

## Detection of Cracks and Lack of Fusion in Butt Joint Arc Welding Using Low Cost Acoustical Sensors

Seyed Amir Hoseini Sabzevari<sup>1</sup> 

1. Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran. E-mail: [Hoseini.Sabzevari@gonabad.ac.ir](mailto:Hoseini.Sabzevari@gonabad.ac.ir)

### Article Information:

#### Research Article

Received 21 January 2025

Revised 12 March 2025

Accepted 30 May 2025

#### Keywords:

Fault detection,  
Welded joint,  
Crack,  
Lack of fusion.

### ABSTRACT

This study thoroughly examines the detection of cracks and incomplete fusion in butt-welded steel plates. These defects, widely recognized as critical welding flaws, can significantly undermine the structural integrity and long-term reliability of metallic systems. To investigate this pressing issue, controlled and artificial defects, specifically cracks and incomplete fusion, were introduced during the experimental phase. These defects were systematically generated by inducing abrupt changes in the welding temperature and voltage during the welding process. Traditional approaches in this domain predominantly rely on ultrasonic waves and high-frequency sensors, which often entail high computational complexity and significant financial costs. In contrast, this study proposes an innovative method that utilizes the characteristics of elastic waves propagating through steel plates, presenting a more straightforward, accessible, and cost-efficient alternative. The proposed method incorporates data acquisition and analysis within a limited frequency range, which mitigates environmental influences and reduces computational demands, thereby facilitating the continuous monitoring of welded joints. The defect identification process involves analyzing the signal energy and higher-order statistical parameters, such as the third- and fourth-order statistical moments, to effectively differentiate between cracks and incomplete fusion. Experimental results indicated that in samples containing cracks, the ratios of signal energy, third-order statistical moments, and fourth-order statistical moments to those of defect-free samples increased by 125%, 394%, and 53%, respectively. Conversely, in samples with incomplete fusion, these ratios were found to be 76%, 28%, and 86%, respectively. These findings clearly underscore the efficiency, robustness, and accuracy of the proposed method for non-destructive testing of welding defects. The approach offers reduced computational complexity, making it a viable tool for practical industrial applications. Furthermore, the simplicity of this method and its capability for real-time monitoring highlight its great potential for integration into the continuous health monitoring of metallic structures. This approach offers a promising and practical alternative to conventional, more resource-intensive techniques for welded joint evaluation.

**Cite this article:** Hoseini Sabzevari, S. A. (2024). Detection of Cracks and Lack of Fusion in Butt Joint Arc Welding Using Low Cost Acoustical Sensors. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (1), 14-23.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.495251.1156>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

## تشخیص ترک و ذوب ناقص در جوشکاری لب به لب قوس الکتریکی به وسیله‌ی حسگر صوتی ارزان قیمت

سید امیر حسینی سبزواری<sup>۱</sup> ✉

۱. دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران، رایانامه: [Hoseini.Sabzevari@gonabad.ac.ir](mailto:Hoseini.Sabzevari@gonabad.ac.ir)

### چکیده:

در این پژوهش، تشخیص ترک و ذوب ناقص در جوش لب به لب صفحات فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. این عیوب که از مهم‌ترین معایب جوشکاری محسوب می‌شوند، می‌توانند استحکام و قابلیت اطمینان سازه‌های فلزی را به‌طور چشمگیری کاهش دهند. به‌منظور ارزیابی این موضوع، در مرحله آزمایشگاهی، دو نوع عیب ترک و ذوب ناقص به‌صورت کنترل‌شده و مصنوعی ایجاد شدند. این کار از طریق تغییرات ناگهانی دمای جوشکاری و ولتاژ بر فرایند جوشکاری انجام گرفت. پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر استفاده از امواج آلتراسونیک و حسگرهای فرکانس بالا تمرکز داشته‌اند که با پیچیدگی محاسباتی و هزینه‌های بالا همراه هستند. در مقابل، روش پیشنهادی در این مطالعه با بهره‌گیری از ویژگی‌های امواج الاستیک منتشر شده در صفحات فولادی، رویکردی ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر ارائه می‌دهد. در این روش، به‌منظور کاهش اثرات عوامل محیطی و حجم محاسبات، داده‌برداری در بازه فرکانسی محدودی انجام شد که امکان پایش دائمی اتصالات را نیز فراهم می‌کند. برای تشخیص و تفکیک عیوب ترک و ذوب ناقص، انرژی سیگنال‌ها و پارامترهای آماری مرتبه بالا از جمله گشتاورهای آماری مرتبه سوم و چهارم مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که نسبت مقادیر انرژی سیگنال و گشتاورهای آماری در نمونه‌های دارای ترک نسبت نمونه‌های سالم به ترتیب ۱۲۵٪، ۳۹۴٪ و ۵۳٪ افزایش یافته است. در حالی که در نمونه‌های دارای عیب ذوب ناقص، این نسبت‌ها به ترتیب ۷۶٪، ۲۸٪ و ۸۶٪ گزارش شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی با کاهش پیچیدگی محاسباتی، می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای شناسایی غیرمخرب عیوب در اتصالات‌های جوشکاری مورد استفاده قرار گیرد.

### اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۰۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۳/۰۹

کلیدواژگان:

تشخیص ایراد،

اتصال جوش،

ترک جوش،

ذوب ناقص جوش.

استناد: حسینی سبزواری، سید امیر. (۱۴۰۳). تشخیص ترک و ذوب ناقص در جوشکاری لب به لب قوس الکتریکی به وسیله‌ی حسگر صوتی ارزان قیمت. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۱)، ۱۴-۲۳.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران



DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.495251.1156>

## ۱- مقدمه

اتصالات جوشکاری نقش کلیدی در صنایع مختلف از جمله خطوط لوله نفت و گاز، پروژه‌های ساخت و ساز، پل‌سازی، صنایع برق و راه‌آهن ایفا می‌کنند. به دلیل استفاده گسترده این اتصالات در پروژه‌های زیربنایی و صنعتی، اطمینان از کیفیت آن‌ها ضروری است [۱]. با این وجود، عیوبی نظیر تخلخل، ترک، محبوس شدن سرباره، عدم همجوشی کامل و نفوذ ناکافی ممکن است در این اتصالات ایجاد شود. شناسایی و رفع به‌موقع این عیوب برای جلوگیری از شکست سازه یا نشتی در لوله‌ها امری حیاتی است. بنابراین، پایش و بازرسی دقیق اتصالات جوشکاری برای تضمین عملکرد ایمن و پایدار سیستم‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

در سال‌های اخیر، روش‌های غیر مخرب به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی برای بازرسی کیفیت جوش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲]. این روش‌ها به دلیل ماهیت غیرتهاجمی و امکان اجرا بدون نیاز به توقف فرآیند، به‌سرعت در صنعت گسترش یافته‌اند. از شناخته‌شده‌ترین روش‌های غیر مخرب می‌توان به روش‌های آزمون نفوذ مایعات، ذرات مغناطیسی، فراصوت، بازرسی چشمی، رادیوگرافی و انتشار امواج آکوستیک اشاره کرد [۳]. انتخاب روش مناسب به عواملی نظیر نوع سازه، نوع اتصال جوش و شرایط محیطی وابسته است.

از میان این روش‌ها، روش انتشار امواج آکوستیک به دلیل قابلیت نظارت مداوم و سرعت بالای بازرسی، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است [۴]. این روش، برخلاف بسیاری از روش‌های دیگر که تنها یک ناحیه خاص را ارزیابی می‌کنند، امکان پایش گسترده‌تری را فراهم می‌آورد. امواج الاستیک هنگام برخورد با عیوب موجود در سازه دچار تغییراتی می‌شوند که می‌توان از این تغییرات برای شناسایی موقعیت و نوع عیوب بهره برد [۵]. این ویژگی، خصوصاً در سازه‌های حساس که نیاز به نظارت پیوسته دارند، بسیار ارزشمند است.

مطالعات مختلفی برای بهبود روش‌های غیرمخرب در بازرسی جوش انجام شده است. سان<sup>۱</sup> و همکاران [۶] از

امواج فراصوت برای ارزیابی جوش‌های نقطه‌ای استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که امواج فراصوت اطلاعات مفیدی درباره وجود عیوب جوش فراهم می‌کنند. کروز<sup>۲</sup> و همکاران [۷] با استفاده از داده‌های فراصوت و شبکه‌های عصبی مصنوعی، سه نوع عیب (ذوب ناقص، تخلخل و حبس سرباره) را شناسایی کردند. در روش پیشنهادی آن‌ها، از بردارهای ویژگی که شامل روش‌های آماری و روش‌های زمان-فرکانس استفاده گردید. باجقولی<sup>۳</sup> و همکاران [۸] قابلیت اطمینان روش‌های فراصوت و رادیوگرافی را برای بازرسی جوش‌های دارای عیوب داخلی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه روش‌های غیر مخرب قادر به شناسایی عیوب کوچک (حدود ۲/۵ میلی‌متر) هستند، برخی از روش‌های سنتی فراصوت در تشخیص عیوب بزرگ‌تر (حدود ۵ میلی‌متر) عملکرد ضعیفی دارند. فکیح<sup>۴</sup> و همکاران [۹] از امواج هدایت‌شده فراصوت برای بازرسی جوش‌های اصطکاکی استفاده کردند. در این تحقیق، یک شاخص برای شناسایی و ارزیابی عیوب جوش بر اساس دامنه امواج لمب منتشر شده، تعریف گردید. یو<sup>۵</sup> و همکاران [۱۰] با روش‌های نیمه‌تحلیلی المان محدود دو نوع عیب جوش را در صفحات شناسایی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که امواج هدایت‌شده با درجات بالا می‌تواند اطلاعات دقیق و مؤثری در مورد عیوب جوش ارائه دهد. لی<sup>۶</sup> و همکاران [۱۱] از امواج هدایت‌شده و روش انتشار امواج آکوستیک برای ارزیابی کیفیت جوش در لوله‌های فلزی استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که امواج هدایت‌شده در مسافت‌های طولانی بدون کاهش قابل‌توجهی در انرژی منتشر شده و به این ترتیب امکان بازرسی وسیع‌تری از نمونه را فراهم می‌آورد. هوانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] یک روش جدید برای پایش برخط ایجاد ترک در نمونه‌های جوشکاری شده، ارائه نمودند. در این روش، از مدل‌های خوشه‌بندی بدون نظارت و داده‌های آکوستیک برای شناسایی الگوهای

<sup>2</sup> Cruz<sup>3</sup> Bajgholi<sup>4</sup> Fakh<sup>5</sup> Wu<sup>6</sup> Lee<sup>7</sup> Huang<sup>1</sup> Sun

عیوبی نظیر ترک و ذوب ناقص در اتصالات جوش فولادی معرفی می‌شود که از نرخ نمونه‌برداری پایین و حسگر صوتی ارزان قیمت بهره می‌برد. برخلاف پژوهش‌های پیشین که عمدتاً متکی به نرخ‌های نمونه‌برداری بالا و تجهیزات گران قیمت بوده‌اند، این تحقیق کارایی نرخ‌های نمونه‌برداری پایین را همراه با روش‌های پیشرفته‌ی پردازش سیگنال ارزیابی می‌کند. این رویکرد نه تنها هزینه‌های بازرسی را کاهش می‌دهد بلکه امکان پایش مداوم و مقرون‌به‌صرفه‌ی سازه‌ها را نیز فراهم می‌آورد. این ویژگی به‌ویژه برای کاربردهای صنعتی که نیاز به نظارت مستمر دارند، بسیار مناسب است.

نوآوری اصلی این تحقیق در استفاده از نرخ نمونه‌برداری پایین و به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی شده پردازش سیگنال برای تشخیص دقیق عیوب است. بردارهای ویژگی آماری و زمان-فرکانسی استخراج‌شده از سیگنال‌ها، با وجود محدودیت‌های معمول نرخ پایین نمونه‌برداری، امکان شناسایی و طبقه‌بندی عیوب را به‌طور قابل قبول نشان می‌دهند. این قابلیت به‌ویژه در مواردی که به دلایل صنعتی و اقتصادی نرخ‌های نمونه‌برداری بالا امکان‌پذیر نیستند، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق، ویژگی‌های آماری سیگنال‌های دریافتی از اتصالات سالم و معیوب مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند تا با دقت بیشتری به تشخیص عیوب پرداخته شود. این رویکرد، از یک سو با مطالعات پیشین در زمینه‌ی استفاده از امواج آکوستیک و تکنیک‌های آماری اشتراکاتی دارد و از سوی دیگر، با تأکید بر کاهش نرخ نمونه‌برداری و استفاده از تجهیزات کم‌هزینه، محدودیت‌های روش‌های مرسوم را برطرف نموده و راهکاری عملی و کارآمد برای نظارت مستمر سازه‌های صنعتی فراهم کرده است.

در نهایت، این پژوهش راهکاری عملی، کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای نظارت مستمر سازه‌های صنعتی ارائه کرده و محدودیت‌های روش‌های مرسوم را برطرف می‌کند.

لازم به ذکر است نویسنده به این مهم اذعان دارد که تشخیص عیوب با نرخ نمونه‌برداری پایین، نمی‌تواند با روش‌های با نرخ بالا رقابت کند. اما در شرایطی که کاهش حجم داده و امکان پایش مداوم ضرورت دارد، روش پیشنهادی در این مقاله کارایی و اثر بخشی خود را به‌طور واضح نشان می‌دهد.

ترک استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که این روش علاوه بر کارایی از قابلیت اطمینان بالایی نیز برخوردار است. ساتیانارایان<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳] عیوب مصنوعی مختلفی مانند ترک‌های محوری را در منطقه تکیه‌گاه لوله شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش، موقعیت و اندازه عیوب از طریق تحلیل زمان و دامنه امواج هدایت‌شده بررسی و گزارش گردید. ژو<sup>۲</sup> و همکاران [۱۴] روش‌هایی را برای ارزیابی آسیب‌های جوشکاری با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز و روش انتشار امواج آکوستیک پیشنهاد دادند. رن<sup>۳</sup> و همکاران [۱۵] تأثیر خستگی بر اتصالات جوش را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش انتشار امواج آکوستیک و به-کارگیری توابع هایپربولیک، موفق به شناسایی عیوب اولیه و آسیب‌های ناشی از خستگی در مراحل اولیه شدند. مانداچه<sup>۴</sup> و همکاران [۱۶] قابلیت‌های روش‌های غیر مخرب مختلف را برای بازرسی عیب نفوذ در جوش‌های لبه‌ای ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که اگرچه روش‌هایی مانند جریان گردابی و نفوذ مایعات دقت بالایی در تشخیص دارند، اما در کاربردهای عملی و سناریوهای واقعی، استفاده از امواج فراصوت به دلیل سادگی و کارایی بیشتر، گزینه مناسب‌تری است. هی<sup>۵</sup> و همکاران [۱۷] یک مدل هوشمند برای ارزیابی کیفیت جوش در بدنه قطارهای مترو توسعه دادند. در این مطالعه، داده‌های مربوط به عیوب جوش با استفاده از آزمایش فراصوت جمع‌آوری شد و برای طبقه‌بندی این داده‌ها از شبکه‌های عصبی مصنوعی بهره گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که روش پیشنهادی دقت بسیار بالایی در شناسایی کیفیت جوش ارائه می‌دهد. هوانگ<sup>۶</sup> و همکاران [۱۸] مسئله نشتی خطوط لوله ناشی از ترک‌های جوش را بررسی کردند. در روش نوآورانه پیشنهادی آن‌ها از تبدیل موجک برای استخراج بردار ویژگی استفاده شد. نتایج این پژوهش بیانگر دقت بالای این روش در شناسایی حالات مختلف عیوب می‌باشد.

در این مقاله، رویکردی جدید و اقتصادی برای شناسایی

<sup>1</sup> Satyarnarayan

<sup>2</sup> Zhou

<sup>3</sup> Ren

<sup>4</sup> Mandache

<sup>5</sup> He

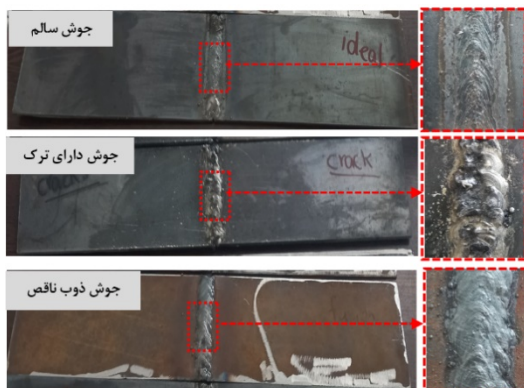
<sup>6</sup> Huang

## ۲- روش پیشنهادی

## ۲-۱ محیط آزمایش



شکل (۱) محیط آزمایش



شکل (۲) صفحات مورد آزمایش.

## ۲-۲ ماهیت امواج منتشر شده

اعمال ضربه بر صفحات فولادی موجب تولید امواج الاستیک می‌شود. این امواج هنگام عبور از محل اتصال جوش، تحت تأثیر عیوب موجود قرار گرفته و توسط حسگر دریافت و ذخیره می‌شوند. انتشار این امواج در صفحه مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۱]:

$$\vec{u} = \vec{u}_P + \vec{u}_{SV} + \vec{u}_{SH} \quad (1)$$

که در آن  $u_P$ ،  $u_{SV}$  و  $u_{SH}$  به ترتیب نمایانگر موج

برای ایجاد بانک داده یک محیط آزمایش طراحی و ساخته شد. در این محیط، شش صفحه‌ی فلزی از جنس فولاد به ابعاد ۲۵ در ۱۰ سانتی‌متر، ضخامت ۳ میلی‌متر و جرم ۰/۵۹۰ کیلوگرم دو به دو با جوش لب به لب به یکدیگر متصل شدند. لبه‌های صفحات پیش از جوشکاری با پخ‌زنی جناقی و تمیزکاری آماده‌سازی شدند. فرآیند جوشکاری با استفاده از جوش قوس الکتریکی دستی، الکتروود روکش‌دار ۶۰-۱۳، جریان مستقیم، زاویه کار ۹۰ درجه و زاویه شیب ۱۰ درجه انجام شد. برای دریافت صدای منتشر شده، از یک میکروفن خازنی [۱۹] با بیشینه فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز و جرم ۰/۸ گرم، به همراه یک کارت صدا با نرخ داده برداری ۴۴۱۰۰ داده بر ثانیه برای اتصال به رایانه استفاده شد. دهنه‌ی دیافراگم میکروفون به گونه‌ای بر روی سطح صفحه ثابت شد که نویز محیط پیرامون را به حداقل برساند. همچنین، صفحه مورد آزمایش در داخل یک قاب معلق گردید. امواج الاستیک تولید شده [۲۰] هنگام عبور از صفحه و اتصال جوش، توسط حسگر دریافت و ذخیره شدند. در منابع، روش‌های گوناگونی برای تولید امواج پیشنهاد شده است. از میان این روش‌ها، می‌توان به شکستن مغز مداد، رها کردن توپ از ارتفاع مشخص و اعمال ضربه مستقیم به صفحه اشاره کرد. با توجه به ویژگی‌های مکانیکی صفحه مورد آزمایش و به منظور کاهش اثر امواج بازتابی، در این پژوهش از روش ضربه مستقیم استفاده شده است.

بانک داده‌ی ایجاد شده شامل سیگنال‌های ثبت شده از آزمایش‌های متعدد و مجزا است که هم اتصال بدون عیب و هم اتصال‌های دارای عیوب مختلف را در برمی‌گیرد. در تمام آزمایش‌ها، حسگر در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از محل ضربه قرار گرفته است. شکل ۱ شماتیک محیط آزمایش و موقعیت حسگر و شکل ۲ صفحات آزمایش شده را نمایش می‌دهد. همچنین جدول ۱ فهرست تجهیزات استفاده شده و شکل ۳ مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

اپراتور کرل است. با جاگذاری رابطه (۲) در معادله ناویر<sup>۴</sup>، معادلات حاکم بر امواج منتشرشده به صورت رابطه (۳)، بیان می‌شوند.

$$\vec{\nabla} \left( (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi - \rho \vec{\nabla} \dot{\varphi} \right) + \vec{\nabla} \times (\mu \nabla^2 \vec{H} - \rho \ddot{\vec{H}}) = 0 \quad (3)$$

که در آن چگالی،  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه<sup>۵</sup> نامیده می‌شوند. با ساده‌سازی معادلات و صرف نظر کردن از یک بعد (به دلیل ضخامت ناچیز صفحه فولادی در مقایسه با دو بعد دیگر) رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$\vec{u} = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (4)$$

با اعمال شرط کرنش صفحه، معادلات به شکل رابطه (۵) ساده می‌شوند [۲۲].

$$C_p^2 \nabla^2 \varphi = \ddot{\varphi} \quad C_p = (\lambda + 2\mu) / \rho \quad (5)$$

$$C_s^2 \nabla^2 H_z = \ddot{H}_z \quad C_s = \mu / \rho$$

که در آن  $C_p$  و  $C_s$  به ترتیب سرعت انتشار موج فشاری و برشی هستند. برهم‌کنش این امواج و بازتاب‌های آن‌ها از سطح صفحه، منجر به ایجاد امواج لمب<sup>۶</sup> می‌شود [۲۳]. این امواج ترکیبی از دو مود متقارن و نامتقارن هستند که در اثر ضربه، هر دو مود در صفحه ایجاد و منتشر می‌شوند [۲۴]. سیگنال‌های دریافت‌شده توسط میکروفون به صورت داده‌های زمانی ذخیره می‌شوند و اطلاعات هر دو مود را در بر دارند. با این حال، به دلیل نرخ نمونه‌برداری پایین، تفکیک این مودها امکان‌پذیر نیست.

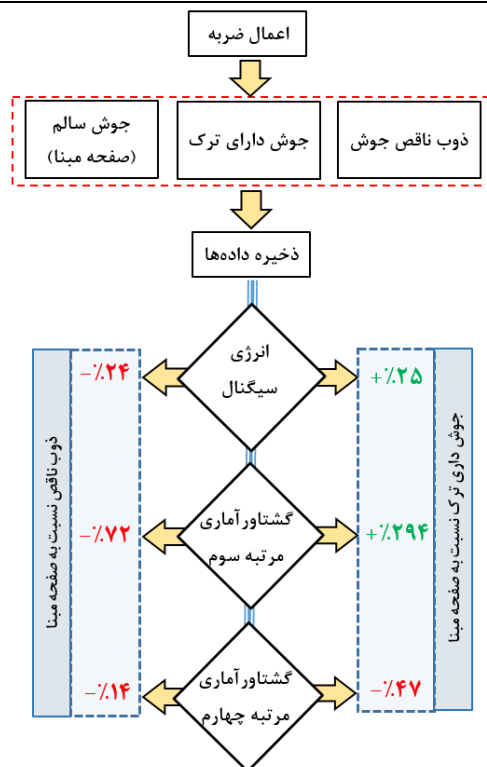
### ۲-۳ انواع ایرادات جوش

وجود نقص در جوش می‌تواند منجر به تمرکز تنش در محل اتصال شده و به‌طور قابل توجهی استحکام و یکپارچگی ساختاری را کاهش دهد. از مهم‌ترین عیوب جوش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. ترک: ترک‌ها از رایج‌ترین و بحرانی‌ترین انواع نقص‌ها هستند که ممکن است با جهت‌گیری‌های مختلف در جوش ظاهر شوند. این نقص زمانی ایجاد می‌شود که تنش

جدول (۱) فهرست تجهیزات استفاده شده.

تجهیزات مورد استفاده	توضیحات
صفحات فلزی با ابعاد ۲۵ در ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر، جنس کربن استیل با چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب	
حسگر صوتی خازنی با پیشینه‌ی فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز و جرم ۰/۸ گرم، به ابعاد ۹/۷ در ۱۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۷ میلی‌متر از برند Uxcell	
قاب آزمایش	قاب چوبی برای معلق نمودن صفحات هنگام انجام آزمایش



شکل (۳) مراحل انجام و نتایج اولیه پژوهش حاضر

فشاری<sup>۱</sup>، موج برشی در صفحه‌ی عمودی<sup>۲</sup> و موج برشی در صفحه افقی<sup>۳</sup> هستند. جایجایی  $\vec{u}$  را می‌توان به صورت رابطه (۲) بیان کرد.

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \varphi + \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (2)$$

که در آن  $\varphi$  و  $\vec{H}$  به ترتیب توابع پتانسیل اسکالر و برداری،  $\nabla \times$  نشان دهنده‌ی اپراتور گرادیان و  $\nabla \times$  نمایانگر

<sup>4</sup> Navier

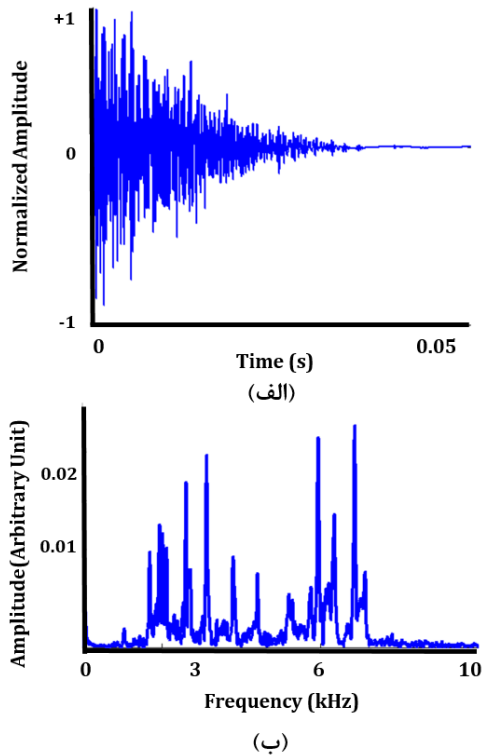
<sup>5</sup> Lamé

<sup>6</sup> Lamb Waves

<sup>1</sup> P-wave

<sup>2</sup> Shear-Vertical wave

<sup>3</sup> Shear-Horizontal wave



شکل ۴) سیگنال ذخیره شده حاصل از ضربه به صفحه آزمایش، (الف) حوزه زمان و (ب) حوزه فرکانس

و تنها عیوب موجود در مسیر انتشار، مربوط به عیوب موجود در اتصال جوش است. برای انجام آزمایش‌ها سه صفحه با اتصال‌های سالم، دارای ترک و ذوب ناقص آماده سازی شدند. به دلیل عدم دسترسی به نمونه‌های استاندارد، نمونه‌ها به روش زیر تهیه شدند: برای ایجاد ترک در اتصال، جوشکاری از پاشش مستقیم آب سرد به محل الکترود استفاده شد. همچنین ذوب ناقص با تغییر در ولتاژ کاری دستگاه جوشکاری ایجاد گردید.

تمامی صفحات پیش از انجام آزمایش با دستگاه تستอัลتراسونیک بررسی شدند تا از صحت ایجاد عیوب مورد نظر اطمینان حاصل شود. لازم به ذکر است که در فرآیند ایجاد هر یک از عیوب، احتمال بروز عیوب دیگر نیز وجود دارد. با این حال، با توجه به شرایط خاص اعمال شده در هنگام جوشکاری (پاشش آب سرد یا تغییر ولتاژ)، می‌توان به‌طور قابل قبولی فرض کرد که عیب غالب در نمونه، همان عیب انتخابی است. بنابراین، در این پژوهش عیب غالب در هر نمونه به‌عنوان تنها عیب موجود در اتصال در نظر گرفته شده است.

موضعی کشتی از استحکام جوش یا ماده پایه فراتر رود.  
 ۲. نفوذ ناکامل: عدم نفوذ کامل ماده جوش در ضخامت قطعه، به‌عنوان نفوذ ناکامل شناخته می‌شود. این نقص معمولاً به دلیل روش نادرست جوشکاری، انتخاب نامناسب الکترود، یا تنظیم نامناسب پارامترهای جوشکاری به وجود می‌آید.  
 ۳. ذوب ناقص: عدم ذوب یک عیب صفحه‌ای است که معمولاً به‌صورت داخلی در جوش مشاهده می‌شود. این مشکل زمانی رخ می‌دهد که فلز پایه و ماده جوش به‌درستی با یکدیگر ترکیب نشوند. ذوب ناقص می‌تواند به کاهش قابل توجه عمر خستگی و استحکام ساختاری منجر شود.  
 ۴. محبوس شدن سرباره: به دام افتادن ناخالصی‌ها درون جوش به‌عنوان محبوس شدن سرباره شناخته می‌شود. این نقص معمولاً به دلیل سرعت نامناسب حرکت مشعل، جریان پایین جوشکاری و یا عدم تمیزکاری کافی قبل از جوشکاری رخ می‌دهد.

۵. تخلخل: حفره‌ها و ناپیوستگی‌هایی ایجاد شده در طول فرآیند جوشکاری به دلیل به دام افتادن هوا، هیدروژن محلول، یا شرایط محیطی، تخلخل نامیده می‌شود. تخلخل می‌تواند منجر به ترک خوردگی یا کاهش استحکام اتصال شود.

از میان نقص‌های ذکر شده، در این پژوهش به بررسی عیب ترک و ذوب ناقص پرداخته شده است. انتخاب این عیوب علاوه بر رایج بودن، به دلیل امکان ایجاد مصنوعی آن‌ها در شرایط آزمایشگاهی بوده است.

### ۳- آزمایش

در روش پیشنهادی، امواج الاستیک از طریق ضربه‌ای که با استفاده از یک نشانگر فلزی به سطح صفحات وارد می‌شود، ایجاد می‌گردند. نمونه‌ای از سیگنال تولید شده در اثر این ضربه در شکل ۴ نمایش داده شده است. امواج منتشر شده پس از عبور از اتصال جوش، توسط حسگر دریافت و ذخیره می‌شوند. این امواج در مراحل ایجاد، انتشار و دریافت، تحت تأثیر محیط انتشار و عیوب احتمالی موجود در مسیر خود قرار می‌گیرند. در این پژوهش فرض شده است که تمامی صفحات فاقد هرگونه ایراد ساختاری هستند

## ۴- بحث

انرژی داشته باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر و کاهش اثر شدت وقوع عیب، از گشتاورهای آماری مرتبه بالا استفاده شد.

گشتاور آماری مرتبه سوم میزان عدم تقارن تابع چگالی احتمال داده‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. این کمیت در آشکارسازی گذرهای سریع سیگنال (از کمینه به بیشینه) بسیار کارآمد است. گشتاور آماری مرتبه سوم در رابطه (۷) بیان شده است.

$$C_{skw} = \frac{\sigma_3}{\sigma_2^{3/2}} = \frac{E\{(X - \mu_1)^2\}}{\sqrt{(E\{(X - \mu_1)^2\})^3}} \quad (7)$$

گشتاور آماری مرتبه چهارم، رابطه (۸)، میزان یکنواختی یا ضربه‌ای بودن داده‌ها را مشخص می‌کند و به شناسایی نواحی با شیب زیاد در سیگنال کمک می‌کند.

$$C_{kts} = \frac{\sigma_4}{\sigma_2^2} = \frac{E\{(X - \mu_1)^4\}}{(E\{(X - \mu_1)^2\})^2} \quad (8)$$

مقادیر این گشتاورها برای اتصالات سالم و دارای عیب در جدول‌های ۳ و ۴ گزارش شده است.

جدول (۳) قدر مطلق گشتاور آماری مرتبه سوم سیگنال. نتایج گزارش شده حاصل میانگین ۷ مرتبه تکرار آزمایش است.

نوع	مدت زمان (میلی ثانیه)				تغییر
	۲۷۲	۴۰۸	۴۹۸	میانگین	
جوش	۰/۱۲۸	۰/۱۵۶	۰/۱۷۰	۰/۱۵۱	به سالم
ترک	۰/۵۰۳	۰/۶۱۰	۰/۶۷۳	۰/۵۹۵	٪۲۹۴+
ذوب ناقص	۰/۰۳۷	۰/۰۴۶	۰/۰۴۷	۰/۰۴۳	٪۷۲-

جدول (۴) گشتاور آماری مرتبه چهارم سیگنال. نتایج گزارش شده حاصل میانگین ۷ مرتبه تکرار آزمایش است.

نوع	مدت زمان (میلی ثانیه)				تغییر
	۲۷۲	۴۰۸	۴۹۸	میانگین	
جوش	۳۱/۵۴	۴۷/۲۹	۵۷/۸۰	۴۵/۵۴	به سالم
ترک	۱۷/۰۱	۲۵/۱۹	۳۰/۷۹	۲۴/۳۳	٪۴۷-
ذوب ناقص	۲۷/۲۳	۴۰/۸۳	۴۹/۹۰	۳۹/۳۲	٪۱۴-

مشابه انرژی سیگنال، مقادیر گشتاورهای آماری با افزایش مدت زمان افزایش یافتند. هر دو گشتاور عملکرد قابل توجهی در نمایش عیوب جوش نشان دادند. مطابق

امواج الاستیک ایجاد شده در صفحات به صورت امواج لمب منتشر شده و توسط یک حسگر دریافت و ذخیره می‌شوند. به منظور کاهش تأثیر شدت ضربه بر سیگنال‌های دریافتی، تمامی سیگنال‌ها قبل از تحلیل، نرمال‌سازی شده و بیشینه‌ی دامنه آن‌ها به مقدار ۱ تنظیم شود. این نرمال‌سازی ممکن است بر پارامترهایی مانند انرژی و گشتاورهای آماری تأثیر بگذارد. بنابراین، نتایج حاصل شده بیشتر تفاوت‌های ریاضی میان سیگنال‌ها را نشان می‌دهند تا مقادیر مطلق فیزیکی آن‌ها. انرژی سیگنال‌های نرمال شده مطابق رابطه (۶) محاسبه شد.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} v^2(t) dt \quad (6)$$

که در آن  $v(t)$  سیگنال صوتی ذخیره شده است. به دلیل محدودیت‌های پژوهش، بازه زمانی انتگرال (که از این پس "مدت زمان" نامیده می‌شود) بین ۰/۲۷۲ تا ۰/۴۹۸ ثانیه با گام‌های ثابت تغییر کرده است. انرژی سیگنال در هر گام محاسبه و در جدول ۲، گزارش شده است.

جدول (۲) انرژی سیگنال ذخیره شده ( $v^2 \times S$ ) در صفحه با

اتصال بدون ایراد و دارای ایراد. نتایج گزارش شده حاصل میانگین ۷ مرتبه تکرار آزمایش است.

نوع	مدت زمان (میلی ثانیه)				تغییر
	۲۷۲	۴۰۸	۴۹۸	میانگین	
جوش	۴۳۸/۶۵	۴۶۱/۵۵	۴۷۵/۹۱	۴۵۸/۷۰	به سالم
ترک	۵۴۵/۳۵	۵۸۳/۰۷	۵۹۷/۰۵	۵۷۵/۱۵	٪۲۵+
ذوب ناقص	۳۱۸/۷۵	۳۳۶/۰۶	۳۴۶/۷۲	۳۴۹/۷۲	٪۲۴-

برای بررسی اثر عیوب جوش، نتایج با صفحه دارای اتصال سالم مقایسه شده است. درصد تغییر میانگین انرژی سیگنال هر صفحه نسبت به صفحه سالم در ستون آخر جدول ۲ گزارش شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، انرژی سیگنال با افزایش مدت زمان در تمامی صفحات افزایش یافته است. حضور ترک و ذوب ناقص به ترتیب موجب افزایش ۲۵٪ و کاهش ۲۴٪ انرژی سیگنال نسبت به صفحه سالم شده است. لازم به ذکر است که شدت وقوع هر یک از این عیوب می‌تواند تأثیر مستقیمی بر میزان تغییر

سریع و ناگهانی سیگنال، به‌ویژه در داده‌هایی با توزیع نامتقارن، منجر به بهبود تشخیص و تفکیک ترک از ذوب ناقص شده است.

افزایش قدرت تمییزدهی این پارامتر به این معنا است که با کاهش حساسیت نسبت به شدت وقوع عیب، تمرکز بیشتری بر نوع عیب داشته دارد و می‌تواند تمایز دقیق‌تری بین ترک و ذوب ناقص ایجاد کند. این ویژگی موجب شده است که گشتاور آماری مرتبه سوم به‌عنوان پارامتر مطلوب انتخاب شود، زیرا دقت بالاتری در تشخیص نوع عیب دارد و از تغییرات ناشی از شدت عیب کمتر متأثر می‌شود. این امر در کاربردهای صنعتی که شناسایی نوع عیب و کاهش اثر شدت آن بر نتایج نهایی اهمیت دارد، مزیتی قابل توجه محسوب می‌شود.

به‌منظور ارزیابی دقت و تکرارپذیری نتایج به‌دست‌آمده، انحراف معیار مطلق و نسبی (ضریب تغییرات) برای سه ویژگی انرژی سیگنال، گشتاور آماری مرتبه سوم و گشتاور آماری مرتبه چهارم محاسبه و در جدول ۶ گزارش شده است. مقدار متوسط انحراف معیار نسبی برای ویژگی‌های انرژی سیگنال، گشتاور آماری مرتبه سوم و گشتاور آماری مرتبه چهارم به ترتیب  $3/52\%$ ،  $11/22\%$  و  $23/54\%$  حاصل شده است. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های انرژی سیگنال و گشتاور آماری مرتبه سوم دارای مقدار انحراف معیار نسبی قابل قبولی بوده و از پایداری و تکرارپذیری بیشتری نسبت به سایر ویژگی‌ها برخوردار هستند. هرچند قدرت

جدول ۶) مقادیر انحراف معیار مطلق و انحراف معیار نسبی برای ویژگی‌های گزارش شده.

ویژگی	جوش	انحراف معیار	
		معیار مطلق	نسبی (%)
	سالم	۱۵/۳۴	۳/۳۴
انرژی	ترک	۲۱/۸۳	۳/۷۹
	ذوب ناقص	۱۱/۵۲	۳/۴۵
گشتاور	سالم	۰/۰۱۷۴	۱۱/۵۳
مرتبه	ترک	۰/۰۷۰۱	۱۱/۷۸
سوم	ذوب ناقص	۰/۰۰۴۴	۱۰/۳۷
گشتاور	سالم	۱۰/۷۹	۲۳/۶۹
مرتبه	ترک	۵/۶۵	۲۳/۲۵
چهارم	ذوب ناقص	۹/۳۱	۲۳/۶۹

جدول ۳، وجود ترک موجب افزایش ۲۹۴ درصدی و ذوب ناقص موجب کاهش ۷۲ درصدی مقدار گشتاور آماری مرتبه سوم نسبت به اتصال سالم شده است. همچنین داده‌های گزارش شده در جدول ۴، نشان می‌دهد که وجود عیوب ترک و ذوب ناقص به ترتیب کاهش ۴۷ درصدی و ۱۴ درصدی در مقدار گشتاور آماری مرتبه چهارم ایجاد کرده است.

در جدول ۵، نتایج حاصل از پارامترهای معرفی شده برای تشخیص عیب با یکدیگر مقایسه شده است. پارامترهای بررسی شده در این پژوهش علاوه بر تشخیص وجود عیب، قابلیت تمایز و تفکیک میان دو عیب را نیز دارند. وجود عیب ذوب ناقص موجب کاهش مقادیر هر سه پارامتر نسبت به صفحه‌ی سالم شده است. در حالی که عیب ترک تنها منجر به کاهش مقدار گشتاور آماری مرتبه چهارم شده و دو پارامتر دیگر را افزایش داده است.

جدول ۵) مقایسه‌ی روش‌های معرفی شده در تشخیص عیوب اتصال جوش.

نوع عیب	قدر مطلق درصد نسبی به اتصال سالم		
	انرژی سیگنال	گشتاور مرتبه سوم	گشتاور مرتبه چهارم
ترک	۱۲۵%	۳۹۴%	۵۳%
ذوب ناقص	۷۶%	۲۸%	۸۶%

اگرچه عملکرد تمامی پارامترهای معرفی شده در تشخیص و تفکیک عیوب ترک و ذوب ناقص قابل قبول است، گشتاور مرتبه سوم نسبت به سایر پارامترها عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

لازم به یادآوری است که با افزایش توانایی پارامتر در تفکیک عیوب، حساسیت آن نسبت به شدت وقوع عیب کاهش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود گشتاور آماری مرتبه سوم با قدرت تفکیک تقریبی ۱۴ برابری، در شرایط عملیاتی واقعی عملکرد بهتری نسبت به سایر پارامترهای این پژوهش داشته باشد.

در این پژوهش، گشتاور آماری مرتبه سوم به‌عنوان پارامتر اصلی برای تمییز بین عیوب ترک و ذوب ناقص انتخاب شده است. این پارامتر در مقایسه با انرژی و گشتاور آماری مرتبه چهارم، حساسیت و دقت بیشتری در شناسایی این دو عیب خاص دارد. توانایی آن در نمایش تغییرات

افزایش ۲۹۴ درصدی مقدار گشتاور آماری مرتبه سوم نسبت به صفحه سالم شد و ذوب ناقص موجب کاهش ۷۲ درصدی مقدار این پارامتر نسبت به صفحه سالم شد.

از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به عدم ارزیابی دقیق عدم قطعیت روش پیشنهادی در حالت سازه‌های سالم اشاره کرد. بررسی این موضوع می‌تواند بازه تغییرات طبیعی شاخص‌ها را مشخص کرده و دقت روش پیشنهادی را بهبود بخشد. این موضوع به‌عنوان بخشی از پژوهش‌های آتی در نظر گرفته شده است. همچنین، بررسی کیفیت اتصال جوش با تأکید بر استفاده از حسگرهای نرخ داده‌برداری پایین در مراحل اولیه توسعه قرار دارد. برای دستیابی به نتایج جامع‌تر، انجام پژوهش‌های منسجم‌تر ضروری است. با فراهم شدن امکانات سخت افزاری مناسب، انتظار می‌رود در آینده امکان بررسی‌های دقیق‌تر و جامع‌تر فراهم شود.

#### ۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسنده وجود ندارد.

#### ۷- منابع

- [1] Bayati, A., Farahani, M. (2023). Non-Destructive Evaluation of the Welded Joints Using Infrared Thermography Technique. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 13-26. (in Persian)
- [2] Ghiyasi Limanjubi, S. M., Badri, M., & Yahaghi, E. (2024). Improvement Contrast of Welding Radiographs with Weighted Median Filter. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3(4), 50-59. (in Persian)
- [3] Kim, K., Kim, K. S., & Park, H. J. (2023). Multi-branch deep fusion network-based automatic detection of weld defects using non-destructive ultrasonic test. *IEEE Access*.
- [4] Asif, K., Zhang, L., Derrible, S., Indacochea, J. E., Ozevin, D., & Ziebart, B. (2022). Machine learning model to predict welding quality using air-coupled acoustic emission and weld inputs. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-15.
- [5] Habibpour, A., & Sharifi Ghaderi, J. (2023). Evaluation of acoustic propagation characteristics in fatigue crack nucleation and growth for structural monitoring of aircraft propeller. *Journal of Aeronautical Engineering*, 25(1), 67-75. (in Persian)
- [6] Sun, H., Ramuhalli, P., & Jacob, R. E. (2023).

تمییز دهندگی بالای گشتاور آماری مرتبه سوم نسبت به انرژی باعث می‌شود، گشتاور آماری مرتبه سوم به عنوان پارامتر مطلوب نهایی در این پژوهش انتخاب می‌شود.

لازم به ذکر است در روش پیشنهادی در این مقاله، داده‌های مربوط به صفحه‌ی سالم به عنوان داده‌ی مبنا جهت تشخیص عیوب ترک و ذوب ناقص استفاده شده است. لذا نمونه‌های مورد استفاده می‌بایست مشخصات هندسی و مکانیکی (ضخامت، ابعاد، جنس و غیره) یکسان و برابری داشته باشند. با این وجود، تغییرات موضعی کوچک در ضخامت یا جرم صفحات (در حین فرآیند جوشکاری یا قبل از آن)، به دلیل ماهیت انتشار امواج لمب در صفحات، تأثیر قابل توجهی بر نتیجه‌ی نهایی نخواهد داشت. اما اگر این تغییرات به‌نحوی باشد که مشخصات و ویژگی‌های کلی صفحات را به طور چشمگیری تغییر دهد، می‌تواند منجر به بروز خطا در نتایج نهایی گردد.

لازم به یادآوری است امواج لمب منتشر شده در صفحات تحت تأثیر عیوب (مستقل از کیفیت و شدت رخداد آن‌ها) قرار می‌گیرند. در نتیجه روش پیشنهادی صرفاً وجود یا عدم وجود عیوب ترک و ذوب ناقص را تشخیص می‌دهد و قادر به شناسایی جزئیاتی همچون محل، ابعاد یا عمق عیب نیست.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پایش و بررسی سلامت اتصال جوش لب به لب با استفاده از روش انتشار امواج الاستیک مورد بررسی قرار گرفت. صفحات فلزی که به‌وسیله‌ی جوش لب به لب به یکدیگر متصل شده بودند، در داخل یک قاب معلق شدند. در این پژوهش به‌منظور ایجاد امکان پایش مداوم از حسگر با نرخ داده‌برداری پایین استفاده شد. در روش پیشنهادی، پارامترهایی همچون انرژی و گشتاورهای آماری مرتبه بالا از سیگنال‌های ذخیره شده استخراج و میزان تغییرات آن‌ها در حضور و عدم حضور عیوب ترک و ذوب ناقص تحلیل شد. برای کاهش اثر تغییرات جزئی بر نتایج، آزمایش‌ها چندین مرتبه تکرار شدند. نتایج تجربی نشان داد گشتاور آماری مرتبه سوم با حساسیت حدود ۱۴ برابری در تشخیص و تفکیک عیوب ترک و ذوب ناقص، نسبت به سایر پارامترها عملکرد بهتری دارد. به‌طور خاص: وجود ترک موجب

- Gougeon, P. (2012). Non-destructive detection of lack of penetration defects in friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 17(4), 295-303.
- [17] He, D., Ma, R., Jin, Z., Ren, R., He, S., Xiang, Z., ... & Xiang, W. (2023). Welding quality detection of metro train body based on ABC mask R-CNN. *Measurement*, 216, 112969.
- [18] Huang, J., Zhang, Z., Qin, R., Yu, Y., Wen, G., Cheng, W., & Chen, X. (2024). Interpretable real-time monitoring of pipeline weld crack leakage based on wavelet multi-kernel network. *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 93-103.
- [19] Hoseini Sabzevari, S. A., & Moavenian, M. (2016). Sound Localization in Glass Plate Using Low Sampling Rate. *Modares Mechanical Engineering*, 15(12), 387-393. (in Persian)
- [20] Sabzevari, S. A. H., & Moavenian, M. (2016). Locating the acoustic source in thin glass plate using low sampling rate data. *Ultrasonics*, 70, 1-11.
- [21] Graff, K. F. (2012). *Wave motion in elastic solids*. Courier Corporation.
- [22] Dieulesaint, E., & Royer, D. (1980). *Elastic waves in solids: applications to signal processing*.
- [23] Xu, C., Wang, Q., Gao, G., & Deng, M. (2025). Lamb wave based damage imaging in variable thickness plates. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 223, 111926.
- [24] Zhang, G., Kundu, T., Deymier, P. A., & Runge, K. (2025). Defect localization in plate structures using the geometric phase of Lamb waves. *Ultrasonics*, 145, 107492.
- Machine learning for ultrasonic nondestructive examination of welding defects: A systematic review. *Ultrasonics*, 127, 106854.
- [7] Cruz, F. C., Simas Filho, E. F., Albuquerque, M. C. S., Silva, I. C., Farias, C. T. T., & Gouvêa, L. L. (2017). Efficient feature selection for neural network based detection of flaws in steel welded joints using ultrasound testing. *Ultrasonics*, 73, 1-8.
- [8] Bajgholi, M. E., Rousseau, G., Viens, M., Thibault, D., & Gagnon, M. (2023). Reliability assessment of non-destructive testing (NDT) for the inspection of weld joints in the hydroelectric turbine industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(9-10), 4223-4233.
- [9] Fakhri, M. A., Mustapha, S., Tarraf, J., Ayoub, G., & Hamade, R. (2018). Detection and assessment of flaws in friction stir welded joints using ultrasonic guided waves: experimental and finite element analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 101, 516-534.
- [10] Wu, J., Jiang, C., Fang, H., & Ng, C. T. (2023). Damage detection in the T-welded joint using Rayleigh-like feature guided wave. *NDT & E International*, 135, 102806.
- [11] Lee, J. K., Bae, D. S., Lee, S. P., & Lee, J. H. (2014). Evaluation on defect in the weld of stainless steel materials using nondestructive technique. *Fusion Engineering and Design*, 89(7-8), 1739-1745.
- [12] Huang, J., Zhang, Z., Zheng, B., Qin, R., Wen, G., Cheng, W., & Chen, X. (2023). Acoustic emission technology-based multifractal and unsupervised clustering on crack damage monitoring for low-carbon steel. *Measurement*, 217, 113042.
- [13] Satyarnarayan, L., Chandrasekaran, J., Maxfield, B., & Balasubramaniam, K. (2008). Circumferential higher order guided wave modes for the detection and sizing of cracks and pinholes in pipe support regions. *NDT & E International*, 41(1), 32-43.
- [14] Zhou, W., Du, Y. G., Wang, S. D., Liu, Y. P., Ma, L. H., & Liu, J. (2023). Effects of welding defects on the damage evolution of Q245R steel using acoustic emission and infrared thermography. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 38(2), 189-210.
- [15] Ren, Z., Li, S., Liu, X., Zhao, X., Chang, H., & Yue, Q. (2024). Fatigue damage evolution model of stainless-steel-cruciform-joint with weld defect using AE signal. *Journal of Constructional Steel Research*, 214, 108499.
- [16] Mandache, C., Levesque, D., Dubourg, L., &