



## شبیه سازی تمرکز امواج آلتراسونیک آرایه فازی به منظور یافتن عیوب در جوش فلزات غیرهمجنس

امین فروزش<sup>۱</sup>، علی ولی پور چهارده چریک<sup>۲\*</sup> و امین یاقوتیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، خوزستان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، خوزستان، ایران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

### چکیده

آزمون آلتراسونیک یکی از روش‌های کارآمد و مقرون به صرفه به جهت بازرسی اتصالاتی همچون جوش است. در مراکز هسته‌ای از جوش فریتی-آستنیتی برای اتصال لوله‌های از جنس فولاد آستنیتی به بدنهٔ راکتور که از جنس فولاد فریتی است استفاده می‌شود. ناهمگن و ناهمسانگرد بودن این جوش موجب انحراف و تضعیف امواج می‌شود. این موضوع سبب کاهش دامنهٔ اکوی عیوب و نتیجتاً کاهش احتمال کشف آنها می‌شود. لذا از روش آرایه فازی به دلیل توانایی در هدایت و تمرکز امواج برای بازرسی جوش فریتی-آستنیتی استفاده می‌کنند. از طرفی، شبیه‌سازی اجزاء محدود ابزار مناسبی برای درک صحیح نحوهٔ انتشار امواج و روند بازرسی در اینگونه مواد است. روش تمرکز معمولی از جمله روش‌های موجود به جهت تمرکز امواج در مواد همگن و همسانگرد است. لذا، از این روش برای جوش فریتی-آستنیتی نمی‌توان استفاده کرد. بر همین اساس، این روش در پژوهش حاضر به منظور تمرکز امواج در محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد توسعه داده شده است. به منظور صحت سنجی روش توسعه یافته، نتایج حاصل از آن با نتایج روش تمرکز تطبیقی مقایسه شده‌اند. نتایج حاکی از دقت بالای روش توسعه یافته برای تمرکز امواج در محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد است. همچنین، مقایسهٔ نتایج نشان از افزایش دامنهٔ اکوی عیب به میزان ۲۳۵٪ نسبت به روش آلتراسونیک معمولی دارد.

**کلمات کلیدی:** شبیه سازی؛ جوش فریتی-آستنیتی؛ روش آرایه فازی؛ روش تمرکز تطبیقی؛ روش تمرکز معمولی توسعه یافته.

## Simulation of Focusing Phased Array Ultrasonic in Dissimilar Metal Welds for Detecting the Defects

A. Forouzes<sup>1</sup>, A. Valipour<sup>2,\*</sup>, A. Yaghoottian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Master of Science (MSc), Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.

### Abstract

Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) is one of the most efficient and economic methods for inspecting weld joints. In some industrial applications, Dissimilar Metal Welds (DMW) is used for connecting the austenitic stainless steel pipes to the ferritic steel. Inhomogeneity and anisotropy of DMW causes ultrasonic waves to skew and attenuate. This issue can decrease the defects echo and reduce the probability of detecting them. Therefore, PAUT is used for inspection of DMW due to its ability to steering and focusing the ultrasonic waves. Simulation tools can help to understand how the ultrasonic waves are propagating in this kind of material to improve the inspection process. Conventional focusing technique is used for focusing waves in the homogenous and isotropic media. However, this technique cannot be used for focusing waves in DMW. In this paper, the conventional focusing technique developed for focusing ultrasonic waves in inhomogeneous and anisotropic media. Results of ultrasonic waves focused on defect in DMW media by the developed conventional focusing technique are compared and validated by adaptive focusing technique. Simulation results have been shown that developed conventional focusing technique has acceptable accuracy operation for focusing waves in inhomogeneous and anisotropic media such as DMW. In addition, the amplitudes of the defect echoes has increased about 235% compared to conventional ultrasonic testing.

**Keywords:** Simulation; Dissimilar Metal Welds (DMW); Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT); Adaptive Focusing Technique; Developed Conventional Focusing Technique.

## ۱- مقدمه

آستنیتی پاس‌های ریشه جوش و لایه دهی<sup>۴</sup> روی سطح فولاد فریتی به روش جوشکاری قوس تنگستن<sup>۵</sup> همراه با گاز آرگون و الکتروود ERNiCr-3 یا ERNiFe-CI ایجاد می‌شوند که آلیاژی پایه نیکلی هستند [۷،۸]. همچنین، گاز آرگون به مقدار ۶ تا ۹ لیتر بر دقیقه بر الکتروود به قطر ۱ تا ۲/۵ میلیمتر تزریق می‌شود و سرعت جوشکاری حدوداً بین ۰/۷ تا ۱ میلیمتر بر ثانیه است [۹]. از طرفی، تبادل کربن میان فولاد فریتی و حوضچه جوش موجب ایجاد ترک خوردگی تنش<sup>۶</sup> در مرز بین فولاد فریتی و حوضچه جوش می‌شود [۸،۱۰]. لذا برای پیشگیری از بروز این موضوع یک ردیف پاس جوشکاری تحت عنوان لایه دهی روی سطح فولاد فریتی به منظور جلوگیری از تبادل کربن میان فولاد فریتی و حوضچه جوش ایجاد می‌کنند [۸]. پاس‌های بعدی جوش به روش جوشکاری الکتروود دستی پوشش‌دار<sup>۷</sup> و استفاده از الکتروود ENiCrFe-3 به قطر ۳ و ۴ میلیمتر روی آن ایجاد می‌شوند [۴،۷،۸]. در این جوش جهت گرادیان دمایی در هر پاس از جوشکاری تغییر می‌کند [۱۰]. این موضوع سبب رشد ستونی و جهت‌گیری دانه‌ها<sup>۸</sup> در راستای گرادیان دمایی می‌شود [۱۰]. منظور از جهت گرادیان دمایی راستایی است که جوش در آن راستا به منظور تبدیل فاز مایع به فاز جامد با محیط تبادل حرارت می‌کند. رشد دانه‌ها باعث تبدیل حوضچه جوش به ماده‌ای با خاصیت ناهمگن و ناهمسانگرد می‌شود [۴]. از طرفی، خاصیت ناهمگن و ناهمسانگرد فریتی-آستنیتی باعث انحراف و تضعیف امواج آلتراسونیک منتشر شده در آن می‌شود [۷]. به همین علت برای بازرسی این جوش از روش آرایه فازی به دلیل داشتن توانایی هدایت و تمرکز امواج آلتراسونیک استفاده می‌کنند [۱۰]. با توجه به پیچیدگی انتشار امواج آلتراسونیک در محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد ابزارهای شبیه سازی کمک شایانی به روند بازرسی و درک صحیح نحوه انتشار امواج در آنها می‌کنند [۴،۱۰]. ببردسلی و همکاران [۱۱] از روش تمرکز تطبیقی<sup>۹</sup> برای محاسبه زمان تأخیر میان پیزوالکتریک‌ها

موضوع ایمنی یکی از مهمترین مشخصه‌های مورد توجه در محیط‌های صنعتی است. موضوعی که بی‌توجهی به آن می‌تواند سبب بروز خسارت‌های جانی و مالی گردد. آزمون‌های غیرمخرب روشی از بازرسی هستند که قطعه پس از انجام بازرسی آسیب نمی‌بیند و قابل استفاده باقی می‌ماند [۱]. آزمون آلتراسونیک یکی از روش‌های کارآمد و مقرون به صرفه به جهت بازرسی اتصالاتی همچون جوش است. آزمون آلتراسونیک به روش آرایه فازی<sup>۱</sup> یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های موجود در زمینه بازرسی جوش است. در روش آرایه فازی هر یک از پیزوالکتریک‌های پروب با یک تأخیر زمانی<sup>۲</sup> مشخص نسبت به یکدیگر تحریک می‌شوند [۲]. این موضوع علاوه بر هدایت و تمرکز امواج آلتراسونیک در یک نقطه با عمق مشخص، سبب کاهش زمان بازرسی قطعه نسبت به استفاده از روش آلتراسونیک معمولی<sup>۳</sup> شده است [۳]. هدایت و تمرکز امواج در نقطه‌ای خاص علاوه بر افزایش دامنه اکوی بازگشتی از عیب احتمالی موجود در آن نقطه، باعث افزایش دقت بازرسی می‌شود. در مراکز هسته‌ای بدنه راکتور از جنس فولاد فریتی SA-508Gr.3cl.1 و لوله‌های متصل به آن از جنس فولاد آستنیتی SS304LN ساخته می‌شوند [۴]. هدف از اتصال فلزات غیرهمجنس به یکدیگر دستیابی همزمان به چندین خاصیت فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مفیدی است که با اتصال فلزات همجنس به یکدیگر حاصل نمی‌شوند [۵]. برای مثال، فولاد فریتی (آهن- کربن- کروم) به دلیل داشتن وزن پایین و استحکام بالا و فولاد آستنیتی (آهن- کربن- کروم- نیکل یا منگنز) به دلیل مقاومت در برابر خوردگی و خزش در دماهای بالا دو فلز غیرهمجنس و پرکاربرد می‌باشند [۵]. از جمله روش‌های اتصال میان این دو فلز غیرهمجنس می‌توان به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوش فلزات غیرهمجنس اشاره نمود [۴،۶]. در این پژوهش از جوش فلزات غیرهمجنس میان دو فولاد فریتی و فولاد آستنیتی به عنوان جوش فریتی-آستنیتی نام برده می‌شود. در جوش فریتی-

<sup>4</sup> Buttering<sup>5</sup> Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)<sup>6</sup> Stress Corrosion Cracking (SCC)<sup>7</sup> Shielded Metal Arc Welding (SMAW)<sup>8</sup> Grain Orientation<sup>9</sup> Adaptive Focusing Technique<sup>1</sup> Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)<sup>2</sup> Time Delay<sup>3</sup> Conventional Ultrasonic Technique

ارائه کرده است. با فرض تقارن منحنی‌های بدست آمده از اتصال مرزخانه‌ها در تصاویر نسبت به خط میانی جوش، تابعی به جهت ترسیم آن منحنی‌ها ارائه نمود. این تابع مقدار شیب مرزخانه‌ها را با توجه به مختصات هریک از نقاط واقع بر آنها محاسبه می‌کند. این مدل با دوران ماتریس سختی<sup>۴</sup> در هر موقعیت از ماده جوش خاصیت ناهمگن آن را مدلسازی می‌کند. جینگ و همکاران [۷] مدل اوگیلوی و متغیرهای دخیل در آن را به منظور نزدیکتر کردن مدل به واقعیت جوش فریتی-آستنیتی بهبود دادند. همچنین، با استفاده از طول مسیر منحنی و سرعت محاسبه شده به روش رد مسیر زمان تأخیر میان پیژوالکتریک‌ها را به منظور تمرکز امواج آلتراسونیک در نقطه‌ای با عمق مشخص در جوش فریتی-آستنیتی را محاسبه کردند. صحت عملکرد زمان تأخیر در متمرکز ساختن امواج در نقطه هدف با استفاده از ترسیم میدان انتشار امواج به روش پرتوی چندگانه گوس<sup>۵</sup> بررسی شده است. نتایج حاکی از افزایش دامنه امواج آلتراسونیک در نقطه تمرکز با استفاده از اعمال زمان تأخیر میان تحریک پیژوالکتریک‌ها است. کیم و همکاران [۱۶] به مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاصل از تمرکز امواج آلتراسونیک به روش تمرکز معمولی، روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز تجزیه عملگر معکوس زمان<sup>۶</sup> در جوش فریتی-آستنیتی پرداختند. با مقایسه دامنه اکوی برگشتی از عیب در هر سه روش تمرکز، نتایج نشان از عملکرد بهتر روش تجزیه عملگر معکوس زمان نسبت به دو روش دیگر دارد. سزاوی و همکاران [۱۰] با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود MSC و با توجه به گراپان دمای ناشی از جوشکاری در یک قطعه نمونه، مدلی به جهت تعریف ریزساختار و جهت‌گیری دانه‌ها در جوش فریتی-آستنیتی ارائه دادند. سپس، مدل ارائه شده را به منظور شبیه سازی بازرسی روش آرایه فازی در نرم افزار CIVA فراخوان کردند. نتایج نشان از دقت بالای مدل ارائه شده در مقایسه با نتایج حاصل از انجام روش آرایه فازی بر قطعه نمونه دارد. آبرا و همکاران [۴] با توجه به مشاهدات خود از تصاویر ماکروگرافی جوش فریتی-آستنیتی جهت‌گیری دانه‌ها در هر نقطه از جوش را محاسبه کردند. سپس، یک مدل اولیه که

به‌منظور تمرکز امواج بر حفره موجود در یک بلوک آلومینیومی استفاده نمودند. نتایج نشان از افزایش دامنه اکوی عیب نسبت به تحریک بدون زمان تأخیر می‌دهد. علاوه بر آن، توانایی تمرکز این روش را در حالت حضور ۳ حفره به‌صورت همزمان در بلوک آلومینیومی بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که با انجام چندباره روش تمرکز تطبیقی برای ماده‌ای که دارای بیش از یک عیب است، منجر به تمرکز امواج بر بزرگترین عیب میان عیوب موجود در آن ماده می‌شود. آزار و همکاران [۱۲] با استفاده از روش تمرکز معمولی<sup>۱</sup> و بدون در نظر گرفتن کفشک، امواج آلتراسونیک را در نقطه‌ای با عمق مشخص درون یک بلوک آلومینیومی متمرکز ساختند. آنها از رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه میدان فشار ناشی از امواج آلتراسونیک به‌منظور بررسی صحت تمرکز امواج در آن نقطه استفاده نمودند. همچنین، نشان دادند که تمرکز امواج آلتراسونیک در بی‌نهایت به هدایت امواج میل می‌کند. وستون و همکاران [۱۳] فرمولاسیون روش تمرکز معمولی را با در نظر گرفتن کفشک به جهت تمرکز امواج در نقطه‌ای با عمق مشخص درون یک ماده همگن و همسانگرد ارائه نمودند. آنها با استفاده از قانون اسنل<sup>۲</sup> و بکارگیری دو روش عددی و تحلیلی، نقطه شکست خط واصل میان هر پیژوالکتریک تا نقطه تمرکز را محاسبه نمودند به طوری‌که موج کمترین زمان ممکن را در آن طی کند. سپس، با انجام یک آزمایش تجربی عیب موجود در بلوک فولادی را با اعمال زمان تأخیر محاسبه شده به پروب یافتند. نتایج نشان از دقت بالای روش ارائه شده برای تمرکز امواج در ماده به همراه کفشک دارد. هولمس و همکاران [۱۴] روش تمرکز کامل را به‌منظور تهیه تصویر از سیگنال‌های دریافتی از پروب آرایه فازی ارائه نمودند. آنها در الگوریتم پردازش تصویر خود از روش تمرکز معمولی برای تهیه تصویر از درون عیب استفاده کردند. تصاویر بدست آمده موقعیت عیب در بلوک آلومینیومی را با دقت بالایی نشان می‌دهند. اوگیلوی [۱۵] با توجه به ریزساختار موجود در تصاویر ماکروگرافی<sup>۳</sup> تهیه شده از جوش فریتی-آستنیتی یک مدل ریاضی به‌منظور مدلسازی خاصیت ناهمگن این جوش

<sup>4</sup> Stiffness Matrix

<sup>5</sup> multi-Gaussian Beam

<sup>6</sup> Decomposition of the Time Reversal Operator method (DORT)

<sup>1</sup> Conventional Focusing Technique

<sup>2</sup> Snell's Law

<sup>3</sup> Macrographs

این پرها به جهت عایق ساختن آنها استفاده شده است. امکان بازرسی تمامیت مفره با استفاده از روش آلتراسونیک معمولی به دلیل وجود این پرها مقدور نبوده است. از این رو، روش آرایه فازی با توجه به توانایی هدایت و تمرکز امواج در فواصل با زوایای مختلف، بازرسی این نوع قطعات با هندسه پیچیده را میسر می‌سازد. آنها چهار عیب از جمله سوراخ سرتاسری، حفره هوا، جدایش عایق از هسته و ساییدگی فوم را در این مفره ایجاد کردند. سپس، با استفاده از دستگاه آرایه فازی موقعیت هر چهار عیب ایجاد شده در مفره به کمک مقایسه تصاویر با یک مفره عاری از عیب تشخیص داده شده است. نتایج حاکی از آن است که با استفاده از روش آرایه فازی چهار عیب از عیوبی که ممکن است در این مفره‌ها ایجاد شود، با دقت بالایی تشخیص داده شده‌اند. کانینگهام و همکاران [۱۸] جوش فریتی-آستنیتی را همراه با ریزساختار آن در نرم افزار اجزاء محدود PZFlex مدل‌سازی کردند. PZFlex نرم افزاری به جهت مدل‌سازی مواد به همراه حفره موجود در جوش را با استفاده از روش تجزیه عملگر معکوس زمان یافتند. در این روش تعداد مقادیر ویژه بزرگ، نمایانگر تعداد عیوب موجود در محیط است. لذا با پیاده‌سازی این روش بر یک جوش عاری از عیب بیشترین مقدار ویژه را به عنوان آستانه‌ای برای تشخیص مقدار ویژه مربوط به عیب بدست آوردند.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر، ارائه مدل واقع بینانه‌تر برای مدل‌سازی خاصیت ناهمگن جوش فریتی-آستنیتی و مؤثرترین روش تمرکز امواج در آن به جهت تشخیص وجود عیب بسیار مورد توجه قرار داشته است. بر همین اساس، شبیه سازی اجزاء محدود روش آرایه فازی به جهت تمرکز امواج آلتراسونیک در جوش فریتی-آستنیتی همراه با پردازش سیگنال به منظور یافتن عیب هدف از پژوهش حاضر است. روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی، از جمله روش‌های موجود به جهت تمرکز امواج می‌باشند. از روش تمرکز تطبیقی در هر دو محیط همگن و ناهمگن می‌توان استفاده نمود. از طرفی، روش تمرکز معمولی، روشی قدرتمند به جهت تمرکز امواج در مواد همگن و همسانگرد است. لذا در این پژوهش روش تمرکز معمولی به منظور تمرکز امواج در مواد ناهمگن و ناهمسانگرد توسعه

اثرات میرایی و انحراف موج در آن لحاظ شده را در نرم افزار اجزاء محدود کامسول مدل‌سازی کردند. در این مدل ماتریس سختی در هر نقطه از ماده جوش با توجه به زاویه جهت‌گیری دانه‌ها در آن محل دوران یافته است. آنها با مقایسه سیگنال‌های دریافتی از انجام آزمایش و شبیه سازی اجزاء محدود مشاهدات خود از تصاویر ماکروگرافی را برای محاسبه جهت‌گیری دانه‌ها در هر نقطه از جوش بهبود بخشیدند. نهایتاً در سعی و خطای مرحله ششم برای بهبود مشاهدات خود، از مقادیر جهت‌گیری دانه‌ها به مقدار تطابق ۹۷٪ برای سیگنال‌های حاصل از هر دو روش دست یافتند. چن و همکاران [۱۷] با مدل‌سازی دو بعدی هندسه پیچ همراه با رزوه‌ها در نرم افزار CIVIVA، بازرسی پیچ به روش آرایه فازی را شبیه سازی کردند. از این رو، سیگنال حاصل از انتشار امواج در یک پیچ عاری از عیب به همراه دامنه اکوی رزوه‌های آن حاصل شده است. سپس، یک شکاف به عمق و اندازه‌های متفاوت را در هندسه پیچ در نرم افزار به منظور دریافت سیگنال‌های پیچ معیوب ایجاد نمودند. دامنه اکوی رزوه‌ها در فواصل و مقادیر مشخصی ایجاد شده است. از این رو، تشخیص و تفکیک اکوی رزوه از اکوی عیب با مشاهده و مقایسه سیگنال‌ها نتیجه شده است. سپس، شکاف را به صورت واقعی در موقعیت‌های مختلفی از سه پیچ فولادی M16 به جهت انجام آزمایش تجربی روش آرایه فازی بر آنها ایجاد کردند. با توجه به توانایی تمرکز امواج آلتراسونیک و تهیه تصویر با استفاده از روش آرایه فازی، موقعیت این سه شکاف در هر سه پیچ مذکور به درستی حاصل شده است. نهایتاً، پیچ‌های معیوب در حال سرویس دهی را با انجام روش آرایه فازی به صورت تجربی بر آنها مشخص نمودند. اولین پیچی که به عنوان پیچ معیوب تشخیص داده شده است، پس از باز شدن متوجه وجود شکستگی در آن شده‌اند. این موضوع نشان دهنده قابلیت استفاده از روش آرایه فازی برای بازرسی هندسه‌های پیچیده و در حال سرویس دهی است. یووان و همکاران [۲] از آزمون آلتراسونیک به روش آرایه فازی برای یافتن عیوب در مفره‌های کامپوزیتی واقع در شبکه خطوط برق رسانی استفاده نمودند. هسته مرکزی این مفره‌های استوانه شکل از جنس فوم بوده است. همچنین، مفره مورد بررسی دارای چهار پره به منظور ثابت نگه داشتن خطوط برق است. از لاستیک سیلیکون به منظور پوشش دهی

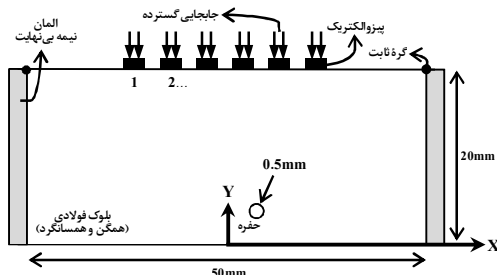
وسط بلوک قرار گرفته است. هندسه این جوش در شکل ۲ ترسیم شده است.

در این پژوهش از مدل اوگیلوی [۱۵] برای مدلسازی ریزساختار ناحیه جوش استفاده شده است. این مدل بیش از سایر مدل‌های ارائه شده برای مدلسازی این جوش مورد استفاده قرار گرفته است [۴، ۱۶]. این مدل در رابطه (۱) آورده شده است [۷].

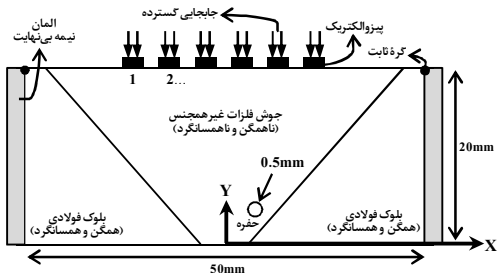
$$F(x, y) = \begin{cases} \tan \theta_1 = \frac{\beta_1(D_1 + y \tan \alpha_1)}{x^{\eta_1}} & , For x > 0 \\ \theta_1 = \theta_2 = 90 & , For x = 0 \\ \tan \theta_2 = \frac{\beta_2|D_2 + y \tan \alpha_2|}{|x|^{\eta_2}} & , For x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

جدول ۱- مشخصات پروب آرایه فازی [۱۶]

تعداد پیزوالکتریک	تعداد سیکل پالس گوس	فرکانس مرکزی	گام	ضخامت
16	3	2.25 MHz	1 mm	0.8 mm



شکل ۱- هندسه بلوک فولادی



شکل ۲- هندسه جوش فریتی-آستنیتی

داده شده است. همچنین، از جوش فریتی-آستنیتی به منظور ارائه کاربرد صنعتی برای مدلسازی ماده ناهمگن و ناهمسانگرد استفاده شده است. لازم به ذکر است که توسعه روش تمرکز معمولی برای مواد ناهمگن و ناهمسانگرد در این مقاله تحت عنوان روش تمرکز معمولی توسعه یافته ارائه شده است. در ادامه، هندسه مسئله مورد پژوهش و نحوه توسعه روش تمرکز معمولی ارائه شده است. همچنین، نتایج شبیه سازی حاصل از تمرکز امواج با استفاده از روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی توسعه یافته در بلوک فولادی و جوش فریتی-آستنیتی با استفاده از دامنه اکوی بازگشتی از عیب بررسی و مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که تمامی شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس و به روش حل صریح<sup>۱</sup> در حوزه زمان انجام شده‌اند.

## ۲- مدل سازی بلوک فولادی و جوش فریتی-آستنیتی در نرم افزار اجزاء محدود

قطعه بازرسی یک بلوک فولادی دارای حفره‌ای به شعاع 0.5 mm به مرکزیت (x,y)=(3.1,4,4) mm است. این بلوک به ابعاد 50×20 mm<sup>2</sup> با چگالی 7800 Kg/m<sup>3</sup>، مدول یانگ 201.7 GPa و نسبت پواسون 0.3 به صورت یک محیط دو بعدی در نرم افزار اجزاء محدود مدلسازی شده است. هندسه این بلوک در شکل ۱ نشان داده شده است

با توجه به شکل ۱، جابجایی و دوران گره‌های گوشه سمت راست و چپ قطعه برای برقراری تعادل استاتیکی بسته شده‌اند. همچنین از المان نیمه بی‌نهایت در دو طرف بلوک به منظور کاهش زمان حل و جلوگیری از تداخل امواج بازتاب شده از دیواره‌های راست و چپ قطعه با امواج بازتاب شده از حفره و دیواره پایینی استفاده شده است. پروب آرایه فازی به صورت متقارن بالای این بلوک مدلسازی شده است. در این پژوهش از پالس گوس<sup>۲</sup> با توجه به اطلاعات جدول ۱ برای تحریک پیزوالکتریک‌ها استفاده شده است [۱۶].

توجه شود که خط تقارن بلوک از وسط فاصله مابین پیزوالکتریک‌های شماره ۸ و ۹ عبور می‌کند. برای تمرکز امواج در جوش فریتی-آستنیتی از همان هندسه واقع در شکل ۱ استفاده شده است با این تفاوت که هندسه جوش در

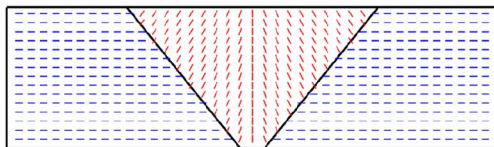
<sup>1</sup> Explicit Analysis

<sup>2</sup> Gaussian Pulse

جدول ۳- ماتریس سختی جوش فریتی-آستنیتی (GPa) [۱۶]

$C_{11}$						
241.1	138.03	96.92	138.03	240.12	138.03	96.92
Other						
138.03	241.1	112.29	72.09	112.29	0	

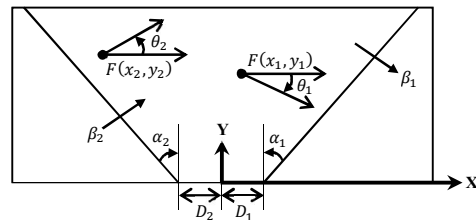
مقادیر متغیرهای مدل اوگیلوی به صورت  $\eta_1 = \eta_2 = 0.85$ ,  $\alpha_1 = |\alpha_2| = 45^\circ$ ,  $D_1 = |D_2| = 0.003$  m و  $\beta_1 = \beta_2 = 0.3$  در نظر گرفته شده‌اند [۱۶]. هر نقطه از محیط جوش فریتی-آستنیتی با استفاده از این مدل خواص الاستیک متناسب با موقعیت خود را خواهد داشت که به واسطه آن خاصیت ناهمگن جوش مدلسازی می‌شود. از این رو، در شکل ۴ طرح واره چرخش ماتریس سختی در هر نقطه از ماده جوش و فلز پایه با استفاده از پاره‌خطهایی که زاویه دوران آنها نسبت به خط افق متناسب با زاویه چرخش ماتریس سختی در آن نقطه رسم شده است. به دلیل همگن بودن ناحیه فلز پایه، ماتریس سختی در آن ناحیه بدون چرخش و ثابت باقی مانده است. در حالیکه، پاره‌خطهای واقع در محیط جوش به دلیل ناهمگن بودن آن دست خوش دوران محاسبه شده از رابطه (۱) شده‌اند. لازم به ذکر است که از کدنویسی تحت عنوان VUMAT برای چرخش ماتریس سختی در هر یک از المان‌های محیط مش‌بندی جوش به منظور پیاده سازی مدل اوگیلوی در نرم افزار آباکوس استفاده شده است.



شکل ۴- چرخش ماتریس سختی در فلز پایه و جوش فریتی-آستنیتی

لذا، تعداد ماتریس سختی حاکم بر محیط جوش برابر با تعداد المان‌های حاصل از مش‌بندی آن است. از طرفی، ارتعاش یک ذره از ماده سبب ایجاد تنش الاستیک در ذرات مجاور آن و در نتیجه انتشار موج در ماده می‌شود [۲۰]. از این رو، از کد VUAMP برای اعمال جابجایی گسترده

درجاییکه  $F$  تابعی به جهت محاسبه مقدار چرخش ماتریس سختی،  $\theta$  مقدار چرخش ماتریس سختی،  $\beta$  متغیری متناسب با شیب لبه‌های جوش،  $D$  فاصله ریشه جوش از مرکز آن،  $\alpha$  زاویه جوش و  $\eta$  میزان تغییرات چرخش دانه‌ها نسبت به خط وسط جوش است که به صورت مقادیری با بازه  $0 < \eta < 1$  تعریف می‌شود [۱۵] که همگی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند [۷].



شکل ۳- متغیرهای مدل ریاضی اوگیلوی در جوش فریتی-آستنیتی [۷]

ماتریس سختی دوران یافته در هر نقطه از محیط جوش با توجه به  $\theta$  حاصل از رابطه (۱) و بکارگیری رابطه (۲) حاصل می‌شود [۱۹].

$$[G] = [R][C][R]^T \quad (2)$$

درجاییکه  $[G]$  ماتریس سختی دوران یافته،  $[C]$  ماتریس سختی،  $[R]$  و  $[R]^T$  به ترتیب ماتریس دوران<sup>۱</sup> و ترانزپوز آن هستند. درایه‌های  $[R]$  دوران در جدول ۲ آورده شده است [۴].

جدول ۲- درایه‌های ماتریس دوران [۴]

$R_{11}$							
$c^2$	$s^2$	$2cs$	$s^2$	$c^2$	$-2cs$	1	$c$
						$R_{66}$	Other
$-s$	$s$	$c$	$-cs$	$cs$	$c^2$	$-s^2$	0

درجاییکه، کسینوس و سینوس به ترتیب با حروف  $c$  و  $s$  نوشته شده‌اند. ماتریس سختی حاکم بر جوش در جدول ۳ آورده شده است [۱۶].

<sup>1</sup> Rotation Matrix

زمان نشان دهنده زمان تأخیر میان دو سیگنال است [۱۶]. مقدار زمان نمونه برداری به منظور تشکیل صحیح سیگنال از رابطه (۵) تبعیت می‌نماید [۲۱].

$$\Delta t \leq \frac{h}{c} \quad (5)$$

که در آن،  $h$  اندازه المان‌ها در مش‌بندی محیط در نرم افزار اجزاء محدود و  $c$  بیشترین سرعت موج موجود در مسئله است. این روش به دلیل استفاده از سیگنال امواج آلتراسونیک طی شده در ماده، محدود به ماده‌ای خاص نمی‌شود و در مواد ناهمگن و ناهمسانگرد کاربرد دارد که می‌توان این موضوع را به‌عنوان یکی از محاسن آن نام برد. از معایب این روش می‌توان به حضور حداقل یک عیب در ماده برای تمرکز امواج بر آن عیب اشاره کرد.

### ۳-۲- روش تمرکز معمولی

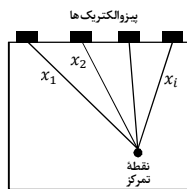
در روش تمرکز معمولی با استفاده از اطلاعات کوتاهترین مسیری که امواج انتشار یافته از پیزوالکتریک‌ها برای رسیدن به نقطه هدف طی می‌کنند، زمان تأخیر میان آنها محاسبه می‌شود. کوتاهترین فاصله میان پیزوالکتریک‌ها تا نقطه تمرکز در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۶]. بر همین اساس، زمان لازم به‌جهت رسیدن امواج از هر پیزوالکتریک تا نقطه تمرکز از رابطه (۶) با توجه به فاصله و سرعت موج در ماده محاسبه می‌شود [۱۶].

$$t_i = \frac{x_i}{c}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

درجاییکه  $t_i$  و  $x_i$  به‌ترتیب، زمان و فاصله‌ای هستند که امواج آلتراسونیک از پیزوالکتریک تا نقطه تمرکز سپری می‌کنند.

سپس با استفاده از رابطه (۷) زمان تأخیر میان پیزوالکتریک‌ها محاسبه می‌شود.

$$T_i = \max(t) - t_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$



شکل ۵- کوتاهترین روش تمرکز معمولی [۱۶]

به‌صورت تابع پالس گوس به سطح هر پیزوالکتریک استفاده شده است.

### ۳- تمرکز امواج آلتراسونیک آرایه فازی

#### ۳-۱- روش تمرکز تطبیقی

در روش آرایه فازی زمان تحریک هر یک از پیزوالکتریک‌های پروب قابل کنترل است. لذا، اگر پیزوالکتریک‌ها با یک تأخیر زمانی منطقی نسبت به یکدیگر تحریک شوند برآیند موج انتشاری از آنها تمرکز امواج آلتراسونیک را در نقطه‌ای با عمق مشخص به دنبال خواهد داشت. لذا، روش تمرکز تطبیقی روشی کارآمد برای محاسبه زمان تأخیر میان تحریک پیزوالکتریک‌ها به کمک انجام ضرب همبستگی<sup>۱</sup> میان سیگنال‌های دریافت شده از آنهاست. در این روش ابتدا تمامی پیزوالکتریک‌ها توسط یک پالس مشخص و یکسان به‌صورت همزمان تحریک می‌شوند. سپس ضرب همبستگی میان سیگنال‌های دریافتی به‌جهت محاسبه زمان تأخیر میان آنها با استفاده از رابطه (۳) انجام می‌شود [۱۱].

$$H_{1,i} = \max \left( \sum_{w=-N_T}^{N_T} S_1(q) \times S_i(q-w) \right) \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, N \\ q = 1, 2, \dots, N_T \end{cases} \quad (3)$$

درجاییکه،  $H_{1,i}$  نشان دهنده موقعیتی در سیگنال است که در آن بیشینه مقدار حاصل از ضرب همبستگی میان سیگنال اول و سیگنال  $N$ ام رخ داده است.  $N$  تعداد پیزوالکتریک‌های پروب،  $N_T$  تعداد نمونه برداری<sup>۲</sup> به‌جهت تشکیل سیگنال و  $S_1$  و  $S_i$  به‌ترتیب سیگنال‌های دریافتی از پیزوالکتریک ۱ و  $i$  است. توجه شود که ضرب همبستگی میان دو سیگنال در بازه بین پالس اولیه<sup>۳</sup> تا اکوی بازگشتی از دیواره پایین<sup>۴</sup> انجام می‌شود [۱۱]. سپس با استفاده از رابطه (۴) زمان تأخیر میان پیزوالکتریک‌ها محاسبه می‌شود.

$$T_i = H_{1,i} \times \Delta t, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

درجاییکه،  $T_i$  زمان تأخیر مربوط به پیزوالکتریک  $N$ ام و  $\Delta t$  زمان نمونه برداری است. به عبارتی دیگر، موقعیت بیشینه مقدار حاصل از ضرب همبستگی میان دو سیگنال روی محور

<sup>1</sup> Cross Correlation

<sup>2</sup> Sampling Time

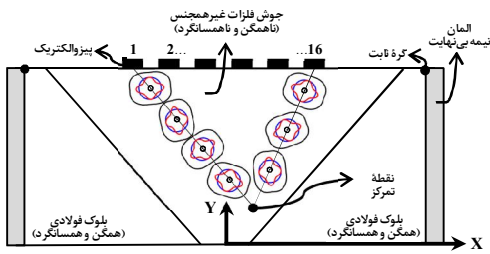
<sup>3</sup> Initial Pulse

<sup>4</sup> Back-Wall Echo

نقاط نمایش داده شده است. سرعت امواج آلتراسونیک در هر نقطه از جوش فریتی-آستنیتی از منحنی کندی با توجه به زاویه خط واصل مابین پیزوالکتریک تا نقطه تمرکز نسبت به خط افق محاسبه می‌شود. سپس میانگین تمامی سرعت‌ها به جهت استفاده در رابطه (۶) با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شوند.

$$c_i = \frac{\sum_{n=1}^{q_i} v_{ni}}{q_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

در جایگاه  $c_i, v_{ni}$  و  $q_i$  به ترتیب میانگین سرعت امواج آلتراسونیک در مسیر مابین پیزوالکتریک لام تا نقطه تمرکز، سرعت محاسبه شده در قسمت  $m$  و تعداد کل قسمت‌بندی خط واصل بین پیزوالکتریک لام تا نقطه تمرکز است.



شکل ۶- تقسیم بندی فاصله بین پیزوالکتریک‌ها تا نقطه تمرکز

در این پژوهش فواصل بین پیزوالکتریک‌ها تا نقطه تمرکز به قسمت‌هایی هم اندازه با ابعاد مش‌بندی در محیط نرم افزار اجزاء محدود تقسیم شده است. ضخامت المان‌ها در مش‌بندی محیط به منظور پایداری و همگرایی حل به اندازه  $\frac{\lambda}{15}$  در نظر گرفته شده‌اند [۱۸]. در جایگاه  $\lambda$  طول موج است. همچنین با توجه به این موضوع که طول پیزوالکتریک‌ها در راستای محور  $Z$  نسبت به سایر ابعاد آن زیاد است، فرض کرنش صفحه‌ای برای مدلسازی مناسب است [۱۴]. از این رو محیط مدل در نرم افزار اجزاء محدود با استفاده از المان چهار گره‌ای کرنش صفحه‌ای<sup>۲</sup> مش‌بندی شده است.

به این ترتیب با اعمال زمان تأخیر میان پیزوالکتریک‌ها، برآیند امواج انتشاری از آنها در نقطه تمرکز حاصل می‌شود. اساس کارکرد دستگاه آرایه فازی مینی بر استفاده مبانی نظری مربوط به روش تمرکز معمولی در متمرکز ساختن امواج آلتراسونیک در نقاط ماده به جهت بازرسی آن است.

### ۳-۳- توسعه روش تمرکز معمولی برای محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد

در مدل اوگیلوی به واسطه تعریف ماتریس سختی در هر نقطه از محیط جوش فریتی-آستنیتی، محیط جوش همراه با خاصیت ناهمگن و ناهمسانگرد خود مدلسازی می‌شود. به همین دلیل، امواج منتشر شده از پیزوالکتریک‌ها تا رسیدن به نقطه تمرکز به دلیل عبور از نقاطی با خواص مکانیکی مختلف نسبت به یکدیگر سرعت‌های متفاوتی به خود می‌گیرند. لذا از رابطه (۶) برای محاسبه زمان رسیدن امواج تا نقطه تمرکز واقع در جوش فریتی-آستنیتی نمی‌توان استفاده کرد. بر همین اساس، در پژوهش حاضر روش تمرکز معمولی به منظور تمرکز امواج آلتراسونیک در محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد همچون جوش فریتی-آستنیتی توسعه داده شده است. نحوه توسعه روش مذکور در ادامه ارائه شده است. ابتدا مسیر پیمودن امواج از هر پیزوالکتریک تا نقطه تمرکز به فواصل کوچکتری تقسیم شده‌اند. سپس منحنی کندی<sup>۱</sup> در هر یک از این فواصل محاسبه شده است. امواج آلتراسونیک در هر یک از این فواصل به دلیل ناهمسانگرد بودن ماده جوش سرعتی متفاوت به خود می‌گیرند. لذا میانگین سرعت طی شده در مسیر هر پیزوالکتریک تا نقطه تمرکز بر اساس سرعت‌های بدست آمده از منحنی کندی به جهت استفاده در رابطه (۶) محاسبه شده است. به منظور درک بهتر این موضوع طرح واره‌ای از تقسیم فاصله مابین پیزوالکتریک‌ها تا نقطه تمرکز و محاسبه منحنی‌های کندی واقع بر آنها در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۶ مسیرهای بین پیزوالکتریک ۱ و ۱۶ تا نقطه تمرکز به ترتیب به ۵ و ۴ قسمت تقسیم شده است که منحنی کندی در هر یک از قسمت‌بندی‌ها با توجه به میزان چرخش آن در آن

<sup>2</sup> Plane Strain Elements

<sup>1</sup> Slowness Curves



۳-۴- منحنی کندی

در ادامه نحوه دستیابی به منحنی کندی در محیط همگن به تفصیل مورد بررسی قرار داده شده است.

معادله (۹) بیانگر قانون نیوتن به فرم اندیسی است [۲۲].

$$\sigma_{iq,q} = \rho \ddot{u}_i \quad (9)$$

که در آن،  $\rho$ ،  $\sigma_{iq}$  و  $u_i$  به ترتیب تانسور تنش، چگالی و بردار جابجایی مربوط به نوسان ذرات در ماده است. با جایگذاری قانون هوک (۱۰) در قانون نیوتن (۹)، معادله (۱۱) نتیجه می شود [۲۲].

$$\sigma_{iq} = C_{iqle} \varepsilon_{le} \quad (10)$$

$$C_{iqle} \varepsilon_{le,q} = \rho \ddot{u}_i \quad (11)$$

که در معادله (۱۰)،  $\varepsilon_{le}$  بیانگر کرنش های بی نهایت کوچک است که با استفاده از جابجایی ها به صورت معادلات کرنش-جابجایی در معادله (۱۲) نشان داده شده است [۲۲].

$$\varepsilon_{le} = \frac{1}{2} (u_{l,e} + u_{e,l}) \quad (12)$$

با جایگذاری معادله (۱۲) در معادله (۱۱)، معادله (۱۳) حاصل می شود [۲۲].

$$\frac{1}{2} C_{iqle} (u_{l,qe} + u_{e,ql}) = \rho \ddot{u}_i \quad (13)$$

با فرض انتشار امواج صفحه ای، پاسخ (۱۴) برای معادله (۱۳) در نظر گرفته می شود [۲۲].

$$u_i = A_i \exp(j(K_w \hat{x}_b - \omega t)) \quad (14)$$

در جاییکه،  $A_i$ ،  $K_w$  و  $\omega$  به ترتیب دامنه، بردار موج و فرکانس زاویه ای است. با جایگذاری پاسخ (۱۴) در معادله (۱۳) و با توجه به برقراری تساوی های  $u_{e,ql} = -K_q K_l u_e$  و  $u_{l,qe} = -K_q K_e u_l$  حاصل می شود که معادله کریستوفل<sup>۱</sup> نام دارد [۲۲].

$$(C_{iqle} K_q K_l - \rho \omega^2 \delta_{ie}) u_e = 0 \quad (15)$$

علاوه بر آن، تساوی های  $K_l = kn_l$  و  $K_q = kn_q$  برای بردار موج برقرار است. در جاییکه  $k$  عدد موج و  $n_i$  و  $n_q$  تصویر بردار عمود بر جبهه موج می باشند. از طرفی، تانسور متقارن آکوستیک کریستوفل<sup>۲</sup> به صورت  $\Gamma_{ie} = C_{iqle} n_q n_l$  تعریف می شود [۲۲] که درایه های آن در مرجع آورده شده است [۲۳]. با جایگذاری تانسور

آکوستیک کریستوفل در معادله (۱۵)، معادله (۱۶) حاصل می شود [۲۲].

$$(\Gamma_{ie} k^2 - \rho \omega^2 \delta_{ie}) u_e = 0 \quad (16)$$

حال با توجه به اینکه فرکانس زاویه ای به صورت  $\omega = ck$  تعریف می شود، فرم دیگری از معادله (۱۶) در معادله (۱۷) نشان داده شده است [۲۲].

$$(\Gamma_{ie} - \rho c^2 \delta_{ie}) u_e = 0 \quad (17)$$

با توجه به معادله (۱۷)، شرط داشتن جواب غیربدهی این است که دترمینان ماتریس ضرایب صفر شود. لذا معادله (۱۸) شکل می گیرد.

$$|\Gamma_{ie} - \rho c^2 \delta_{ie}| = 0 \quad (18)$$

به این ترتیب مقادیر ویژه و بردارهای ویژه متناظر با آنها از حل معادله (۱۸) حاصل می شوند. به عبارتی بهتر، معادله کریستوفل یک مسئله مقدار ویژه است که از حل آن سه مقدار ویژه و بردارهای ویژه متناظر با آنها حاصل می شوند [۲۲]. همچنین، با استفاده از ضرب داخلی و ضرب خارجی بردارهای ویژه در بردار یکه صفحه انتشار موج، سرعت موج های طولی<sup>۳</sup>، عرضی عمودی<sup>۴</sup> و عرضی افقی<sup>۵</sup> از میان مقادیر ویژه مشخص می شوند. توجه شود که نوسان ذرات بر اثر انتشار امواج طولی و امواج عرضی عمودی، درون صفحه ای است که موج در آن منتشر می شود. منحنی کندی مربوط به ماتریس سختی حاکم بر محیط جوش فرتی-آستیتی در شکل ۷ ترسیم شده است.

منحنی کندی رسم شده در شکل ۷، مربوط به یک ماده همگن و ناهمسانگردی است که خاصیت ماتریس سختی ارائه شده در جدول ۳ را داراست. لازم به ذکر است که محیط جوش در نرم افزار اجزاء محدود بر اساس کمترین سرعت موج عرضی عمودی به دست آمده از منحنی کندی که به مقدار 2549 m/s بوده مش بندی شده است. از طرفی، به دلیل ناهمگن بودن ماده جوش، منحنی های کندی متفاوتی برای نقاط مختلف آن می توان ترسیم نمود. این منحنی های کندی شدیداً به موقعیت ترسیم و فواصل آن نقاط تا لبه های جوش وابسته می باشند. منحنی کندی مربوط به موقعیت

<sup>3</sup> Longitudinal Wave (L-Wave)

<sup>4</sup> Shear Vertical Wave (SV-Wave)

<sup>5</sup> Shear Horizontal Wave (SH-Wave)

<sup>1</sup> Christoffel's Equation

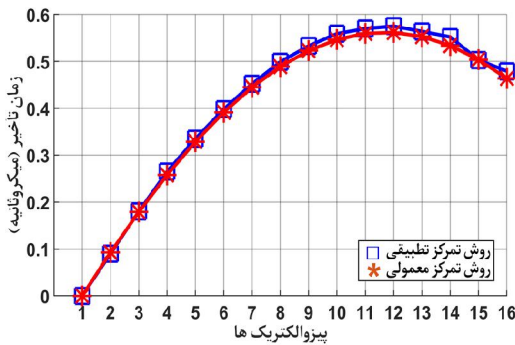
<sup>2</sup> Christoffel Acoustic Tensor

۴- نتایج

۴-۱- تمرکز امواج آلتراسونیک در بلوک فولادی

به منظور محاسبه زمان تأخیر میان پیزوالکتریک‌ها با استفاده از روش تمرکز تطبیقی برای تمرکز امواج در بلوک فولادی، تمامی پیزوالکتریک‌ها با توجه به اطلاعات جدول ۱ توسط یک پالس گوس یکسان به صورت اعمال جابجایی گسترده عمودی به آنها تحریک شده‌اند. سپس، زمان تأخیر میان پیزوالکتریک‌ها با استفاده از ضرب همبستگی برای ۱۶ پیزوالکتریک محاسبه شده است که مقادیر آنها به همراه زمان‌های تأخیر محاسبه شده از روش تمرکز معمولی در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. مقادیر زمان تأخیر محاسبه شده به روش تمرکز تطبیقی با منحنی آبی و روش تمرکز معمولی با منحنی قرمز در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. مقادیر زمان تأخیر بدست آمده از هر دو روش با اختلاف بسیار ناچیزی نسبت به یکدیگر حاصل شده‌اند.

نحوه انتشار امواج آلتراسونیک در بلوک فولادی بر اثر تحریک همزمان پیزوالکتریک‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

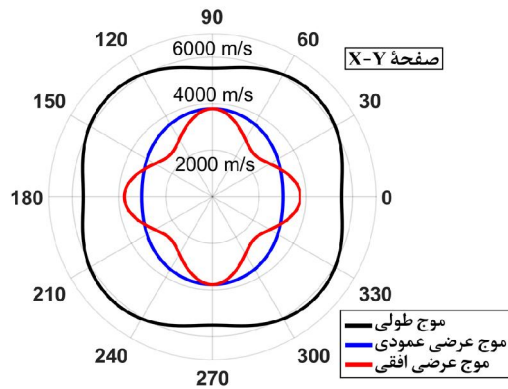


شکل ۹- زمان تأخیر محاسبه شده به روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی (بلوک فولادی)

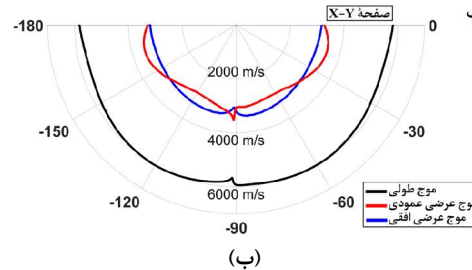
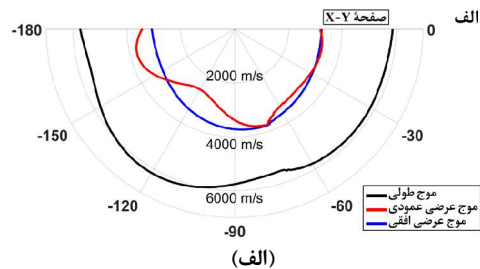
در شکل ۱۰-الف به دلیل عدم اعمال زمان تأخیر به پروب، تمامی پیزوالکتریک‌ها به صورت همزمان تحریک شده‌اند. از طرفی، با توجه به همگن و همسانگرد بودن محیط بلوک فولادی، سرعت امواج در تمامی راستاهای انتشار ثابت است. لذا در شکل ۱۰-ب امواج آلتراسونیک به صورت امواج کروی انتشار یافته‌اند. موج رایلی مشخص شده بر اثر انتشار بخشی از موج عرضی بر سطح بلوک ایجاد شده است. موج

پیزوالکتریک‌های ۱ و ۹ به ترتیب در شکل ۸-الف و ب ترسیم شده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود، علی‌رغم اینکه هر دو موقعیت ترسیم در ناحیه جوش قرار داشته‌اند، منحنی‌های گندی مربوط به آنها متمایز ایجاد شده است. این موضوع بیانگر تفاوت سرعت امواج آلتراسونیک در راستاهای متفاوت در مواد ناهمگن است.



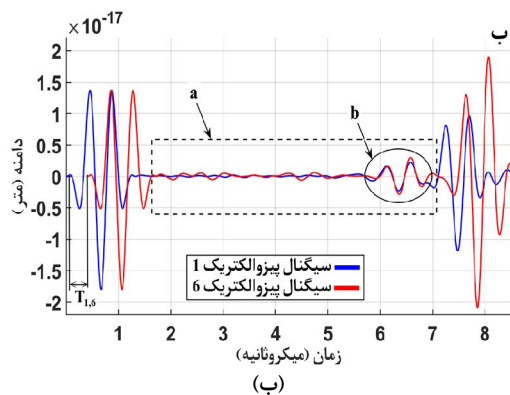
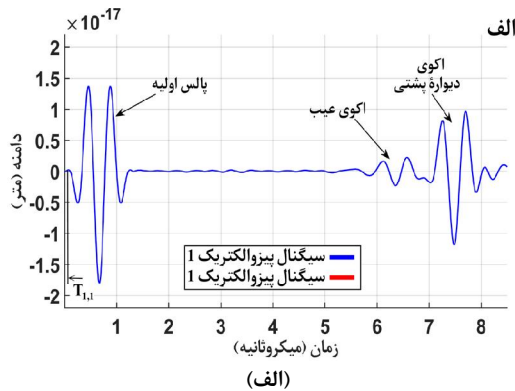
شکل ۷- منحنی گندی ماتریس سختی حاکم بر جوش فریتی-آستنیتی



شکل ۸- منحنی گندی مربوط به موقعیت

الف) پیزوالکتریک ۱ و ب) پیزوالکتریک ۹

در جوش فریتی-آستنیتی

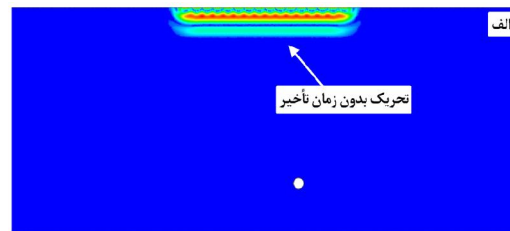


شکل ۱۱- محاسبه زمان تأخیر به روش تمرکز تطبیقی با استفاده از اکوی عیب برای الف) پیزوالکتریک ۱ و ب) پیزوالکتریک ۶

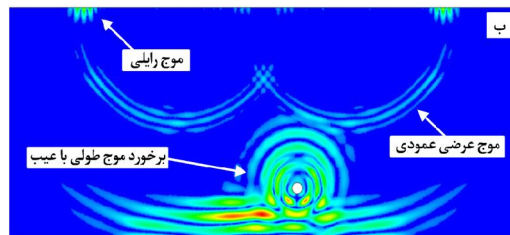
سیگنال ۱ روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. در نتیجه، زمان تأخیر مربوط به سیگنال ۱ در روش تمرکز تطبیقی، صفر محاسبه شده است. در شکل ۱۱-ب سیگنال ۶ همراه با سیگنال ۱ ترسیم شده است. ضرب همبستگی در محدوده نشان داده شده  $a$  صورت گرفته است که بیشینه مقدار حاصل از ضرب همبستگی درحالی رخ داده که اکوهای ناشی از عیب روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. مقدار  $T_{1,6}$  و محدوده  $b$  به ترتیب نشان دهنده زمان تأخیر مربوط به پیزوالکتریک ۶ و لحظه ایجاد بیشینه مقدار حاصل از ضرب همبستگی میان سیگنال‌های ۱ و ۶ است. با استفاده از زمان‌های تأخیر محاسبه شده از روش تمرکز تطبیقی برای تمرکز امواج آلتراسونیک بر عیب موجود در بلوک فولادی، نحوه انتشار امواج در بلوک فولادی در شکل ۱۲ نشان داده است. لازم به ذکر است که به دلیل اختلاف بسیار اندک میان زمان‌های تأخیر محاسبه از روش

طولی با برخورد به عیب به سمت پروب بازتاب داده شده است. از این رو، با استفاده از سیگنال‌های دریافتی و انجام ضرب همبستگی میان آنها در روش تمرکز تطبیقی مقادیر زمان تأخیر محاسبه شده است. به منظور درک بهتر نحوه عملکرد روش تمرکز تطبیقی، سیگنال پیزوالکتریک‌های ۱ و ۶ با توجه به انجام ضرب همبستگی آنها با سیگنال ۱ در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. در شکل ۱۱-الف، به دلیل کمتر بودن فاصله عیب تا سطح پروب نسبت به فاصله دیواره پایینی قطعه تا سطح پروب، اکوی دریافتی از عیب بین پالس اولیه و اکوی دیواره قرار گرفته است. همچنین، پالس اولیه مطابق با تابع پالس تحریک گوس تشکیل شده است. در شکل ۱۱ سیگنال پیزوالکتریک ۱ با منحنی آبی و سیگنالی که قرار است زمان تأخیر آن محاسبه شود، به منحنی قرمز ترسیم شده است.

طبق رابطه (۳) در ضرب همبستگی بین سیگنال ۱ و خودش که خود همبستگی<sup>۱</sup> نام دارد، بیشترین تطبیق زمانی رخ می‌دهد که سیگنال ۱ بدون جابجایی زمانی باقی بماند. لذا در شکل ۱۱-الف، دو سیگنال آبی و قرمز مربوط به



الف)



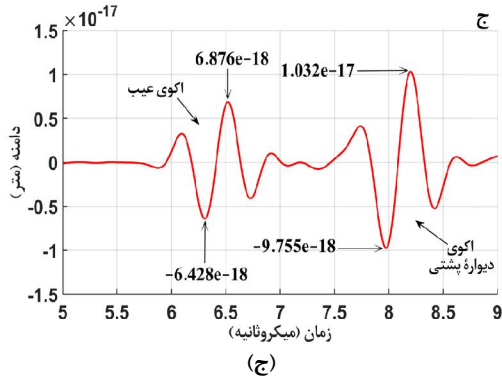
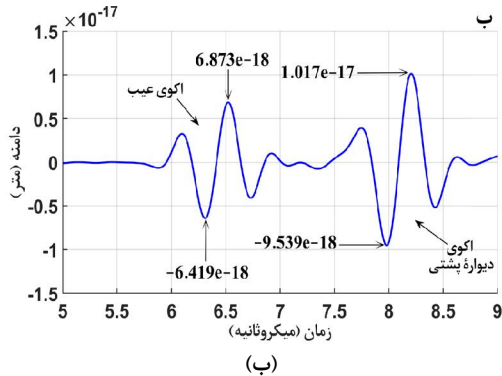
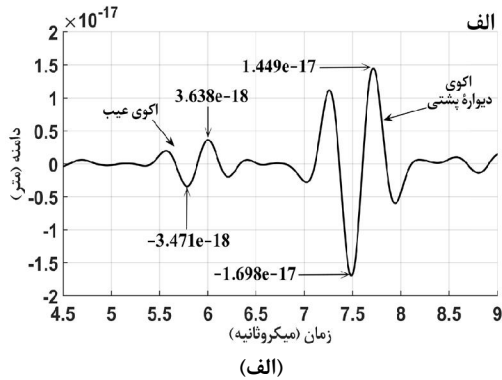
ب)

شکل ۱۰- انتشار امواج آلتراسونیک در بلوک فولادی (بدون زمان تأخیر) الف) 6e-7 s و ب) 3.95e-6 s

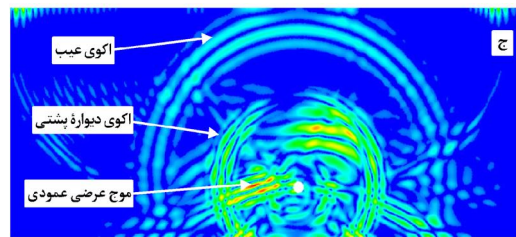
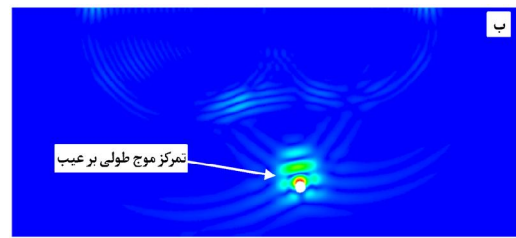
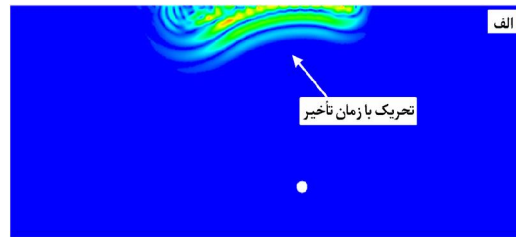
<sup>1</sup> Auto Correlation

کرده است. همچنین، اکوی دیواره پشتی بر اثر برخورد موج طولی به دیواره پایینی در حال انتشار در قطعه است. موج عرضی عمودی به دلیل سرعت کمتر نسبت به موج طولی در حال رسیدن به دیواره پشتی است. به منظور مقایسه نتایج حاصل از روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی

تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی فقط تصاویر مربوط به شبیه سازی تمرکز امواج آلتراسونیک به روش تمرکز تطبیقی بر عیب موجود در بلوک فولادی نمایش داده شده‌اند. با توجه به شکل ۱۲-الف، برآیند موج انتشاری از پیزوالکتریک‌ها به دلیل اعمال زمان تأخیر به صورت یک موج منحنی ایجاد شده است. این موج با گذشت زمان و نزدیکتر شدن به عیب موجود در بلوک فولادی همگرا می‌شود. لحظه برخورد موج طولی با عیب درون بلوک فولادی در شکل ۱۲-ب نشان داده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشینه انرژی موج طولی به صورت یک ناحیه قرمز رنگ پیرامون عیب ظاهر شده است.

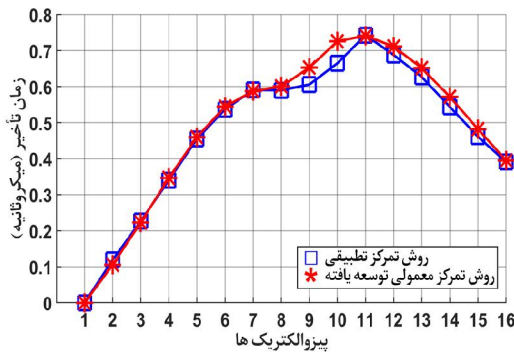


شکل ۱۳- سیگنال دریافتی از بلوک فولادی الف) بدون زمان تأخیر، ب) روش تمرکز تطبیقی و ج) روش تمرکز معمولی

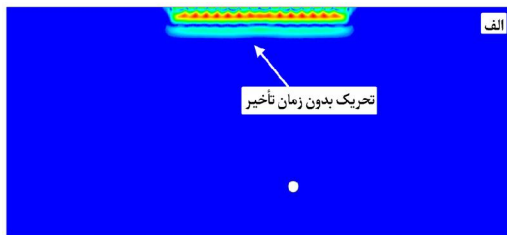


شکل ۱۲- انتشار امواج آلتراسونیک در بلوک فولادی (روش تمرکز تطبیقی) الف) 1.2e-6 s، ب) 3.77e-6 s و ج) 6.2e-6 s

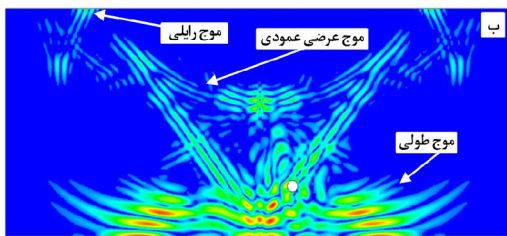
در شکل ۱۲-ج دامنه اکوی بازگشتی از عیب بر اثر برخورد موج طولی متمرکز شده بر آن به سطح پروب برخورد



شکل ۱۴- زمان تأخیر محاسبه شده به روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی توسعه یافته (جوش فریتی-آستنیتی)



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- انتشار امواج آلتراسونیک در جوش فریتی-آستنیتی (بدون زمان تأخیر) (الف) 6e-7 s (ب) 3.95e-6 s

از صحت مدلسازی صورت گرفته از جوش در نرم افزار اجزاء محدود است. در شکل ۱۵ تصاویر مربوط به شبیه سازی انتشار امواج آلتراسونیک در ماده جوش با استفاده از تحریک همزمان پیزوالکتریکها به جهت محاسبه زمان تأخیر به روش تمرکز تطبیقی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۵-الف، چون امواج آلتراسونیک در جهات مختلف از جوش ثابت و یکسان نیست، جبهه موج حاصل از برهم نهی امواج کروی منتشر شده از پیزوالکتریکها همانند شکل ۱۰-الف به صورت یکدست و صاف تشکیل نشده است. لذا، امواج کروی شکل

در متمرکز ساختن امواج بر عیب موجود در بلوک فولادی دامنه سیگنال دریافتی از آنها همراه با سیگنال دریافتی از تحریک بدون زمان تأخیر در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در شکل ۱۳، دامنه اکوی عیب و اکوی دیواره پشتی در روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی در مقایسه با حالت تحریک بدون زمان تأخیر به ترتیب ۸۸٪ افزایش و ۴۲٪ کاهش پیدا کرده است. این موضوع نشان از تمرکز بیشینه انرژی موج طولی در نقطه مورد نظر یا همان عیب درون بلوک فولادی دارد. همچنین، مقادیر اکوی دامنهها در دو روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی به دلیل نزدیکی مقادیر زمان تأخیر آنها به یکدیگر اختلاف کمی با یکدیگر دارند.

#### ۴-۲- تمرکز امواج آلتراسونیک در جوش فریتی-آستنیتی

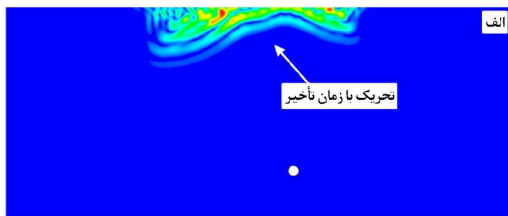
فرآیند محاسبه زمان تأخیر به روش تمرکز تطبیقی در جوش فریتی-آستنیتی همانند توضیحات داده شده برای بلوک فولادی است. علاوه بر آن، با استفاده از روش تمرکز معمولی توسعه یافته در پژوهش حاضر، زمان تأخیر مورد نیاز به منظور تمرکز امواج بر عیب موجود در جوش محاسبه شده است که مقادیر آن به همراه زمان تأخیر حاصل از روش تمرکز تطبیقی، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در شکل ۱۴ زمان تأخیر محاسبه شده به روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی توسعه یافته به ترتیب با استفاده از منحنی آبی و منحنی قرمز نشان داده شده است. همچنین، زمان محاسبه شده به روش تمرکز معمولی توسعه یافته با اختلاف بسیار کمی نسبت به روش تمرکز تطبیقی بدست آمده است.

روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی توسعه یافته، دو فرآیند کاملاً متفاوت با یکدیگر را برای محاسبه زمان تأخیر میان پیزوالکتریکها طی می کنند. مقادیر زمان تأخیر در روش تمرکز تطبیقی به دلیل استفاده از سیگنالهای دریافتی از نرم افزار باعث وابستگی کامل این روش به مدلسازی محیط جوش در نرم افزار اجزاء محدود است. درحالیکه زمان تأخیر در روش تمرکز معمولی توسعه یافته بدون استفاده از اطلاعات حاصل از شبیه سازی محاسبه می شود. لذا، انطباق زمان تأخیر حاصل از این دو روش، حاکی

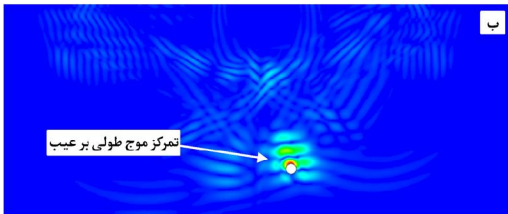
دو بعدی جوش و با توجه به راستای انتشار موج عرضی افقی، این موج در تصاویر حاصل از شبیه سازی قابل مشاهده نیستند.

با توجه به شکل ۱۵-ب، موج‌های طولی و عرضی بر اثر انحراف و تغییر مسیر در خلال انتشار در ماده جوش به راحتی مواد همگن و همسانگرد همانند بلوک فولادی قابل تشخیص نیستند. نحوه تمرکز امواج آلتراسونیک بر عیب درون جوش فریتی-آستنیتی با استفاده از روش تمرکز تطبیقی در شکل ۱۶ نشان داده است. با مشاهده شکل ۱۶-الف، امواج منتشر شده از پروب به فرم منحنی زمان تأخیر موجود در شکل ۱۴ ایجاد شده‌اند.

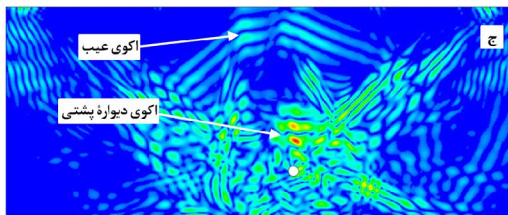
شکل ۱۶-ب، لحظه برخورد موج طولی به عیب درون جوش را نشان می‌دهد. این موضوع باعث ایجاد یک ناحیه قرمز رنگ پیرامون عیب شده است که نشان از تمرکز امواج به دلیل برخورد به عیب و دیواره پستی جوش و قطعه در آن



(الف)



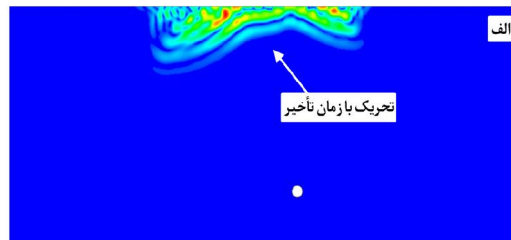
(ب)



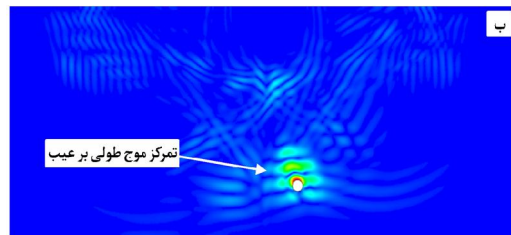
(ج)

شکل ۱۷- انتشار امواج آلتراسونیک در جوش فریتی-آستنیتی (روش تمرکز معمولی توسعه یافته) (الف)  $1.2e-6$  s، (ب)  $3.87e-6$  s و (ج)  $6.2e-6$  s

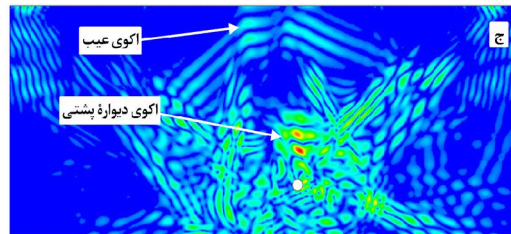
منتشر شده از پیزوالکتریک‌ها شروع به از دست دادن فرم کروی خود می‌کنند که به تدریج با دورتر شدن از پروب این موضوع افزایش یافته است. این موضوع به دلیل آن است که امواج منتشر شده از هر پیزوالکتریک در خلال طی شدن در محیط جوش سرعت متفاوتی به خود گرفته‌اند و فرم کروی را از دست داده‌اند. این موضوع انجام پردازش سیگنال به منظور محاسبه زمان تأخیر به روش تمرکز تطبیقی را با دشواری‌هایی روبرو می‌سازد. علاوه بر آن، به دلیل تفاوت سرعت امواج آلتراسونیک در تمامی جهات مختلف محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد، امواج عرضی عمودی و عرضی افقی در آنها ایجاد می‌شوند. از طرفی، از موج طولی برای بازرسی این نوع جوش به دلیل انحراف و میرایی کمتر نسبت به دو موج عرضی دیگر استفاده می‌شود [۲۴]. همچنین، بر اثر مدلسازی



(الف)



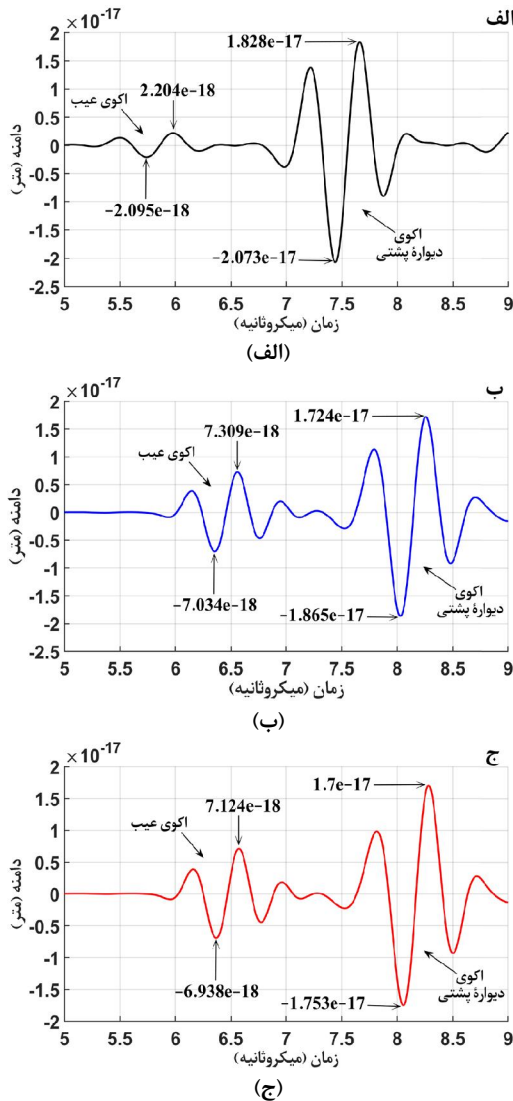
(ب)



(ج)

شکل ۱۶- انتشار امواج آلتراسونیک در جوش فریتی-آستنیتی (روش تمرکز تطبیقی) (الف)  $1.2e-6$  s، (ب)  $3.87e-6$  s و (ج)  $6.2e-6$  s





شکل ۱۸- سیگنال دریافتی از جوش فریتی-آستنیتی؛

الف) بدون زمان تأخیر، ب) روش تمرکز تطبیقی و

ج) روش تمرکز معمولی توسعه یافته

### ۵- بحث و نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر، بکارگیری روش آرایه فازی به منظور متمرکز ساختن امواج آلتراسونیک در ماده ناهمگن و ناهمسانگرد بوده است. به همین جهت، شبیه سازی تمرکز امواج آلتراسونیک به روش آرایه فازی و با بهره از روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی در یک بلوک فولادی و جوش

نقطه دارد. با توجه به شکل ۱۶-ج امواج آلتراسونیک محیط پخش شده‌اند. تشخیص موج طولی و موج عرضی به دلیل انحراف آنها در محیط به راحتی ماده بلوک فولادی نیست. اکوی عیب که بر اثر برخورد موج طولی متمرکز شده بر عیب ایجاد شده است، به دلیل اختلاف سرعت در جهات مختلف به فرم غیرکروی به سطح پروب برخورد کرده است. تمرکز امواج بر عیب موجود در جوش فریتی-آستنیتی به روش تمرکز معمولی توسعه یافته در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷-الف و شکل ۱۶-الف، به دلیل اختلاف اندک میان زمان‌های تأخیر محاسبه شده به روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی توسعه یافته، تشکیل جبهه موج از پروب در هر دو روش شبیه به یکدیگر شده است. لحظه برخورد موج طولی به عیب در شکل ۱۷-ب نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که بیشینه انرژی موج طولی که به صورت ناحیه قرمز رنگ در کنار عیب رخ داده است که این موضوع نشان از صحت زمان‌های محاسبه شده به روش تمرکز معمولی توسعه یافته در پژوهش حاضر است. در شکل ۱۷-ج علاوه بر پخش شدن امواج آلتراسونیک در جوش فریتی-آستنیتی، اکوی بازگشتی از عیب به سطح پروب رسیده است.

سیگنال‌های دریافتی حاصل از انتشار امواج آلتراسونیک در جوش فریتی آستنیتی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. دامنه اکوی عیب حاصل از تمرکز امواج به روش تمرکز تطبیقی و روش تمرکز معمولی توسعه یافته در مقایسه با حالت تحریک پیزوالکتریک‌ها بدون اعمال زمان تأخیر میان آنها به میزان ۲۳۵٪ افزایش داشته است. مشاهده می‌شود که همانند مرجع [۱۶] دامنه اکوی بازگشتی از عیب در حالت تمرکز امواج بر عیب موجود در جوش فریتی-آستنیتی افزایش یافته است. این موضوع نشان از بالا رفتن احتمال کشف عیوب در قطعات به واسطه قابلیت هدایت و تمرکز به کمک روش آرایه فازی است. مقدار اکوی حاصل از دیواره پایین قطعه در هر دو روش تمرکز نسبت به حالت تحریک همزمان پیزوالکتریک‌ها به میزان ۱۵٪ کاهش یافته است که این موضوع نشان از تمرکز امواج بر عیب موجود در قطعه دارد. انحراف امواج در خلال انتشار در ماده جوش، یکی از عوامل مهم در کاهش کمتر دامنه دیواره پستی در آن نسبت به بلوک فولادی است.

- [8] Rathod, et al. (2014) Metallurgical characterization and diffusion studies of successively buttered deposit of Ni-Fe alloy and Inconel on SA508 ferritic steel. ISIJ Int 54(8): 1866-1875.
- [9] Rathod DW, et al. (2015) Experimental analysis of dissimilar metal weld joint: Ferritic to austenitic stainless steel. Mater Sci Eng 639: 259-268.
- [10] Szávai S, et al. (2016) Modeling of phased array ultrasonic inspection of a steam generator dissimilar metal weld. Procedia Struct Integr 2: 1015-1022.
- [11] Beardsley B, et al. (1995) A simple scheme for self-focusing of an array. J Nondestruct Eval 14(4): 169-179.
- [12] Azar L, et al. (2000) Beam focusing behavior of linear phased arrays. NDT&E Int 33(3): 189-198.
- [13] Weston M, et al. (2012) Time efficient auto-focusing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using Full Matrix Capture. NDT&E Int 47: 43-50.
- [14] Holmes C, et al. (2005) Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. NDT&E Int 38(8): 701-711.
- [15] Ogilvy JA (1985) Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel. NDT Int 18(2): 67-77.
- [16] Kim, et al. (2016) Simulation based investigation of focusing phased array ultrasound in dissimilar metal welds. Nucl Eng Technol 48(1): 228-235.
- [17] Chen J, et al. (2015) Simulation and experiment for the inspection of stainless steel bolts in servicing using an ultrasonic phased array. Nondestruct. Test Eval 30(4): 373-386.
- [18] Cunningham LJ, et al. (2016) The detection of flaws in austenitic welds using the decomposition of the time-reversal operator. Proc R Soc A Math Phys Eng Sci 472(2188): 20150500.
- [19] Shivaprasad S, et al. (2018) Modeling and simulation of ultrasonic beam skewing in polycrystalline materials. Int J Adv Eng Sci Appl Math 10(1): 70-78.
- [۲۰] افتخاری شهری س و همکاران (۱۳۹۳) طراحی سیستم هیدروفورمینگ لوله همراه با ارتعاشات آلتراسونیک قالب. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۴۸-۱۳۵: ۵(۱)
- [21] Drozd MB (2008) Efficient finite element modeling of ultrasound waves in elastic media. Imperial College London.
- [22] Rose JL (2014) Ultrasonic Guided waves in solid media. 1st edn. Cambridge Press, London.
- فرتی-آسنیتی بررسی شده‌اند. روش تمرکز معمولی، روشی قدرتمند در متمرکز کردن امواج آلتراسونیک در محیط‌های همگن و همسانگرد است. در محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد به دلیل اینکه سرعت امواج آلتراسونیک به مکان وابسته می‌شود، از روش تمرکز معمولی نمی‌توان استفاده نمود. لذا در پژوهش حاضر، روش تمرکز معمولی به منظور استفاده در محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد همانند جوش فرتی-آسنیتی توسعه داده شده است. نتایج نشان از دقت بالای روش توسعه یافته برای تمرکز امواج آلتراسونیک در بر عیب موجود در این جوش دارند. اکوی عیب و دیواره پایینی قطعه در حالت تمرکز امواج آلتراسونیک به روش تمرکز معمولی توسعه یافته نسبت به روش آلتراسونیک معمولی به ترتیب به میزان ۲۳۵٪ افزایش و ۱۵٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است که از روش تمرکز معمولی توسعه یافته که در این پژوهش ارائه شده است، می‌توان در کاربردهای صنعتی استفاده کرد.

#### ۶- منابع

- [۱] طاهری م و همکاران (۱۳۹۵) ارزیابی تغییرات فرمولبندی لاستیک با اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۹۴-۲۸۵: ۶(۱)
- [2] Yuan C, et al. (2016) Ultrasonic phased array detection of internal defects in composite insulators. IEEE Trans. Dielectr Electr Insul 23(1): 525-531.
- [3] Olympus NDT (2017) Advances in phased array ultrasonic technology applications. 2nd edn. Olympus Scientific Solutions Americas.
- [4] Gezaei Abera A, et al. (2018) Prediction of grain orientation in dissimilar metal weld using ultrasonic response of numerical simulation from deliberated scatterers. Int J Press Vessel Pip 168: 1-10.
- [۵] قاقانی م (۱۳۸۹) بررسی متالورژیکی جوش پذیری فلزات غیرهمجنس در حالت ذوبی. چاپ اول، سبزان، تهران.
- [6] Singh RKR, et al. (2018) Friction stir welding of nuclear grade SA508Gr.3C1.1 and SS304LN dissimilar steels. Proc. Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci 232(21): 3814-3822.
- [7] Ye J, et al. (2011) Model-based simulation of focused beam fields produced by a phased array ultrasonic transducer in dissimilar metal welds. NDT&E Int 44(3): 290-296.



[24] Tabatabaeipour SM, Honarvar F (2010) A comparative evaluation of ultrasonic testing of AISI 316L welds made by shielded metal arc welding and gas tungsten arc welding processes. J Mater Process Technol 210(8): 1043-1050.

[23] Kolkoori SR, et al. (2013) Ultrasonic field profile evaluation in acoustically inhomogeneous anisotropic materials using 2D ray tracing model: Numerical and experimental comparison. Ultrasonics 53(2): 396-411.