

بررسی امکان ایجاد و توانایی امواج هدایت شده فراصوتی برای آزمون

لوله با استفاده از سنسور پیزوالکتریک

محمد ریاحی^۱ و پویا غلامی^۲

مرکز پیشرو تست‌های مکانیکی و غیرمخرب
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۲)

چکیده

در این مقاله، با استفاده از طراحی و ساخت یک سامانه جهت ایجاد سیگنال مورد نیاز برای تحریک امواج هدایت شده و با استفاده از یک کریستال پیزوالکتریک، امواج هدایت شده در یک لوله ایجاد و انتشار یافته‌اند. امواج، پس از انتشار، توسط یک پراب اولتراسونیک دریافت شده و توسط اسیلوسکوپ دیجیتال ذخیره شده‌اند. سیگنال‌های دریافتی پس از پردازش و اعمال فیلتر جهت حذف نویز، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جهت مقایسه نتایج و بررسی پارامترهای مؤثر بر توانایی بازرسی این امواج، پراب دریافت‌کننده در امتداد لوله حرکت داده شده و با تغییر تعداد پالس‌های سینوسی ورودی و اعمال تغییر در فرکانس سیگنال، داده‌ها در فرکانسی که بیش‌ترین دامنه دریافت می‌شود، ضبط شده‌اند. با تنظیم فرکانس در محدوده ۳۰ تا ۴۰ کیلوهرتز، می‌توان در هر یک از نقاط آزمایش سیگنال مناسبی دریافت کرد.

واژه‌های کلیدی: امواج هدایت شده فراصوتی، بازرسی غیرمخرب لوله‌ها، انتشار امواج، پردازش سیگنال، حسگر پیزوالکتریک

Feasibility Analysis of Generating Ultrasonic Guided Waves for Inspection of Pipes via Using Piezoelectric Sensor

M. Riahi and P. Gholami

School of Mechanical Engineering Arak, Iran
Iran University of Science and Technology
(Received: 31/January/2013; Accepted: 01/May/2016)

Abstract

In this study, ultrasonic guided waves have been generated by means of a system developed for producing the desired signal needed for excitation of guided waves and a piezoelectric sensor. After propagating, waves are measured using an ultrasonic probe and recorded via a digital oscilloscope. Subsequently, the received signals have been processed and filtered for de-noising in order to be compared. As investigating the parameters influencing the inspection ability of these waves, the receiving probe has been moved along the pipe and by changing number of input signal pulses and sweeping the frequency; signals have been recorded at the frequency in which amplitude is maximum. By sweeping the frequency in the range of 30 to 40 kHz, it is possible to receive an appropriate signal in each point of the test piece.

Keywords: Ultrasonic Guided Waves, Non-Destructive Testing of Pipes, Wave Propagation, Signal Processing, Piezoelectric Sensor

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): Riahi@iust.ac.ir
۲- کارشناس ارشد: pooya.gholami@gmail.com

۱- مقدمه

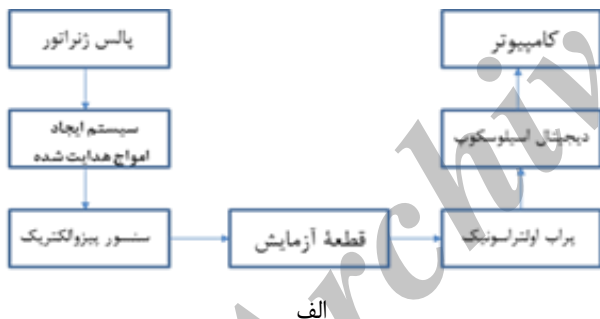
امواج هدایت شده فراصوتی در سال‌های اخیر بخش اعظمی از مطالعات تئوری و آزمایشگاهی پژوهشگران در حوزه اولتراسونیک را به خود اختصاص داده‌اند. این امواج این توانایی را دارند که در فواصل بسیار طولانی منتشر شده و باعث شده که بازرسی در طول مقاطع طولانی از قطعه خیلی سریع انجام شود. به علاوه، شکل موج‌های بسیاری وجود دارند که حساسیت‌های عالی به عیوب را ایجاد می‌کنند. از آنجایی که لوله‌ها مسیر موج کارآمدی هستند، امواج هدایت شده فراصوتی پتانسیل زیادی برای بازرسی سریع و کم هزینه لوله‌ها را دارند.

از لحاظ فیزیکی، انتشار نهایی امواج اولتراسونیک در یک مسیر موج، کاملاً با انتشار امواج برشی و طولی متفاوت است. بیش‌ترین تفاوت اساسی این است که سرعت و عدد موج به صورت طبیعی متفرق شونده هستند و با فرکانس تغییر می‌کنند. همچنین حل الاستیک نشان می‌دهد که تنها ترکیب‌های مشخصی از فرکانس و عدد موج وجود دارند که در آن‌ها امواج می‌توانند انتشار یابند [۱]. در لوله‌ها سه مود از امواج هدایت‌شده وجود دارند که همه مودها در امتداد محور لوله حرکت می‌کنند. محققان از یک علامت‌گذاری ساده و مناسب برای انتشار مودهای امواج هدایت‌شده در استوانه توخالی استفاده کردند. مودهای طولی و مودهای پیچشی که هر دو متقارن محوری هستند، به ترتیب به صورت $L(0,n)$ و $T(0,n)$ مشخص می‌شوند که صفر متقارن محوری بودن را نشان می‌دهد و n شماره مود را مشخص می‌کند. مودهای مارپیچی که غیرمتقارن محوری می‌باشند، به صورت $F(M,n)$ نشان داده می‌شوند که M تعداد امواج حول محیط را نشان می‌دهد و n شماره مود موردنظر را مشخص می‌کند. در مودهای پیچشی فقط جابجایی محیطی وجود دارد، درحالی‌که در مودهای طولی جابجایی شعاعی و محوری وجود دارد و جابجایی محیطی وجود ندارد. در مودهای مارپیچی هر سه نوع جابجایی وجود دارند [۲].

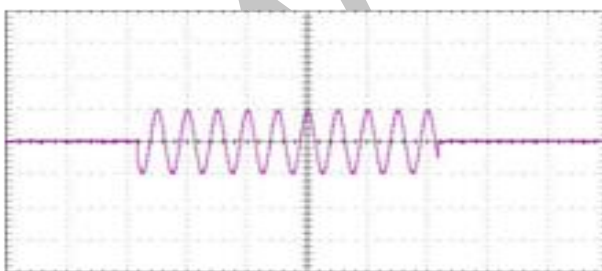
از آنجایی که در ایران هنوز تحقیقات چندانی در زمینه امواج هدایت‌شده صورت نگرفته و کمتر کار پژوهشی در این رابطه موجود است. لذا در این مطالعه، هدف امکان‌سنجی و نمایش توانایی ایجاد و به‌کارگیری این امواج برای تست لوله‌ها، به صورت آزمایشگاهی و با استفاده امکانات موجود در کشور می‌باشد.

۲- روش تحقیق

برای انجام تحقیقات آزمایشگاهی در حوزه امواج هدایت شده، به سیستم تست و اندازه‌گیری این امواج نیاز است که طراحی و راه‌اندازی شده است. شکل ۱- الف، سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مرکز برای ایجاد امواج هدایت شده فراصوتی را نمایش می‌دهد. برای ایجاد امواج هدایت‌شده و تحریک مودهای مختلف نیاز به ارسال یک پالس سینوسی به درون پراب هستیم. بدین منظور، در این مرکز سیستمی طراحی و ساخته شده که با کمک یک پالس ساده این سیگنال سینوسی را با تعداد پالس دلخواه ایجاد می‌نماید (شکل ۱- ب). برای تبدیل این سیگنال ولتاژ به سیگنال مکانیکی و ارسال موج الاستیک به درون قطعه عموماً از پراب اولتراسونیک و یا مبدل پیزوالکتریک استفاده می‌شود. در این تحقیق، برای ارسال امواج به درون قطعه از یک کریستال پیزوالکتریک استفاده شد. این کریستال با استفاده از چسب مایع (به‌عنوان کاپلنت برای پرکردن فاصله هوایی بین کریستال و قطعه) بر روی لوله متصل شده است.



الف



ب

شکل (۱): الف) سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده؛ ب) نمونه‌ای از سیگنال خروجی سیستم ایجاد امواج هدایت‌شده.

در شکل ۲، کریستال مورد استفاده و نحوه اتصال آن به قطعه نشان داده شده است. پس از انتشار موج هدایت‌شده در طول قطعه، امواج در نقاط دلخواه دریافت و ذخیره می‌شوند. برای این منظور از یک پراب اولتراسونیک جهت دریافت امواج

پس از دریافت و ذخیره سیگنال‌ها، برای وضوح بیشتر سیگنال، یک فیلتر پایین‌گذر بر روی سیگنال‌ها اعمال شده است تا نویزهای موجود در سیگنال دریافتی را حذف نماید. بدین منظور، یک فیلتر پایین‌گذر از نوع باتروورث و با مرتبه ۱۰ بر روی سیگنال‌ها اعمال شد تا فرکانس‌های بالای ۱۰۰ کیلوهرتز (با توجه به فرکانس کاری این مطالعه) را حذف نماید و سیگنال شفاف‌تری نمایش داده شود.

هم‌چنین از آن‌جا که به‌دلیل ویژگی متفرق‌شونده بودن امواج هدایت‌شده، ابزار اصلی برای بررسی و مطالعه این امواج منحنی پراکندگی هر قطعه می‌باشد، برای استخراج منحنی پراکندگی مربوط به سرعت فازی و سرعت گروهی قطعه مورد آزمایش از کد PCDISP که توسط فرناندو سکو [۳] نوشته شده، استفاده شده است. در این نرم‌افزار، با توجه به ابعاد لوله و فرکانس کاری مورد استفاده در این آزمایش (بین ۲۵ تا ۴۰ کیلوهرتز) و هم‌چنین توجه به این موضوع که به‌دلیل بارگذاری غیرمتقارن محوری روی لوله احتمال تحریک مدهای طولی و پیچشی (که متقارن محوری هستند) بسیار کم می‌باشد، نمودار پراکندگی مورد نیاز برای مدهای مارپیچی در محدوده فرکانسی مذکور در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، در این محدوده فقط دو مود $F(1,1)$ و $F(2,1)$ وجود دارند.

فرکانس مرکزی پراب‌های مورد استفاده در این آزمون در محدوده ۸۰ تا ۹۵ کیلوهرتز می‌باشد که با تغییر فرکانس تحریک توسط پالس ژنراتور قوی‌ترین سیگنال دریافتی با فرکانس تحریک ۹۰ KHz رخ می‌دهد.

در واقع، در یک ورق با ضخامت d و فرکانس آکوستیکی f تعداد معدودی از مدهای انتشار موجود است که با سرعت‌های فازی مشخص تعیین می‌شوند که می‌توان توصیف کاملی از آن را در نمودارهای پراکنده‌شدگی مشاهده کرد. هر منحنی بیانگر یک مود می‌باشد که با علائم A_n و S_n که به ترتیب مدهای متقارن و نامتقارن می‌باشند نام‌گذاری می‌شوند [۵].

مدهای متقارن و نامتقارن ایجادشده در هنگام انتشار امواج هدایت‌شده در محیط و امتداد انتشار و حرکت آن‌ها در شکل ۳ قابل مشاهده است.

موجود در قطعه و یک اسیوسکوپ دیجیتال برای ذخیره اطلاعات دریافتی استفاده شده است.



شکل (۲): لوله تحت آزمایش به‌همراه کریستال پیزوالکتریک و پراب اولتراسونیک دریافت‌کننده.

امواج هدایت‌شده امواجی هستند که در امتداد مرز یک سازه انتشار می‌یابند. امواج منتشرشده در داخل یک صفحه که دارای دو مرز موازی و بدون تنش می‌باشد، به‌عنوان امواج لمب شناخته می‌شوند که به نام مخترع آن نامیده شده‌اند. این امواج در واقع انتشار اغتشاشات الاستیک در یک ورق جامد با شرایط مرزی آزاد می‌باشند که برحسب مدهای انتشار به دو دسته متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شوند. می‌توان گفت امواج هدایت‌شده از طریق بازتاب‌های متوالی از سطوح آزاد ورق، در طول محیط مورد آزمون منتشر می‌گردد [۳].

نمونه مورد استفاده در این تحقیق، یک لوله آهنی با قطر خارجی $21/4$ میلی‌متر و ضخامت $2/3$ mm و طول 1 m می‌باشد که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. پس از اتصال پیزوالکتریک به لوله و انتشار امواج در آن، پراب دریافت‌کننده در طول لوله حرکت داده شده و در فواصل 50 میلی‌متری قرار داده شده است. در هر نقطه، سه سیگنال با تعداد پالس‌های 5 و 10 kHz و 15 kHz و با دامنه ولتاژ 5 ولت به‌درون کریستال پیزوالکتریک و از آن طریق به‌درون قطعه فرستاده شده و در طرف دیگر، داده‌برداری توسط پراب اولتراسونیک انجام شد. در هر داده‌برداری، فرکانس موج ارسالی به‌صورتی تغییر داده می‌شد که پراب موجی با بیش‌ترین دامنه ممکن را دریافت نماید. لذا با در نظرگیری 14 نقطه و 3 سیگنال در هر نقطه، تعداد 42 سیگنال ذخیره و بررسی شده‌اند.

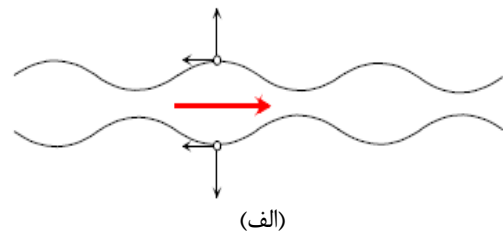
۳- نتایج آزمایش

پس از آماده‌سازی تجهیزات لازم، داده‌برداری طبق شرح قبلی انجام شد. با ثابت نگه داشتن تعداد پالس سینوسی ورودی در سه مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ پراب دریافت‌کننده در طول لوله حرکت داده شده و با تنظیم فرکانس، در هر نقطه حداکثر دامنه دریافتی ضبط شده است. جدول ۱ فاصله هر نقطه تا نقطه ارسال امواج و فرکانس مربوط به بیش‌ترین دامنه دریافتی در هر نقطه را نشان می‌دهد.

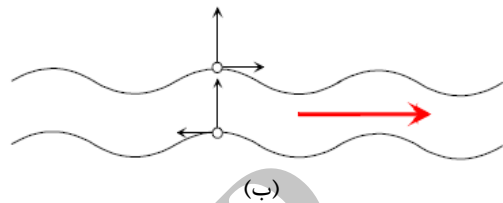
جدول (۱): فاصله نقاط داده‌برداری از نقطه ارسال امواج و فرکانس مربوط به بیش‌ترین دامنه دریافتی در هر نقطه.

شماره نقطه	فاصله نقطه (cm)	فرکانس بیش‌ترین دامنه (kHz)
۱	۵	۳۸
۲	۱۰	۳۸
۳	۱۵	۳۸
۴	۲۰	۲۸
۵	۲۵	۳۰
۶	۳۰	۳۵
۷	۳۵	۳۳
۸	۴۰	۳۳
۹	۴۵	۳۵
۱۰	۵۰	۳۳
۱۱	۵۵	۳۳
۱۲	۶۰	۳۱
۱۳	۶۵	۳۳
۱۴	۷۰	۳۳

همان‌طور که مشاهده می‌شود، فرکانس‌های به‌دست‌آمده همگی در محدوده ۲۸ تا ۳۸ کیلوهرتز می‌باشند و تغییر چندانی ندارند. اما با همین تغییر اندک نیز سیگنال خروجی به‌طور چشم‌گیری دستخوش تغییرات می‌شود. به‌همین دلیل، برای ثبت سیگنال‌های دریافتی، از فرکانسی که بیشترین دامنه را در خروجی ظاهر می‌کرد، استفاده شد. شکل ۵ نتایج مربوط به دامنه سیگنال دریافتی در نقاط آزمایش را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد پالس‌های ورودی باعث تقویت سیگنال خروجی می‌شود.

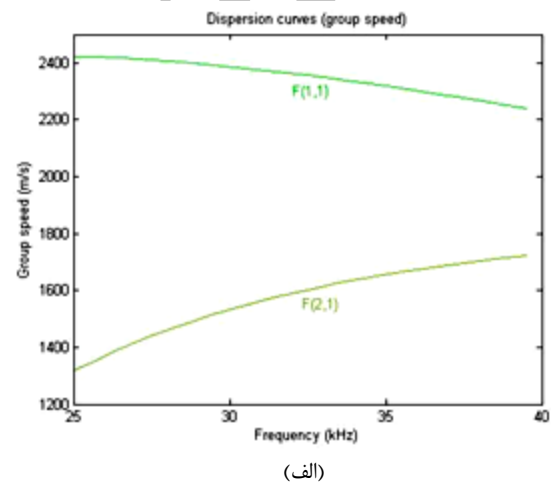


(الف)

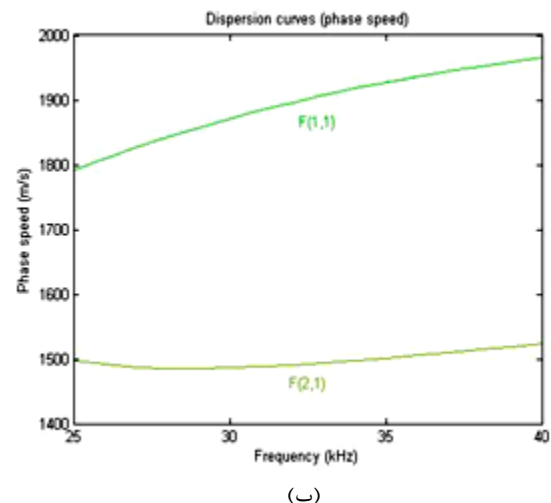


(ب)

شکل (۳): (الف) موج لمب متقارن (ب) موج لمب نامتقارن [۶].

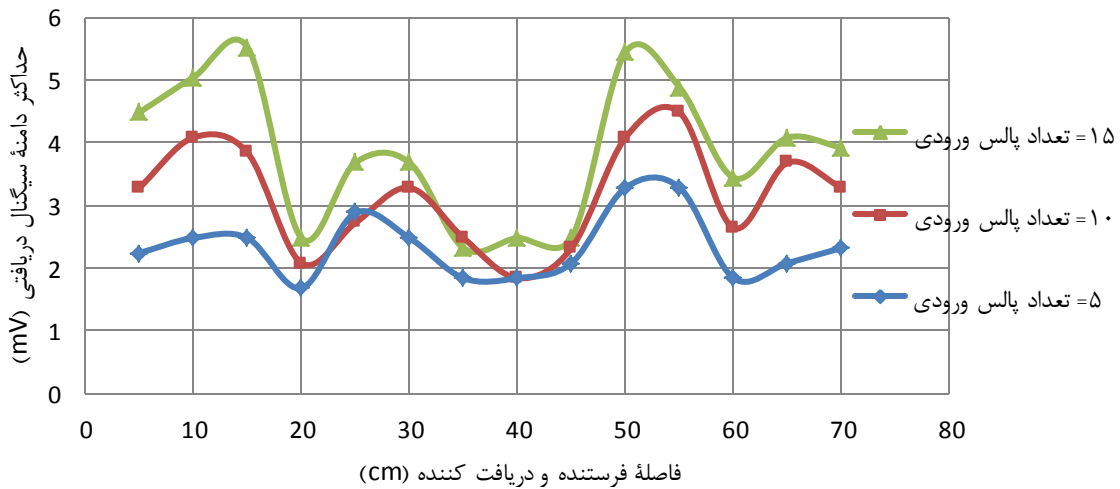


(الف)

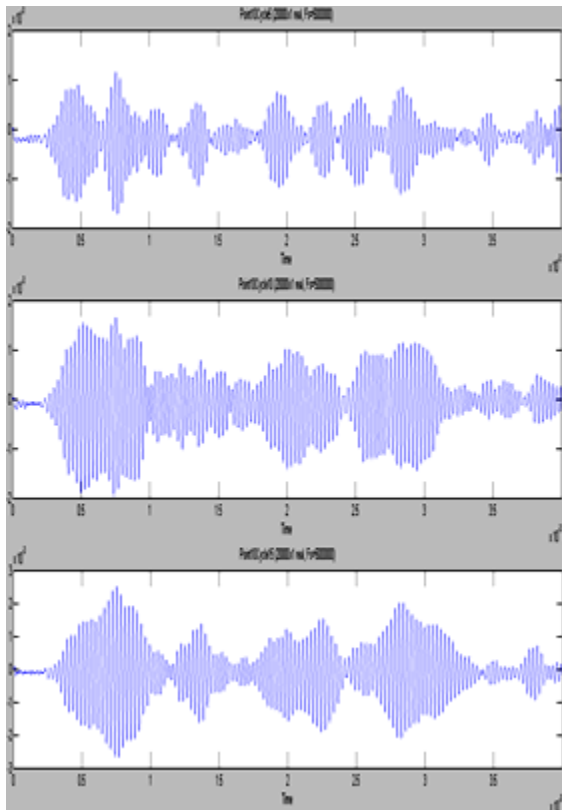


(ب)

شکل (۴): منحنی پراکندگی: (الف) سرعت گروهی (ب) سرعت فازی.



شکل (۵): منحنی تغییرات دامنه سیگنال دریافتی با تغییر فاصله فرستنده و گیرنده، و تغییر سیگنال ورودی.



شکل (۶): سیگنال‌های دریافتی در نقطه ۱۰ با ۵، ۱۰ و ۱۵ سیکل سینوسی در ورودی.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در سه نقطه دامنه سیگنال دریافتی دارای پیک می‌باشد. این سه نقطه انتخاب شده و سیگنال‌های ثبت شده در این سه نقطه مقایسه می‌شوند. این نقاط عبارتند از: نقاط ۳، ۶ و ۱۰ با فواصل به ترتیب ۱۵، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر از نقطه ارسال. در هر نقطه اثر تغییر تعداد سیکل‌های سیگنال ورودی بررسی می‌شود.

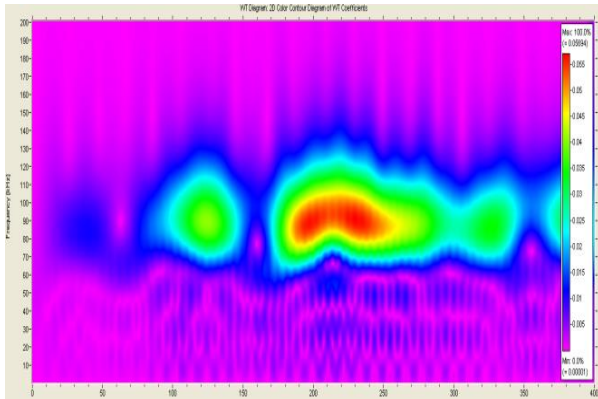
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سیکل‌های سیگنال ورودی، به دلیل افزایش طول سیگنال، رفته رفته مدهای ایجاد شده با یکدیگر ادغام می‌شوند و مجال چندانی برای تفسیر مدهای موج باقی نمی‌گذارند. این مسئله در سیگنال دریافتی نقطه ۱۰ به خوبی مشخص است و در سیگنال سایر نقاط نیز مشهود بود. لذا برای تفسیر بهتر مدهای سیگنال‌های به دست آمده با تعداد ۵ سیکل ورودی در سه نقطه با استفاده از تحلیل موجک بررسی می‌شوند.

عامل دیگری که باعث ادغام مدهای موج می‌شود (در اینجا دو مود اول و دوم مارپیچی)، نزدیک بودن سرعت این دو موج است. به همین دلیل، در سیگنال‌های ثبت شده در نقاط اولیه توانایی تفکیک این دو مود از یکدیگر بسیار دشوار است. اما در نقاط دورتر، این دو مود، به دلیل اختلاف سرعتی که با یکدیگر دارند، پس از طی مسافت بیشتر از یکدیگر جدا می‌شوند و مود $F(1,1)$ که سرعت بیشتری نسبت به مود $F(2,1)$ دارد، زودتر دریافت می‌شود. همچنین به منظور تحلیل مدها، سیگنال دریافتی در یکی از نقاط انتهایی، توسط تحلیل موجک بررسی می‌شود.

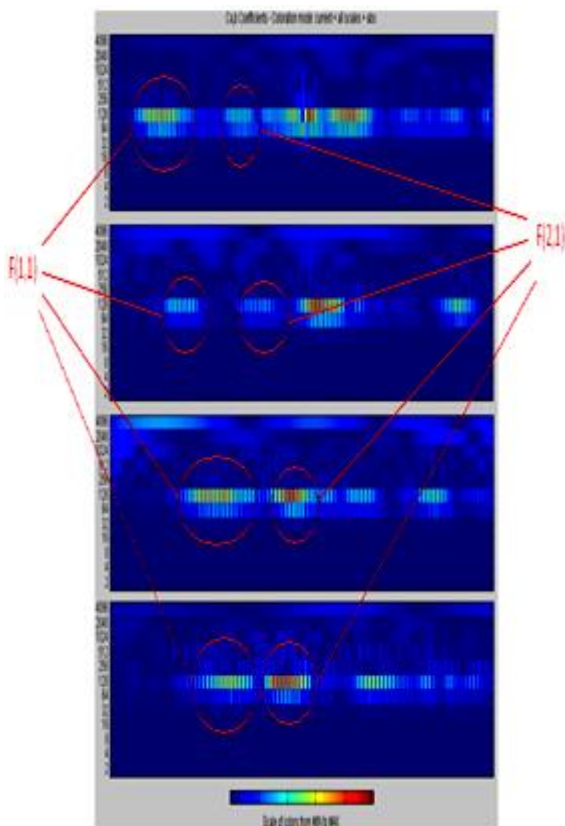
۴- تحلیل موجک

موجک یا ویولت دسته‌ای از توابع ریاضی هستند که برای تجزیه سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های فرکانسی آن به کار می‌رود که تفکیک پذیری هر مؤلفه برابر با مقیاس آن است. تبدیل موجک، تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک می‌باشد.

و از آن طریق به درون قطعه فرستاده شده و در طرف دیگر داده برداری توسط پراب اولتراسونیک انجام شد. در هر داده برداری فرکانس موج ارسالی به صورتی تغییر داده می شد که پراب موجی با بیشترین دامنه ممکن را دریافت نماید. لذا با در نظرگیری ۱۴ نقطه و ۳ سیگنال در هر نقطه، تعداد ۴۲ سیگنال ذخیره و بررسی شده اند.



شکل (۸): تحلیل موجک از سیگنال دریافتی در صورت وجود جوش اصطکاکی.



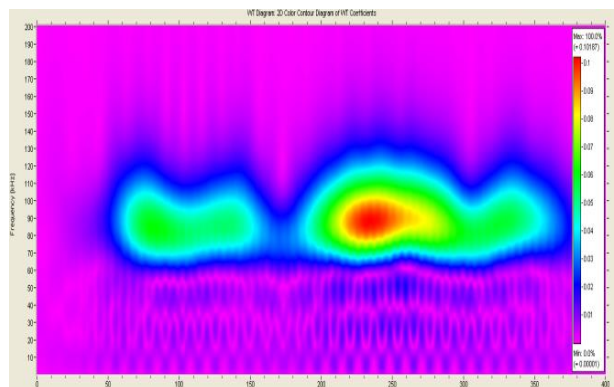
شکل (۹): تحلیل موجک سیگنال مربوط به نقاط ۳، ۶، ۱۰ و ۱۲ (به ترتیب از بالا به پایین) با ۵ سیکل ورودی.

در این جا برای بررسی محتوای سیگنال از تبدیل موجک برای نقاط شماره ۳، ۶، ۱۰ و ۱۲ که در قبل به آن ها اشاره شد استفاده شده است (شکل ۹).

جهت تحلیل فرکانسی سیگنال های دریافت شده، می توان از تحلیل موجک استفاده نمود. تحلیل موجک امروزه از پرکاربردترین شیوه های پردازش سیگنال است که به خوبی اطلاعات مربوط به هر دو حوزه زمان و مکان را ارائه می دهد. در واقع این تحلیل شامل دسته ای از توابع ریاضی می باشد که اطلاعات موجود را به دسته های فرکانسی مختلف تقسیم نموده و هر قسمت را با رزولیشن متناسب مورد بررسی قرار می دهد، لذا در این تحلیل می توان تغییرات بزرگ و کوچک را به طور هم زمان به خوبی مشاهده نمود. جهت کسب اطلاعات بیشتر راجع به این شیوه پردازش سیگنال، می توان به مقاله گراپس تحت عنوان آشنایی با تحلیل موجک رجوع کرد [۷].

در این بررسی، تحلیل موجک بر روی سیگنال های دریافت شده، انجام گرفته است که به راحتی می توان محتوای فرکانسی سیگنال را در نتایج آن مشاهده نمود. نتایج تحلیل موجک سیگنال های دریافت شده در شکل های ۹-۷، نشان داده شده و در مرجع [۷] در خصوص جوش اصطکاکی ذکر شده است.

تأثیر حضور جوش اصطکاکی در ورق بر روی مشخصه های موج منتشر شده، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، ارزیابی الگویی از موج دریافت شده در حضور جوش اصطکاکی در ورق می باشد تا بتوان با استفاده از آن، معیار استاندارد را جهت بررسی کیفیت جوش های اصطکاکی به کار رفته در صنایع نفت و گاز، ارائه نمود.

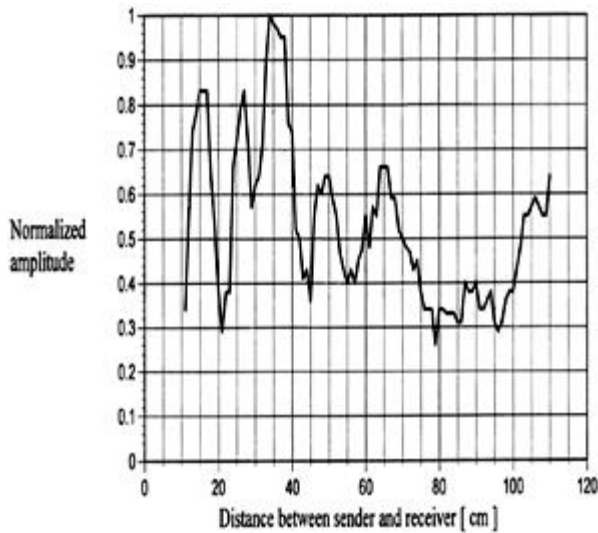


شکل (۷): تحلیل موجک از سیگنال دریافتی بدون وجود جوش.

در هر نقطه، سه سیگنال با تعداد پالس های ۵ و ۱۰ و ۱۵ کیلوهرتز و با دامنه ولتاژ ۵ ولت به درون کریستال پیزوالکتریک

۵- تحلیل سرعت موج

۵۰ سانتی‌متر دارای بیشینه مقدار و در نقاط ۲۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متر دارای کمینه مقدار می‌باشند.



شکل (۱۱): منحنی به‌دست‌آمده توسط رُز برای لوله‌ای به قطر ۱۸/۹ mm و ضخامت ۱/۲۲ میلی‌متر [۴].

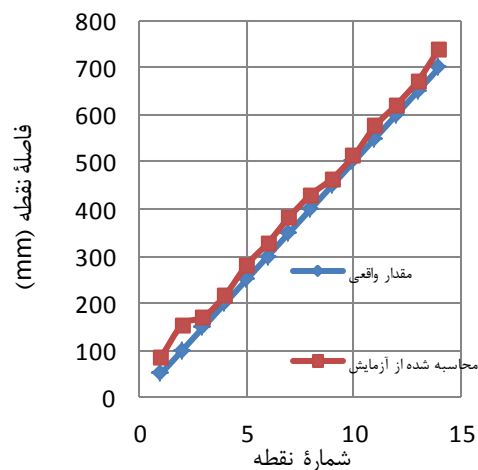
۶- نتیجه‌گیری

اثر تغییر تعداد پالس‌های ورودی بررسی شد. اگرچه طبق نمودار شکل ۴، با افزایش تعداد پالس‌های ورودی سیگنال قوی‌تری در خروجی دریافت می‌شود، اما در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش پالس‌های سیگنال ورودی، دو مود تحریک‌شده با یکدیگر ادغام می‌شوند و تحلیل دقیق‌تر سیگنال را دشوار می‌سازند. لذا از پالس‌های کم‌تر، استفاده شد و برای تحلیل دقیق‌تر سیگنال، از تحلیل موجک بهره‌گیری شد.

در شکل ۱۱، از سیگنال دریافتی از نقاط ۳، ۶، ۱۰ و ۱۲ تبدیل موجک گرفته شده است. با کمی دقت در این شکل، مود اول و دوم منتشرشده به‌وضوح مشخص است که با دورشدن از نقطه ارسال، زمان دریافت این دو مود نیز افزایش می‌یابد.

در نهایت، در بخش نهایی به یافتن فاصله نقاط با استفاده از زمان دریافت سیگنال در خروجی و سرعت موج به‌دست آمده از نمودار پراکندگی سرعت گروهی (شکل ۳- الف) پرداخته شد. در نمودار شکل ۱۰، نتایج این بخش به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج هم‌پوشانی مناسبی با مقادیر واقعی دارند و فاصله همگی نقاط

به منظور بررسی صحت آزمایش و بررسی سرعت امواج دریافتی، نمودار شکل ۱۰ رسم شده است. در این نمودار ابتدا سرعت امواج در هر نقطه با توجه به فرکانس تحریک نقطه مذکور از منحنی پراکندگی استخراج می‌شود و سپس با استفاده از زمان رسیدن موج که از سیگنال دریافتی به‌دست می‌آید، فاصله نقطه آزمایش محاسبه شده و با مقدار واقعی مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است از آنجایی که در سیگنال‌های دریافتی امکان تفکیک مود اول و دوم دریافتی دشوار است و نقطه شروع سیگنال مود دوم در بسیاری از نقاط در سیگنال مود اول ادغام شده و قابل تشخیص نیست، لذا این محاسبات فقط برای مود اول، یعنی $F(1,1)$ انجام شده است.



شکل (۱۰): دقت آزمایش در محاسبه فاصله نقاط.

همان‌طور که مشاهده شد با اعمال پالس سینوسی به کریستال پیزوالکتریک و دریافت کردن موج ایجادشده از طرف دیگر توسط پراب اولتراسونیک، به تحلیل و بررسی سیگنال خروجی پرداخته شد. در نخستین مرحله، پراب در طول لوله حرکت داده شد تا توانایی دریافت سیستم در طول قطعه مشخص شود که نتیجه در نمودار شکل ۵ نشان داده می‌شود. در این جا این نمودار با نموداری مقایسه‌شده که در سال ۱۹۹۸ توسط شین و رُز [۴] برای لوله‌ای با ابعاد مشابه اما در فرکانس‌های بالاتر به‌دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، روند کلی نمودار ارائه‌شده توسط شین و رُز تا حد زیادی با نمودار شکل ۴ مطابقت دارد. هرچند شکل ۸ در فرکانس ۱/۲ مگاهرتز بوده، اما هر دو نمودار در نقاط ۱۵، ۲۵ و

با اندکی خطا، کمی دورتر از مقدار واقعی محاسبه شده‌اند که این مقدار خطا به دلیل اندک خطای موجود در یکسان‌سازی پایه‌های زمانی سیگنال ورودی و خروجی می‌باشد.

۷- مراجع

1. J. Krautkramer, H. Krautkramer, "Ultrasonic Testing of Materials", Springer-verlag, New York (1990)
2. J. N. Barshinger, "Guided Wave Propagation in Pipes with Viscoelastic Coatings", A Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, The Pennsylvania State University, August 2001
3. F. Seco, J. M. Martín, A. Jiménez, J. Pons, L. Calderón, R. Ceres, "PCDISP: A Tool for the Simulation of Wave Propagation in Cylindrical Wave Guides", 9th International Congress on Sound and Vibration, 2002
4. H.J. Shin and Rose J.L., "Guided Wave Tuning Principles for Defect Detection in Tubing", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 17, No. 1, pp.27-36, 1998.
5. T. Kundu, Ultrasonic Nondestructive Evaluation, CRS PRESS, 2004
6. L. Carlson, Matthias Ericsson, "Laser-Ultrasonic (LUS) for Examination of Structure Changes and Defects in Aluminum", Corrosion and Metals Research Institute, Stockholm, 2005
7. A. Graps., An Introduction to Wavelets, IEEE Computational Science and Engineering, 1995

Archive