Modeling of Torsional Wave Modes Along Pipes with Absorbing Materials," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 119, No. 6, pp. 3741-3751, 2006.

[18] Chen, G., Katagiri, T., Song, H., Yusa, N. and Hashizume, H., "Investigation of the Effect of a Bend on Pipe Inspection Using Microwave NDT," *NDT & E International*, Vol. 110, pp. 102208, 2020.

[19] Alleyne, D. and Cawley, P., "The Excitation of Lamb Waves in Pipes Using Dry-Coupled Piezoelectric Transducers," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-20, 1996.

[20] Kwun, H. and Dynes, C. P., "Long-Range Guided Wave Inspection of Pipe Using Magnetostrictive Sensor Technology: The Feasibility of Defect Characterization," *Proceeding SPIE 3398, Nondestructive Evaluation of Utilities and Pipelines II*, pp. 28-34, 1998.

[21] Liu, T., Pei, C., Cai, R., Li, Y. and Chen, Z., "A Flexible and Noncontact Guided-Wave Transducer Based on Coils-Only EMAT for Pipe Inspection," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 314, pp. 112213, 2020.

[22] Guo, S., Chen, S., Zhang, L., Liew, W. H. and Yao, K., "Direct-Write Piezoelectric Ultrasonic Transducers for Pipe Structural Health Monitoring," *NDT & E International*, Vol. 107, pp. 102131, 2019.

[23] Ditri, J. J., Rose, J. L. and Pilarski, A., "Generation of Guided Waves in Hollow Cylinders by Wedge and Comb Type Transducers," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp. 211-218, 1993.

[24] Quarry, M. J. and Rose, J. L., "Multimode Guided Wave Inspection of Piping Using Comb Transducers," *Materials Evaluation*, Vol. 57, No. 10, pp. 1089-1090, 1999.

[25] Miao, H., Huan, Q., Wang, Q. and Li, F., "Excitation and Reception of Single Torsional Wave T (0, 1) Mode in Pipes Using Face-Shear D24 Piezoelectric Ring Array," *Smart Materials and Structures*, Vol. 26, No. 2, pp. 025021, 2017.

[26] Zhu, W., "A Finite Element Analysis of the Time-Delay Periodic Ring Arrays for Guided Wave Generation and Reception in Hollow Cylinders," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 48, No. 5, pp. 1462-1470, 2001.

[27] Zhu, W., "An FEM Simulation for Guided Elastic Wave Generation and Reflection in Hollow Cylinders with Corrosion Defects," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 124, No. 1, pp. 108-117, 2002.

جدول 6 بررسی تأثیر خواص مکانیکی لایه‌های لوله‌های دولایه در 100 کیلوهرتز
Table 6 Effect of mechanical properties of layers in two-layer pipes at 100 kHz

| نمونه | ماده لایه داخلی | ماده لایه بیرونی | سرعت گروه (m/s) |
|-------|-----------------|------------------|-----------------|
| 1 | آلومینیوم | فولاد | 3123 |
| 2 | آلومینیوم | مس | 2138 |
| 3 | آلومینیوم | قلع | 1563 |

5- نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا سرعت فاز برای لوله‌ی چندلایه متشکل از مواد همگن، با استفاده از معادلات حرکت موج و با شرایط مرزی ذکر شده استخراج شد. سپس جهت بررسی انتشار موج پیچشی در لوله دولایه و سه لایه، یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس ایجاد شد. همچنین نشان داده شد نتایج مدل‌سازی موج پیچشی در لوله دولایه و سه لایه، در مقایسه با سرعت گروه به‌دست‌آمده از معادلات تحلیلی، مطابقت خوبی دارند. از مقایسه‌ی انتشار موج پیچشی تقارن محوری در سه مدل با ضخامت یکسان ولی با تعداد لایه متفاوت، مشاهده می‌شود که سرعت گروه موج منتشرشده با یکدیگر متفاوت بوده و باید مورد توجه بازرسان قرار گیرد. همچنین مشاهده شد که تعداد لایه‌ها و ضخامت لایه‌ها تأثیری کوچکی بر سرعت انتشار موج در لوله دارد. در حالی که ترتیب لایه‌ها و جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده تأثیر بیشتری بر روی سرعت انتشار موج پیچشی $T(0,1)$ در لوله‌های چندلایه دارد. مطالعه تفاوت سرعت و الگوهای انتشار موج می‌تواند منجر به شناخت بهتر ساختار لوله چندلایه و تشخیص عیوب احتمالی آن شود.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز جهت حمایت از این پژوهش که با شماره قرارداد (SCU.EM97.29321) به انجام رسیده، تشکر و قدردانی می‌کنند.

7- مراجع

[1] Rose, J. L., "Ultrasonic Guided Waves in Solid Media," Cambridge university press, 2014.

[2] Tan, J. J., Wang, X., Guo, N. and Ho, J. H., "Parametric Study of Defect Detection in Pipes with Bend Using Guided Ultrasonic Waves," in *MATEC Web of Conferences*, Vol. 71, pp. 2003, 2016.

[3] Gazis, D. C., "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 31, No. 5, pp. 568-573, 1959.

[4] Gazis, D. C., "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. II. Numerical Results," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 31, No. 5, pp. 573-578, 1959.

[5] Liu, G. and Qu, J., "Guided Circumferential Waves in a Circular Annulus," *Applied Mechanics*, Vol. 65, No. 2, pp. 424-430, 1998.

[6] Muggleton, J. M., Kalkowski, M., Gao, Y. and Rustighi, E., "A Theoretical Study of the Fundamental Torsional Wave in Buried Pipes for Pipeline Condition Assessment and Monitoring," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 37, pp. 155-171, 2016.

[7] Lai, J. L., Dowell, E. H. and Tauchert, T. R., "Propagation of Harmonic Waves in a Composite Elastic Cylinder," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 49, No. 2, pp. 220-228, 1971.

[8] Armenakos, A. E., "Torsional Waves in Composite Rods," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 38, No. 3, pp. 439-446, 1965.

- [28] Lowe, P. S., Lais, H., Paruchuri, V. and Gan, T.-H., "Application of Ultrasonic Guided Waves for Inspection of High Density Polyethylene Pipe Systems," *Sensors*, Vol. 20, No. 11, pp. 3184, 2020.
- [29] Demma, A., Cawley, P. and Lowe, M., "The Reflection of the Fundamental Torsional Mode from Cracks and Notches in Pipes," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 114, No. 2, pp. 611-625, 2003.
- [30] Furukawa, T. and Komura, I., "Simulation and Visualization of Guided Wave Propagation by Large-Scale 3D FEM," *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol. 3-3, pp. 92-101, 2011.
- [31] Tan, J. J., Wang, X., Guo, N. and Ho, J. H., "Parametric Study of Defect Detection in Pipes with Bend Using Guided Ultrasonic Waves," *The International Conference on Computing and Precision Engineering*, pp.5, 2016.
- [32] Zhang, X., Tang, Z., Lv, F. and Yang, K., "Scattering of Torsional Flexural Guided Waves from Circular Holes and Crack-Like Defects in Hollow Cylinders," *NDT & E International*, Vol. 89, pp. 56-66, 2017.
- [33] Løvstad, A. and Cawley, P., "The Reflection of the Fundamental Torsional Mode from Pit Clusters in Pipes," *NDT & E International*, Vol. 46, pp. 83-93, 2012.
- [34] Abramowitz, M. and Stegun, I., "Handbook of Mathematical Functions: With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables Applied Mathematics Series," Dover Publications, 1964 .
- [35] Dassault Systèmes, "Abaqus Analysis User's Guide," Technical Report Abaqus 6.14 Documentation ,Simulia Corp., 2016 .
- [36] Gresil, M., Poohsai, A. and Chandarana, N., "Guided Wave Propagation and Damage Detection in Composite Pipes Using Piezoelectric Sensors," *Procedia Engineering*, Vol. 188, pp. 148-155, 2017.