



بررسی تحلیلی و عددی انعکاس امواج فراصوت هدایت شده از سطح عیب خوردگی در لوله

پژمان تقی‌پور بیرگانی*

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

* نویسنده مسول: p_t_birgani@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵ 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.

واژه‌های کلیدی: امواج فراصوت هدایت شده، نمودارهای تجزیه، ضریب بازتاب، عیب خوردگی محیطی.

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. در سازه‌های پیچیده، تفسیر سیگنال‌های به دست آمده از آزمون امواج فراصوت هدایت شده به سادگی میسر نخواهد بود. بنابراین برای درک بهتر برهم‌کنش این امواج و سازه‌های پیچیده، شبیه‌سازی انتشار امواج بسیار مفید خواهد بود. همچنین سرعت امواج هدایت‌شده، به فرکانس و ضخامت قطعه وابسته است و این امواج دارای مدهای مختلفی هستند که باعث می‌شود رفتار آنها پیچیده شود. محققانی که جهت پیدا کردن عیوب مختلف در لوله‌ها با استفاده از امواج فراصوت هدایت شده مطالعاتی را انجام داده‌اند معدود می‌باشند [۱-۴]. آیین و همکاران [۵]، بازرسی لوله‌های پتروشیمی را جهت یافتن خوردگی و دیگر عیوب با استفاده از امواج فراصوت هدایت‌شده 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 هدایت‌شده با عیوب استوانه‌های فلزی توخالی یک شبیه‌سازی مبتنی بر روش اجزاء محدود برای دو مود $T(0,1)$ و $L(0,2)$ به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام دادند. کینگ تیان و همکاران [۹]، انتشار امواج فراصوت هدایت‌شده 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]، مطالعه ای آزمایشگاهی در خصوص انعکاس امواج هدایت‌شده 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 هدایت‌شده در لوله‌ها را انجام دادند در این مطالعه، تولید امواج هدایت‌شده 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 مودهای تولید شده از ۸ المان در محیط لوله استفاده نمودند. همچنین نمودار ساختار موج و پروفیل زاویه‌ای را در مودهای مختلف مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. تقی پور بیرگانی [۱۳]، انعکاس امواج فراصوت هدایت‌شده از سطح فرورفتگی ساده در لوله را با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی کرده و رابطه بین ضریب انعکاس این امواج از سطح عیب و میزان تغییرشکل را بدست آورد. در این تحقیق همچنین تأثیر 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 هدایت‌شده در یک لوله با طول نامحدود بررسی می‌شود و سپس با اعمال شرایط مرزی بدون تنش معادله مشخصه انتشار امواج بدست می‌آید. با حل عددی معادله مشخصه توسط کد متلب نمودارهای تجزیه سرعت فاز و سرعت گروه برای لوله بدست می‌آید. با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود توسط نرم افزار آباکوس خوردگی محیطی در لوله مدل سازی شده و ارتباط بین ضریب بازتاب و عمق عیب خوردگی بدست آورده می‌شود.

معادلات حاکم بر انتشار امواج در لوله

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

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

میدان جابجایی با استفاده از تجزیه هلمهولتز به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$\vec{u} = \nabla\phi + \nabla\times\vec{H} \quad (2)$$

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

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{c_L^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}, \quad c_L^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \quad (3)$$



$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}, \quad c_T^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

رابطه‌ی (۳) بیان‌گر انتشار موج طولی و رابطه‌ی (۴) بیان‌گر انتشار موج عرضی است. با حل این معادلات توابع پتانسیل اسکالر و برداری بدست می‌آید. با داشتن توابع پتانسیل از تجزیه هلمهولتز میدان جابجایی حاصل می‌شود، سپس از روابط کرنش-جابجایی برای کرنش‌ها کوچک، کرنش‌ها حاصل می‌شود. در انتها با استفاده از قانون هوک برای یک جسم جامد الاستیک خطی تنش‌ها در این اجسام حاصل می‌گردد.

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

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad r = a, r = b \quad (5)$$

با اعمال شرایط مرزی تنش در سطوح خارجی و داخلی لوله و روش ماتریس کلی، معادله مشخصه به صورت معادله (۶) حاصل می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = [0] \quad (6)$$

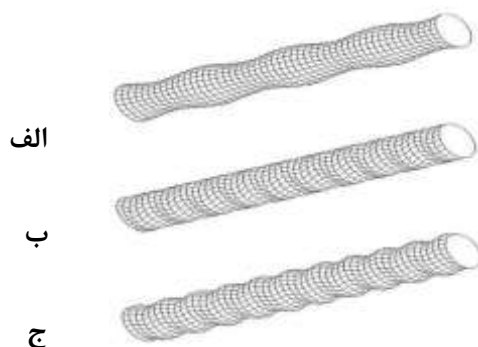
که جواب‌های غیر بديهی معادله (۶) از معادله (۷) حاصل می‌شود:

$$|c_{ij}| = 0 \quad i, j = 1 \dots 6 \quad (7)$$

با حل دترمینان معادله (۷) توسط کدی که با نرم افزار متلب نوشته می‌شود ریشه‌های معادله مشخصه که همان سرعت فاز بر حسب فرکانس می‌باشند حاصل می‌شود. با استفاده از سرعت فاز می‌توان سرعت گروه امواج بر حسب فرکانس را بدست آورد.

در انتشار امواج فراصوت هدایت شده در لوله‌ها و استوانه‌ها سه نوع مود متفاوت به فرم مودهای طولی، مودهای پیچشی و مودهای خمشی وجود دارد. شکل (۱) نحوه‌ی انتشار مودهای مختلف در جهت طولی را نشان می‌دهد.

با حل عددی معادله مشخصه برای یک لوله با مشخصات مکانیکی و هندسی جدول (۱)، می‌توان نمودارهای تجزیه سرعت فاز و سرعت گروه را برای انواع مودها در فرکانس‌های 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 می‌دهد.

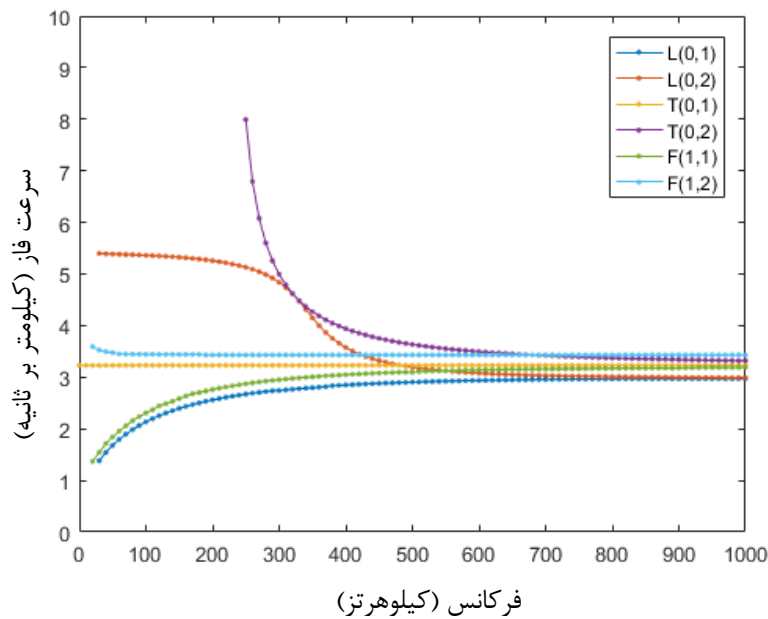


شکل(۱): الف: مود طولی - ب: مود پیچشی - ج: مود خمشی.

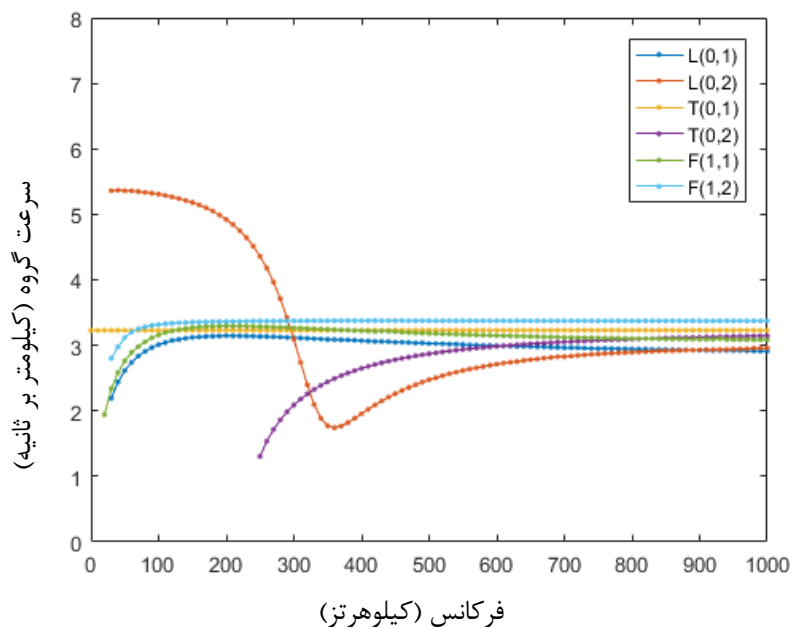


جدول (۱): مشخصات هندسی و مکانیکی لوله‌ی کربن استیل با قطر ۸ اینچ و sch 30.

۱۵۰۰	طول لوله (میلی‌متر)
۱۰۹/۵۵	شعاع خارجی لوله (میلی‌متر)
۱۰۲/۵۱	شعاع داخلی لوله (میلی‌متر)
۷۸۶۰	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲۱۰	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۰/۲۸	ضریب پواسون
۵/۸۵	سرعت موج طولی (کیلومتر بر ثانیه)
۳/۲۳	سرعت موج برشی (کیلومتر بر ثانیه)



شکل (۲): نمودار مدهای مختلف سرعت فاز-فرکانس برای لوله‌ی کربن استیل با قطر ۸ اینچ و sch 30.



شکل (۳): نمودار مدهای مختلف سرعت گروه-فرکانس برای لوله‌ی کربن استیل با قطر ۸ اینچ و sch 30.

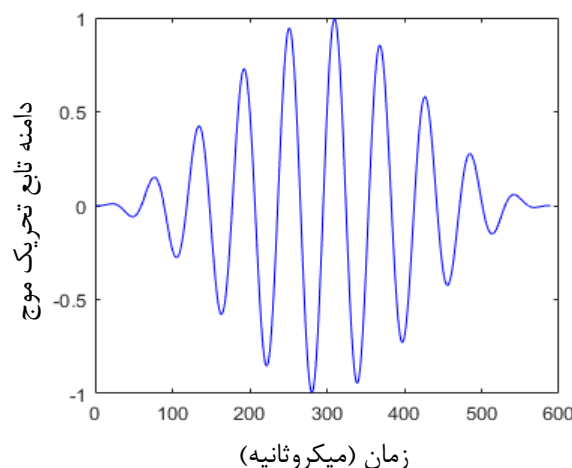


از روی نمودارهای شکل‌های (۲) و (۳) می‌توان مشاهده کرد که تا فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز مودهای متقارن محور $L(0,1)$ ، $L(0,2)$ ، $T(0,1)$ و مودهای نامتقارن $F(1,1)$ و $F(1,2)$ تولید می‌شود. این امر نشان دهنده‌ی این است که پس از انتشار موج در لوله و برخورد موج به عیب و انعکاس بخشی از موج با توجه به نوع عیب ممکن 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.

مدل سازی اجزاء محدود انتشار امواج جهت تعیین ابعاد خوردگی

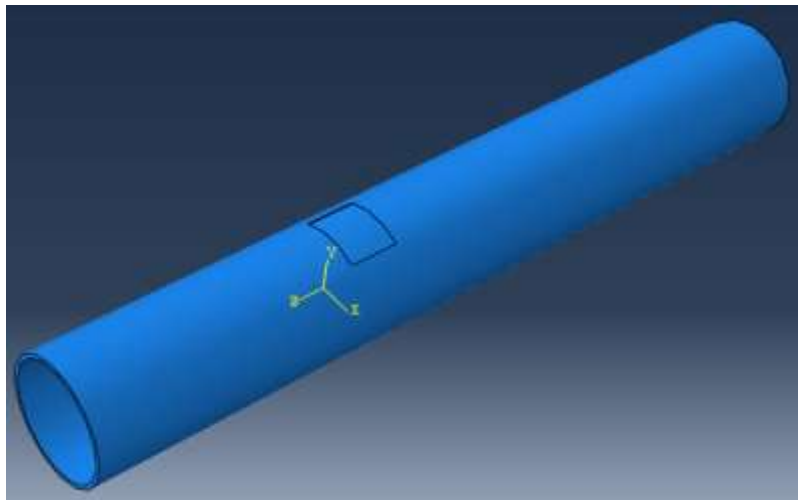
تحلیل اجزاء محدود از قوی‌ترین روش‌های محاسباتی به منظور مطالعه و ارزیابی مکانیک امواج در سازه‌ها است. لوله مورد نظر چهار سطح به عنوان سطوح مرزی دارد که دو سطح آن در مجاورت هوا شامل سطوح داخلی و خارجی و دو سطح دیگر شامل ابتدا و انتهای لوله می‌باشد که یک سطح ثابت و سطح دیگر در معرض اثر مبدل‌های امواج فراصوت قرار دارد. در مدل-سازی اجزاء محدود به سطوح داخلی و خارجی هیچ‌گونه تنش‌ی 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 متلب رسم شده است. در این معادله f ، t و n_T به ترتیب نشان‌دهنده‌ی فرکانس، زمان و تعداد سیکل‌ها در ثانیه می‌باشد.

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

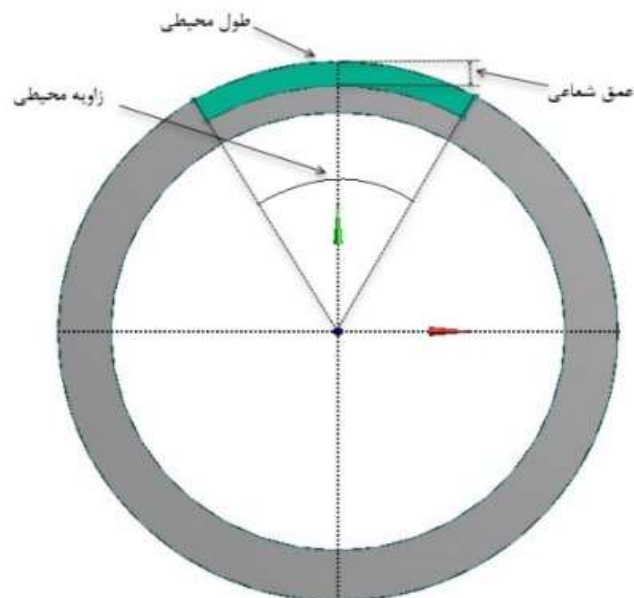


شکل (۴): تابع تون‌برست با ۱۰ سیکل و فرکانس ۱۷۰ کیلوهرتز.

شکل (۵) مدل هندسی لوله و عیب خوردگی محیطی را نشان می‌دهد. به منظور شبیه‌سازی عیب خوردگی محیطی در سطح مقطع لوله، شکل و ابعاد خوردگی محیطی مطابق شکل (۶) در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): مدل هندسی لوله و عیب خوردگی محیطی.

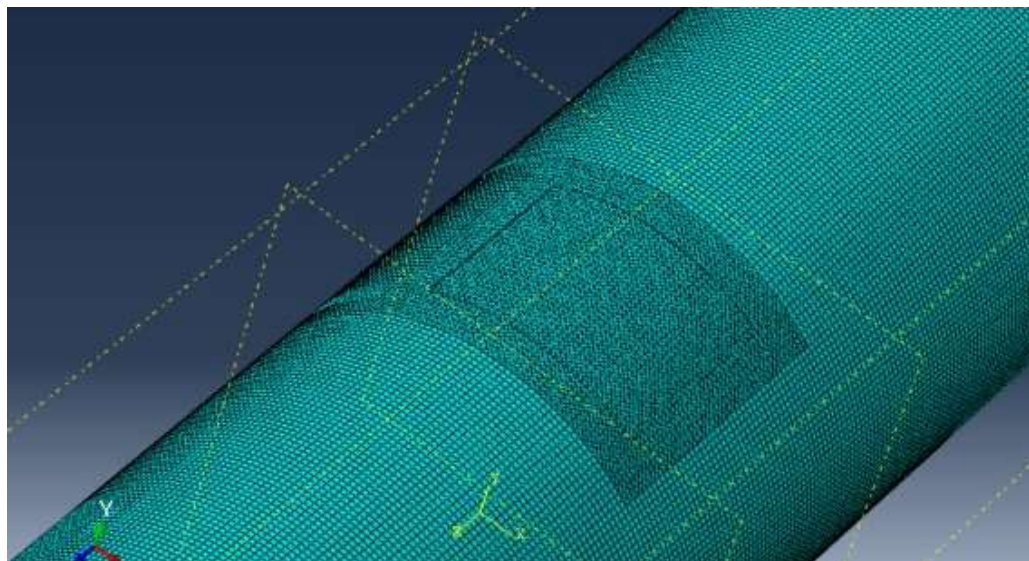


شکل (۶): شکل و ابعاد عیب خوردگی محیطی در سطح مقطع لوله.

در بحث شبیه‌سازی انتشار امواج فراصوت انتخاب نوع المان و تعداد مش تاثیر محسوسی بر صحت نتایج خواهد گذاشت. در شبیه‌سازی انتشار امواج حداقل ۱۰ المان در هر طول موج نیاز است. به منظور رسیدن به پاسخ‌های دقیق سعی بر آن است که از المان‌های با اندازه‌ی کوچک استفاده شود. در نرم‌افزار آباکوس از المان خطی سه بعدی با شش وجه و هشت گره در هر گوشه المان جهت شبیه‌سازی استفاده می‌شود. به منظور تضمین همگرایی در شبیه‌سازی انتشار موج، ماکزیمم طول هر المان باید از یک دهم کوچکترین طول موج و براساس معادله‌ی (۹) حاصل شود [۱۴]. بدین ترتیب می‌توان به مقدار حداکثر اندازه‌ی المان مورد نیاز دست پیدا کرد. سرعت گروه مود $L(0,2)$ در فرکانس ۱۷۰ کیلوهرتز برابر 5099.6 متر بر ثانیه می‌باشد.

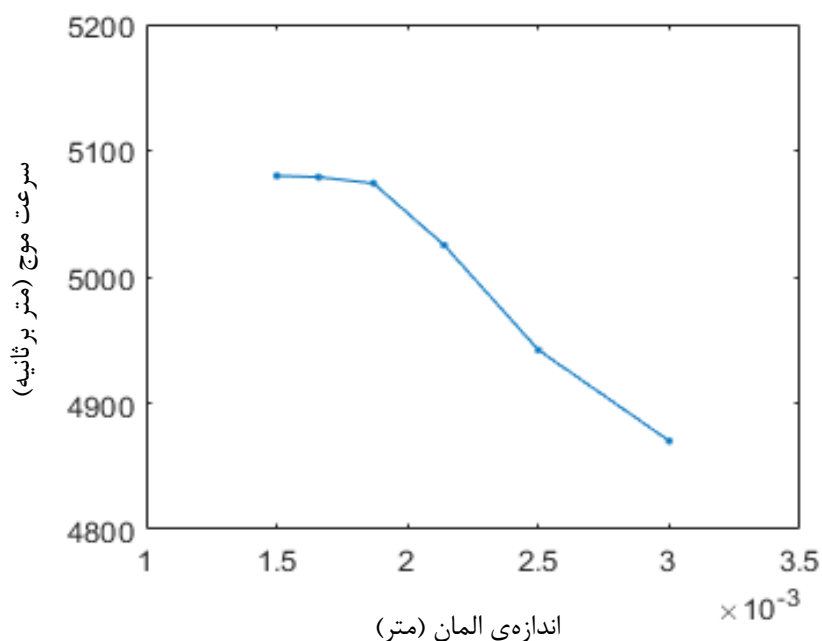
$$\lambda_{min} = \frac{(C_g)_{L(0,2)}}{f} = \frac{5099.6}{170000} = 0.03 \text{ m} , \quad \Delta L_{max} = \frac{\lambda_{min}}{10} = 0.003 \text{ m} \quad (9)$$

شکل (۷) یک شبکه بندی منظم، با قاعده و استاندارد و مش‌بندی مدل و ناحیه‌ی اطراف عیب را نشان می‌دهد.



شکل (۷): مش بندی مدل و ناحیه‌ی اطراف عیب.

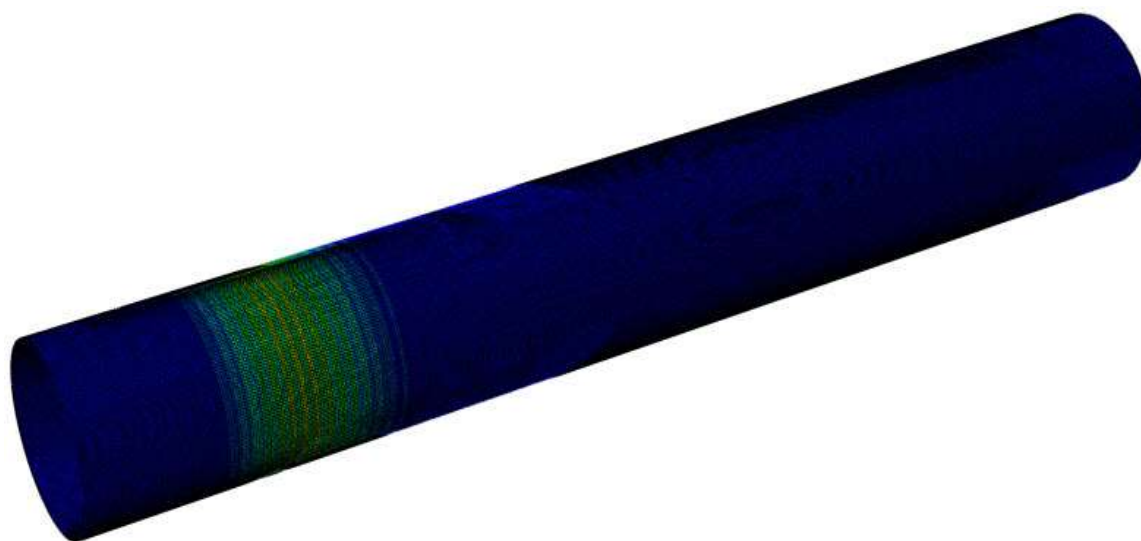
پس از بدست آوردن اندازه‌ی المان و شبکه بندی مدل هندسی نمودار مربوط به هم‌گرایی جهت تعیین دقیق اندازه المان های مناسب ترسیم می گردد. شکل (۸) نمودار هم‌گرایی سرعت موج بر حسب اندازه المان را نشان می‌دهد.



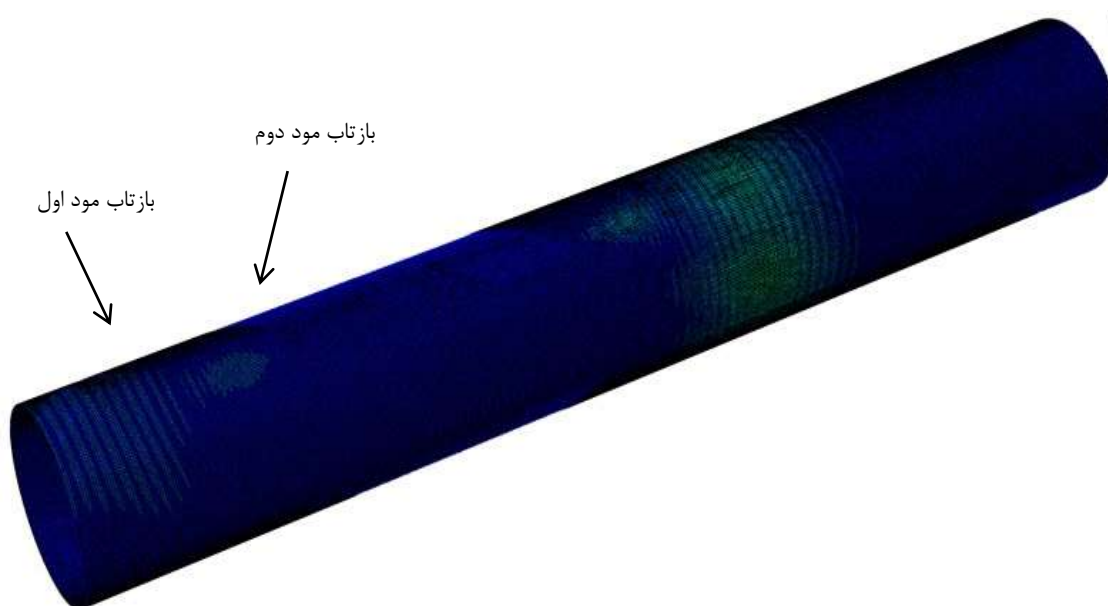
شکل (۸): نمودار هم‌گرایی مربوط به سرعت موج در مدل اجزاء محدود.

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.

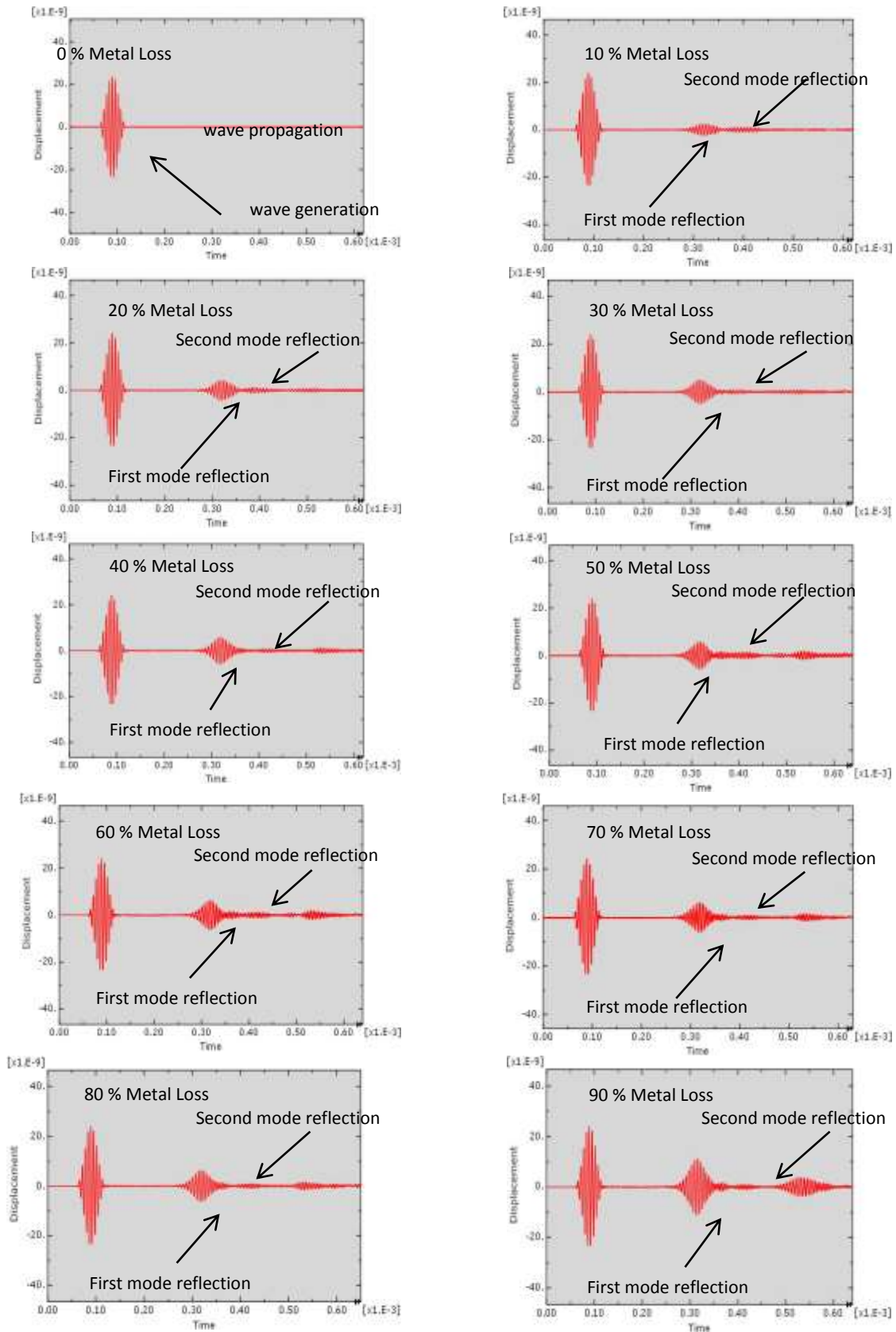


شکل (۹): ارسال موج در لوله.

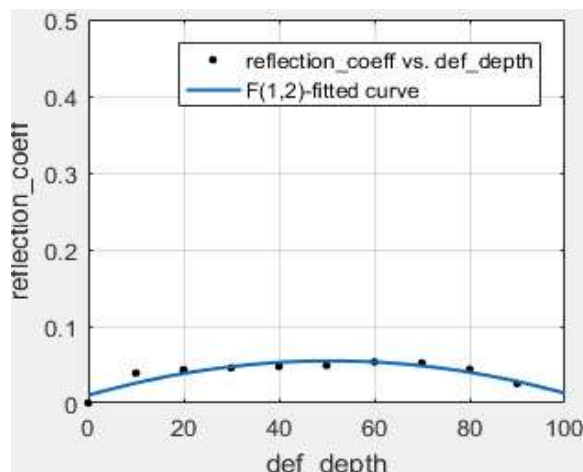


شکل (۱۰): بازتاب موج از عیب.

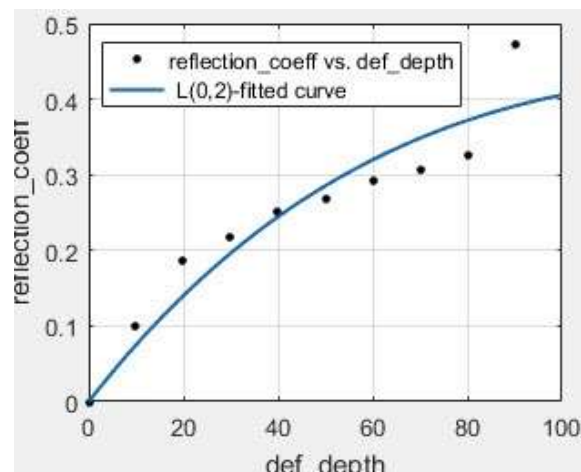
به دنبال بررسی تغییر ضخامت‌های مختلف برای عیب در لوله، نمودار دامنه-زمان برای هر تغییر ضخامت از عیب در نمودارهای شکل (۱۱) حاصل می‌شود. شکل (۱۱) نمودار میزان دامنه‌ی جابجایی نسبت به زمان برای لوله بدون عیب تا لوله دارای عیب ۹۰ درصد تغییر ضخامت را نشان می‌دهد. در نهایت نموداری به منظور توصیف ضرایب بازتاب 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 پهناي محیطی نمودار جابجایی از بازتاب موج نیز اختلاف چندانی با خوردگی محیطی نداشت و نتایج یکسانی از سیگنال‌های دریافتی حاصل شده است.



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.

نتیجه‌گیری

با مدل‌سازی انتشار موج در لوله، برای لوله‌ی بدون عیب و با عیب با ابعاد مختلف، ضرایب بازتاب و دامنه جابجایی مختلفی حاصل شده است. نشان داده شده است که با افزایش عمق عیب، دامنه‌ی جابجایی موج بازتابیده شده نیز افزایش می‌یابد، در این مقاله نیز با افزایش عمق شعاعی عیب، دامنه موج بازتابیده شده افزایش یافته است. این در حالیست که با افزایش عمق عیب، مود خمشی از صفر تا ۵۰ درصد عمق عیب، افزایش پیدا می‌کند اما پس از افزایش ۵۰ درصدی عمق عیب مود خمشی بازتابیده شده کاهش محسوسی پیدا می‌کند.

در مطالعه انجام گرفته مشاهده شد که بازتاب موج در بیش از ۸۰ درصد عمق شعاعی عیب بیش از پیش نمایان‌تر است این در حالیست که در عمق‌های کم‌تر، بازتاب موج ناچیز می‌باشد. با بررسی و مطالعه‌ی 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 $F(1,2)$ می‌باشد. 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 می‌باشد. کارفرما و حامی مالی این طرح شرکت گاز استان خوزستان می‌باشد. در این بخش جا دارد از تمام حامیان مادی و معنوی این طرح کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

مراجع

- [1] Alleyne, D.N., Cawley, P., (1996). The effect of discontinuities on the long-range propagation of lamb waves in pipes, *Journal of Process Mechanical Engineering*, 210(11), pp. 217-226.
- [2] Alleyne, D.N., Lowe, M.J.S., Cawley, P., (1998). The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes, *Journal of Applied Mechanics*, 65(3), pp. 635-641.
- [3] Lowe, M.J.S., Alleyne, D.N., Cowley, P., (1998). The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in a pipe, *Journal of Applied Mechanics*, 65(3), pp. 649-656.



- [4] Jae, H., Shin, Rose, J.L., (1999). Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders, *Ultrasonics*, 37(5), pp. 355-363.
- [5] Alleyne, D.N., Pavlakovic, B., Lowe, M.J.S., Cawley, P., (2001). Rapid, long range inspection of chemical plant pipework using guided waves, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 20, pp. 180-187.
- [6] Demma, A., Cawley, P., Lowe, M.J.S., (2004). The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements, *NDT & E International*, 37(3), pp. 167-180.
- [7] Wang, X., Tse, P.W., Mechefske, C.K., Hua, M., (2010). Experimental investigation of reflection in guided wave-based inspection for the characterization of pipeline defects, *NDT&E International*, 43, pp. 365-374.
- [8] Zheng, M. F., Lu, C., Chen, G. Z., Men, P., (2011). Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach, *Physics Procedia*, 22, Pp. 112-118.
- [9] Qing-Tian, D., Zhi-Chun, Y., (2013). Wave propagation analysis in buried pipe conveying fluid, *Applied Mathematical Modeling*, 37, pp. 6225-6233.
- [10] Wang, Y.S., Liu, K., Wu, Z., Ma, S., (2015). The reflection of guided waves from simple dents in pipes, *Ultrasonics*, 57, pp. 190-197.
- [11] Maghami, S., Honarvar, F., Bouzary, H., (2016). Simulation of ultrasonic guided waves in pipes by finite element method, In *Proceedings of the 3rd Iranian International NDT Conference*, Tehran, Iran.
- [12] Zhang, X., Tang, Z., Lu F. and Pan, X., (2016) Excitation of dominant flexural guided waves in elastic hollow cylinders using time delay circular array transducers, *Wave Motion*, 62, pp. 41-54.
- [13] Taghipour Birgani, P., (2020). 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*, 51(1), pp. 66-71.
- [14] Mu, J., (2008). Guided wave propagation and focusing in viscoelastic multilayered hollow cylinder, A Dissertation in Engineering Science and Mechanics, Department of Engineering Science and Mechanics.