

FE-based Ultrasonic Evaluation of HDPE Butt Fusion Joints

Mohammad Taghi Shomalinassab | Sina Sodagar 

Department of Mechanical Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran. E-mail: sodagar@put.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 17 January 2023

Revised 6 February 2023

Accepted 24 Feb. 2023

Keywords:

High Density Polyethylene (HDPE),

Butt fusion, ultrasonic evaluation, dispersion, attenuation.

ABSTRACT

Polyethylene (PE) pipes are widely used in oil and gas industry. Their joints are prone to various flaws e.g., lack of fusion and cold fusion, and are the most problematic part of the pipeline. So, the infrastructure industry requires effective techniques to evaluate the pipes and joints. Butt-fusion (BF) is the most common method of joining PE pipes. Ultrasonic inspections are usually carried out using pulses of finite bandwidth with different frequency components. PE is viscoelastic and its mechanical response at high frequency differs significantly from that of the low frequency. Therefore, when a broadband ultrasound pulse passes through PE pipe, the waveform of the pulse changes as result of attenuation and dispersion of PE. Previously, attenuation was primarily thought of in terms of the reduction of signal amplitude, ultimately limiting the penetration of ultrasound. Actually, one of the major effects of acoustic absorption through PE is wave form distortion. In the present study, with the aim of investigating the possibility of using ultrasonic waves to evaluate HDPE materials and butt fusion of polyethylene pipes, the characteristics and behavior of ultrasonic waves in HDPE materials are studied and researched. For this purpose, the finite element method is used to simulate the propagation of ultrasonic waves in HDPE butt fusion joints. Changes in the wave velocity, and amplitude of the received waves are measured in order to identify the dispersive behavior and attenuation of the waves in HDPE within the effective ultrasonic frequency range of 1-5MHz. Also, by modeling the lack of fusion (LOF) defects embedded in the BF joint with different lengths, the inspection sensitivity, using a 4MHz transducer, for evaluating the LOF defects is evaluated. The numerical results show that the dispersive behavior of longitudinal wave is decreased, as the frequency of transducer increases. Therefore, higher frequency transducers, in the range of 4-5 MHz, can be used for ultrasonic inspection of HDPE butt fusion joints to increase the inspection sensitivity.

Cite this article: Shomalinassab, M. & Sodagar, S. (2023). FE-based Ultrasonic Evaluation of HDPE Butt Fusion Joints. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (2), 16-26. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.390294.1114>

ارزیابی فراصوتی جوش‌های سر به سر BF لوله‌های پلی اتیلن HDPE به روش اجزا محدود

محمدتقی شمالی نسب | سینا سوداگر ✉

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران، رایانامه: sodagar@put.ac.ir

چکیده:

لوله‌های پلی اتیلن و به طور ویژه لوله‌های پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE)، مزیت‌های ویژه‌ای نسبت به سایر مواد برای لوله‌کشی در کاربردهای مختلف دارند. استفاده از این مواد به دلیل عدم دسترسی به یک روش بازرسی غیرمخرب قابل اطمینان، خصوصاً در کاربردهایی، نظیر خطوط لوله گاز، که نیاز به ایمنی بالا دارند، محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند. آزمون‌های فراصوتی یکی از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر، برای ارزیابی لوله‌ها و جوش‌های پلی اتیلن مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. با این وجود، استفاده از این آزمون‌ها به دلیل پیچیدگی رفتار امواج در پلی اتیلن به عنوان یک ماده‌ی پلیمری با چالش‌های فراوانی مواجه شده است. استفاده از امواج فراصوتی برای ارزیابی جوش‌های BF لوله‌های HDPE به دلیل دو عامل استهلاک بالا و پاشندگی انتشار امواج در این مواد با چالش مواجه می‌شود. در پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان استفاده از امواج فراصوتی برای ارزیابی مواد HDPE و جوش‌های سر به سر (Butt Fusion) اتصال لوله‌های پلی اتیلن، مشخصات و رفتار امواج فراصوتی حجمی در مواد HDPE مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است. بدین منظور روش اجزا محدود برای شبیه سازی انتشار امواج فراصوتی در لوله‌های HDPE و اتصالات BF این لوله‌ها به کار گرفته شد. تغییرات سرعت و دامنه‌ی امواج دریافتی جهت شناسایی پاشندگی و استهلاک امواج در HPDE در محدوده‌ی فرکانسی متداول آزمون‌های فراصوتی 1-5MHz اندازه‌گیری شده است. همچنین با مدلسازی عیب عدم ذوب جاسازی شده در جوش BF با طول‌های مختلف، حساسیت آزمون در اندازه‌گیری عیوب موجود در این جوش‌ها ارزیابی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که پاشندگی موج طولی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری عیب عدم ذوب با طول‌های مختلف نشان داد که خطای اندازه‌گیری با استفاده از فرکانس 4MHz، به دلیل کاهش پاشندگی امواج فراصوتی، در محدوده‌ی کمتر از 15% است و حساسیت مناسبی برای ارزیابی اتصال دارد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۰/۲۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۲/۰۵

کلیدواژگان:

آزمون فراصوتی، لوله‌های پلی اتیلن با چگالی بالا، جوش‌های سر به سر، پاشندگی، استهلاک.

استناد: شمالی نسب، محمدتقی و سوداگر، سینا. (۱۴۰۱). ارزیابی فراصوتی جوش‌های سر به سر BF لوله‌های پلی اتیلن HDPE به روش اجزا محدود. مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب، ۳ (۲)، ۱۶-۲۶. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.390294.1114>

۱- مقدمه

مصنوعی سوراخ‌های جانبی^۹ تعبیه شده در جوش‌های BF با اندازه‌های مختلف استفاده کرد. در این پژوهش آزمون‌های انجام شده ToFD در محدوده فرکانس‌های پایین و با استفاده از امواج عرضی به جای امواج طولی انجام شد. با گسترش آزمون فراصوتی آرایه فازی (PAUT) در سال‌های اخیر، استفاده از این تکنولوژی برای بازرسی جوش‌های سر به سر (BF) پلی اتیلن مورد توجه قرار گرفت [۷،۸]. لویجه و همکارانش [۹] امکان استفاده از یادگیری ماشین^{۱۰} (ML) برای بازرسی اتوماتیک فراصوتی جوش‌های BF در لوله‌های PE مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۷ شنگ و همکارانش [۱۰]، انتشار امواج فراصوتی در لوله‌های پلی اتیلن را با استفاده از یک روش تئوری مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه همچنین از آزمایشات طیف سنجی فراصوتی^{۱۱} نیز برای بررسی رفتار موج در HDPE استفاده شد. کین و همکارانش [۱۱]، در سال ۲۰۱۹ با ارائه یک قانون تاخیر توسعه یافته، از تراگذارهای آرایه فازی برای ارزیابی فراصوتی لوله‌های HDPE جدار ضخیم استفاده کردند. در این پژوهش ارزیابی لوله‌های HDPE به صورت آزمایشگاهی با استفاده از تراگذارهای آرایه فازی تا فرکانس 5MHz انجام شد.

در این پژوهش، تاثیر پاشندگی و استهلاک امواج فراصوتی در HDPE در فرکانس‌های مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور از روش اجزا محدود برای مطالعه تاثیر پاشندگی امواج فراصوتی برای تشخیص و اندازه‌گیری عیوب عدم ذوب (LOF) در جوش‌های BF استفاده می‌شود.

۲- جوش سر به سر (BF) پلی اتیلن

جوش‌های BF یکی از متداول‌ترین نوع اتصالات این لوله‌های PE به شمار می‌روند. شکل ۱ را ببینید. اتصال BF پلی اتیلن با استفاده از یک صفحه داغ برای ذوب کردن انتهای دو لوله PE انجام می‌شود. پس از ذوب انتهای دو لوله PE، قسمت‌های ذوب شده برای زمان مشخصی به یکدیگر فشرده می‌شوند. در خلال این فرآیند قسمتی از ماده PE به صورت اضافی بر روی هر دو سطح داخلی و خارجی لوله

لوله‌های پلی اتیلن به دلیل مزیت‌های منحصر به فردی نظیر مقاومت بالا در برابر خوردگی، انعطاف پذیری، وزن پایین و هزینه کم، برای جایگزینی با لوله‌های فولادی پوشش‌دار در کاربردهای مختلف مورد توجه قرار دارند. جوش‌های سر به سر^۱ (BF) یکی از متداول‌ترین نوع اتصالات این لوله‌ها به شمار می‌روند. با این وجود، دسترسی به یک روش قابل اطمینان جهت ارزیابی غیرمخرب این لوله‌ها و اتصالات (جوش‌ها) آنها، که احتمال بالاتری برای وجود عیوب مختلف نظیر عدم ذوب^۲، ذوب سرد^۳ و آخال^۴ دارند، همواره یکی از چالش‌های به کارگیری این لوله‌ها، به ویژه در کاربردهایی نظیر خطوط لوله گاز که نیاز به ایمنی بالایی دارند، بوده است [۱]. آزمون‌های فراصوتی یکی از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر، برای ارزیابی لوله‌ها و جوش‌های پلی اتیلن مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. قابلیت‌ها و گسترش تکنولوژی در آزمون‌های فراصوتی، این آزمون‌ها را به یکی از اصلی‌ترین آزمون‌های غیرمخرب تبدیل کرده است. با این وجود، استفاده از این آزمون‌ها برای ارزیابی لوله‌های پلی اتیلن به دلیل پیچیدگی رفتار امواج فراصوتی در پلی اتیلن، به عنوان یک ماده پلیمری، با چالش‌های فراوانی مواجه است. این چالش‌ها عمدتاً به دلیل استهلاک بالا و پاشندگی امواج در مواد پلیمری ایجاد می‌شوند. در سال‌های اخیر با گسترش استفاده از لوله‌های پلی اتیلن در کاربردهای با حساسیت بالا، پژوهش‌های متعددی برای استفاده از آزمون‌های فراصوتی برای بازرسی این سازه‌ها انجام گرفته است [۲،۳]. تکنیک‌های مختلف آزمون‌های فراصوتی نظیر تدم^۵، زمان پرواز پراش^۶ (ToFD) و استفاده از امواج خزشی^۷ برای تشخیص عیوب لوله‌های پلی اتیلن به کار گرفته شده است [۳-۵]. تقی پور [۶] در سال ۲۰۱۵ در پژوهشی که بر روی جوش‌های سر به سر (BF) لوله‌های HDPE^۸ انجام داد، از آزمون ToFD برای ارزیابی عیوب

¹ butt-fusion

² lack of fusion

³ cold fusion

⁴ inclusion

⁵ tandem

⁶ time-of-flight diffraction

⁷ creeping waves

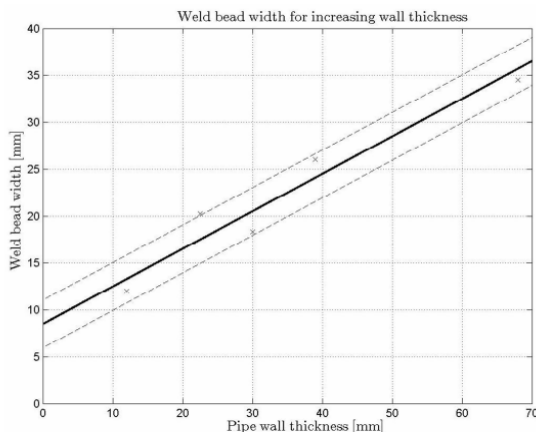
⁸ High-Density Polyethylene

⁹ Side-drilled hole (SDH)

¹⁰ machine learning

¹¹ ultrasonic spectroscopy

در بعضی از کاربردها، مهره جوش را می‌توان پس از فرآیند جوش‌کاری حذف کرد، با این وجود، در بسیاری موارد، خصوصاً کاربردهای صنعتی، مهره جوش حفظ شده و از روی اتصال حذف نخواهد شد. در این پژوهش، اتصالات BF با در نظر گرفتن مهره جوش ارزیابی خواهند شد. در این شرایط علاوه بر مطالعات و بررسی فرکانسی امواج فراصوتی برای ارزیابی عیوب، ملاحظات نظیر موقعیت قرارگیری کفشک و پروب، به ویژه اینکه عرض مهره جوش با توجه به هندسه لوله و فرآیند جوش کاری تغییر می‌کند، در انتخاب پروب و کفشک تاثیر گذار خواهد بود. در شکل ۳ عرض میانگین مهره جوش بر حسب ضخامت لوله ترسیم شده است. لازم به ذکر است که به دلیل وابستگی دو عامل استهلاک و پاشندگی به فاصله طی شده در ماده، علاوه بر فرکانس، موقعیت قرارگیری کفشک-تراگذار در نتایج بدست آمده از آزمون اثر گذار خواهد بود.



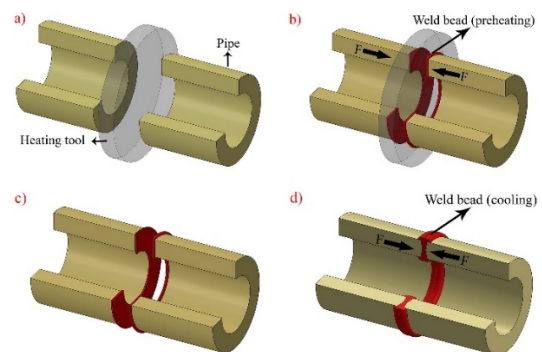
شکل ۳- عرض میانگین مهره جوش بر حسب ضخامت دیواره لوله [۱۳]

۳- استهلاک و پاشندگی امواج فراصوتی در PE
بر خلاف لوله‌های فلزی سنتی، لوله‌های پلی اتیلن رفتار ویسکوالاستیک دارند. رفتار مکانیکی این مواد در فرکانس‌های بالا به طور قابل ملاحظه‌ای با فرکانس‌های پایین متفاوت است. از طرف دیگر، ارزیابی فراصوتی معمولاً با استفاده از پالس‌هایی با پهنای باند محدود با مولفه‌های فرکانسی مختلف انجام می‌شود. برای انتشار موج در چنین

تشکیل می‌شود که مهره جوش^۱ نامیده می‌شود. نمای شماتیک فرآیند جوش BF دو لوله PE به یکدیگر در شکل ۲ نمایش داده شده است. در طی این فرآیند، عیوبی نظیر عدم ذوب، ذوب سرد و آخال از جمله عیوبی هستند که ممکن است به دلیل عدم رعایت شرایط استاندارد فرآیند اتصال، در BF ایجاد شود. یک جوش کاملاً معیوب را می‌توان از طریق بازرسی چشمی^۲ مهره خارجی جوش تشخیص داد. با این وجود، مهره جوشی که سالم به نظر می‌رسد ممکن است دارای عیب باشد.



شکل ۱- اتصال سر به سر (BF) دو لوله PE



شکل ۲- نمای شماتیک فرآیند جوش BF (الف) صفحه داغ بین دو لوله قرار داده می‌شود. (ب) لوله‌ها بین به صفحه داغ فشرده می‌شوند. (ج) صفحه داغ برداشته می‌شود. (د) لوله‌ها با فشار مشخصی برای تشکیل یک اتصال جوش به یکدیگر فشرده می‌شوند [۱۲].

¹ weld bead
² visual inspection

در این رابطه k عدد موج است. بنابراین رابطه پاشندگی را می‌توان به صورت $k = \beta + i\alpha$ نوشت، که در این رابطه

$$\alpha = \frac{\beta_0}{\beta} \alpha_0 |\omega|^\gamma \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \left[1 + 4 \left(\frac{\alpha_0 |\omega|^\gamma}{\beta_0} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

به طوری که $\beta_0 = \omega/c_0$

۴- مدل‌سازی اجزا محدود

برای بررسی مشخصات انتشار موج در لوله PE از روش صریح^۷ المان محدود در محیط نرم افزار اباکوس^۸ جهت شبیه‌سازی انتشار امواج الاستیک منتشر شده از تراگذار فراصوتی استفاده شده است. ساختار هندسی آزمون، همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، شامل یک لوله پلی اتیلن (HDPE) و دو تراگذار-کفشک فراصوتی در دو طرف مهره جوش BF است. ضخامت جداره لوله PE برابر 20 mm است. جهت ارسال زاویه‌ای موج به درون قطعه از یک کفشک پلکسی گلاس استفاده شده است. همانگونه که شکل ۵ نشان داده است، به منظور مدل‌سازی المان محدود ساختار ارزیابی فراصوت جوش BF لوله PE در محل آزمون، از المان کرنش صفحه‌ای چهار گره‌ای CPE4R برای مدل‌سازی اتصال دو لوله HDPE با ضخامت 20 mm و کفشک پلکسی گلاس استفاده شده است. تحریک ناشی از المان فعال پیزوالکتریک تراگذار نرمال^۹ بصورت فشار اعمالی بر سطح مایل کفشک پلکسی گلاس در محل قرارگیری تراگذار بر روی کفشک و با استفاده از تابع هنینگ^{۱۰} در فاصله زمانی اعمال پالس تحریک به صفحه پیزوالکتریک شبیه‌سازی شده است. در شکل ۵ الف شماتیک هندسه اتصال BF مورد آزمون و چگونگی قرارگیری تراگذارهای فراصوتی فرستنده و گیرنده بر روی قطعه و در شکل ۵ ب ساختار المان بندی مدل اجزا محدود نشان داده شده است.

محیطی، با افزایش فاصله طی شده توسط موج، انرژی کاهش می‌یابد. این رفتار استهلاک آکوستیک^۱ نامیده می‌شود. همچنین، مولفه‌های فرکانسی متفاوت با سرعت‌های متفاوتی حرکت می‌کنند که موجب اعوجاج شکل موج^۲ می‌شود، که پاشندگی آکوستیک^۳ نامیده می‌شود. بنابراین هنگامی که یک پالس فراصوت پهن باند از یک لوله PE عبور می‌کند، شکل موج پالس تحت تاثیر استهلاک و پاشندگی موج در PE تغییر می‌کند. در بسیاری از تحقیقات اولیه، محدود شدن نفوذ امواج فراصوتی در PE به کاهش دامنه موج ناشی از تضعیف موج در عبور از PE مرتبط می‌شد. در حالی که، در عمل، یکی از اثرات مهم جذب آکوستیک^۴ در PE تغییر شکل موج در عبور از ماده است. لوله‌های پلی اتیلنی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند به صورت همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده‌اند. با تحریک پالس فراصوتی متداول برای کاربردهای NDE، امواج به صورت تغییر شکل‌های بسیار کوچک در پلی اتیلن منتشر شده و می‌توان آنها را در محدوده ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفت. استهلاک امواج آکوستیک در انتشار در یک محیط با اتلاف بالا^۵ به صورت تابع نمایی از فرکانس به صورت معادله زیر تغییر می‌کند [۱۰]:

$$\alpha(\omega) = \alpha_0 |\omega|^\gamma \quad (1)$$

به طوری که ω فرکانس زاویه‌ای بر حسب MHz، α_0 ضریب استهلاک بر حسب Neper/(cm. MHz) و γ یک ثابت غیرمنفی است. مقدار این پارامتر در بازه $1 < \gamma < 2$ قرار دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد برای PE این پارامتر برابر ۱ است ($\gamma = 1$)، یعنی برای PE استهلاک، α رابطه خطی با فرکانس ω دارد [۱۰]. زاویه^۶ [۱۴] بر اساس مقایسه معادله موج آکوستیک و معادله موج الکترومغناطیس، یک رابطه عمومی برای پاشندگی به صورت پیشنهاد کرد:

$$k^2 = (\omega/c_0)^2 + 2i(\omega/c_0)(\alpha_0 |\omega|^\gamma) \quad (2)$$

¹ acoustic attenuation

² waveform distortion

³ acoustic distortion

⁴ acoustic absorption

⁵ lossy media

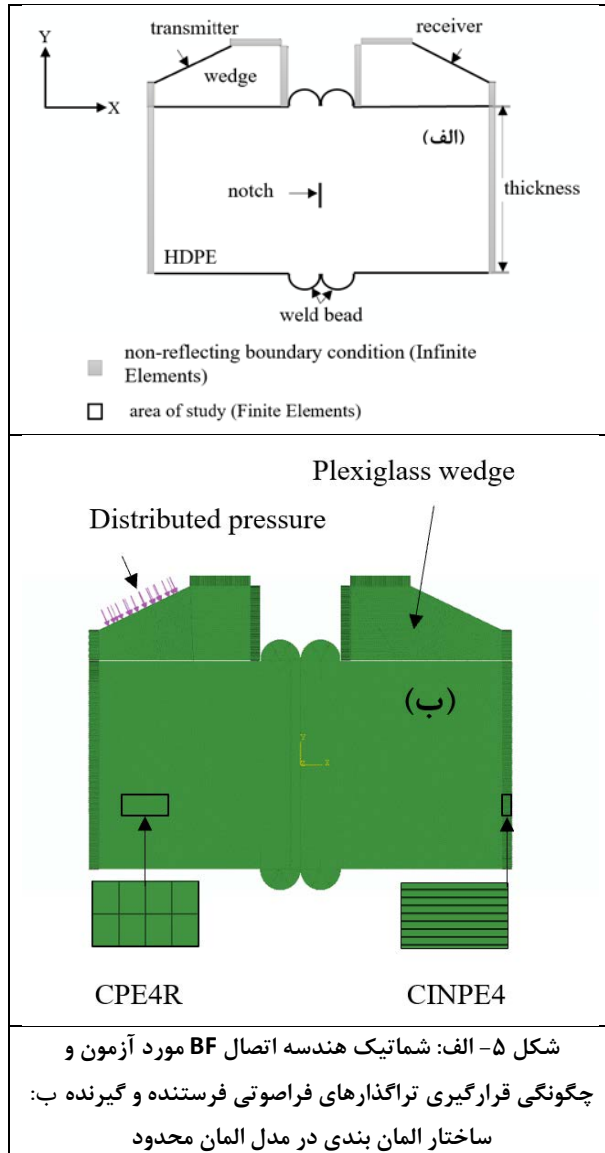
⁶ Szabo

⁷ explicit method

⁸ ABAQUS/Explicit

⁹ normal transducer

¹⁰ Hanning function



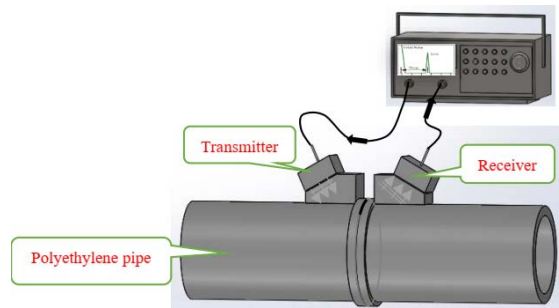
برای بررسی همگرایی با استفاده از مشخصاتی که پیش‌تر برای مدلسازی المان محدود مسئله بیان شد، تحریکی با فرکانس میانی 5 MHz و تعداد سیکل $N = 2$ به سطح قطعه مورد آزمون اعمال گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود، نسبت به دامنه سیگنال به نویز با کاهش اندازه المانها در مدل المان محدود بررسی شده است. تغییرات پارامتر نسبت سیگنال به نویز^۱ (SNR) بر حسب اندازه المان در المانهایی با اندازه‌های کوچکتر از $40 \mu\text{m}$ همگرا می‌شود. در جدول ۱ مشخصات آکوستیک و الاستیک مواد مورد آزمون ارائه شده است.

^۱Signal-to-Noise ratio

همچنین به منظور حذف تاثیر نویزهای ناشی از بازتابش و تبدیل مود امواج از دیواره‌های مدل المان محدود جوش BF و دیواره‌های کفشک پلکسی گلاس از المانهای نامحدود CINPE4R در دیواره‌های مرزی استفاده شده است. چگونگی استفاده از المانهای محدود و المانهای نامحدود در سیستم اندازه‌گیری در شکل ۵ نشان داده شده است. در روش صریح المان محدود برای اطمینان از پایداری نتایج تحلیل، حد پایداری گام زمانی انتگرال‌گیری به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۵]:

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \Delta l / C_L \quad (5)$$

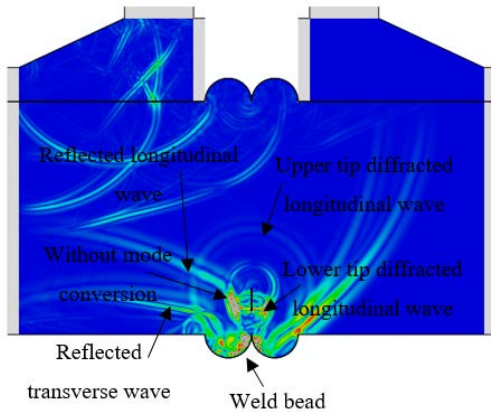
بطوریکه Δl بیانگر کوچک‌ترین اندازه‌ی المانها و C_L معرف سرعت موج طولی است. همچنین به منظور اطمینان از همگرایی نتایج المان محدود، اندازه المانها، Δd ، بر حسب کوچکترین طول موج منتشر شده در فرکانس تحریک، λ_{min} ، برابر $\Delta d \leq \lambda_{min} / 36$ پیشنهاد می‌شود.



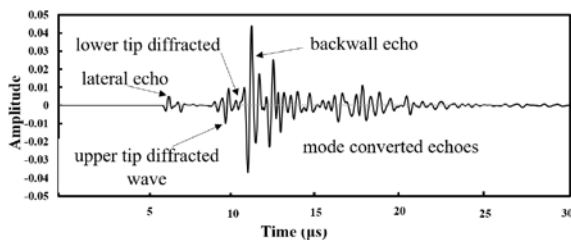
شکل ۴- شماتیک ساختار سیستم ارزیابی فراصوتی BF در یک لوله HDPE

بررسی همگرایی و پایداری نتایج تحلیل، بازه فرکانسی تراگذار فراصوتی در دو فرکانس مرکزی 4 MHz و 5 MHz انجام شده است. پالس فراصوتی و طیف فرکانسی حاصل از تراگذارهای 4 MHz در شکل ۶ نشان داده شده است.

انتشار امواج فراصوتی ارسالی از یک تراگذار فرستنده 4MHz نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود علاوه بر بازتابش امواج از سطح پایینی قطعه، پراکندگی امواج از لبه‌های بالایی و پایینی عیب، بازتابش قابل ملاحظه‌ای از ساختار مهره جوش در قسمت پایین ضخامت لوله (درون لوله) رخ می‌دهد که با توجه به ضخامت کم مهره جوش عملاً امکان تداخل این امواج با امواج بازتابیده شده از عیب نیز وجود دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که بازتابش امواج از مهره جوش موجب تاثیر مجدد این امواج بر عیب در مجاورت مهره جوش شده است. در شکل ۸ سیگنال زمانی دریافتی توسط تراگذار گیرنده نشان داده شده است.

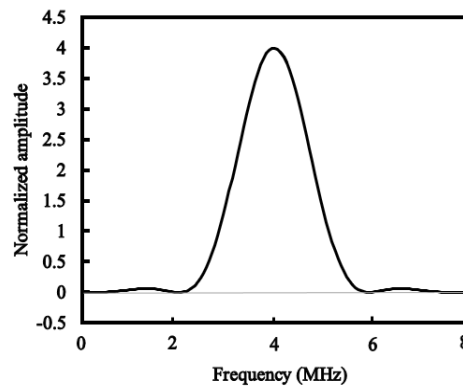
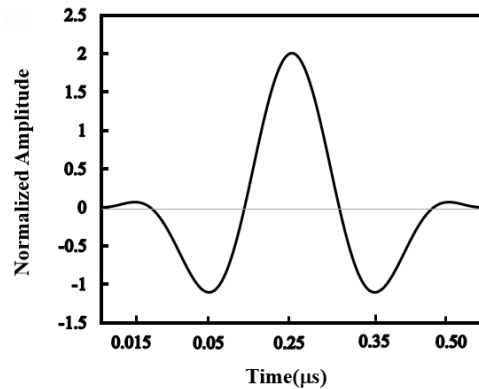


شکل ۷- تاثیر تابش امواج بر عیب موجود در جوش سر به سر HDPE دو لوله BF



شکل ۸- سیگنال زمانی دریافتی برای ارزیابی اتصال PE با استفاده از تراگذار فراصوتی 4MHz

۵-۱ تاثیر فرکانس بر پاشندگی امواج فراصوتی در HDPE همانگونه که پیشتر بیان شد، دو عامل استهلاک امواج و پاشندگی امواج فراصوتی در مواد PE، به عنوان یک ماده



شکل ۶- پالس ارسالی از تراگذار 4 MHz (الف) سیگنال زمانی، (ب) طیف فرکانسی

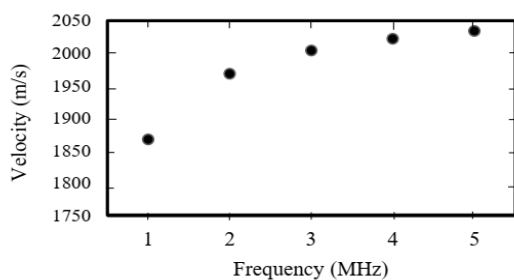
جدول ۱- مشخصات آکوستیک و ثوابت الاستیک مواد [۱۶،۱۷]

ماده	سرعت موج طولی (m/s)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m ³)
HDPE	-	0.45	1.1	948
Plexiglass	2730	0.35	9	1180

۵- نتایج و بحث

برای مطالعه چگونگی تاثیر امواج فراصوتی بر عیوب در جوش سر به سر BF، ساختار آزمون برای مقطعی از دو لوله HDPE با ضخامت 20 mm مدلسازی شده است. یک عیب عدم ذوب با طول 2mm قسمت میانی BF قرار داده شده است. برای ارسال زاویه‌ای امواج، تراگذار فراصوتی فرستنده بر روی یک کفشک 45° قرار داده شده و یک تراگذار گیرنده در سمت مقابل اتصال BF برای دریافت امواج بازتابی و پراکندگی از درون قطعه جایگذاری شده است. در شکل ۷

PE بر حسب فرکانس مرکزی ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود سرعت موج طولی در فرکانس مرکزی 1MHz حدود 1870m/s می‌باشد که با افزایش فرکانس تا 5MHz تا حدود 2030m/s افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان دید که نرخ افزایش سرعت با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد، به طوری که تغییرات سرعت موج از فرکانس 4MHz تا 5MHz تقریباً همگرا شده است.



شکل ۹- سرعت موج طولی اندازه‌گیری شده بر حسب فرکانس مرکزی موج تابشی

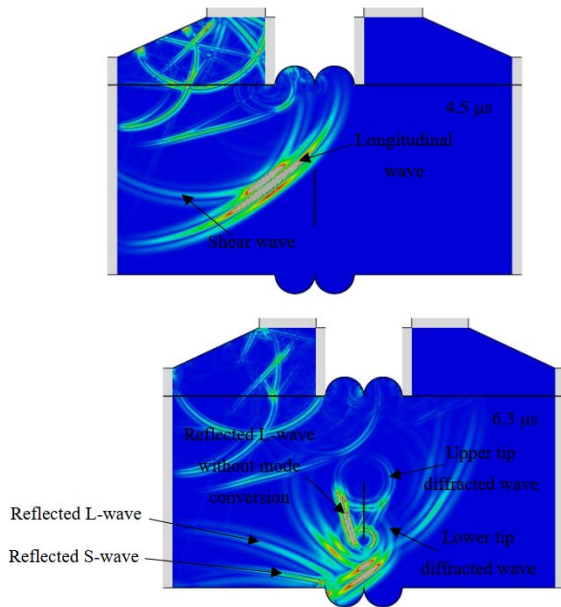
در شکل ۱۰ تغییرات دامنه موج دریافتی بر حسب فرکانس مرکزی موج ارسالی نمایش شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش فرکانس از 1MHz به 2MHz دامنه موج ابتدا اندکی افزایش یافته و سپس با افزایش فرکانس تا 5MHz کاهش یافته است. همچنین روند تغییرات دامنه موج دریافتی نشان می‌دهد نرخ کاهش دامنه در فرکانس‌های بالاتر، 4MHz و 5MHz، نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر کاهش پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان انتظار داشت در استفاده از امواج فراصوتی برای ارزیابی عیوب جوش‌های BF، علاوه بر کاهش دامنه موج بر اثر پدیده استهلاک، پاشندگی رفتار موج نیز بر حساسیت آزمون موثر خواهد بود. همچنین با توجه به همگرا شدن سرعت موج در فرکانس‌های بالاتر انتظار می‌رود تاثیر این پاشندگی در محدوده فرکانس‌های بالاتر 4-5 MHz کاهش یابد. در حالی که در محدوده فرکانس‌های پایین‌تر اگر چه به دلیل پایین‌تر بودن استهلاک موج، دامنه موج دریافتی بالاتر است، با این وجود، شدیدتر بودن پاشندگی موج می‌تواند خطای اندازه‌گیری در ارزیابی را افزایش دهد. لازم به ذکر است که در آزمون‌های فراصوتی، حتی در مواردی که انتشار موج در ماده پاشندگی ندارد، انتظار می‌رود فرکانس پایین موجب

پلمیری، چالش‌هایی را در استفاده از این امواج برای ارزیابی اتصالات PE ایجاد می‌کند. پژوهش‌ها و مطالعات انجام شده نشان داده است که تاثیر استهلاک امواج بر ارزیابی اتصال را می‌توان با تقویت انرژی و دامنه امواج فراصوت ارسالی به میزان قابل توجهی کاهش داد. آزمون‌های متعدد آزمایشگاهی نشان داده است، با تقویت انرژی ارسالی در استفاده از تراگذارهای سنتی [۱۲] و آرایه فازی [۱۰]، علاوه بر فرکانس‌های پایین 1-2MHz، در محدوده فرکانس‌های بالاتر 4-5 MHz نیز می‌توان از امواج فراصوتی در مواد پلی اتیلن استفاده کرد. با این وجود، همانگونه که پیشتر بیان شد، علاوه بر استهلاک امواج در PE، پاشندگی امواج فراصوتی در PE نیز بر امواج فراصوتی تاثیر گذاشته و نتایج حاصل از آزمون‌های فراصوتی در این مواد را تحت تاثیر قرار خواهد داد. برای مطالعه این رفتار و چگونگی تاثیر آن بر مشخصات امواج فراصوتی در ارزیابی اتصالات PE، از پنج تراگذار فراصوتی با فرکانس‌های مرکزی 1MHz تا 5MHz برای اندازه‌گیری مشخصات امواج دریافت شده توسط تراگذار گیرنده استفاده شده است. به منظور بررسی پاشندگی موج در اتصال BF، با استفاده از اکوی بازتابش دریافتی از دیواره پشتی جوش در سیگنال دریافتی توسط تراگذار گیرنده، سرعت و دامنه موج طولی در عبور از جوش BF لوله HDPE در فرکانس‌های 1MHz، 2MHz، 3MHz، 4MHz و 5MHz اندازه‌گیری و محاسبه شده است. سرعت موج طولی در این فرکانس‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

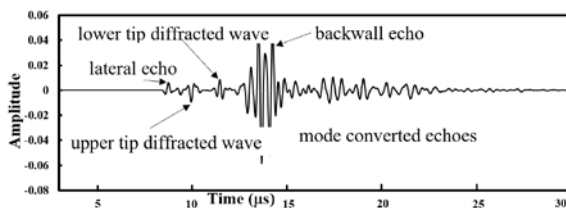
جدول ۲- سرعت و دامنه اندازه‌گیری شده با استفاده از سیگنال دریافتی در فرکانس‌های مختلف					
فرکانس مرکزی (MHz)	1	2	3	4	5
سرعت (m/s)	1867	1968	2004	2022	2034
دامنه	4.1	4.7	2.9	1.6	0.9

مقایسه سرعت‌های بدست آمده از مدلسازی المان محدود با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [۱۸]، از 2030m/s در فرکانس 1MHz تا 2060m/s در فرکانس 3.5MHz، خطای نسبی بین 3% تا 8% را نشان می‌دهد که بیانگر مطابقت مناسب نتایج مدل المان محدود با نتایج آزمایشگاهی است. در شکل ۹ سرعت موج طولی در اتصال

توان پس از برخورد موج تابش با دیواره پایینی قطعه مشاهده کرد. همانگونه که ملاحظه می‌شود مدهای مختلف امواج ایجاد شده در قطعه پیش و پس از برخورد موج تابش با عیب با فیزیک مورد انتظار در انتشار امواج و پراش امواج فراصوتی از لبه‌های عیب کاملاً مطابقت دارد. در شکل ۱۲ سیگنال دریافتی توسط تراگذار گیرنده نشان داده شده است.



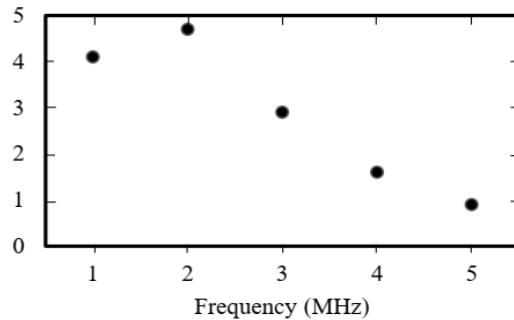
شکل ۱۱- ارسال پالس فراصوتی از یک تراگذار 4MHz (الف) پیش از برخورد با عیب در زمان $4.5 \mu s$ (ب) پس از برخورد در زمان $6.3 \mu s$



شکل ۱۲- سیگنال دریافتی توسط تراگذار گیرنده

در جدول ۳ طول‌های اندازه‌گیری شده عیوب جاسازی شده در جوش با طول‌های واقعی 5mm, 4mm, 3mm و 6mm و خطای نسبی اندازه‌گیری طول مربوط به هر عیب ارائه شده است.

کاهش حساسیت آزمون گردد.



شکل ۱۰- تغییرات دامنه موج دریافتی بر حسب فرکانس مرکزی موج ارسالی

۵-۲ تاثیر پاشندگی

به منظور بررسی تاثیر متقابل دو عامل کاهش دامنه ناشی از استهلاک موج و تغییرات سرعت حاصل از پاشندگی امواج فراصوتی، در ارزیابی فراصوت عیوب موجود در جوش BF، از چهار عیب عدم ذوب در قسمت میانی BF با طول‌های 3mm, 4mm, 5mm و 6mm استفاده شده است. بدین منظور از یک تراگذار 4MHz و یک کفشک 45° برای انجام آزمون استفاده شده است. ضخامت جداره جوش (ضخامت لوله) برابر 20mm است. به منظور جبران افت دامنه ناشی از استهلاک موج در PE، انرژی موج ارسالی در اندازه‌گیری‌های انجام شده نسبت به آزمونهای متداول، تقویت شده و با توجه به ضخامت 20mm قطعه مورد آزمون، امکان دریافت موج ارسالی توسط تراگذار گیرنده فراهم شده است. در شکل ۱۱ انتشار پالس فراصوتی پیش و پس از برخورد با یک عیب 6mm در قسمت میانی جوش نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برخورد موج طولی با عیب عدم ذوب موجب تولید امواج پراش از دو نوک بالا و پایین، بازتابش موج از دیواره پشتی، بازتابش موج از مهره جوش و تبدیل مدهای مربوطه در پایین قطعه می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود با تابش موج طولی صفحه‌ای از کفشک به درون قطعه، دو موج طولی و عرضی در درون قطعه و دو موج زیر سطحی طولی و عرضی نیز در مجاورت سطح بالایی قطعه منتشر می‌شوند. با برخورد موج طولی با عیب دو موج استوانه‌ای پراش از دو لبه بالایی و پایینی عیب پراکنده می‌شوند. همچنین بازتابش موج از دیواره پشتی قطعه را می‌

فراهم نمود. در این مقاله تاثیر پاشندگی امواج فراصوت در PE بر روی ارزیابی جوش‌های BF لوله‌های HDPE مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از مدل‌سازی اجزا محدود برای شبیه‌سازی ارزیابی فراصوتی جوش‌های BF استفاده شده است. بررسی تاثیر فرکانس بر سرعت امواج فراصوتی در HDPE نشان داد که سرعت موج طولی در فرکانس مرکزی 1MHz حدود 1870m/s می‌باشد که با افزایش فرکانس تا 5MHz تا حدود 2030m/s افزایش می‌یابد. با این وجود، نرخ افزایش سرعت با افزایش فرکانس کاهش یافته و پاشندگی موج در این محدوده فرکانسی کاهش می‌یابد. این در حالی است که دامنه موج دریافتی توسط تراگذار گیرنده با افزایش فرکانس کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد که با توجه به استهلاک بالا در HDPE چنین رفتاری قابل انتظار بود. اندازه‌گیری عیب عدم ذوب با طول‌های مختلف نشان داد که استفاده از فرکانس 4MHz با توجه به کاهش پاشندگی امواج فراصوتی خطای اندازه‌گیری قابل قبول، در محدوده پایین‌تر از 15%، و حساسیت مناسبی برای ارزیابی اتصال خواهد داشت.

۷- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت شرکت گاز استان خوزستان انجام شده است.

۸- تعارض منافع

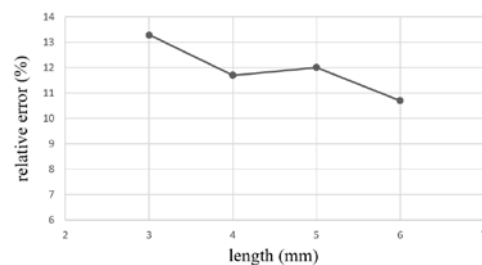
هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹- منابع

- [1] Leinov, E., Lowe, M.J.S. & Cawley, P., (2016), Ultrasonic isolation of buried pipes, J. Sound Vib. 363, 225–239.
- [2] Zheng, J., Zhang, Y., Hou, D., Qin, Y., Guo, W., Zhang, C., & Shi, J., (2018), A review of nondestructive examination technology for polyethylene pipe in nuclear power plant, Front. Mech. Eng. 13(4), 535–545.
- [3] Munns, I.J. & Georgiou, G.A., (1999), Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes, Insight, 41(5), 520.

جدول ۳- اندازه‌گیری طول عیوب جاسازی شده در فرکانس 4MHz		
طول واقعی (mm)	طول اندازه‌گیری شده (mm)	خطای نسبی (%)
3	2.60	13.3
4	3.53	11.7
5	4.40	12.0
6	5.36	10.7

در شکل ۱۳ خطای نسبی اندازه‌گیری بر حسب طول عیب ترسیم شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود در فرکانس 4MHz با افزایش طول عیب از 3mm تا 6mm خطای نسبی اندازه‌گیری از 13% تا حدود 10% کاهش یافته و با وجود پاشندگی موج، درصد خطای نسبی اندازه‌گیری در محدوده قابل قبول برای اندازه‌گیری طول عیب قرار دارد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد استفاده از تراگذار 4MHz برای ارزیابی BF، با توجه به کاهش پاشندگی موج در HDPE با افزایش فرکانس، و همچنین بالاتر بودن حساسیت آزمون فراصوتی در فرکانسهای بالاتر، امکان اندازه‌گیری عیوب را با حساسیت مناسب و درصد خطای نسبی قابل قبول فراهم می‌کند.



شکل ۱۳- خطای نسبی اندازه‌گیری عیوب بر حسب طول عیب در فرکانس 4MHz

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

استفاده از امواج فراصوتی برای ارزیابی جوش‌های BF لوله‌های HDPE به دلیل دو عامل استهلاک بالا و پاشندگی انتشار امواج در این مواد با چالش مواجه می‌شود. در ضخامت‌های پایین تاثیر استهلاک امواج در PE را می‌توان با افزایش انرژی و دامنه پالسهای فراصوت ارسالی تا اندازه‌ای جبران کرد و امکان دریافت امواج را توسط تراگذار گیرنده

Degradation of butt fusion joint integrity, *Polymer Degradation and Stability*, 162, 138-147.

[13] Hagglund, F., Spicer, M.A., & Troughton, M.J., (2012), Phased Array Ultrasonic Testing of Welded Joints in Plastic (P.E.) Pipes, 6th Middle East Nondestructive Testing Conference, Bahrain.

[14] Szabo, T.L., (1994), "Time domain wave equation for lossy media obeying a frequency power law", *Journal of Acoustical Society of America*, 113(6), 3024-3031.

[15] Naserabadi, M.J.R & Sodagar, S., (2017), Ultrasonic high frequency lamb waves for evaluation of plate structures, *Acoustical Physics*, 63 (4), 402-409.

[16] Naserabadi, M.J.R & Sodagar, S., (2021), Investigation of High-Frequency Guided Wave Modes Applicability in Defect Detection Using Phased Array Ultrasonic Transducer, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 57 (9), 762-768.

[17] Risitano, G., Guglielmino, E., Santonocito, D., (2018), Evaluation of mechanical properties of polyethylene for pipes by energy approach during tensile and fatigue tests, *Procedia Structural Integrity*, (13), 1663-1669.

[18] Mažeika, L., Šliteris, R., Vladišauskas A., (2010), Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples, *ULTRAGARSAS Ultragarsas (Ultrasound)*, Vol. 65 (4), 12-15.

[4] Crawford, S.L., Cumblidge, S.E., Doctor S.R., Hall, T.E, Anderson & M.T., (2008), Preliminary Assessment of NDE Methods on Inspection of HDPE Butt Fusion Piping Joints for Lack of Fusion, Technical Report, Department of Energy, USA.

[5] Sodagar, S., Honarvar, F., Sinclair, S., (2011), Multiple scattering of an obliquely incident plane acoustic wave from a grating of immersed cylindrical shells, *Applied Acoustics*, 72(1), 1-10.

[6] M. H. Taghipour, (2015), Study and evaluation of advanced TOFD method for inspection of polyethylene pipes but welding, *J. Phys. Sci. Appl.* 5(5), 349–355.

[7] Shafiei Alavijeh, M., Scott R., Seviaryn, F., & Maev, R., Gr., (2021), Using machine learning to automate ultrasound-based classification of butt-fused joints in medium-density polyethylene gas pipes, *Journal of Acoustical Society of America*, 150(1), 561.

[8] Prowant, M.S., Denslow, K.M., Moran, T.L., Jacob, R.E., Hartman, T.S., Crawford, S.L., Mathews, R., Neill, K.j., & Cinson, A.D., (2016), Evaluation of ultrasonic phased-array for detection of planar flaws in high-density polyethylene (HDPE) butt-fusion joints," in *Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference*, Vancouver, Canada.

[9] Fredrich, Porter A., & Zimmerman, D., (2009), High-density polyethylene piping butt fusion joint examination using ultrasonic phased array, *Pressure Vessels and piping conference*, Czech Republic, Paper No: PVP2009-77783, pp. 1295-1299.

[10] Sheng, X., Hou, D., & Zheng, J., (2017), Investigation on acoustic propagation of ultrasound in polyethylene pipe used in nuclear power plant, *ASME*, Paper No. PVP2017-65578, 2017.

[11] Qin Y., Shi, J., Zheng, J., Hou, D. & Guo, W., (2019), An improved phased array ultrasonic testing technique for thick-walled polyethylene pipe used in nuclear power plant, *Journal of pressure vessel technology*, 14, 041403.

[12] Deveci, S., Anthony, N., Nugrohi, S. & Eryigit, B., (2019), Effect of carbon black distribution on the properties of polyethylene pipes, part 2: