



مطالعه عددی استفاده از تمرکز امواج فراصوت به روش آرایه‌فازی در بازرسی اتصالات لوله‌های پلی‌اتیلنی

سید معین جوادی^۱، محمدرضا شیخ‌الاسلامی^{۲*}، حمیدرضا محمدرضایی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

^۳ محقق، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

چکیده

بازرسی اتصالات لوله‌های پلی‌اتیلنی به دلیل کاربرد فراوان در شبکه‌های انتقال آب، گاز و مواد شیمیایی، اهمیت زیادی در صنایع مختلف دارد. از میان روش‌های بازرسی غیرمخرب، فراصوت مناسب‌ترین روش برای این نوع اتصالات است. به سبب جنس پلیمری این اتصالات و در نتیجه تضعیف زیاد موج، این نوع بازرسی با چالش‌هایی همراه است. استفاده از بازرسی فراصوت به روش آرایه‌فازی به سبب تمرکز موج و ایجاد نقاط پراورزی در محل اتصالات، راه حل جایگزینی برای روش‌های معمول است. در این مقاله با استفاده از روش المان محدود، بازرسی فراصوت به روش معمول و نیز به روش آرایه‌فازی برای پایش اتصالات لوله‌های پلی‌اتیلنی شبیه‌سازی شده است. انواع عیوب احتمالی بررسی شده و اثر آن در سیگنال بازتاب مشخص شده است. با استفاده از روش عددی بر پایه شبیه‌سازی‌های متوالی، سیگنال بازتاب در روش آرایه‌فازی تحلیل شده است. نتایج نشان داد، افزایش تعداد پیزوها سبب افزایش بهبود عملکرد پروب و همچنین افزایش تمرکز موج مکانیکی، تا ۱۶۰ درصد برای ۳۲ المان و ۲۷۰ درصد برای ۶۴ المان نسبت به پروبی با ۱۶ پیزوالکتریک به همراه خواهد داشت.

کلمات کلیدی: لوله‌های پلی‌اتیلنی؛ جوشکاری الکتروفیوژن؛ بازرسی غیرمخرب؛ فراصوت؛ روش آرایه‌فازی.

Numerical study of the use of focused ultrasound waves by the phased array method in the inspection of polyethylene pipe joints.

Seyed Moein Javadi¹, Mohammad Reza Sheikholeslani^{2,*}, Hamidreza Mohammad Rezaie

¹ MSc student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

² Assist. Prof. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

³ Markazi Province Gas Company, Arak, Iran

Abstract

Inspection of polyethylene pipe connections is very important in various industries due to its many applications in water, gas, and chemical transmission networks. Among the non-destructive inspection methods, the ultrasonic method is the most suitable method for this type of connection. Due to the polymer material of these connections and a result of the high attenuation of the wave, this type of inspection is associated with challenges. Using the phased array ultrasonic inspection method due to the focus of the wave and creating high-energy points at the joints is an alternative solution to the usual ultrasonic inspection techniques. In this paper, using the finite element method, Ultrasonic inspection is simulated by the usual method and also by the phased array method for monitoring the connections of polyethylene pipes. some kinds of possible defects have been investigated and their effect on the reflection signal has been determined. Using the numerical method based on successive simulations, the reflection signal has been analyzed in the Phased array method. The results showed that the increase in the number of piezo increased the performance of the inspection as well as an increase in the concentration of the mechanical wave up to 160% for 32 elements and 270% for 64 elements compared to the probe with 16 piezoelectric elements.

Keywords: Polyethylene pipes; Electrofusion welding; Non destructive inspection; Ultrasonic; Phased array methode

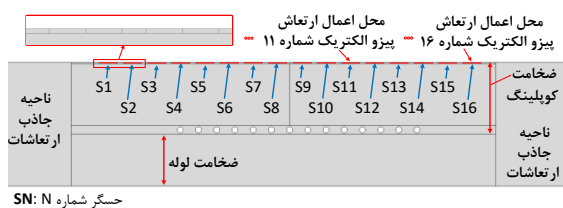
۱- مقدمه

مقاومت مکانیکی مناسب، مقاومت به خوردگی بالا، وزن کم و روش اتصال آسان، لوله‌های پلی اتیلنی را به انتخاب مناسبی برای کاربرد انتقال آب، نفت، گاز و مواد شیمیایی تبدیل کرده است [۱]. برای اتصال لوله‌ها از کوپلینگ‌ها و روش جوشکاری الکتروفیوژن استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از سیم‌های جانمایی شده در کوپلینگ و گرمای ایجاد شده به سبب عبور جریان الکتریکی از سیم‌ها، جوشکاری انجام می‌شود [۲]. علی‌رغم مزیت‌های این روش از قبیل سادگی و سرعت بالا، این نوع اتصال مستعد عیوب مختلفی از جمله ایجاد خلا، جابجایی سیم‌ها، وجود آلودگی، رابط اتصال ضعیف و جوش سرد است؛ لذا پایش سلامت اتصال، علی‌الخصوص در صنایعی مثل نفت و گاز، از حساسیت بالایی برخوردار است. برای ارزیابی سلامت اتصال به طور سنتی از روش‌های مخرب استفاده می‌شود که علی‌رغم مزیت‌هایی چون سادگی، نیاز به تجهیزات کم و قابلیت اعتماد بالا در ارزیابی نمونه مورد مطالعه، تنها روی اتصالات محدودی قابل انجام است و اتصالات بعد از آزمایش، امکان استفاده مجدد ندارند؛ لذا کاربرد روش‌های غیر مخرب در این موضوع ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به ساختار و هندسه اتصال، جنس لوله‌ها و کاربرد آن‌ها روش آزمون غیرمخرب فراصوت مناسب‌ترین انتخاب است. با این وجود ساختار پلیمری و افت قابل توجه موج مکانیکی در پلی اتیلن مانع بزرگی جهت کاربرد روش‌های فراصوت معمول در این اتصالات است. استفاده از روش‌های نوین جهت تمرکز موج مثل روش آرایه فازی می‌تواند سبب کاهش این محدودیت شود [۳].

فردریک و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۴]، با استفاده از تکنیک آرایه فازی، اتصالات لب به لب لوله‌های پلی اتیلنی را پایش کردند. بر اساس نتایج به دست آمده حفره با قطر ۸ میلی‌متر توسط این روش قابل مشاهده است. ضمن این که تصویر دو بعدی مناسبی از مقطع با این روش به دست می‌آید. شی و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۵] با بررسی اتصالات پلی اتیلنی، مکانیزم‌های تشکیل خط جدایش عیب جوش در اتصال لوله های پلی اتیلنی را بررسی کردند. مک‌لنن و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۶]، از پروب آرایه‌فازی به همراه گوه برای بازرسی اتصالات پلی اتیلن استفاده کردند. با استفاده از پروب معرفی شده، نفوذ ناقص با محیط ۶ میلی‌متر در ارتفاع ۲ میلی‌متری را

شناسایی کردند. هاگلوند و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۷]، با ارائه یک سیستم نوین از پروب آرایه فازی امکان همزمان پایش اتصالات لب به لب و اتصالات الکتروفیوژن را فراهم کردند. پروب معرفی شده قابلیت پایش اتصالات پلی اتیلنی با قطر ۹۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر را دارد. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۸]، با استفاده از بهینه‌سازی تجربی پارامترهای بازرسی در تکنیک آرایه فازی، روشی را برای بازرسی لوله‌های پلی اتیلنی با ضخامت بالا ارائه کردند. شنگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۹]، به مطالعه تئوری انتشار امواج فراصوتی در پلی اتیلن پرداختند. سپس با استفاده از یک روش تجربی با استفاده از طیف‌سنجی فراصوتی، مدل مورد نظر را صحت‌سنجی کردند. نتایج نشان داد که ضریب میرایی پلی اتیلن رابطه نسبتاً خطی با فرکانس دارد و سرعت فاز با فرکانس به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد؛ همچنین فرکانس و زمان تاخیر در وضوح تصویر و قابلیت تمرکز تأثیر داشته است. یاره‌بی در سال ۲۰۱۸ [۱۰]، طراحی و مدل‌سازی آزمون فراصوت آرایه‌فازی و شبیه‌سازی انتشار دسته پرتو امواج فراصوتی در ورق فلزی به کمک نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. در این پژوهش با ملاحظات حل معادله موج به کمک روش اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس، آزمون فراصوت آرایه فازی با یک پروب ۸ المانی خطی مدل‌سازی شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که استفاده از روش اجزای محدود و نتایج آن علاوه بر بهبود درک مفاهیم آزمون فراصوتی آرایه‌فازی، طراحی آزمون با فرض شرایط مختلف با صرف حداقل هزینه و زمان را ممکن می‌سازد. رحمانی و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۱]، به بررسی پارامترها و وجود متغیرهای تأثیرگذار در کیفیت و استحکام اتصالات جوش الکتروفیوژن در لوله‌های پلی اتیلن با استفاده از سیستم فراصوتی آرایه‌فازی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که با روش آرایه‌فازی می‌توان ۴۵ تا ۵۰ درصد جوش‌های معیوب را شناسایی کرد. فروزش و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۲]، با استفاده از روش عددی نشان دادند که استفاده از بازرسی به روش آرایه فازی در جوش‌های فلزات غیرهمجنس سبب تقویت قابل ملاحظه آکو از عیب و دیواره پستی شده و دقت بازرسی را بالا می‌برد. میائو و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۳]، با استفاده از تکنیک آرایه فازی و همچنین بهره‌گیری از گوه آب، تطبیق امپدانسی مناسب‌تری برای بازرسی جوش لب به لب پلی اتیلن به وجود آورده و بدین ترتیب

همچنین داده برداری می‌شود. افزایش داده‌ها سبب می‌شود که تحلیل و تفسیر آن‌ها پیچیده‌تر شود. تحمل این پیچیدگی نه تنها سبب افزایش دقت شبیه‌سازی نمی‌شود، بلکه سبب سردرگمی در تفسیر نتایج می‌شود. از طرفی با توجه به ابعاد لوله می‌توان از انحنای آن صرف‌نظر کرد و تحلیل به صورت دوبعدی انجام شود. از این‌رو در این مقاله مدل عددی به صورت دوبعدی فرض و مدل‌سازی شد. با توجه به هندسه مسئله، نیمی از مدل در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. شکل ۱، مدل مورد نظر را نشان می‌دهد. در مرز بالایی مطابق شکل ۱ نواحی ایجاد شد که محل اعمال ارتعاشات حلقه‌های پیزوالکتریک است. کمی پایین‌تر از موقعیت پیزوالکتریک‌ها (به اندازه دو ردیف المان) بوسیله پارتیشن‌بندی نقاطی ایجاد شد که در مرحله ذخیره نتایج به عنوان دریافت کننده موج (سنسور) در نظر گرفته شد.



حسگر شماره N: SN

شکل ۱- مدل لوله و کوپلینگ در نرم افزار آباکوس

برای تفسیر پالس، در کنار تحلیل قطعه با عیب، تحلیل قطعه بدون عیب، تحلیل قطعه بدون سیم و تحلیل مدل توپر با ضخامتی برابر با کوپلینگ انجام شده که اکوی بازتابی از عیب، اکوی بازتابی از سیم و اکوی بازتاب از کف دقیقاً در سیگنال اصلی مشخص شود.

۳- خصوصیات مواد

پلی‌اتیلن یک ماده پلیمری است برای شبیه‌سازی یک ماده پلیمری باید آنرا به صورت مدل ویسکو الاستیک تعریف کرد. یکی از مدل‌های مناسب مدل کلونین ویت است. در مدل کلونین ویت برای در نظر گرفتن خاصیت لزجت از یک دمپر و برای در نظر گرفتن تغییر شکل از مدل فنر به صورت موازی با دمپر استفاده می‌شود. مدل کلونین ویت توانایی پیش‌بینی رفتار خزشی با دقت خوب در تغییر شکل‌های کوچک را دارد [۱۸].

سیگنال برگشتی قوی‌تری در بازرسی ارائه شده، ایجاد شد. تاو و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۴]، استفاده از یک تکنیک بازرسی همزمان را برای بازرسی جوش الکتروفیوژن در اتصالات لوله‌های پلی‌اتیلنی توسعه دادند. نیو و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۵]، با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین بر پایه دامنه و زمان سیگنال، روش جدیدی برای عیب یابی قطعات پلی‌اتیلنی ارائه دادند. راو و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۶]، از روش مهاجرت زمانی معکوس حداقل مربعات (LSRTM)، استفاده کرده و الگوریتم جدیدی جهت عیب یابی قطعات پلی‌اتیلنی ارائه دادند. لی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۱۷]، از تکنیک آرایه فازی به صورت تجربی جهت بازرسی فراصوتی اتصالات الکتروفیوژن لوله‌های پلی‌اتیلنی استفاده کرده و بر اساس نتایج به دست آمده، بازرسی فراصوت به روش آرایه فازی به صورت موفقیت آمیزی سه عیب متداول این اتصالات را با دقت بالا شناسایی کرده است.

با توجه به پیشینه پژوهش بیان شده، بازرسی با قابلیت اعتماد بالا در اتصالات پلی‌اتیلنی کماکان با چالش‌های فراوانی روبرو است. پراش موج و افت قابل توجه موج، سبب ابهام در تصاویر و سیگنال‌های بازتابی می‌شود. در این مقاله با استفاده از روش المان محدود، بازرسی اتصالات پلی‌اتیلنی با روش آرایه‌فازی شبیه‌سازی شده و نتایج بازرسی با روش معمول بازتابی مقایسه شد. در کنار آن، اثر افزایش تعداد المان‌های آرایه‌فازی بر بازرسی بررسی شده و نتایج آن به صورت کمی ارائه شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد المان، اگر چه قدرت تشخیص را افزایش می‌دهد، اما پردازش سیگنال را مشکل کرده و احتمال خطا در محاسبات را بالا می‌برد؛ لذا برای کاربردهای مختلف، یک هندسه بهینه با تعداد المان‌های مشخص بر حسب استانداردهای بازرسی انتخاب مناسب‌تری است.

۲- مدل‌سازی

در این مقاله شبیه‌سازی‌ها به دو صورت پالس اکو و آرایه‌فازی انجام شده است. در هر دو شبیه‌سازی از یک مدل مشابه برای لوله پلی‌اتیلنی و کوپلینگ استفاده شده است. از نتایج عدم وابستگی به المان‌بندی نشان داده می‌شود که برای رسیدن به دقت بالا در شبیه‌سازی‌ها نیازمند انتخاب اندازه المان برابر حداقل یک دهم طول موج است. با توجه به اندازه لوله و کوپلینگ، افزایش تعداد المان سبب افزایش حجم محاسبات و

دسته‌هایی چهارتایی تقسیم شدند که در یک دسته پیزوالکتریک‌ها با تقدم یا تاخر زمانی نسبت به پیزوالکتریک‌های دیگر همان دسته تحریک می‌شوند. پس از روشن شدن یک دسته با یک تاخیری پیزوهای دسته بعدی تحریک می‌شوند این روند تا روشن شدن تمام دسته پیزوالکتریک‌ها ادامه پیدا می‌کند. در تحلیل پالس-اکو تنها یک المان از پیزوالکتریک‌ها تحریک شدند. در هر دو دسته مدل ایجاد شده و خواص مواد مشابه هم است. در هر دو دسته تحلیل، تحلیل به صورت دینامیک صریح انجام شده است. زمان تحلیل در تحلیل پالس

اکو برابر $10^{-5} \times 6$ ثانیه و در تحلیل کامل $0.003/0$ ثانیه در نظر گرفته شد. زمان تحلیل به گونه‌ای در نظر گرفته شد که تمام سنسورها، موج مکانیکی ایجاد شده را دریافت کنند. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه بر اثر تحریک پیزوالکتریک‌ها و تداخل موج مکانیکی حاصل از پیزوالکتریک‌های مختلف جواب حاصل از تحلیل به صورت استاتیکی یا دینامیک ضمنی همگرا نمی‌شود. برای تحلیل دینامیک ضمنی از تمام روش‌های پایدار کننده حل که در نرم‌افزار آباکوس امکان استفاده داشت؛ استفاده شد؛ ولی جواب‌ها همگرا نشد. از این‌رو تحلیل به صورت دینامیک صریح در یک مرحله انجام شد. در شبیه‌سازی‌ها به علت اینکه مقادیر جابجایی اعداد کوچکی هستند و برای اینکه خطای ناشی از گرد کردن و استفاده از تحلیل دینامیک صریح اعداد در محاسبات اتفاق نیفتد، شبیه‌سازی با دقت مضاعف^۱ انجام شد. برای اینکه موج مکانیکی اعمالی از دقت مناسبی برخوردار باشد. زمان هر گام حل با توجه به فرکانس ۱MHz برابر 10^{-7} ثانیه در نظر گرفته شد. در قسمت داده‌برداری تعداد داده ۱۰۰۰ داده در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد.

۴- آگوریتیم تاخیر زمانی در مبدل آرایه فازی

از مهم‌ترین مزایای پروب آرایه‌فازی هدایت پرتو موج فراصوت و پایش الکترونیکی محدوده‌ای خاص بدون حرکت دادن پروب است. اساس پایش الکترونیکی تاخیر زمانی مناسب در تحریک هر یک از المان‌های پیزوالکتریک است. تاخیر زمانی با توجه به فاصله‌ی کانونی و نوع پایش مورد نظر برای تمرکز پرتوی منتشر شده به درون قطعه قابل محاسبه است. تنظیم

برای بیان مدل کلونیت نیاز به تعریف تنش برشی بر حسب زمان است. رابطه ۱، بیان کننده این موضوع است [۱۸].

$$\tau(t) = \tau_0(t) + \int_0^t \dot{g}_R(s)\tau_0(t-s)ds \quad (1)$$

در رابطه ۱، $\tau_0(t)$ تنش برشی در زمان صفر است. $\dot{g}_R(s)$ تغییرات ضریب استراحت تنش است. حل رابطه بالا به کمک سری پرونی انجام می‌شود. رابطه ۲، ضریب استراحت تنش در حالت بی‌بعد را بر اساس سری پرونی نشان می‌دهد [۱۸].

$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^N \bar{g}_i^P \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i^G}}\right) \quad (2)$$

در رابطه ۲ \bar{g}_i^P و τ_i^G و $i = 1, 2, \dots, N$ ضرایب ماده است. در نرم‌افزار آباکوس برای تعریف ضرایب پرونی، ضریب \bar{k}_i^P ، ضریب حجمی استراحت است، برای مواد هایپرپوم مثل پلی‌اتیلن مقدار \bar{k}_i^P برابر \bar{g}_i^P است.

جدول ۱ خصوصیات مواد مورد نیاز برای شبیه‌سازی شامل خواص پلی‌اتیلن بر اساس مدل مذکور و نیز خواص سیم مسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص مواد اعمال شده در شبیه‌سازی

جنس	چگالی kg m ³	ضریب کشسانی (GPa)	نسبت پواسان	\bar{k}_i^P	τ_i^G
پلی‌اتیلن [۱۹]	۹۴۲	۱۱۲۶۷۶	۰/۴	۰/۵۶۴	۴۳۴
(PE100)		۱			۸
مس [۲۰]	۸۹۶۰	۱۲۸	۰/۳۳	-	-

۳- نوع تحلیل

در این مقاله برای دو نوع بازرسی پالس اکو و آرایه فازی شبیه‌سازی‌هایی انجام شد. با توجه به اینکه باید اندازه المان‌ها حداکثر یک‌دهم طول موج ارسالی باشد و این سبب افزایش قابل توجه تعداد المان‌ها می‌شود، همچنین با توجه به شرایط مسئله تحلیل به صورت دوبعدی با فرض کرنش صفحه‌ای انجام شد. در تحریک به صورت آرایه‌فازی پیزوالکتریک‌ها به

^۱ Double precision

در همه راستاها مقید شد. بین مرز سیم مسی و کوپلینگ تماس در نظر گرفته شد. تماس از نوع عمومی صریح تعریف شد. تماس به صورت تماس سخت و با در نظر گرفتن اجازه جدایش به دو سطح بعد از تماس تعریف شد. در تماس به صورت سخت اجازه نفوذ دو قطعه در هم داده نمی‌شود. با توجه به شرایط مسئله از اصطکاک صرف نظر شد.

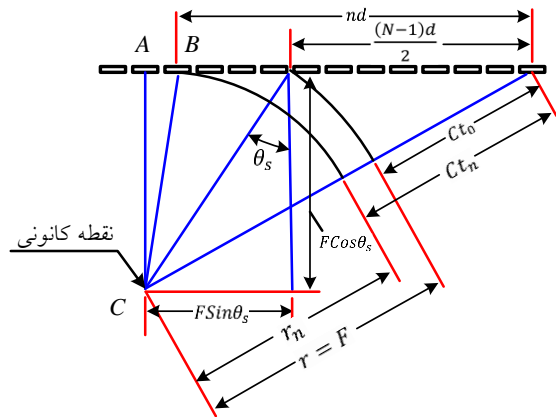
در شبیه‌سازی آرایه فازی پیزوالکتریک‌ها به دسته‌های ۴ تایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در هر دسته پیزوالکتریک‌ها با تاخیر یا تقدم زمانی نسبت به هم تحریک می‌شوند. از آنجا که از مدل کردن پیزوالکتریک‌ها صرف نظر شده است، تحریک به صورت جایجایی گره در راستای عمودی بر اساس شکل موج مشخص شده اتفاق می‌افتد. شرط مرزی اعمال ارتعاشات در دو دسته شبیه‌سازی پالس اکو و آرایه فازی تفاوت‌هایی دارد. پالس اکو روی پیزوالکتریک شماره ۸ (پیزوالکتریک میانی پروب)، پالس تحریک گذاشته شد. نوع پالس تحریک مشابه پالس نوع تون‌برست است. تابع تحریک مطابق رابطه ۴ در نظر گرفته شد. در این رابطه، N تعداد سیکل کسینوس و f فرکانس پیزوالکتریک است. در این مقاله N برابر ۳ و فرکانس تحریک برابر ۱ MHz است.

$$Y(t) = \begin{cases} \cos(2\pi ft) \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{N}\right) \right] & 0 \leq t \leq \frac{N}{f} \\ 0 & t \geq \frac{N}{f} \end{cases} \quad (4)$$

۶- المان بندی

برای المان‌بندی از المان چهار گره‌ای $CPEAR$ مرتبه اول خطی استفاده شد. برای المان استفاده شده از روش انتگرال کاهش یافته استفاده شده است. برای انتخاب اندازه المان، اندازه المان به صورت کسری از اندازه طول موج در نظر گرفته شد. ابتدا اندازه المان برابر λ در نظر گرفته شد با روش نصف کردن اندازه المان کوچکتر در نظر گرفته شد. نحوه توزیع موج مکانیکی در قطعه و انرژی کرنش به عنوان نتایج مهم شبیه‌سازی است. نهایتاً مشخص شد که هنگامی که اندازه المان یک دهم طول موج است، نحوه انتشار موج و دقت نتایج قابل قبول است. هنگامی که اندازه المان بزرگ است، موج مکانیکی در قطعه منتشر نمی‌شود. از این اتفاق استفاده شد و در ناحیه‌ای که به عنوان جاذب موج مکانیکی در نظر گرفته شده، اندازه المان بزرگ‌تر از یک دهم در نظر گرفته شده است. پس از در نظر

تاخیرهای زمانی به تعداد و قطر المان‌ها، فاصله کانونی، سرعت موج صوتی و زاویه تابش موج وابسته است. در رابطه تاخیر زمانی (رابطه ۳) F بیانگر فاصله کانونی، C سرعت موج صوتی، d قطر المان‌ها، n شماره المان‌ها، N تعداد المان‌ها و θ_s زاویه تابش (وابسته به نقطه‌ی تمرکز) است. شکل ۲ نحوه محاسبه تاخیر زمانی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تاخیر زمانی مبدل آرایه فازی [۲۱]

با توجه به شکل برای به دست آوردن t_n از فاصله‌ی دو پیزوالکتریک متوالی و فاصله‌ی کانونی پروب (فاصله‌ی مرکز پروب تا نقطه‌ی هدف) استفاده می‌شود؛ لذا مثلث قائم الزاویه‌ای با اضلاع $F \cos \theta_s$ و $F \sin \theta_s$ ترسیم می‌گردد. که از اضلاع این مثلث برای بدست آوردن طول وتر مثلث قائم الزاویه ABC استفاده می‌شود. اختلاف میان ct_0 و ct_n برابر تفاضل فاصله کانونی از BC است. بدین ترتیب مقدار تاخیر زمانی قابل محاسبه است. این مقدار در رابطه ۳ ارائه شده است [۲۱].

$$t_n = \frac{F}{c} \left(1 \mp \left(\sqrt{1 + (A^2 - B)} \right) \right) + t_0 \quad (3)$$

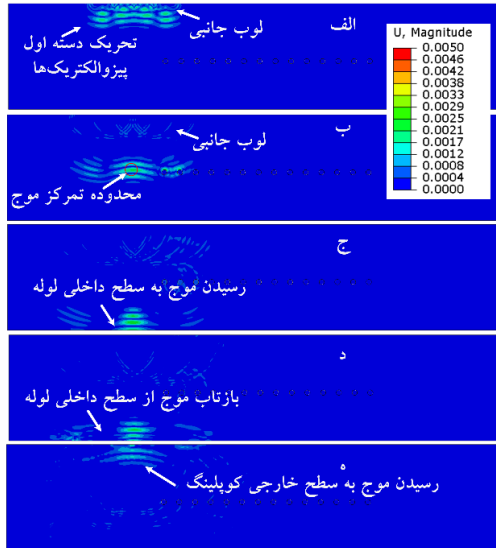
$$A = \left(\frac{d}{F} \left(n - \frac{(N-1)}{2} \right) \right)$$

$$B = \frac{2d}{F} \sin \theta_s \left(n - \frac{(N-1)}{2} \right)$$

۵- شرایط مرزی

دو شبیه‌سازی پالس اکو و آرایه فازی در تعدادی از شرایط مرزی مشابه هم هستند. مرز پیرامونی ناحیه جاذب ارتعاشات

مراحل انتشار موج در بازرسی آرایه فازی برای تحریک دسته اول پیزوالکتریک‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. تداخل سازنده امواج در این شکل به وضوح مشخص است. وجود این تداخل سازنده سبب افزایش دامنه بازتاب امواج از عیوب، سیم‌ها و کف شده و قابلیت اعتماد بازرسی را بالا می‌برد.



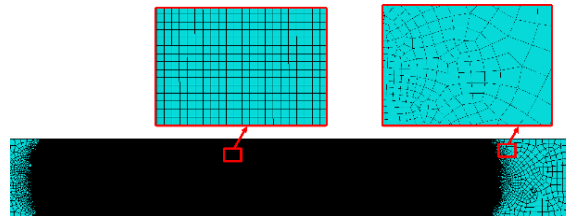
شکل ۶- مراحل بازرسی آرایه فازی در لحظات الف) تحریک پیزوالکتریک‌های دسته اول ب) رسیدن به ناحیه تمرکز موج ج) رسیدن موج به سطح داخلی لوله د) بازتاب موج از سطح داخلی لوله ه) رسیدن موج به سطح خارجی کویلینگ

شکل ۶- مراحل بازرسی آرایه فازی در لحظات الف) تحریک پیزوالکتریک‌های دسته اول ب) رسیدن به ناحیه تمرکز موج ج) رسیدن موج به سطح داخلی لوله د) بازتاب موج از سطح داخلی لوله ه) رسیدن موج به سطح خارجی کویلینگ

با مقایسه مقدار جابجایی در نقطه تمرکز موج که در شکل ۶ مشخص شده با مقدار جابجایی در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در حالتی که از روش پالس اکو با یک المان استفاده می‌شود مقدار جابجایی بیشینه در روی سیم مسی برابر 0.14 mm است، در صورتی که در روش آرایه فازی فقط با تحریک با چهار المان ابتدایی پیزوالکتریک‌ها برابر 0.328 mm است که افزایش ۱۳۴ درصدی در مقدار جابجایی روی سیم مسی را نشان می‌دهد. با توجه به میرایی بالای پلی‌اتیلن این مقدار افزایش می‌تواند در پیش‌بینی بهتر عیوب موثر باشد. از طرفی این تقویت موج سبب می‌شود که مقدار تداخل نامطلوب افزایش یابد. یکی از روش‌هایی که می‌تواند در کاهش این تداخل‌ها کمک کند، ایجاد فاصله زمانی بین پالس تحریک دسته‌های پیزوالکتریک است.

شکل ۷ تا شکل ۹ جابجایی در راستای ۷ را برای سنسور شماره ۱، ۴ و ۱۶ را نشان می‌دهد. شماره‌گذاری پیزوالکتریک‌ها و

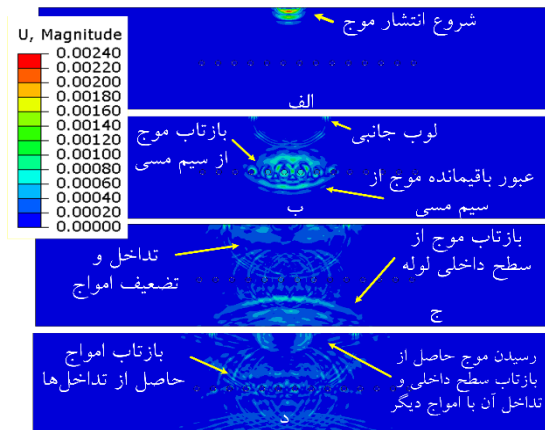
گرفتن عدم وابستگی به مش‌بندی المان‌ها به تعداد ۲۵۰۰۰۰ لحاظ شد. شکل ۳ مدل المان‌بندی شده را نشان می‌دهد.



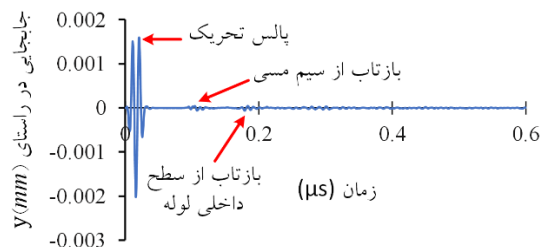
شکل ۳- مدل المان‌بندی شده

۷- نتایج و بحث

شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی بازرسی اتصال به روش پالس اکو را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، به دلیل افت و تفرق قابل ملاحظه در پلی‌اتیلن، اکوی بازگشتی بسیار ضعیف بوده و بازرسی را با خطا مواجه می‌کند. بازگشتی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- مراحل بازرسی پالس اکو در زمان‌های الف) ۰/۸ (ب) ۷/۲ ج) ۱۲ (د) ۱۴/۴ میکرو ثانیه



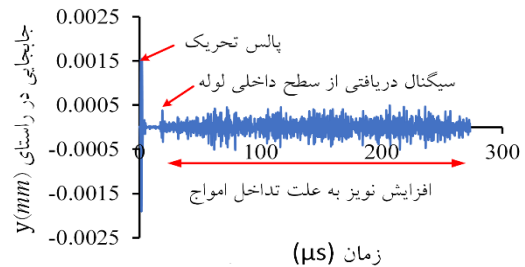
شکل ۵- شکل سیگنال بازرسی پالس اکو

همانطور که در قسمت پیشین بیان شد. شبیه‌سازی‌ها در ادامه به این صورت انجام شد که در هر شبیه‌سازی تنها یک دسته پیزوالکتریک تحریک شدند. برای اینکه بتوان داده‌ها را تحلیل نتایج کرد باید تشخیص داد که سیگنال دریافتی مربوط به سطح داخلی لوله یا سیم مسی یا عیب است. برای این منظور برای شناسایی یک سیگنال بدون عیب و کامل شبیه‌سازی‌هایی با وجود کوپلینگ، لوله و سیم مسی انجام شد. برای شناسایی سیگنال ناشی از سطح داخلی لوله شبیه‌سازی‌هایی با وجود کوپلینگ، لوله و بدون عیب و سیم مسی انجام شد. برای شناسایی عیب شبیه‌سازی‌های کامل با در نظر گرفتن لوله، کوپلینگ سیم مسی و وجود عیب انجام شد. عیب به صورت حفره و اطراف سیم مسی شماره ۳ ایجاد شده است. شماره گذاری سیم‌ها نیز از سمت چپ انجام شده است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی‌های انجام شده در هر شبیه‌سازی تنها یک دسته پیزوالکتریک تحریک می‌شود و سیزده دسته پیزوالکتریک در مدل وجود دارد برای بررسی انواع شبیه‌سازی توضیح داده شده در بالا ۵۲ شبیه‌سازی انجام شد که در ادامه خلاصه‌ای از نتایج آن به صورت نمودارهایی ارائه شده است. در شکل ۱۰ نتایج چهار نمونه تحلیل به صورت جابجایی در راستای ۷ بر حسب میلی‌متر برای سنسور شماره ۱ در تحریک دسته اول پیزوالکتریک‌ها داده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود و انتظار می‌رود، هیچ بازگشتی از سیم یا عیب مشاهده نمی‌شود. باید توجه داشت که در مدل ایجاد شده در زیر دسته اول پیزوالکتریک‌ها سیم یا عیبی وجود ندارد.

شکل ۱۱ جابجایی در راستای ۷ بر حسب میلی‌متر برای سنسور شماره ۳ در تحریک دسته اول پیزوالکتریک‌ها را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به سیم مسی مقدار سیگنال دریافتی در محدوده مشخص شده در شکل ۱۱ مشهود است. البته با توجه به اینکه سیم در نقطه تمرکز موج برای پیزوالکتریک دسته اول نیست، دامنه دریافتی در محدوده مشخص شده کوچک است.

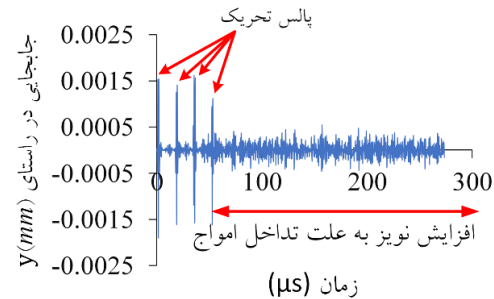
همانطور که پیشتر بیان شد، در روش آرایه‌فازی برای تقویت سیگنال دریافتی از روش جمع سیگنال دریافتی مجموعه سنسورهای بیننده عیب استفاده می‌شود و با استفاده از فیلتر الکترونیکی نویز موجود در سیگنال دریافتی حذف می‌شود. از طرفی در تحریک پیزوالکتریک در یک دسته به علت متفاوت بودن مسیر پیموده شده، یک اختلاف زمانی در دریافت

سنسورها به ترتیب از سمت چپ پروب آرایه انجام شده است. در شبیه‌سازی ۱۶ دریافت کننده موج تعریف شده است که از بین این ۱۶ عدد، ۳ سنسور انتخاب شد. برای بقیه دریافت کننده‌های موج نیز روند به همین صورت است؛ از این رو از آوردن بقیه خودداری شد. همانطور که مشاهده می‌شود، در سنسور شماره یک سیگنال دریافتی از سطح داخلی لوله قابل مشاهده است در صورتی در بقیه دریافت کننده‌ها، به علت تداخل امواج و سیگنال‌های مزاحم، تحلیل سیگنال به راحتی امکان‌پذیر نیست. با توجه نقطه تمرکز در نظر گرفته شده، سنسورهای انتهایی عملاً نقش قابل توجهی در بازرسی ایفا نمی‌کنند.



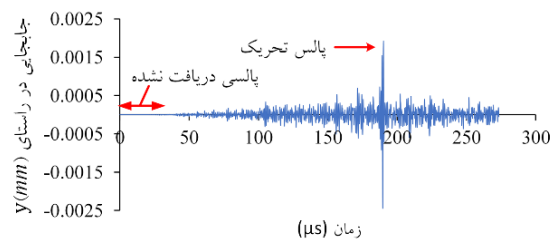
شکل ۷- جابجایی در راستای ۷ بر حسب میلی‌متر برای

سنسور شماره ۱



شکل ۸- جابجایی در راستای ۷ بر حسب میلی‌متر برای

سنسور شماره ۴



شکل ۹- جابجایی در راستای ۷ بر حسب میلی‌متر برای

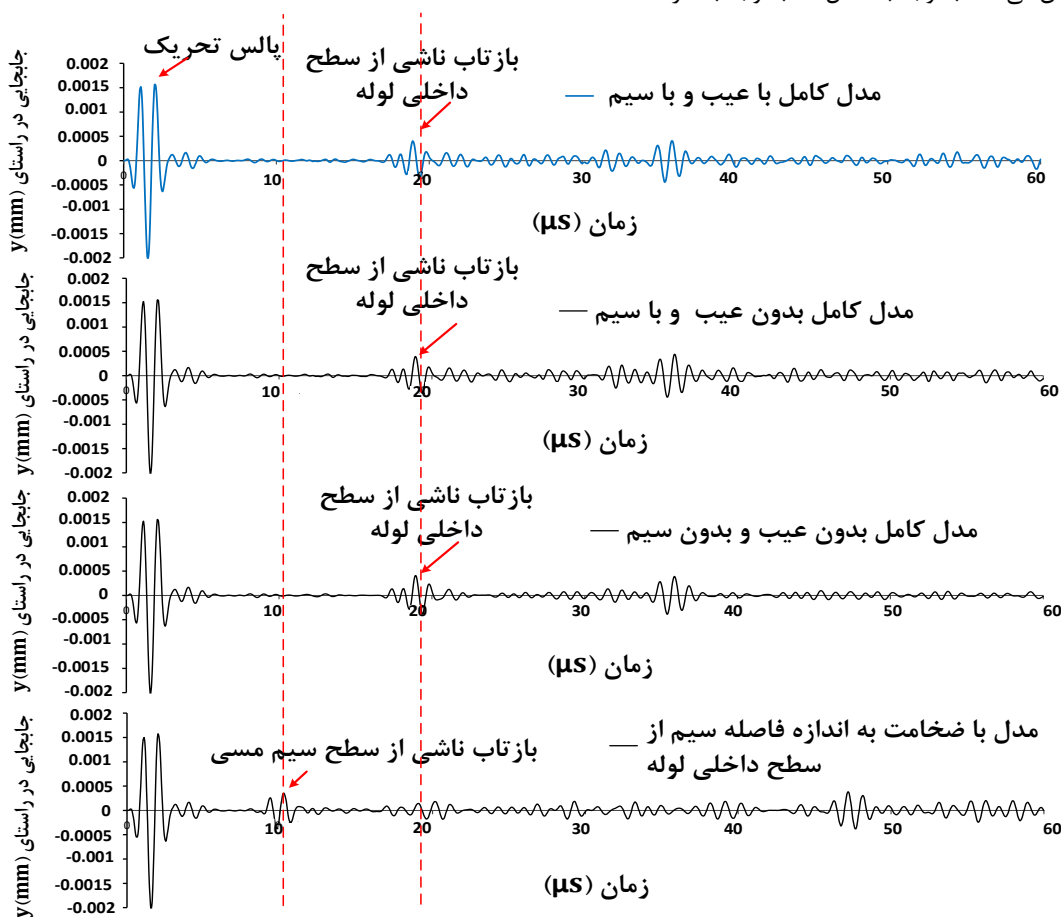
سنسور شماره ۱۶

و اختلاف زمانی نشان داده شده موقعیت عیب برابر $8/67mm$ بدست آمد. با توجه به اینکه موقعیت عیب مدل شده نسبت به سطح خارجی کوپلینگ برابر $8mm$ است خطای محاسبه موقعیت عیب برابر $8/3$ درصد است. خلاصه‌ای از نتایج صحت سنجی در جدول ۲ ارائه شده است

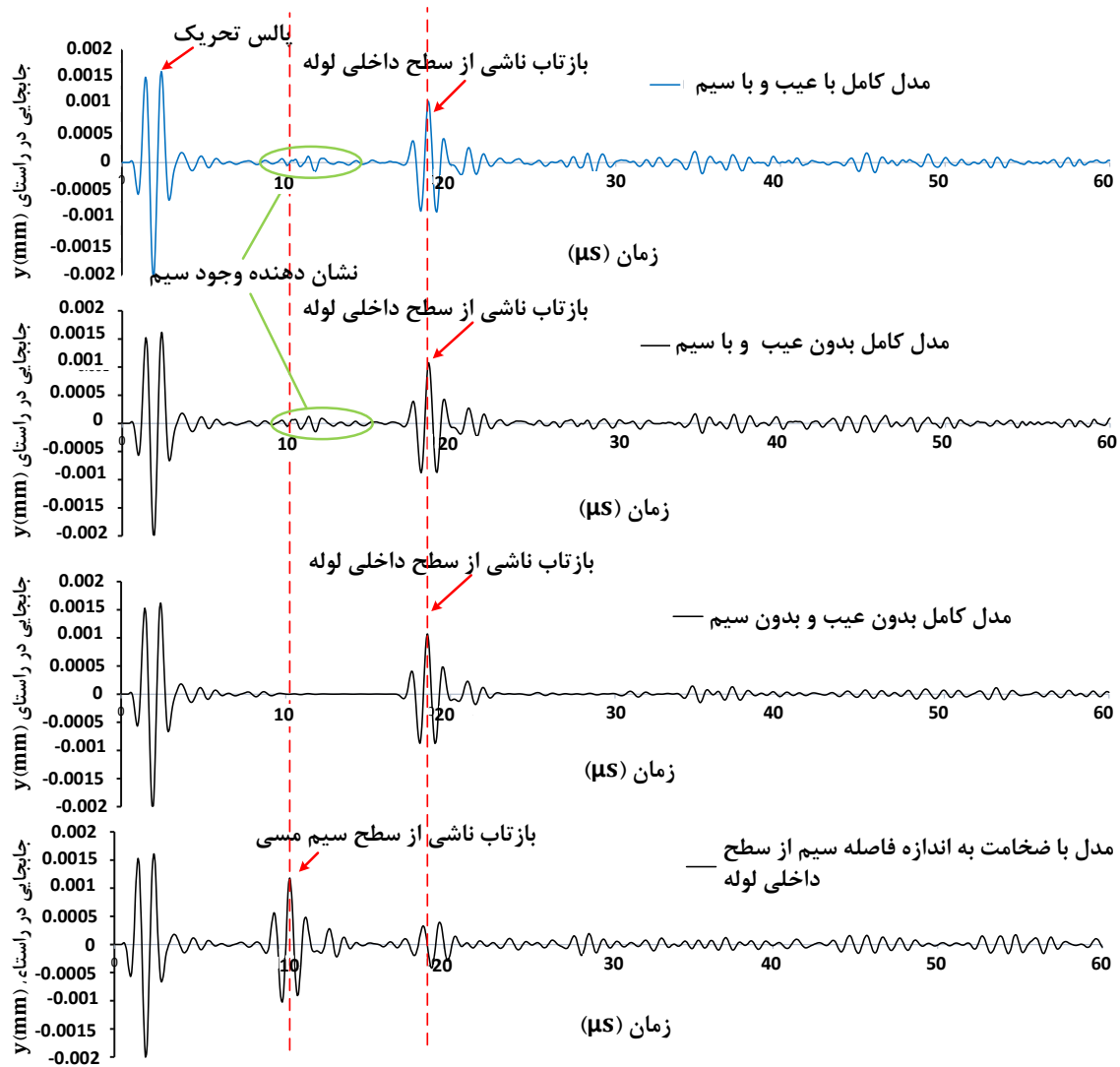
برای مطالعه تاثیر تعداد المان پیزوالکتریک، شبیه‌سازی با روال توضیح داده شده، برای پروب آرایه فازی با ۳۲ و ۶۴ المان انجام شد. شکل ۱۴ و ۱۵ نتایج این شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، افزایش تعداد المان سبب افزایش دامنه سیگنال اکوی برگشتی شده و بدین ترتیب قابلیت اعتماد شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. در عین حال زمان بازرسی افزایش، هزینه پروب و هزینه محاسبات نیز به تبع آن با افزایش تعداد المان بیشتر می‌شود.

سیگنال وجود دارد با محاسبه این اختلاف زمانی که به اندازه اختلاف زمانی در تحریک است، سیگنال‌های دریافتی از لحاظ زمانی منطبق می‌کنند.

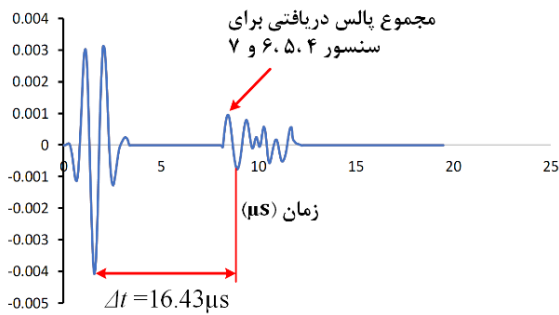
با استفاده از مطلب بیان شده این تطبیق زمانی و جمع آثار برای تحریک دسته اول پیزوالکتریک‌ها و دسته چهارم پیزوالکتریک‌ها انجام شد، در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ به ترتیب برای تحریک دسته اول پیزوالکتریک‌ها و دسته چهارم پیزوالکتریک‌ها نشان داده شده است. موج دریافتی دسته اول پیزوالکتریک‌ها مطابق شکل ۱۲ حاصل از سطح داخلی لوله است. در مدل انجام شده ضخامت برابر $20/2mm$ است با توجه زمان رفت و برگشت موج که برابر $16/43$ میکروثانیه است، سرعت صوت بدست آمده در شبیه‌سازی برابر $2460m/s$ بدست آمد که با سرعت صوت پلی‌اتیلن، اختلاف یک درصد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳ با توجه به سرعت $2460m/s$



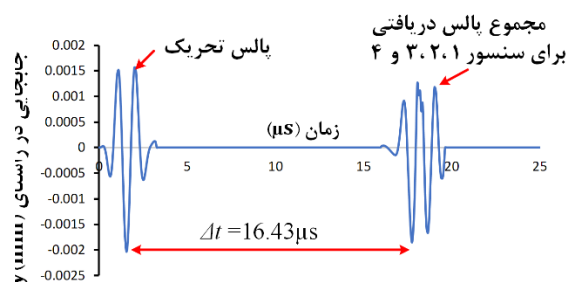
شکل ۱۰- جابجایی در راستای y بر حسب میلی‌متر برای سنسور شماره ۱ در تحریک دسته اول پیزوالکتریک‌ها



شکل ۱۱- جایابی در راستای y بر حسب میلیمتر برای سنسور شماره ۳ در تحریک دسته اول پیزوالکتریک‌ها



شکل ۱۳- جمع آثار برای تحریک دسته چهارم پیزوالکتریک‌ها



شکل ۱۲- جمع آثار برای تحریک دسته اول پیزوالکتریک‌ها

پیزوالکتریک اهمیت زیادی دارد، در صورتی که فاصله زمانی کم (یا نامناسب) انتخاب شود، تداخل موج و به تبع آن نویز زیادی در سیگنال دریافتی به وجود می‌آید. افزایش تعداد پیزوها سبب افزایش بهبود عملکرد پروب و همچنین افزایش تمرکز موج مکانیکی را تا ۱۶۰ درصد برای ۳۲ المان و ۲۷۰ درصد برای ۶۴ المان نسبت به پروبی با ۱۶ پیزوالکتریک به همراه خواهد داشت؛ اما افزایش تعداد المان‌ها باعث افزایش حجم محاسبات و همچنین افزایش هزینه ساخت و پیچیده‌تر شدن سیستم الکتریکی را به همراه خواهد داشت. به نظر می‌رسد، با توجه به استانداردهای بازرسی باید توافقی بین افزایش تعداد المان و همچنین حجم محاسبات در طراحی انجام گیرد.

۹- سپاسگزاری

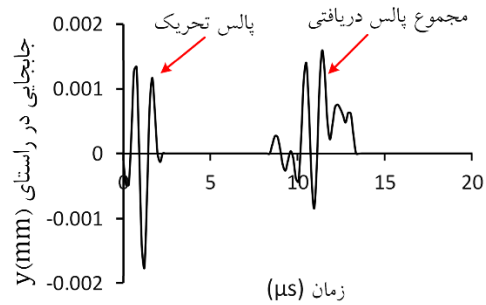
این پژوهش با حمایت و پشتیبانی شرکت گاز استان مرکزی اجرا شده است.

مراجع

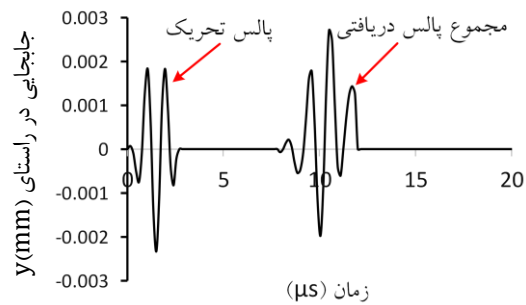
- [1] Maclennan, D., Pettigrew, I. G., & Bird, C. R. (2012, April). Plastic Fantastic?—An NDE inspection solution for HDPE butt welds. In 18 th World Conference in Non-Destructive Testing, Durban, South Africa (pp. 16-20).
- [2] Bowman, J. (1997). A review of the electrofusion joining process for polyethylene pipe systems. *Polymer Engineering & Science*, 37(4), 674-691.
- [3] Hekun, C., Zheng, C., Hong, C., & Yang, F. (2012, April). Ultrasonic phased array inspection on PE pipe heat fusion joints and electr-fusion joints. In 18 th World Conference in Non-Destructive Testing, Durban, South Africa (pp. 16-20).
- [4] Frederick, C., Porter, A., & Zimmerman, D. (2010). High-density polyethylene piping butt-fusion joint examination using ultrasonic phased array. *J. pres. Ves. Tech.*, 132(5).
- [5] Shi, J., Zheng, J., & Guo, W. (2011). Formation mechanism of the eigen-line in electrofusion joints of polyethylene pipes. *J. pres.. ves. Techno.*, 133(5).
- [6] Maclennan, D., Pettigrew, I. G., & Bird, C. R. (2012, April). Plastic Fantastic?—An NDE inspection solution for HDPE butt welds. In 18 th World Conference in Non-Destructive Testing, Durban, South Africa (pp. 16-20).
- [7] Hagglund, F., Robson, M., Troughton, M. J., Spicer, W., & Pinson, I. R. (2014, October). A novel phased array ultrasonic testing (PAUT) system for on-site inspection of welded joints in plastic pipes. In Proceedings of the 11th European Conference on

جدول ۲- صحت سنجی شبیه‌سازی

خطا (%)	تخمین عددی	مقدار	جنس
۱	۲۴۶۰	۲۴۳۴ [۲۲]	سرعت صوت (m/s)
۸/۳	۸/۶۷	۸	موقعیت حفره (mm)



شکل ۱۴- جمع آثار برای پروب با ۳۲ المان پیزوالکتریک



شکل ۱۵- جمع آثار برای پروب با ۶۴ المان پیزوالکتریک

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله یک رویکرد عددی برای ارزیابی روش فراصوت در عیب یابی اتصالات لوله‌های پلی‌اتیلنی به کار گرفته شد. به کمک روش عددی، دو تکنیک پالس-اکو و آرایه‌فازی مطالعه و مقایسه شدند. بر اساس نتایج به دست آمده با خطای حدود ۸ درصد موقعیت عیب توسط روش عددی تخمین زده شد. نتایج نشان داد که به علت میرایی بالای امواج مکانیکی در پلی اتیلن استفاده از روش‌های مرسوم پالس-اکو موج مناسب نیست. با استفاده از روش آرایه‌فازی با ۴ المان پیزوالکتریک در مقایسه با روش پالس اکو مبتنی بر یک المان پیزوالکتریک تا ۱۳۴ درصد افزایش تمرکز موج مکانیکی ایجاد می‌کند. در روش آرایه فازی فاصله زمانی بین تحریک دسته‌های

- [15] Niu, S., Bellala, V., Qureshi, D. A., & Srivastava, V. (2023). A machine learning method to characterize the crack length and position in high-density polyethylene using ultrasound. arXiv preprint arXiv:2304.11497.
- [16] Rao, J., Tao, Y., Sun, Y., Miao, C., & Wang, W. (2023). Detection of defects in highly attenuating materials using ultrasonic least-squares reverse time migration with preconditioned stochastic gradient descent. *Ultrasonics*, 131, 106930.
- [17] Li, Q., Lu, Q., Chen, Y., Su, J., & Yang, J. (2023). Effect of the ultrasonic phased array on defect detection of HDPE electro-fusion joint. In. *J. Phys.: Conference Series* (Vol. 2419, No. 1, p. 012070). IOP Publishing.
- [18] Muñoz-Rojas, P. A., Kühn, A., Mendonça, P. D., Benvenuti, I. J., & Creus, G. J. (2011). Modeling nonlinear viscoelastic behavior of high density polyethylene (HDPE): Application of stress-time equivalence versus interpolation of rheological properties. In III International Symposium on Solid Mechanics.
- [19] Szozi, E. N. (2014). The effect of viscoelastic deformation in pipe cracks on leakage response to variations in pressure (Master's thesis, University of Cape Town).
- [20] Mosavi, S. S., Mazdak, S., Sheykhosslami, M. R., Sajadi, V. S., & Yousefi, P. (2021). The effects of loading path on process parameters in the free tube forming process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. Eng. Manufac.*, 235(12), 1992-2003.
- [21] Azar, L., Shi, Y., & Wooh, S. C. (2000). Beam focusing behavior of linear phased arrays. *NDT & e International*, 33(3), 189-198.
- [22] Qi, G., Li, Y., & Ding, N. (2019, December). Measurement of acoustic basic parameters of polyethylene pipe. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 677, No. 2, p. 022050). IOP Publishing.
- Non-Destructive Testing (ECNDT), Prague, Czech Republic (pp. 6-10).
- [8] Zheng, J., Hou, D., Guo, W., Miao, X., Zhou, Y., & Shi, J. (2016). Ultrasonic inspection of electrofusion joints of large polyethylene pipes in nuclear power plants. *J. Pres. Ves. Tech.*, 138(6).
- [9] Sheng, X., Hou, D., & Zheng, J. (2017, July). Investigation on acoustic propagation of ultrasound in polyethylene pipe used in nuclear power plant. In *Pressure Vessels and Piping Conference* (Vol. 57946, p. V03AT03A049). American Society of Mechanical Engineers.
- [۱۰] یاره پی. (۲۰۱۸). طراحی و مدلسازی آزمون فراصوت آرایه فازی و شبیه سازی انتشار دسته پرتو امواج فراصوتی در ورق فلزی به کمک نرم افزار اجزای محدود آباکوس. *مهندسی مکانیک و ارتعاشات*, ۲۹(۲), ۲۶-۳۳.
- [۱۱] حسام رحمانی، حامد ثابت، مهران روح نیا، ۱۳۹۸، سیستم فراصوتی آرایه فازی را برای بازرسی در محل اتصالات جوش های الکتروفیوژن در لوله های پلی اتیلنی، بیستمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی در دانشگاه شهرکرد.
- [۱۲] فروزش، امین، ولی پور چهارده چریک و یاقوتیان، امین. (۲۰۱۹). شبیه سازی تمرکز امواج آلتراسونیک آرایه فازی به منظور یافتن عیوب در جوش فلزات غیرهمجنس. *مکانیک سازه ها و شاره ها*، ۲۹(۲)، ۹۲-۷۷.
- [13] Miao, C., Qin, Y., Guo, W., An, C., Ling, Z., & Chen, Z. (2019, July). Ultrasonic phased array inspection with water wedge for butt fusion joints of polyethylene pipe. In *Pressure Vessels and Piping Conference* (Vol. 58974, p. V06AT06A030). American Society of Mechanical Engineers.
- [14] Tao, Y. J., Guo, W. C., Miao, C. J., & Shi, J. F. (2020, November). Study on Electrofusion Welding Process Based on Real-time Ultrasonic Phased Array Video Recording. In *2020 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)* (pp. 66-70). IEEE.