

## Detection of Dimensions of Axisymmetric Surface Defects Located on the Pipe Using the First Order Symmetric Torsional Guided Waves

Armin Mokhtarizadeh<sup>1</sup>, Amin Yaghootian<sup>2\*</sup>, Ali Valipour<sup>2</sup>

1- MSc student, Mechanical Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz.

2- Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz.

\*a.yaghootian@scu.ac.ir

### Abstract

Nowadays, ultrasonic guided waves are widely used in non-destructive inspection of pipelines due to their high accuracy and speed. One of the advantages of using the symmetric modes of guided waves is simplicity in propagation and easier interpretation of the results. This has led to their significant use in the inspection of pipelines. Depending on the type of damage, defects can appear on the surface of pipe in different forms such as cracks, cavities, porosity, etc. In this paper, by using the propagation of the first-order torsional symmetric mode, symmetric defects in the different dimensions and sizes are investigated. The various factors such as the excitation frequency, the thickness of pipe and position of the defects are investigated to determine the effect of each on the reflection. Also, in this study, the reflection coefficients for the defects with different sizes have been calculated and their related diagrams have been drawn to use them for estimating the geometric dimensions of symmetrical defects. Finally, with the study of reflection coefficients, it is observed that the excitation frequency, the thickness of pipe and position of the defects can be considered as factors that affecting the reflected wave reflection.

**Keywords:** Wave Propagation, Nondestructive Testing (NDT), Reflection Coefficient, Guided Waves, Symmetric Defects.

## تشخیص ابعاد هندسی عیوب متقارن سطحی لوله با بهره گرفتن از انتشار مد متقارن مرتبه اول پیچشی امواج هدایت شده

آرمین مختاری زاده<sup>۱</sup>، امین یاقوتیان<sup>۲</sup>،\* علی ولی پور<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*a.yaghootian@scu.ac.ir

### چکیده

امروزه از امواج هدایت شده فراصوتی به دلیل دقت و سرعت بالا، در بازرسی غیرمخرب خطوط لوله استفاده‌ی زیادی می‌گردد. سادگی در انتشار و تفسیر راحت‌تر نتایج از جمله مزایای مدهای متقارن امواج هدایت شده می‌باشد که سبب استفاده‌ی چشم-گیر آن‌ها در بازرسی خطوط لوله شده است. با توجه به نوع آسیب، عیوب می‌توانند به شکل‌های مختلفی چون شکاف، حفره، تخلخل و غیره بر سطوح لوله پدیدار گردند. در این مقاله با بهره گرفتن از انتشار مد متقارن مرتبه اول پیچشی، ابتدا عیوب متقارن در ابعاد و اندازه‌های مختلف بررسی می‌شود. سپس عوامل مختلفی چون فرکانس تحریک، ضخامت لوله و موقعیت عیوب بررسی شده تا تأثیر هر یک بر بازتاب مد مذکور مشخص گردد. در این بررسی، ضرایب بازتاب برای عیوب با اندازه‌های مختلف محاسبه و نمودارهای مربوط به آن‌ها ترسیم شده است تا از آن‌ها برای تخمین ابعاد هندسی عیوب متقارن بهره گرفته شود. در نهایت، با بررسی‌های مربوط به ضرایب بازتاب، مشاهده می‌گردد که فرکانس تحریک، ضخامت لوله و موقعیت عیوب از جمله عوامل تأثیرگذار بر بازتاب موج هدایت شده می‌باشند.

**واژگان کلیدی:** انتشار موج، آزمون‌های غیرمخرب، ضریب بازتاب، امواج هدایت شده، عیوب متقارن.

### ۱- مقدمه

غیرمخرب<sup>۱</sup> استفاده می‌گردد. روش آزمون‌های غیرمخرب، متشکل از چند روش مهم بازرسی است که برحسب شرایط بازرسی از یک روش آن بهره گرفته می‌شود. آزمون فراصوتی، یکی از مهم‌ترین روش‌های آزمون غیرمخرب است که روز به روز دامنه کاربرد آن در صنایع مختلف وسیع‌تر می‌گردد. امروزه به دلیل مزایای بالای آزمون فراصوتی، از آن در سطح وسیعی برای آزمون جوش، کشف عیوب داخلی در قطعات، نظارت بر سلامت خطوط لوله و در تشخیص خوردگی و ضخامت سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. امواج فراصوتی به‌طور کلی به دو دسته‌ی امواج حجمی<sup>۲</sup> و امواج هدایت شده<sup>۳</sup> تقسیم می‌شوند که برحسب محیط انتشار و شرایط بازرسی یکی از آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

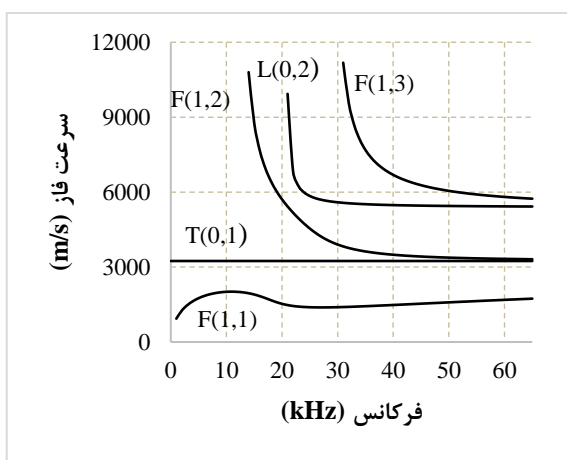
امروزه، ده‌ها میلیون کیلومتر لوله در سراسر دنیا در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین این صنایع می‌توان به صنعت گاز، نفت و پتروشیمی اشاره نمود. خطوط لوله وظیفه حمل و نقل مواد شیمیایی و غیر شیمیایی را برعهده دارند. حمل و نقل مواد، شرایط محیطی و افزایش عمر لوله می‌تواند سلامت خطوط لوله را تحت تأثیر قرار دهد. برحسب نوع آسیب، عیوب می‌توانند به شکل‌های مختلفی چون شکاف، حفره، تخلخل و غیره بر سطح لوله پدیدار گردند. وجود عیب بر سطح لوله خطر نشتی را به همراه دارد و می‌تواند باعث به وجود آمدن ضررهای مختلفی از قبیل ضررهای مالی، جانی و حتی زیست محیطی گردد. به‌منظور بررسی سلامت خطوط لوله، از روش آزمون‌های

<sup>1</sup>Non Destructive Testing (NDT)

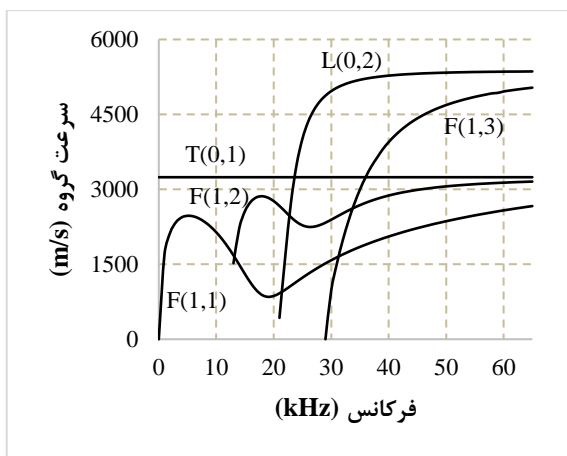
<sup>2</sup>Bulk Wave

<sup>3</sup>Guided Wave

دارد مدهای دیسپرسیو<sup>۱</sup> گویند. از شکل ۱ و ۲ می‌توان به غیردیسپرسیو بودن مد متقارن مرتبه اول پیچشی پی برد چراکه سرعت فاز و گروهی مد مذکور، ثابت و به فرکانس بستگی ندارد. مدهایی که اندیس  $m$  در آن‌ها صفر است به دلیل تغییرات هارمونیک جابه‌جایی محیطی در آن‌ها، تحت عنوان مدهای متقارن شناخته می‌شوند. در عمل به دلیل سادگی در انتشار و تفسیر راحت‌تر نتایج، مدهای متقارن بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تئوری هم از انتشار مدهای متقارن و هم از انتشار مدهای غیرمقارن استفاده می‌گردد [۵].



شکل ۱- نمودار پراکندگی سرعت فاز برحسب فرکانس مربوط به لوله فولادی با قطر داخلی ۷۷/۹ میلی‌متر و ضخامت ۵/۵ میلی‌متر



شکل ۲- نمودار پراکندگی سرعت گروهی برحسب فرکانس مربوط به لوله فولادی با قطر داخلی ۷۷/۹ میلی‌متر و ضخامت ۵/۵ میلی‌متر

عیب‌یابی نقطه به نقطه لوله‌های با طول زیاد، به کمک امواج فراصوتی حجمی، زمان و هزینه بازرسی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. امروزه از امواج هدایت‌شده فراصوتی، به دلیل سرعت و دقت بالا، هزینه پایین و مقرون به‌صرفه بودن، در بازرسی خطوط لوله مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازرسی به کمک امواج هدایت‌شده اولین بار در آزمایشگاه غیرمخرب دانشگاه امپریال توسعه پیدا کرد [۲]. امواج هدایت‌شده در ضخامت لوله انتشار می‌یابند و قادر هستند لوله‌های با طول زیاد را مورد بازرسی قرار دهند. این امواج از جنس تنش می‌باشند و هنگام برخورد با ناپیوستگی منعکس می‌گردند. اندازه عیوب بر دامنه بازتاب موج هدایت‌شده تأثیرگذار می‌باشند [۳]. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس، انتشار موج هدایت‌شده در یک لوله با در نظر گرفتن عیوب با ابعاد و اندازه‌های مختلف مدل‌سازی می‌گردد تا تأثیر ابعاد عیوب بر بازتاب موج هدایت‌شده بررسی گردد. به همین منظور ضریب بازتاب برای هر عیب محاسبه می‌گردد تا در جهت شناسایی ابعاد عیوب استفاده شود.

شکل ۱ و ۲ به ترتیب سرعت فاز و گروهی را برای یک لوله با قطر داخلی ۷۷/۹ میلی‌متر و ضخامت ۵/۵ میلی‌متر نشان می‌دهد که در محدوده فرکانسی ۰ تا ۶۵ کیلوهرتز ترسیم شده است. نمودارهای مذکور به کمک نرم‌افزار GUIGUW ترسیم شده‌اند و سرعت فاز و گروهی مدهای مختلف امواج هدایت‌شده را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهند. مدهای موجود در نمودار پراکندگی اولین بار توسط سیلک و باینتون نام‌گذاری گردیدند. به‌طور کلی مدهای موجود در نمودار پراکندگی به شکل  $X(m,n)$  نام‌گذاری شده‌اند.  $X$  می‌تواند با حروف  $L$ ،  $T$  و  $F$  نشان داده شود که به ترتیب دلالت بر مد طولی، پیچشی و خمشی دارد که بیانگر نوع مد در حال وقوع است. اندیس  $m$  بیانگر تغییرات هارمونیک جابه‌جایی و تنش در اطراف لوله است و اندیس  $n$  بیانگر شماره مد در حال وقوع می‌باشد [۴].

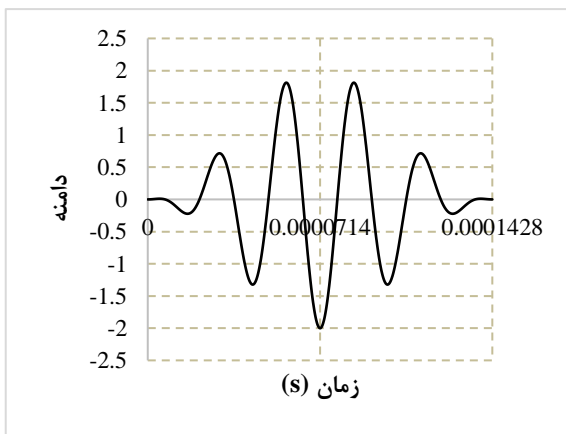
همان‌طور که از شکل ۱ و ۲ مشخص است مدهای مختلفی از امواج هدایت‌شده قادر به پدیدار شدن در محیط انتشار می‌باشند. از شکل ۱ و ۲ واضح است که در تمامی مدها بجز مد متقارن مرتبه اول پیچشی، سرعت فاز و گروهی به فرکانس بستگی دارد. به مدهایی که سرعت آن‌ها به فرکانس بستگی

<sup>1</sup>Dispersive

لوله، فولاد و دارای مدول یانگ ۲۱۰ گیگا پاسکال، چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون ۰/۲۸ می-باشد. به منظور دریافت سیگنال، حس‌گرها در ۰/۸ متر از ابتدای لوله و ۰/۸ متر از انتهای لوله مدل‌سازی شده‌اند. موج هدایت‌شده از یک سمت لوله منتشر شده و در راستای محور لوله انتشار می‌یابد. از تابع تحریک بیان شده در رابطه ۴، برای استخراج دامنه و سیگنال تحریک استفاده شده است.

$$\begin{cases} A(t) = \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{n}\right)\right) \cdot \cos(2\pi ft) \\ 0 < t < \frac{n}{f} \end{cases} \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $f$  فرکانس تحریک،  $n$  تعداد سیکل تحریک و  $t$  زمان تحریک سیگنال است. با توجه به مقدار فرکانس و تعداد سیکل تحریک می‌توان از رابطه ۴ دامنه و زمان را برای سیگنال تحریک استخراج کرد. در شکل ۴ نمودار تغییرات دامنه برحسب زمان برای فرکانس تحریک ۳۵ کیلوهرتز با تعداد سیکل تحریک ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- سیگنال تحریک حاصل از رابطه ۴ با در نظر گرفتن فرکانس ۳۵ کیلوهرتز و تعداد سیکل ۵

اندازه المان‌ها به نحوی در نظر گرفته شده است که هر طول موج حداقل از ۲۰ المان عبور کند. با توجه به سرعت فاز، اندازه طول موج و فرکانس تحریک، این مقدار ۴ میلی‌متر در منظور شده است. نوع المان به کار گرفته شده در این مدل‌سازی، مکعبی و ۸ گره‌ای پیوسته<sup>۲</sup> می‌باشد. همچنین می‌توان اندازه المان را با توجه به نمودار همگرایی و مقایسه سرعت گروهی برای حل تئوری و حل حاصل از نرم‌افزار مقایسه نمود. شکل ۵ نحوه مش‌بندی مدل را نشان می‌دهد.

<sup>۲</sup>C3D8R

عیوب مورد نظر در این مقاله کاملاً متقارن می‌باشند. عیوب متقارن به عیوبی اطلاق می‌گردد که نسبت به تمام صفحاتی که از مرکز استوانه می‌گذرند متقارن باشند. هدف از این مقاله بررسی تأثیر عمق و گستره محوری عیوب متقارن بر بازتاب مد متقارن مرتبه اول پیچشی است. لذا عیب متقارن در ابعاد و اندازه‌های مختلف مدل‌سازی می‌گردد تا تأثیر ابعاد بر بازتاب موج هدایت‌شده بررسی گردد. عیوب در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت پارامترهای بدون بعد تعریف گردیده‌اند. به طور مثال، گستره محوری عیب به صورت درصدی از طول موج مد تحریک، تعریف شده است. بنابراین برای تعریف گستره محوری عیب از رابطه ۱ و برای تعریف عمق عیب از رابطه ۲ استفاده گردیده است.

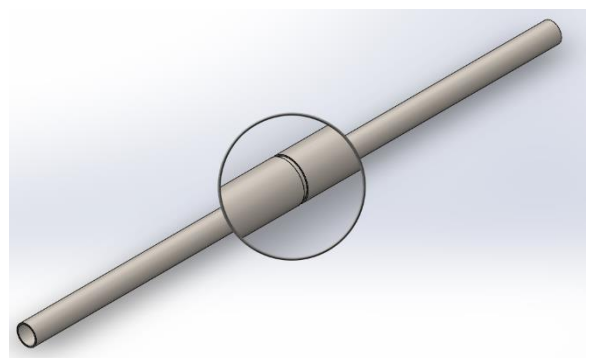
$$A\% = \frac{a}{\lambda} \cdot 100 \quad (1)$$

$$D\% = \frac{d}{t} \cdot 100 \quad (2)$$

$a$  و  $d$  به ترتیب اندازه‌ی عیب در راستای محور و ضخامت لوله می‌باشند و برحسب میلی‌متر هستند. در رابطه ۱،  $\lambda$  طول موج و از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3)$$

$v$  و  $f$  در رابطه ۳ به ترتیب بیانگر سرعت فاز و فرکانس تحریک موج هدایت‌شده می‌باشند. تمامی عیوب دقیقاً در مرکز لوله مدل‌سازی شده‌اند.



شکل ۳- لوله و شما تیک عیب متقارن بر سطح آن

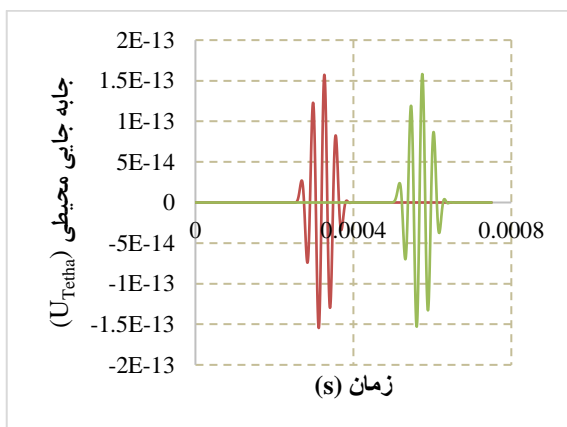
## ۲- مدل‌سازی اجزا محدود

در این پژوهش از نرم‌افزار اجزا محدود اباکوس<sup>۱</sup> ورژن ۲۰۲۰ استفاده گردیده است. لوله مورد تحلیل در این مقاله دارای قطر داخلی ۷۷/۹ میلی‌متر و ضخامت ۵/۵ میلی‌متر است. طول در نظر گرفته شده برای لوله ۲/۴ متر است. جنس

<sup>۱</sup>Abaqus

مطابق شکل ۸، به منظور مقایسه سرعت گروهی حاصل از حل اجزا محدود و تئوری، پس از حل مسئله در محیط نرم افزار، سیگنال‌های دریافت شده از حسگرها استخراج شده‌اند و با توجه به فاصله بین دو حسگر و زمان رسیدن موج، سرعت گروهی به صورت عملی به دست آمده و با سرعت گروهی تئوری مقایسه شده است.

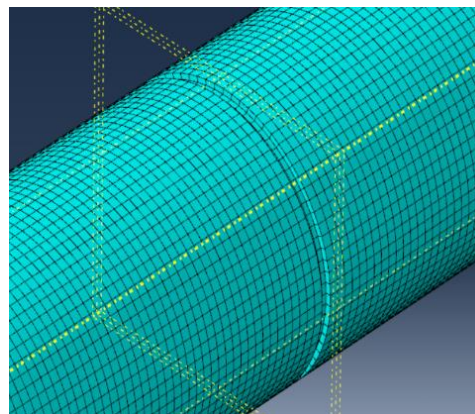
با توجه به خواص الاستیک فولاد و ابعاد هندسی لوله، سرعت گروهی تئوری در انتشار مد متقارن مرتبه اول پیچشی برابر ۳۲۴۳ متر بر ثانیه و برای حل نرم افزار این مقدار ۳۲۳۴ متر بر ثانیه بدست می‌آید. با توجه به این دو مقدار درصد خطا برای سرعت گروهی ۰/۲۷ درصد حاصل می‌شود که مقدار قابل قبولی است. همچنین، با توجه به شکل ۸، می‌توان مشاهده کرد که دامنه‌های سیگنال عبوری از دو حسگر یکسان به دست آمده است. در نتیجه می‌توان غیردیسپرسیو بودن مد متقارن مرتبه اول پیچشی را از این شکل مشاهده نمود.



شکل ۸- سیگنال دریافت شده از دو حسگر (اولین حسگر ۰/۸ متر از ابتدای لوله و دومین حسگر ۰/۸ متر از انتهای لوله) برای لوله فاقد عیب

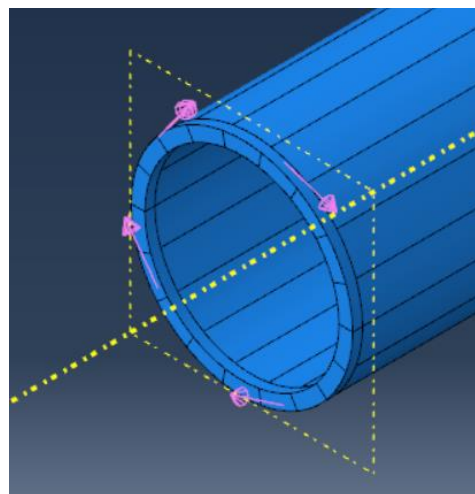
### ۳- تأثیر عمق و گستره محوری عیوب متقارن بر بازتاب موج هدایت شده

در این بخش ضرایب بازتاب مربوط به عیوب متقارن در ابعاد و اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بتوان درباره‌ی تأثیر آن‌ها بر بازتاب مد پیچشی اظهار نظر نمود. با توجه به متقارن بودن عیوب نسبت به محور استوانه، تبدیل مد رخ نخواهد داد و در هر بخش، ضرایب بازتاب براساس نسبت دامنه موج بازتاب به دامنه موج تابش شده بدست می‌آیند.

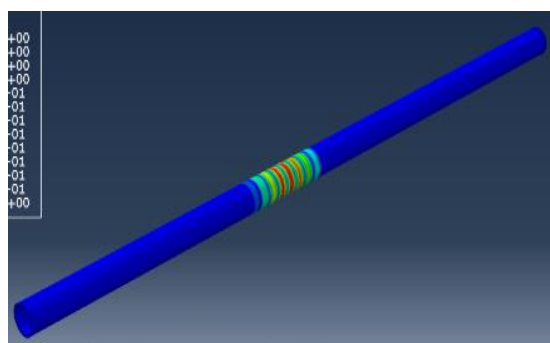


شکل ۵- نحوه اجزا بندی مدل در محیط نرم افزار

به منظور شبیه‌سازی انتشار مد متقارن مرتبه اول پیچشی، از بارگذاری تنش صفحه‌ای<sup>۱</sup> استفاده گردیده است. بارگذاری در ابتدای لوله و روی سطح خارجی اعمال شده است (شکل ۶). شکل ۷ انتشار امواج پیچشی در لوله را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نحوه اعمال بارگذاری به منظور انتشار مد متقارن مرتبه اول پیچشی از امواج هدایت شده



شکل ۷- نحوه انتشار موج هدایت شده پیچشی در ضخامت لوله در محیط نرم افزار

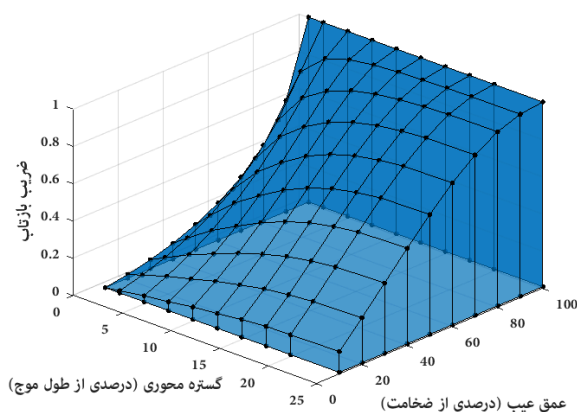
<sup>1</sup>Surface Traction



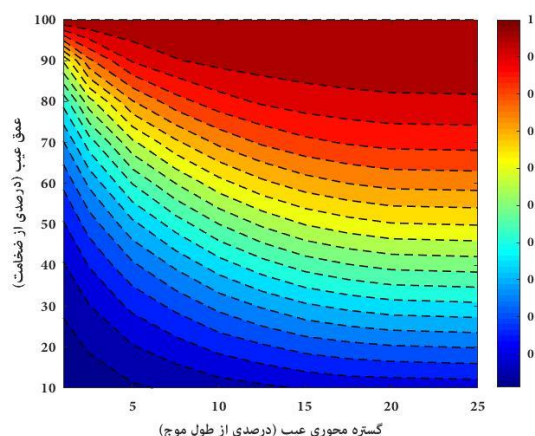
همان‌طور که از شکل ۱۰ قابل مشاهده است مقدار ضریب بازتاب در گستره محوری ۵۰ درصد (نصف طول موج) و ۱۰۰ درصد (یک طول موج) به صفر میل می‌کند. دلیل این پدیده برهمکنش میان موج حاصل از برخورد با لبه جلویی عیب و موج حاصل از برخورد با لبه عقبی عیب است. همچنین از شکل ۱۰ قابل مشاهده است که مقدار بیشینه ضریب بازتاب در ۲۵ درصد طول موج و ۷۵ درصد طول موج رخ خواهد داد.

### ۳-۳- بررسی هم‌زمان عمق و گستره محوری عیوب متقارن

در این تحلیل ضرایب بازتاب برای عیوب متقارن در عمق و گستره‌های محوری مختلف در فرکانس تحریک ۳۵ کیلوهرتز بررسی شده‌اند. شکل ۱۱ و ۱۲ تغییرات ضریب بازتاب را برحسب تغییر هم‌زمان عمق و گستره محوری عیوب نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: نمودار سه‌بعدی ضریب بازتاب برای عیوب متقارن در گستره محوری و عمق‌های متفاوت در فرکانس تحریک ۳۵ kHz



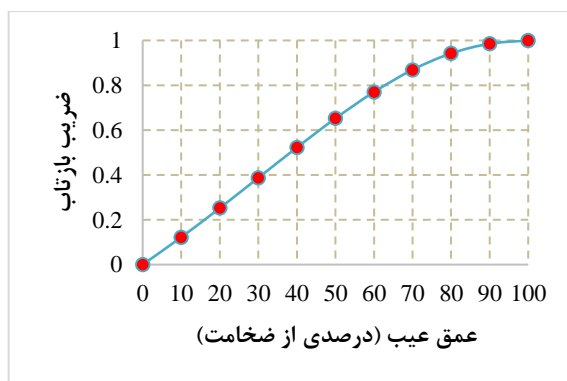
شکل ۱۲: نقشه تغییرات ضریب بازتاب برای عیوب متقارن در گستره محوری و عمق‌های متفاوت در فرکانس تحریک ۳۵ kHz

### ۳-۱- بررسی عمق عیب متقارن

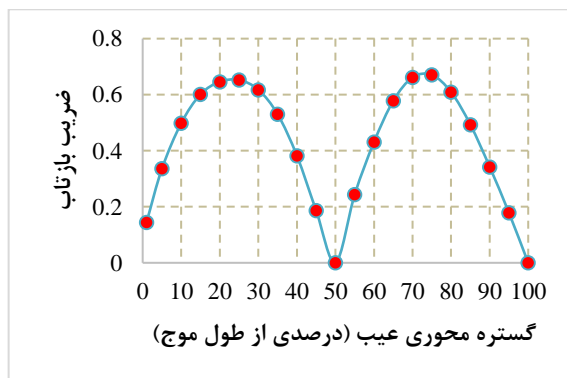
عمق عیوب از جمله پارامترهای تأثیرگذار در مقدار ضریب بازتاب است. شکل ۹ به‌وضوح نشان می‌دهد که با افزایش عمق عیب، ضریب بازتاب موج هدایت‌شده افزایش پیدا خواهد کرد. در این بررسی عیبی متقارن با گستره محوری ۰/۲۵ درصد طول موج، در فرکانس ۳۵ کیلوهرتز، در عمق‌های مختلف بررسی شده است.

### ۳-۲- بررسی گستره محوری عیب متقارن

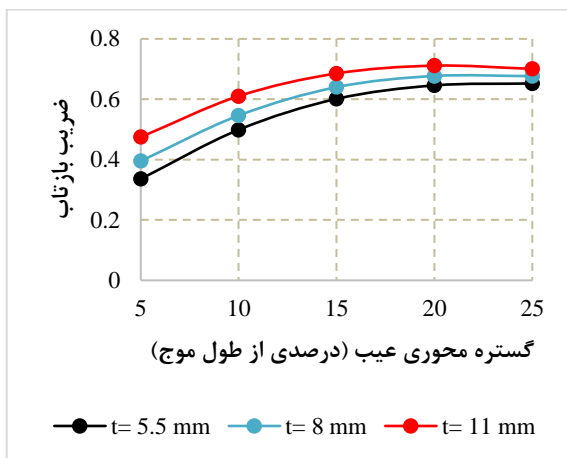
گستره محوری عیب متقارن یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در مقدار ضریب بازتاب است. در این بررسی عیب متقارن با عمق ۵۰ درصد از ضخامت در گستره‌های محوری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پس از محاسبه ضرایب بازتاب مشاهده گردید که روند تغییر ضریب بازتاب در گستره‌های محوری مختلف به‌صورت چرخه‌ای است. این نتیجه در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. مقدار فرکانس در این بررسی مشابه حالت قبل ۳۵ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- ضریب بازتاب برای عیب متقارن با گستره محوری ۰/۲۵ طول موج، در عمق‌های مختلف و در فرکانس ۳۵ کیلوهرتز



شکل ۱۰- ضریب بازتاب برای عیب متقارن با عمق ۵۰ درصد از ضخامت در گستره‌های محوری مختلف و در فرکانس تحریک ۳۵ کیلوهرتز



شکل ۱۳- ضریب بازتاب برای سه لوله با قطر داخلی ۷۷/۹ میلی‌متر با ضخامت‌های مختلف، در گستره‌ی محوری ۵ تا ۲۵ درصد طول موج و در فرکانس تحریک ۳۵ کیلوهرتز

مقدار گستره محوری عیب با توجه به مقدار فرکانس تغییر خواهد کرد، زیرا مقدار گستره محوری، ضریبی از طول موج است و طول موج به فرکانس وابسته است. برای درک بهتر این موضوع مقدار ۵ درصد طول موج در فرکانس‌های مختلف محاسبه شده است.

جدول ۱- مقادیر ۵ درصد طول موج برای فرکانس‌های متفاوت در انتشار مد متقارن مرتبه اول پیشی

T(0,1)	
فرکانس (kHz)	۵ درصد طول موج (mm)
۱۰	۰/۰۱۶۲
۲۰	۰/۰۰۸۱
۳۰	۰/۰۰۵۴
۴۰	۰/۰۰۴۱
۵۰	۰/۰۰۳۲
۶۰	۰/۰۰۲۷
۶۵	۰/۰۰۲۵

همان‌طور که از جدول ۱ قابل مشاهده است مقدار ۵ درصد گستره محوری عیب با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. زیرا مقدار طول موج با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۴، واضح است که در یک گستره محوری ثابت، با افزایش مقدار فرکانس، ضریب بازتاب افزایش می‌یابد. همان‌طور که قابل مشاهده است تأثیر فرکانس در بازه ۱۰ تا ۶۵ کیلوهرتز اندک است لذا در این مقاله از فرکانس حد واسط (۳۵ کیلوهرتز) استفاده شده است.

از شکل ۱۱ واضح است که ضریب بازتاب در عمق ثابت، با افزایش گستره محوری افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین از این نمودار می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقدار عمق عیب در گستره محوری ثابت، ضریب بازتاب روند افزایشی دارد. شکل ۱۲ نقشه دوبعدی تغییرات ضریب بازتاب شکل ۱۱ را نشان می‌دهد.

#### ۴- بررسی اثر فرکانس تحریک، ضخامت لوله و موقعیت عیوب بر بازتاب موج هدایت‌شده

علاوه بر عمق و گستره محوری عیوب متقارن، عوامل مختلفی در بازتاب امواج هدایت‌شده در خطوط لوله تأثیر دارند. ضخامت لوله، فرکانس تحریک و موقعیت عیب بر سطح داخلی یا سطح خارجی لوله از جمله عوامل تأثیرگذار بر بازتاب موج هدایت‌شده هستند. در ادامه به بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها بر بازتاب مد متقارن مرتبه اول پیشی پرداخته خواهد شد.

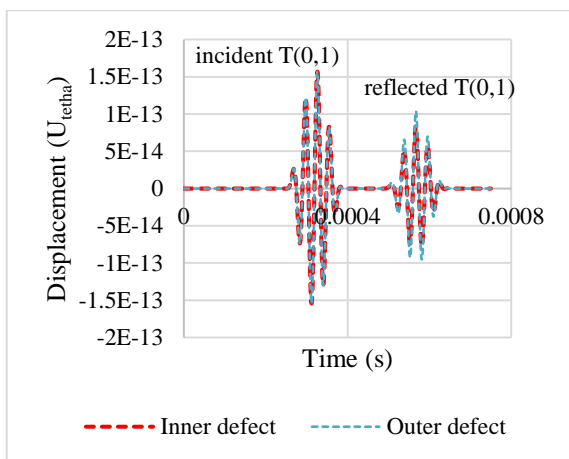
##### ۴-۱- ضخامت لوله

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در بازتاب امواج هدایت‌شده ضخامت لوله است. در این بررسی سه لوله ۳ اینچ با ضخامت‌های ۵/۵، ۸ و ۱۱ میلی‌متر مدل‌سازی شده‌اند. قطر داخلی برای هر سه لوله ثابت و برابر ۷۷/۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. عمق عیوب متقارن ۵۰ درصد ضخامت می‌باشد و در گستره‌های محوری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. فرکانس تحریک در این بررسی ۳۵ کیلوهرتز می‌باشد. نتایج این بررسی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۳ مشخص است با ثابت در نظر گرفتن قطر داخلی لوله، چنانچه ضخامت لوله افزایش یابد ضریب بازتاب موج هدایت‌شونده افزایش پیدا خواهد کرد.

##### ۴-۲- فرکانس تحریک

یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار در مقادیر ضرایب بازتاب فرکانس تحریک است. در این بررسی سه فرکانس ۱۰، ۳۵ و ۶۵ کیلوهرتز برای بررسی عیبی متقارن در نظر گرفته شده‌اند. عیب متقارن دارای عمق ۵۰ درصد از ضخامت است. در این بررسی گستره محوری عیب متفاوت در نظر گرفته شده است تا تأثیر فرکانس بر بازتاب موج هدایت‌شده مشخص گردد.

در شکل ۱۶ دامنه بازتاب شده برای دو عیب داخلی و خارجی مقایسه گردیده است. این نمودار برای عیب متقارن با عمق ۵۰ درصد از ضخامت در گستره محوری ۱۰ درصد طول موج ترسیم شده است.



شکل ۱۶- دامنه عبوری و بازتاب شده از دو عیب متقارن داخلی و بیرونی با عمق ۵۰ درصد از ضخامت در گستره محوری ۱۰ درصد و در فرکانس تحریک ۳۵ کیلوهرتز

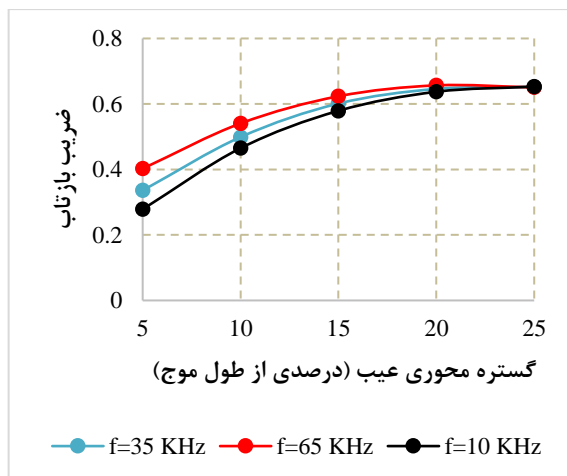
#### ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره گرفتن از انتشار مد متقارن مرتبه اول پیچشی اثر عمق و گستره‌ی محوری عیوب متقارن بررسی شد. در این بررسی عیوب متقارن در ابعاد و اندازه‌های مختلف بر سطح لوله مدل‌سازی شدند تا ضرایب بازتاب برای آن‌ها محاسبه گردند. پس از بررسی‌های صورت گرفته، نتایج حاکی از آن بود که:

الف) با ثابت در نظر گرفتن گستره محوری برای عیوب متقارن، چنانچه عمق عیب افزایش یابد ضریب بازتاب افزایش پیدا خواهد کرد.

ب) با ثابت در نظر گرفتن عمق برای عیوب متقارن، چنانچه گستره محوری عیب افزایش یابد ضریب بازتاب روندی چرخه‌ای پیدا خواهد کرد. با توجه به روند چرخه‌ای ضریب بازتاب، مشاهده گردید که مقدار ضریب بازتاب در گستره محوری ۰/۲۵ و ۰/۷۵ از طول موج بیشینه می‌گردد و در ۰/۵۰ و ۱ طول موج به صفر میل می‌کند که دلیل این پدیده برهمکنش میان موج حاصل از برخورد با لبه جلویی عیب و موج حاصل از برخورد با لبه عقبی عیب است.

ج) با توجه به شکل ۱۰ و روند چرخه‌ای نمودار، سعی شد عیب متقارن، از مقدار کمینه ضریب بازتاب که در گستره

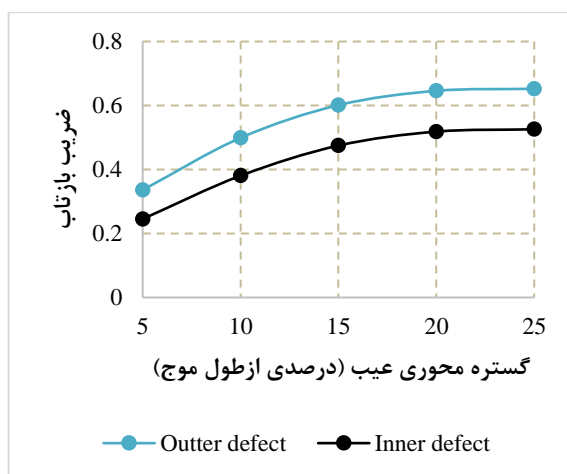


شکل ۱۴: ضریب بازتاب برای عیوب متقارن با عمق ۵۰ درصد از ضخامت با گستره محوری مختلف و در فرکانس‌های متفاوت

#### ۳-۴- موقعیت عیوب بر سطوح لوله

موقعیت قرارگیری عیوب روی سطح لوله از جمله عوامل تأثیرگذار در بازتاب موج هدایت‌شونده است. برحسب نوع آسیب، عیوب می‌توانند بر سطح داخلی و یا سطح خارجی لوله ایجاد شوند. در این بررسی عیبی متقارن با عمق ۵۰ درصد از ضخامت با گستره محوری متفاوت در فرکانس تحریک ۳۵ کیلوهرتز مدل‌سازی شده است. عیب یک بار روی سطح خارجی لوله و یک بار روی سطح داخلی لوله در نظر گرفته شده است.

از شکل ۱۵ می‌توان مشاهده کرد که عیوب موجود روی سطح خارجی لوله دامنه بازتاب بیشتری را تولید خواهند کرد.



شکل ۱۵- ضریب بازتاب برای عیب متقارن داخلی و خارجی با عمق ۵۰ درصد از ضخامت در گستره محوری مختلف و در فرکانس تحریک ۳۵ کیلوهرتز



## ۷- منابع

- [۱] جعفری، ح. (۱۳۸۵)، *آزمون فراصوت و کاربرد آن در صنایع*، چاپ اول، تهران، دانشگاه شهید رجایی.
- [2] Demma, A., Cawley, P., Lowe, M., Roosenbrand, A.G., (2004), Pavlakovic, B., The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements, NDT&E International, Vol 37, pp167-180.
- [3] Demma, A., Cawley, P., Lowe, M., Roosenbrand, A.G., (2003) The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes. The Journal of the Acoustical Society of America, 114(2), pp.611-625.
- [4] Lowe, M.J.S, Alleyne, D. N., Cawley, P., (1998), The Mode Conversion of a Guided Wave Part Circumferential Notch in a Pipe, Journal of Applied Mechanics, Vol 65(3), pp 649-656.
- [5] Niu, X., Duan, W., Chen, H. P., Marques H. R., (2018), Excitation and propagation of torsional T(0,1) mode for guided wave testing of pipeline integrity, Vol 131, pp341-348.

محوری ۱ درصد رخ خواهد داد تا بیشینه آن که در ۲۵ درصد از گستره محوری رخ می‌دهد مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاکی از آن بود که ضریب بازتاب در عمق ثابت، با افزایش گستره محوری افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین مشاهده گردید که با افزایش عمق عیب در گستره محوری ثابت، ضریب بازتاب افزایش پیدا خواهد کرد.

د) با توجه به بررسی‌های صورت گرفته مشاهده گردید که ضخامت لوله و فرکانس تحریک بر بازتاب موج هدایت شده تأثیرگذار هستند لذا پس از بررسی نتایج، مشاهده گردید که با افزایش ضخامت لوله و فرکانس تحریک ضریب بازتاب افزایش پیدا خواهد کرد.

ن) برحسب نوع آسیب، عیوب ممکن است بر سطح داخلی و یا سطح خارجی خطوط لوله پدیدار شوند لذا پس از بررسی دو حالت، مشاهده گردید که عیوب موجود بر سطح خارجی لوله دامنه بازتاب بیشتری نسبت به عیوب موجود روی سطح داخلی لوله تولید خواهند کرد.

## ۶- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN99/3/02/18287) در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.