

بررسی انعکاس امواج فراصوت هدایت شده جهت تعیین ابعاد عیوب خوردگی در خطوط لوله

پژمان تقی پور بیرگانی^{۱*}، منصور فرزام^۲

^۱استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

^۲دانشیار، گروه بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

* نویسنده مسئول: p_taghipour@iauahvaz.ac.ir

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

چکیده

در این مقاله ضریب بازتاب امواج فراصوت هدایت شده از سطح یک عیب خوردگی محیطی جهت یافتن رابطه‌ای بین این ضریب و اندازه‌ی عیب بررسی شده‌است. در ابتدا با حل معادلات حاکم بر انتشار موج به روش ماتریس کلی و با توجه به شرایط مرزی موجود در لوله، نمودارهای تجزیه سرعت فاز و سرعت گروه استخراج شده، سپس شبیه‌سازی انتشار موج با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شده است. به منظور تولید موج در لوله از مود طولی $L(2,0)$ که از خصوصیات فرکانسی مناسبی برخوردار است استفاده شده است. پس از بررسی هم‌گرایی، انتشار موج در لوله‌ی دارای عیب با ابعاد مختلف بررسی شده است. در شبیه‌سازی انتشار موج، بخشی از موج تولید شده پس از برخورد به عیب، انعکاس پیدا کرده و مدهای مختلفی حاصل شده که با محاسبه‌ی سرعت مدهای بازگشتی و مقایسه‌ی این سرعت‌ها با نمودار تجزیه سرعت گروه در فرکانس ۱۷۰ کیلوهرتز، اولین مود بازتابی مود $L(2,0)$ و دومین مود بازتابی، مود $F(2,1)$ می‌باشد. با توجه به ابعاد مختلف عیب، ضرایب بازتاب مختلفی حاصل شده و مشاهده شده که با افزایش عمق عیب، ضریب انعکاس موج بازتابی طولی نیز افزایش پیدا می‌کند. در این مقاله همچنین تاثیر پهنای خوردگی محیطی بر روی ضریب انعکاس موج طولی نیز بررسی شده و مشاهده شده که ضریب انعکاس امواج فقط به عمق عیب بستگی داشته و با تغییر پهنای خوردگی محیطی تغییر چندانی ندارد.

کلیدواژه: امواج فراصوت هدایت شده، نمودارهای تجزیه، ضریب بازتاب، روش اجزاء محدود، عیب خوردگی محیطی، امواج طولی.

The Investigation of Ultrasonic Guided Waves Reflection to Assess Corrosion Defect Sizes in the Pipelines

P. Taghipour Birgani ^{1*}, M. Farzam ²

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

² Associate Professor, Technical Inspection Engineering Department, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

* **Corresponding Author:** p_taghipour@iauahvaz.ac.ir

Submission: 2022, 03, 11 **Acceptance:** 2022, 06, 10

Abstract

In this article, reflection coefficient of ultrasonic guided waves from surface of a circumferential corrosion is evaluated to find the relation between this coefficient and the size of defect. In the present work, firstly, by solving the governing equations of the wave propagation with general matrix method and according to the boundary conditions in the pipe, dispersion curves of the phase velocity and group velocity were obtained, then simulation of wave propagation was performed using Abaqus finite element software. In this method, a longitudinal L(0,2) mode, which has good frequency characteristics, was used to generate the wave in the pipe. After determining the convergence, the wave propagation was carried out in the pipe with different dimension of defect. It was observed that part of the generated wave after collision to defect was reflected and various modes were generated that the first reflected mode was L(0,2) and the second reflected mode according to the group velocity dispersion curves of different modes was F(1,2). Different reflection coefficients were obtained due to different dimension of defects, and it was observed that with increasing defect depth, the reflection coefficient of the reflected wave also increased. In this article, the effect of circumferential corrosion width on the reflection coefficient of longitudinal wave has been investigated and it has been observed that the reflection coefficient of waves depends only on the depth of the defect and does not change much with the change of circumferential corrosion width.

Keywords: Ultrasonic guided waves, Dispersion curves, Reflection coefficient, Finite element method, Circumferential Corrosion, Longitudinal waves.

۱- مقدمه

یکی از روش‌های بازرسی نوین، بازرسی با امواج فراصوت هدایت شده می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان مسافت‌های طولانی در سازه‌هایی از قبیل خطوط لوله انتقال نفت و گاز را جهت شناسایی انواع عیوب از قبیل خوردگی بازرسی نمود. در روش‌های سنتی آزمون فراصوتی، بازرسی به صورت نقطه به نقطه صورت می‌گیرد و این امر در بازرسی مسافت‌های طولانی مقرون به صرفه نیست. امواج فراصوت هدایت شده توانایی انتشار در مسافت طولانی از محل تحریک را دارند، معمولاً استفاده از آن‌ها در سازه‌های پیچیده با مشکلاتی همراه است. در سازه‌های پیچیده، تفسیر سیگنال‌های به دست آمده از آزمون امواج فراصوت هدایت شده به سادگی میسر نخواهد بود. بنابراین برای درک بهتر برهم کنش این امواج و سازه‌های پیچیده، شبیه‌سازی انتشار امواج بسیار مفید خواهد بود. همچنین سرعت امواج هدایت شده، به فرکانس و ضخامت قطعه وابسته است و این امواج دارای مدهای مختلفی هستند که باعث می‌شود رفتار آن‌ها پیچیده شود. از امواج فراصوت هدایت شده برای یافتن عیوب مختلف از قبیل تغییر ضخامت ناشی از خوردگی، ترک و فرورفتگی استفاده می‌شود. محققانی که جهت پیدا کردن عیوب مختلف در لوله‌ها با استفاده از امواج فراصوت هدایت شده مطالعاتی را انجام داده‌اند محدود می‌باشند [۴-۱]. آلین و همکاران [۵]، بازرسی لوله‌های پتروشیمی را جهت یافتن خوردگی و دیگر عیوب با استفاده از امواج فراصوت هدایت شده انجام دادند. این مطالعه بر روی لوله‌های بدون پوشش و همچنین لوله‌های با پوشش اپوکسی صورت گرفت و از دو مود $L(0,2)$ و $T(0,1)$ برای بررسی انواع عیوب استفاده شده است. دیما و همکاران [۶]، انعکاس امواج فراصوت هدایت شده را از شکاف‌های موجود در لوله بررسی کردند و از نتایج آن‌ها جهت تفسیر اندازه خوردگی در لوله‌ها استفاده می‌شود. وانگ و همکاران [۷]، عیوبی با ابعاد مختلف در لوله را با استفاده از امواج فراصوت هدایت شده به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها همچنین از شبیه‌سازی اجزاء محدود جهت مقایسه استفاده کردند. آن‌ها سیگنال‌های منعکس شده از دیواره‌ی جلویی و

عقبی عیب را به صورت مجزا بررسی کردند و نشان دادند که انعکاس از این دو دیواره مشخصه‌های سیگنالی متفاوتی را در بردارد که منجر به پیچیدگی سیگنال منعکس شده از عیب می‌گردد. ژنگ و همکاران [۸]، به منظور مطالعه ویژگی‌های انتشار و برهم کنش امواج فراصوت هدایت شده با عیوب استوانه‌های فلزی توخالی یک شبیه‌سازی مبتنی بر روش اجزاء محدود برای دو مود $L(0,2)$ و $T(0,1)$ به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام دادند. کینگ تیان و همکاران [۹]، انتشار امواج فراصوت هدایت شده در لوله‌های مدفون حاوی سیال را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در شرایط ایده‌آل ۲۰۰ متر از لوله در هر جهت با یک موقعیت سیگنال می‌تواند بازرسی کرد. معمولاً در لوله‌های روی زمین ۵۰ متر در هر جهت و در لوله‌های زیر خاک ۱۰ متر در هر جهت رایج می‌باشد، مگر در حالتی که لوله آستین‌دار باشد. وانگ و همکاران [۱۰]، مطالعه‌ای آزمایشگاهی در خصوص انعکاس امواج هدایت شده از فرورفتگی‌های ساده در لوله‌ها انجام دادند. ناحیه فرورفته به صورت مجموعه‌ای از سطح مقطع‌های برشی با پارامترهای نظیر طول محوری ناحیه فرورفته، کمترین و بیشترین قطر در ناحیه فرورفته تعریف می‌گردد. در این تحقیق مشاهده شد که میان نسبت فرورفتگی و ضریب بازگشت موج از فرورفتگی، رابطه‌ای نسبتاً خطی وجود دارد. مقامی و همکاران [۱۱]، شبیه‌سازی اجزاء محدود انتشار امواج فراصوت هدایت شده در لوله‌ها را انجام دادند. در این مطالعه، تولید امواج هدایت شده با استفاده از شرایط مختلف بارگذاری محیطی فرستنده‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. ژنگ و همکاران، با استفاده از اعمال تأخیر زمانی در المان‌های پیزوالکتریک محیطی توانستند مود مورد نظر خمشی را به صورت مجزا و با دامنه‌ی مطلوب در لوله تولید کنند. آن‌ها پس از بررسی تأثیر المان‌های تحریک بر مدهای تولید شده از ۸ المان در محیط لوله استفاده نمودند. هم‌چنین نمودار ساختار موج و پروفیل زاویه‌ای را در مدهای مختلف مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. تقی پور بیرگانی [۱۳]، انعکاس امواج فراصوت هدایت شده از سطح فرورفتگی ساده در لوله را با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی کرده و رابطه بین ضریب انعکاس این امواج از سطح

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \cdot c_L^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \quad (۳)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \cdot c_T^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (۴)$$

در روابط (۳) و (۴) c_L سرعت موج طولی و c_T سرعت موج عرضی می باشد. رابطه (۳) بیانگر انتشار موج طولی و رابطه (۴) بیانگر انتشار موج عرضی است. با حل این معادلات توابع پتانسیل اسکالر و برداری بدست می آید. با داشتن توابع پتانسیل از تجزیه هلمهولتز میدان جابجایی حاصل می شود، سپس از روابط کرنش - جابجایی برای کرنش ها کوچک، کرنش ها حاصل می شود. در انتها با استفاده از قانون هوک برای یک جسم جامد الاستیک خطی تنش ها در این اجسام حاصل می گردد.

همچنین شرایط مرزی بدون تنش در سطوح داخلی و خارجی لوله به صورت معادله (۵) است:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad r = a, r = b \quad (۵)$$

در رابطه (۵) a و b به ترتیب شعاع داخلی و خارجی لوله می باشد. با اعمال شرایط مرزی تنش در سطوح خارجی و داخلی لوله و روش ماتریس کلی، معادله مشخصه به صورت معادله (۶) حاصل می گردد:

$$(۶)$$

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = [0]$$

که جواب های غیر بدیهی معادله (۶) از معادله (۷) حاصل می شود:

$$|c_{ij}| = 0 \quad i, j = 1 \dots 6 \quad (۷)$$

عیب و میزان تغییر شکل را بدست آورد. در این تحقیق همچنین تاثیر پارامترهای منبع تولید موج بر روی میدان موج تولید شده با استفاده از روش بسط مودهای نرمال بررسی شده است. در این مقاله ابتدا معادلات حاکم بر انتشار امواج فراصوت هدایت شده در یک لوله با طول نامحدود بررسی می شود و سپس با اعمال شرایط مرزی بدون تنش معادله مشخصه انتشار امواج بدست می آید. با حل عددی معادله مشخصه توسط کد متلب نمودارهای تجزیه سرعت فاز و سرعت گروه برای لوله بدست می آید. با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود توسط نرم افزار آباکوس خوردگی محیطی در لوله مدل سازی شده و ارتباط بین ضریب بازتاب و عمق عیب خوردگی بدست آورده می شود.

۲- معادلات حاکم بر انتشار امواج در لوله

معادله حرکت حاکم بر انتشار امواج در یک جسم جامد الاستیک همسانگرد معادله ناویر می باشد که در رابطه (۱) نشان داده شده است:

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \vec{u} + \mu \nabla^2 \vec{u} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (۱)$$

در معادله (۱)، λ و μ ثابت های لامه، ρ چگالی و $\vec{u}$ بردار جابجایی می باشد. میدان جابجایی با استفاده از تجزیه هلمهولتز به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته می شود:

$$\vec{u} = \nabla \phi + \nabla \times \vec{H} \quad (۲)$$

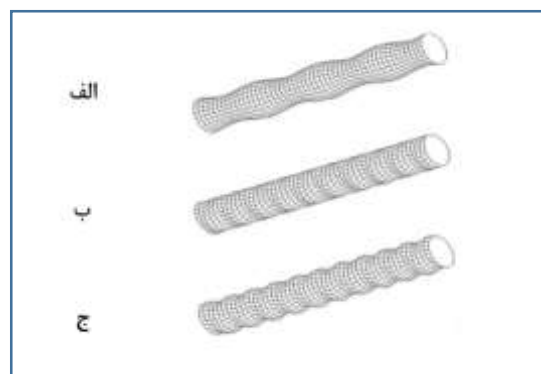
که در آن ϕ تابع پتانسیل اسکالر و $\vec{H}$ یک تابع پتانسیل برداری است که دیورژانس آن صفر می باشد ($\nabla \cdot \vec{H} = 0$). با جایگذاری $\vec{u}$ در رابطه (۱) و با دانستن این که $\nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = 0$ و $\nabla \cdot (\nabla \phi) = 0$ روابط زیر حاصل می شود:

با حل عددی معادله مشخصه برای یک لوله با مشخصات مکانیکی و هندسی جدول ۱، می توان نمودارهای تجزیه سرعت فاز و سرعت گروه را برای انواع مودها در فرکانس های مختلف بدست آورد. شکل ۲ نمودار سرعت فاز بر حسب فرکانس برای مودهای مختلف برای یک لوله کربن استیل با قطر ۸ اینچ و sch 30 و شکل ۳ نمودار سرعت گروه بر حسب فرکانس برای مودهای مختلف برای یک لوله کربن استیل با قطر ۸ اینچ و sch 30 را نشان می دهد.

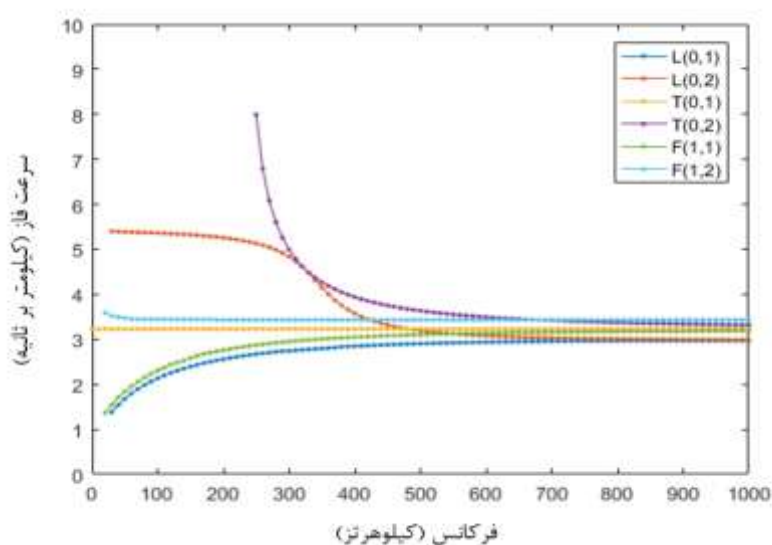
جدول ۱ - مشخصات هندسی و مکانیکی لوله ی کربن استیل با قطر ۸ اینچ و sch 30

۱۵۰۰	طول لوله (میلی متر)
۱۰۹/۵۵	شعاع خارجی لوله (میلی متر)
۱۰۳/۵۱	شعاع داخلی لوله (میلی متر)
۷۸۶۰	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۱۰	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۰/۳۸	ضریب پواسون
۵/۸۵	سرعت موج طولی (کیلومتر بر ثانیه)
۳/۲۳	سرعت موج برشی (کیلومتر بر ثانیه)

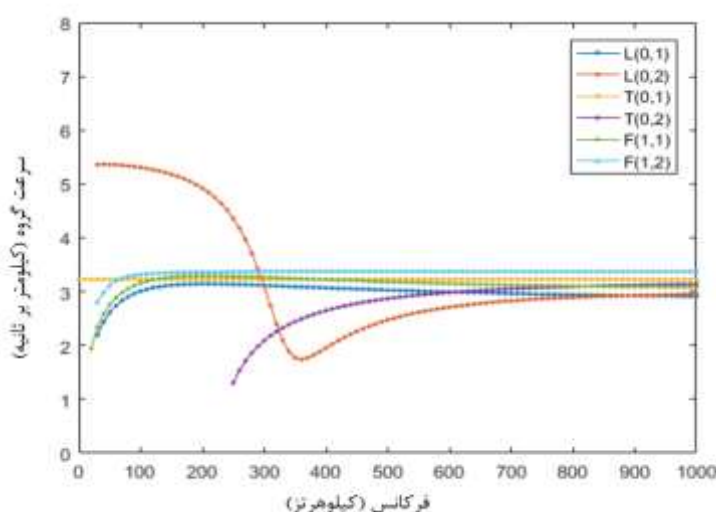
با حل دترمینان معادله (۷) به صورت عددی توسط کدی که با نرم افزار متلب نوشته می شود ریشه های معادله مشخصه که همان سرعت فاز بر حسب فرکانس می باشند حاصل می شود. با استفاده از سرعت فاز می توان سرعت گروه امواج بر حسب فرکانس را بدست آورد. در انتشار امواج فراصوت هدایت شده در لوله ها و استوانه ها سه نوع مود متفاوت به فرم مودهای طولی، مودهای پیچشی و مودهای خمشی وجود دارد. شکل ۱ نحوه ی انتشار مودهای مختلف در جهت طولی را نشان می دهد.



شکل ۱ - الف: مود طولی، ب: مود پیچشی، ج: مود خمشی



شکل ۲ - نمودار مودهای مختلف سرعت فاز - فرکانس برای لوله ی کربن استیل با قطر ۸ اینچ و sch 30



شکل ۳ - نمودار مودهای مختلف سرعت گروه - فرکانس برای لوله‌ی کربن استیل با قطر ۸ اینچ و sch 30

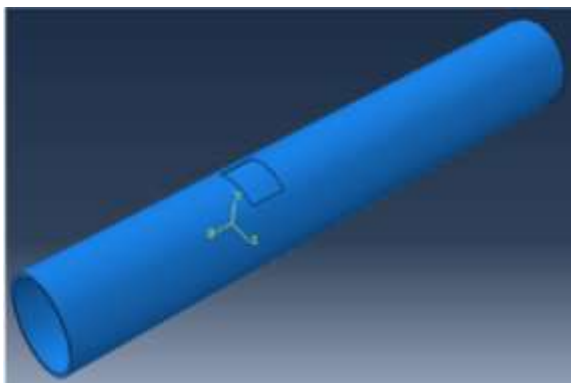
از روی نمودارهای شکل‌های (۲) و (۳) می‌توان مشاهده کرد که تا فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز مودهای متقارن محور $L(0,1)$ ، $L(0,2)$ ، $T(0,1)$ و مودهای نامتقارن $F(1,1)$ و $F(1,2)$ تولید می‌شود. این امر نشان دهنده‌ی این است که پس از انتشار موج در لوله و برخورد موج به عیب و انعکاس بخشی از موج با توجه به نوع عیب ممکن است مودهای دیگری نیز تولید شود. با توجه به ساختار هندسی عیب و ثابت بودن سرعت مود $L(0,2)$ در یک محدوده فرکانسی (۵۰ تا ۲۸۰ کیلوهرتز) از این مود جهت بررسی ابعاد عیب خوردگی محیطی در فرکانس ۱۷۰ کیلوهرتز در شبیه‌سازی استفاده خواهد شد. این مود در آشکارسازی عیب‌های محیطی از توانایی خاصی برخوردار است.

۳- مدل‌سازی اجزاء محدود انتشار امواج جهت تعیین ابعاد خوردگی

تحلیل اجزاء محدود از قوی‌ترین روش‌های محاسباتی به منظور مطالعه و ارزیابی مکانیک امواج در سازه‌ها است. لوله مورد نظر چهار سطح به عنوان سطوح مرزی دارد که دو سطح آن در مجاورت هوا شامل سطوح داخلی و خارجی و دو سطح دیگر شامل ابتدا و انتهای لوله می‌باشد که یک سطح

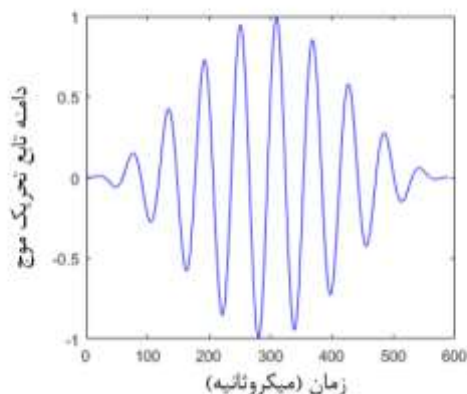
ثابت و سطح دیگر در معرض اثر مبدل‌های امواج فراصوت قرار دارد. در مدل‌سازی اجزاء محدود به سطوح داخلی و خارجی هیچ‌گونه تنش وارد نمی‌شود و اثر مبدل‌های امواج فراصوت به صورت فشار در نظر گرفته می‌شود. به منظور تولید مود طولی $L(0,2)$ می‌بایست سطح مورد نظر به طور یکسان و هم‌زمان تحریک شود. لازم است که تمامی سطح مقطع لوله را با تابع تحریک تون‌برست تحریک نمود. بدین منظور از پارامتر فشار یکنواخت به میزان یک مگاپاسکال در تمام سطح مقطع لوله استفاده می‌شود. پس از انتخاب تابع تحریک تون‌برست، مقادیر حاصله از این تابع در نرم‌افزار آباکوس به منظور ایجاد یک نوع حرکت موجی با دامنه‌ی متغیر در نظر گرفته می‌شود. به طور معمول تعداد سیکل‌ها به منظور استفاده از تابع تحریک ۵ تا ۱۵ سیکل است. تابع تحریک مورد نظر به منظور تولید مود $L(0,2)$ با ۱۰ سیکل و فرکانس ۱۷۰ کیلوهرتز می‌باشد. شکل ۴ مربوط به این تابع موج است که با استفاده از معادله‌ی (۸) و در نرم‌افزار رسم شده است. در این معادله f ، t و n_T به ترتیب نشان-دهنده‌ی فرکانس، زمان و تعداد سیکل‌ها در ثانیه می‌باشد.

$$y = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi f t}{n_T} \right) \right) \sin(2\pi f t) \quad (8)$$



شکل ۵ - مدل هندسی لوله و عیب خوردگی محیطی

$$y = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi f t}{n_T} \right) \right) \sin (2\pi f t)$$



شکل ۴ - تابع تون برست با ۱۰ سیکل و فرکانس ۱۷۰ کیلوهرتز

شود [۱۴]. بدین ترتیب می توان به مقدار حداکثر اندازه‌ی المان مورد نیاز دست پیدا کرد. سرعت گروه مود $L(0,2)$ در فرکانس ۱۷۰ کیلوهرتز برابر $5099.6/6$ متر بر ثانیه می باشد.

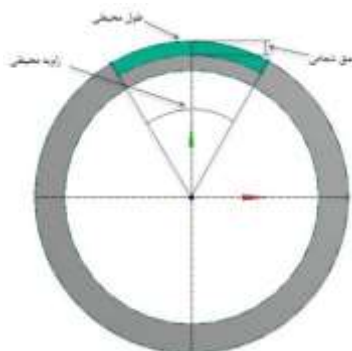
$$\lambda_{min} = \frac{(C_g)_{L(0,2)}}{f} = \frac{5099.6}{170000} = 0.03 \text{ m} \quad \Delta L_{max} = \frac{\lambda_{min}}{10} = 0.003 \text{ m}$$

در رابطه (۹) λ_{min} طول موج مینیمم، ΔL_{max} طول المان ماکزیمم می باشد. شکل ۷ یک شبکه بندی منظم، با قاعده و استاندارد و مش بندی مدل و ناحیه‌ی اطراف عیب را نشان می دهد.

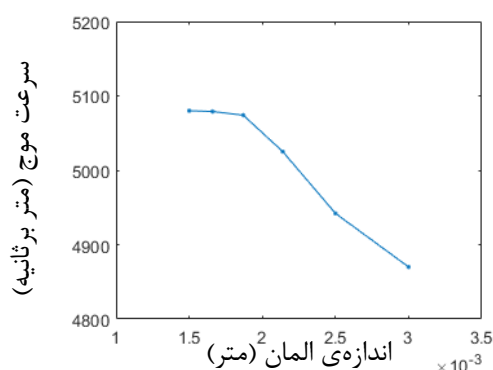
پس از بدست آوردن اندازه‌ی المان و شبکه بندی مدل هندسی نمودار مربوط به هم گرایی جهت تعیین دقیق اندازه المان های مناسب ترسیم می گردد. شکل ۸ نمودار هم گرایی سرعت موج بر حسب اندازه المان را نشان می دهد.

شکل ۵ مدل هندسی لوله و عیب خوردگی محیطی را نشان می دهد. به منظور شبیه سازی عیب خوردگی محیطی در سطح مقطع لوله، شکل و ابعاد خوردگی محیطی مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شده است.

در بحث شبیه سازی انتشار امواج فراصوت انتخاب نوع المان و تعداد مش تاثیر قابل محسوسی بر صحت نتایج حاصله خواهد گذاشت. در شبیه سازی انتشار امواج حداقل ۱۰ المان در هر طول موج نیاز است. به منظور رسیدن به پاسخ های دقیق سعی بر آن است که از المان های با اندازه ی کوچک استفاده شود. در نرم افزار آباکوس از المان خطی سه بعدی با شش وجه و هشت گره در هر گوشه ی المان جهت شبیه سازی استفاده می شود. به منظور تضمین همگرایی در شبیه سازی انتشار موج، ماکزیمم طول هر المان می بایست از یک دهم کوچکترین طول موج و براساس معادله ی (۹) حاصل



شکل ۶ - شکل و ابعاد عیب خوردگی محیطی در سطح مقطع لوله



شکل ۸ - نمودار هم‌گرایی مربوط به سرعت موج در مدل اجزاء محدود



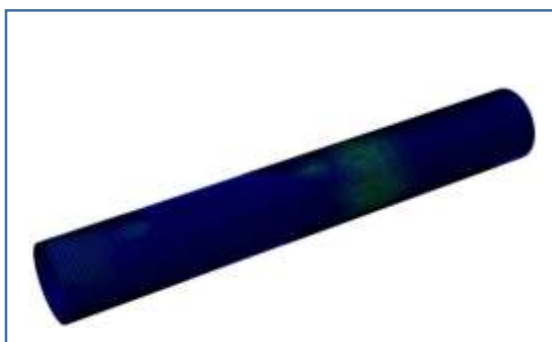
شکل ۷ - مش‌بندی مدل و ناحیه‌ی اطراف عیب

دامنه‌ی جابجایی نسبت به زمان برای لوله بدون عیب تا لوله‌ی دارای عیب ۹۰ درصد تغییر ضخامت را نشان می‌دهد. در نهایت نموداری به منظور توصیف ضرایب بازتاب نسبت به عمق‌های مختلف عیب در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۲ به ترتیب نمودار ضریب بازتاب نسبت به عمق عیب برای مود طولی و مود خمشی در لوله را نشان می‌دهد. در این بخش همچنین مشاهده شد که با کاهش یا افزایش پهنای محیطی نمودار جابجایی از بازتاب موج نیز اختلاف چندانی با خوردگی محیطی نداشت و نتایج یکسانی از سیگنال‌های دریافتی حاصل شده است.

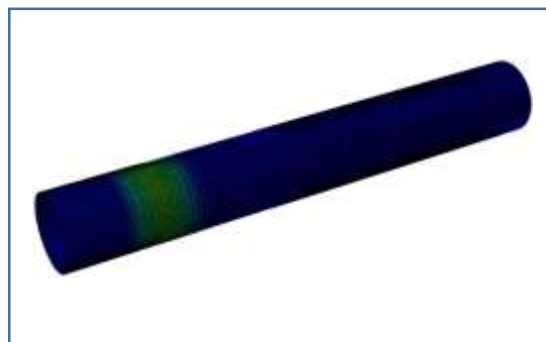
۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود انتشار موج در لوله مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. پس از طراحی هر مدل و حل مسئله، نتایج جابجایی موج در لوله حاصل شده است. شکل ۹ تصویری از ارسال موج در لوله قبل از برخورد به عیب و شکل ۱۰ بازگشت بخشی از موج پس از برخورد به عیب را نشان می‌دهد.

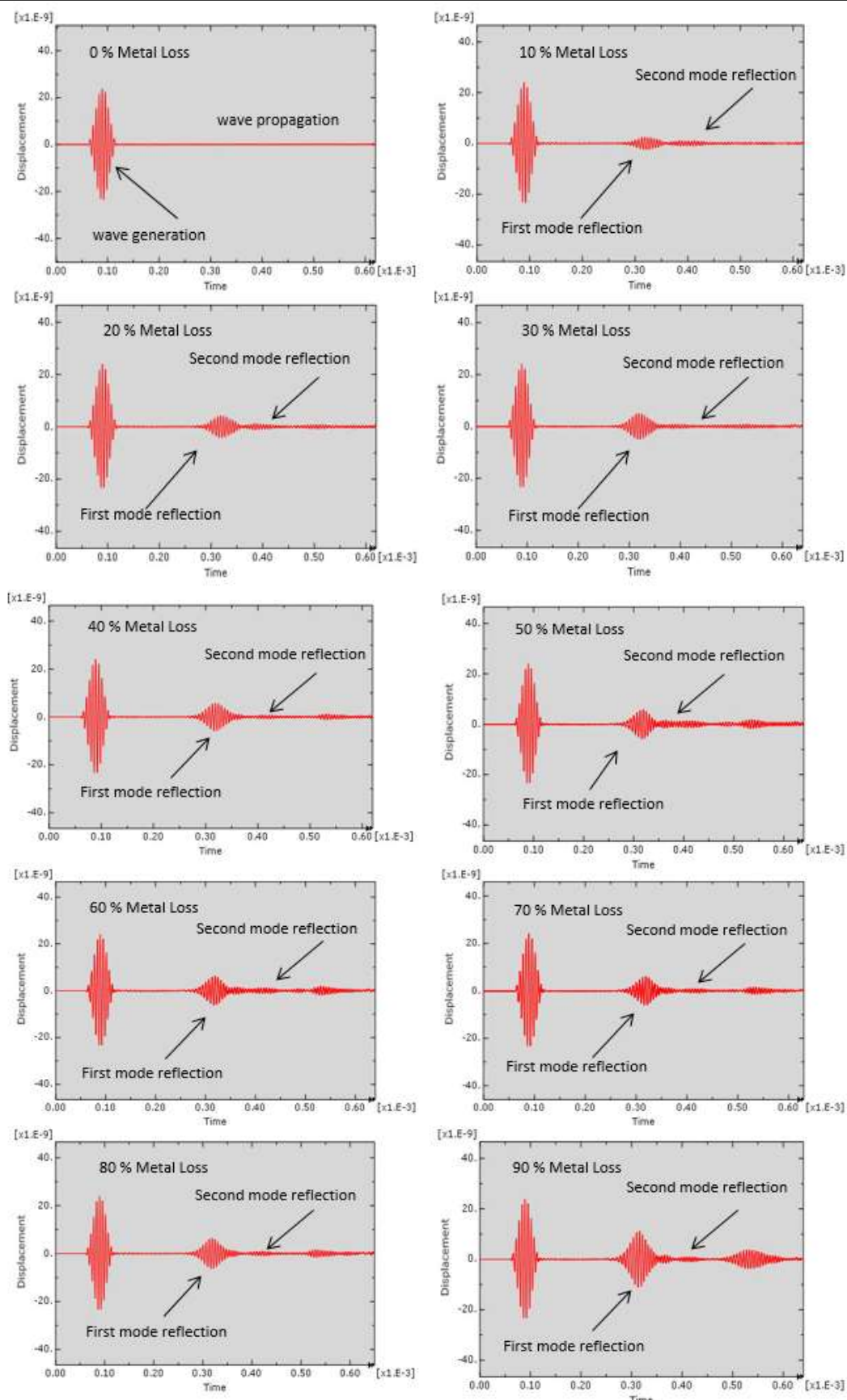
به دنبال بررسی تغییر ضخامت‌های مختلف برای عیب در لوله، نمودار دامنه - زمان برای هر تغییر ضخامت از عیب در نمودارهای شکل ۱۱ حاصل می‌شود. شکل ۱۱ نمودار میزان



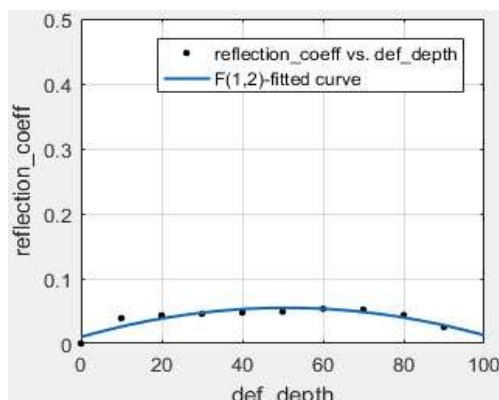
شکل ۱۰ - بازتاب موج از عیب



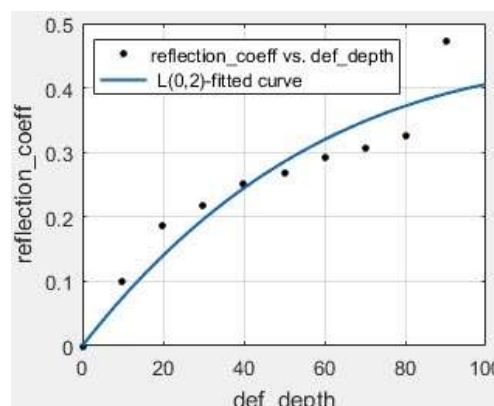
شکل ۹ - ارسال موج در لوله



شکل ۱۱ - نمودار دامنه - زمان لوله با عیب از صفر تا ۹۰٪ تغییر ضخامت



ب



الف

شکل ۱۲ - نمودار ضریب بازتاب نسبت به عمق عیب (الف) مود طولی، (ب) مود خمشی

نتیجه گیری

با مدل سازی انتشار موج در لوله، برای لوله ی بدون عیب و با عیب با ابعاد مختلف، ضرایب بازتاب و دامنه ی جابجایی مختلفی حاصل شده است. نشان داده شده است که با افزایش عمق عیب، دامنه ی جابجایی موج بازتابیده شده نیز افزایش می یابد، در این مقاله نیز با افزایش عمق شعاعی عیب، دامنه ی موج بازتابیده شده افزایش پیدا یافته است. این در حالیست که با افزایش عمق عیب، مود خمشی از صفر تا ۵۰ درصد عمق عیب، افزایش پیدا می کند اما پس از افزایش ۵۰ درصدی عمق عیب مود خمشی بازتابیده شده کاهش محسوسی پیدا می کرد.

در مطالعه ی انجام گرفته مشاهده شد که بازتاب موج در بیش از ۸۰ درصد عمق شعاعی عیب بیش از پیش نمایان تر است این در حالیست که در عمق های کم تر، بازتاب موج ناچیز می باشد. با بررسی و مطالعه ی سایر مودهای بازگشتی از عیب خوردگی محیطی، مشاهده شد که به سبب نامتقارن بودن عیب و با توجه به نمودار سرعت گروه، اولین مود نامتقارن تولیدی پس از مود $L(0,2)$ ، با توجه به سرعت گروه، مود نامتقارن $F(1,2)$ می باشد. در این مقاله همچنین تاثیر پهنای خوردگی محیطی بر روی ضریب انعکاس موج طولی نیز بررسی شده و مشاهده شده که ضریب انعکاس امواج فقط به عمق عیب بستگی داشته و با تغییر پهنای خوردگی محیطی تغییر چندانی ندارد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از یک طرح پژوهشی برون دانشگاهی و صنعتی است که مجری آن دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز می باشد. کارفرما و حامی مالی این طرح شرکت گاز استان خوزستان می باشد. در این بخش جا دارد از تمام حامیان مادی و معنوی این طرح کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

مراجع

- [1] D.N. Alleyne, P. Cawley, The effect of discontinuities on the long-range propagation of lamb waves in pipes, Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 210, No. 11, 1996, Pp. 217-226.
- [2] D.N. Alleyne, M.J.S. Lowe, P. Cawley, The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes, Journal of Applied Mechanics, Vol. 65, No. 3, 1998, Pp. 635-641.
- [3] M.J.S. Lowe, D.N. Alleyne, P. Cowley, The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch

- in a pipe, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 65, No. 3, 1998, Pp. 649-656.
- [4] H. Jae, Shin, J.L. Rose, Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders, *Ultrasonics*, Vol. 37, No. 5, 1999, Pp. 355-363.
- [5] D.N. Alleyne, B. Pavlakovic, M.J.S. Lowe, P. Cawley, Rapid, long range inspection of chemical plant pipework using guided waves, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 20, 2001, Pp. 180-187.
- [6] A. Demma, P. Cawley, M.J.S. Lowe, et al, The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements, *NDT & E International*, Vol. 37, No. 3, 2004, Pp. 167-180.
- [7] X. Wang, P.W. Tse, C.K. Mechefske, M. Hua, Experimental investigation of reflection in guided wave-based inspection for the characterization of pipeline defects, *NDT&E International*, Vol. 43, 2010, Pp. 365-374.
- [8] M.F. Zheng, et al., Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach, *Physics Procedia*, Vol. 22, 2011, Pp. 112-118.
- [9] D. Qing-Tian, Y. Zhi-Chun, Wave propagation analysis in buried pipe conveying fluid, *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, 2013, Pp. 6225-6233.
- [10] Y.S. Wang, K. Liu, Z. Wu, S. Ma, The reflection of guided waves from simple dents in pipes, *Ultrasonics*, Vol. 57, 2015, Pp. 190-197.
- [11] S. Maghami, F. Honarvar, H. Bouzary, Simulation of ultrasonic guided waves in pipes by finite element method, In *Proceedings of the 3rd Iranian International NDT Conference*, Tehran, Iran, 2016.
- [12] X. Zhang, Z. Tang, F. Lu and X. Pan, Excitation of dominant flexural guided waves in elastic hollow cylinders using time delay circular array transducers, *Wave Motion*, Vol. 62, 2016, Pp. 41-54.
- [13] P. Taghipour Birgani, Ultrasonic guided waves reflection from simple dent in pipe for defect rate estimation and parameters determination of axisymmetric wave generation source, *Journal of Computational Applied Mechanics*, Vol. 51, No. 1, 2020, Pp. 66-71.
- [14] J. Mu, Guided wave propagation and focusing in viscoelastic multilayered hollow cylinder, A Dissertation in Engineering Science and Mechanics, Department of Engineering Science and Mechanics, 2008.

