



پایش وضعیت اتصال جوش در صفحات با استفاده از انتشار امواج آکوستیک

سید امیر حسینی سبزواری

ایران، گناباد، مجتمع آموزش عالی گناباد، دانشکده فنی و مهندسی، ۹۶۹۱۹۵۷۶۷۸، استادیار.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hoseini.Sabzevari@gonabad.ac.ir

چکیده

بررسی و پایش سلامت و استحکام اتصالات جوشکاری در صنایع مختلف، از جمله خطوط لوله، ساخت و ساز و حمل و نقل، امری حیاتی است، زیرا عیوبی مانند تخلخل، ترک و عدم همجوشی کامل می‌توانند منجر به خرابی‌های جدی در سازه‌ها گردد. این مطالعه به بررسی امکان استفاده از تکنیک‌های انتشار امواج آکوستیک با فرکانس پایین و حسگرهای با نرخ نمونه‌برداری پایین که در یک سمت نمونه‌ها نصب می‌شوند، برای بازرسی از عیوب جوش می‌پردازد. روش پیشنهادی شامل محاسبه توابع هزینه بر اساس ویژگی‌های زمانی و فرکانسی سیگنال‌های منتشرشده است که امکان نظارت مداوم و افزایش دقت در شناسایی عیوب را فراهم می‌کند. در این روش از دمپرهای سیلیکونی در لبه‌های نمونه‌ها استفاده می‌شود. این مهم موجب کاهش تداخل موج‌های بازتابی و توسعه‌ی استراتژی‌های مؤثر برای محاسبه تابع هزینه می‌گردد. به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، یک آزمایش بر روی صفحات معلق فولاد کربنی انجام شد. قبل از انجام آزمایش‌ها، وجود عیوب در نمونه‌ها از طریق آزمون فراصوتی تأیید شد. آزمایش‌های متعددی به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها مؤید اثربخشی این تکنیک در بازرسی مقدماتی در برخی عیوب جوشکاری است. این روش پتانسیل قابل توجهی به‌عنوان یک راه‌حل عملی برای بهبود ایمنی و اطمینان از سازه‌های جوشکاری شده در کاربردهای صنعتی، از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: عیوب جوشکاری؛ انتشار امواج آکوستیک؛ آزمون غیر مخرب؛ نرخ نمونه‌برداری پایین.

۱- مقدمه

اتصالات جوشکاری در کاربردهای صنعتی مختلفی از جمله خطوط لوله نفت و گاز، ساخت و ساز، پل‌ها، صنایع برق و راه‌آهن به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. انواع مختلفی از عیوب، مانند تخلخل، ترک، سرباره، عدم همجوشی کامل و نفوذ ناکافی، می‌توانند باعث خرابی کلی سازه یا نشت لوله‌ها شوند [۱]. بنابراین، بازرسی سیستماتیک این جوش‌ها برای ایمنی و استفاده قابل اطمینان از این

سیستم‌ها بسیار مهم است. در دهه‌های اخیر، استفاده از روش‌های غیر مخرب برای بازرسی و ارزیابی این عیوب به شدت افزایش یافته است، چرا که این تکنیک‌ها تأثیری بر عملکرد سیستم ندارند. روش‌های غیر مخرب معمول شامل نفوذ مایعات، ذرات مغناطیسی، فراصوت، بازرسی چشمی، رادیوگرافی و انتشار امواج آکوستیک هستند [۲]. هرچند دقت بازرسی جوش با استفاده از روش انتشار امواج آکوستیک ممکن است به اندازه سایر تکنیک‌ها قابل دفاع نباشد، اما در سال‌های اخیر توجه بیشتری به این روش جلب شده است [۳]. برخلاف بسیاری از روش‌های دیگر که ارزیابی محلی یک ناحیه خاص از سازه را ارائه می‌دهند، تکنیک انتشار امواج آکوستیک برای نظارت مداوم و بازرسی سریع و تعیین محدوده‌ی مورد توجه مناسب است [۴]. این موضوع به این دلیل است که امواج الاستیک منتشر شده در سازه به راحتی تحت تأثیر عیوب موجود در سازه قرار می‌گیرند. با بررسی تغییرات در ویژگی‌های این امواج، عیوب جوش شناسایی و مشخص می‌شوند.

سان و همکاران [۵] یک بررسی از روش‌های بازرسی جوش با استفاده از امواج فراصوت ارائه دادند که بر طبقه‌بندی نمونه‌ها به دو دسته اصلی عیب دار و بدون عیب تأکید داشت. تأثیر عیوب بر سیگنال‌های فراصوت در جوش نقطه‌ای نیز بررسی شده است. کروز و همکاران [۶] سه نوع عیب را در اتصالات جوش فولادی با استفاده از شبکه عصبی بر اساس داده‌های فراصوت شناسایی کردند. بردارهای ویژگی پیشنهادی شامل تکنیک‌های آماری و زمان-فرکانس مانند تبدیل موجک بودند. لی و همکاران [۷] از امواج هدایت‌شده و تکنیک انتشار امواج آکوستیک برای ارزیابی کیفیت جوش در لوله‌های فلزی استفاده کردند. مطالعه آن‌ها به دو مزیت عمده امواج هدایت‌شده اشاره دارد: انتشار آن‌ها در طول ساختار به مسافت‌های طولانی با تلفات انرژی محدود و امکان انجام بازرسی وسیع از نمونه. در تحقیقی دیگر، درویی و همکاران با استفاده از تکنیک انتشار امواج آکوستیک، عیوب مختلفی را در چهار نمونه فولاد کربنی شناسایی کردند. آن‌ها از ویژگی‌هایی مانند دامنه اوج و ویژگی‌های آماری مانند ریشه میانگین مربعات و انرژی امواج را برای شناسایی وجود عیوب جوش استفاده کردند. رن و همکاران [۸] آزمایش خستگی بر روی اتصالات با حضور عیوب اولیه جوش و با استفاده از تکنیک انتشار امواج آکوستیک انجام دادند. در این روش، از تابع هایپرپولیک و انرژی بسته موجک برای نرمال‌سازی داده‌های آکوستیک استفاده شد. نتایج نشان داد که تابع هزینه پیشنهادی به طور مؤثری عیب‌های اولیه و آسیب‌های خستگی در مراحل اولیه را قبل از وقوع ترک‌های جدی در اتصالات جوشکاری شناسایی می‌کند. مانداجه و همکاران [۹] قابلیت‌های روش‌های غیر مخرب مختلف برای بازرسی نقص نفوذ در جوش‌های لبه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که هرچند تکنیک‌هایی مانند جریان گردابی متداول و نفوذ مایعات نتایج قابل اعتمادتری ارائه می‌دهند، استفاده از امواج فراصوت در سناریوی دنیای واقعی عملی‌تر است. هوانگ و همکاران [۱۰] نشی ایجاد شده در یک خط لوله به دلیل ترک‌های جوش را مورد بررسی قرار دادند. در روش پیشنهادی آن‌ها از هسته‌های تبدیل موجک برای استخراج ویژگی‌ها از سیگنال‌های آکوستیک استفاده گردید. دقت شناسایی حالات مختلف عیوب در این روش ۹۸/۳۲٪ گزارش شده است.

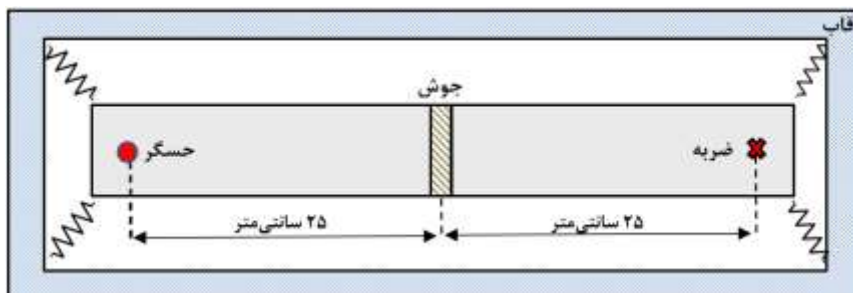
در پژوهش حاضر آزمایش‌های متعددی به منظور پایش وضعیت و بررسی عیوب جوش در صفحات با استفاده از روش انتشار امواج آکوستیک، صورت گرفته است. در این آزمایش‌ها دو صفحه فلزی به وسیله‌ی اتصال جوش به یکدیگر متصل شده‌اند. معیار انتخاب جنس صفحات علاوه بر دسترسی آسان، کاربرد گسترده‌ی آن‌ها در صنایع می‌باشد. در این مقاله در گام نخست با استفاده از حسگرهای صوتی ارزان قیمت که بر روی صفحه نصب شده‌اند، داده‌های مربوط به امواج منتشر شده در اتصال جمع‌آوری می‌شود. در گام بعدی با بررسی و پردازش هم‌زمان داده‌های مربوط به اتصال سالم و اتصال دارای عیب، بردار ویژگی مربوط به آن‌ها با یکدیگر مقایسه و گزارش می‌شود.

۲- بیان مسئله و روش پیشنهادی

۲-۱ محیط آزمایش

جهت ایجاد جهت ایجاد بانک داده یک محیط آزمایش طراحی و ساخته شد. در این محیط آزمایش صفحات فلزی از جنس فولاد به ابعاد ۲۵ در ۱۰ سانتی‌متر و با ضخامت ۳ میلی‌متر و به جرم ۲/۱ کیلوگرم به وسیله‌ی اتصال جوش لب به لب به یکدیگر متصل شدند. جهت دریافت صدای منتشر شده از یک میکروفن خازنی [۱۱] (با بیشینه فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز و به جرم ۰/۸ گرم) و کارت صدا با نرخ داده برداری ۴۴۱۰۰ داده بر ثانیه جهت اتصال به رایانه استفاده شده است. دهنه‌ی دیافراگم میکروفون بر روی سطح صفحه ثابت شده است به نحوی که باعث کاهش دریافت نویز از محیط پیرامون گردد. همچنین صفحه مورد آزمایش در داخل یک قاب معلق شده است.

امواج ایجاد شده از شکستن مغز ممداد [۱۲] با منتشر شدن در صفحه و عبور از اتصال توسط حسگر دریافت و ذخیره می‌گردند. در منابع روش‌های گوناگونی جهت ایجاد امواج پیشنهاد شده است که از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به: شکستن مغز ممداد، رها نمودن توپ از فواصل مشخص و اعمال ضربه مستقیم به صفحه اشاره نمود. با توجه به ویژگی‌های مکانیکی صفحه مورد آزمایش و به جهت کاهش اثر امواج بازتابی، در این پژوهش از روش شکستن مغز ممداد استفاده شده است. بانک داده‌ی توسعه داده شده حاوی سیگنال ذخیره شده از ۱۲۰ آزمایش مجزا (شامل اتصال بدون ایراد و اتصال دارای ایراد) می‌باشد. در تمامی آزمایش‌های محل قرارگیری حسگر فاصله ۵۰ سانتی‌متری از محل ضربه دارد. در شکل (۱) و شکل (۲)، شماتیک محیط آزمایش و موقعیت قرارگیری حسگر نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک محیط آزمایش و موقعیت قرارگیری حسگر.



شکل ۲. صفحه‌ی مورد آزمایش و نحوه نصب حسگر.

۲-۲ ایرادات جوش

این بخش به بررسی انواع رایج نقص‌های جوشکاری و علل اصلی آن‌ها می‌پردازد. این نقص‌ها باعث ایجاد تمرکز تنش در اتصال می‌گردد که به‌طور قابل توجهی یکپارچگی ساختاری و استحکام اتصالات جوش را کاهش می‌دهد. از مهم‌ترین این نقص‌های می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- ترک: ترک‌ها رایج‌ترین و بحرانی‌ترین نوع نقص هستند که ممکن است با جهت‌گیری‌های مختلف در جوش‌ها رخ دهند. زمانی که تنش موضعی کششی از استحکام جوش یا ماده پایه فراتر رود، ترک‌ها ایجاد می‌شوند.
- ۲- نفوذ ناکامل: نفوذ ناکامل ماده جوش از ضخامت قطعه به‌عنوان نفوذ ناکامل شناخته می‌شود. این نقص عمدتاً به دلیل تکنیک نادرست جوشکاری، انتخاب نامناسب الکتروود و پارامترهای جوشکاری نادرست به وجود می‌آید.
- ۳- عدم ذوب: عدم ذوب یک نقص صفحه‌ای است که معمولاً به‌صورت داخلی در جوش رخ می‌دهد. این نقص زمانی اتفاق می‌افتد که فلز پایه و ماده جوش به‌درستی باهم ترکیب نمی‌شوند، که منجر به کاهش قابل توجه عمر خستگی و استحکام ساختاری می‌شود.
- ۴- محبوس شدن سرباره: به دام افتادن ناخالصی‌ها درون جوش به‌عنوان محبوس شدن سرباره شناخته می‌شود. این نقص عمدتاً به دلیل سرعت نامناسب حرکت مشعل جوشکاری، زاویه نامناسب جوشکاری، تمیزکاری ضعیف قبل از جوشکاری و چگالی جریان جوشکاری پایین به وجود می‌آید.

۵- تخلخل: تخلخل به حفره‌ها و ناپیوستگی‌هایی اشاره دارد که در اثر محبوس شدن هوا، هیدروژن محلول، یا شرایط محیطی در طول فرآیند جوشکاری و انجماد فلز مذاب ایجاد می‌شوند. تشکیل تخلخل نه تنها ممکن است به نقص‌های دیگری مانند ترک‌ها و شکست‌های خستگی منجر شود، بلکه باعث کاهش انعطاف‌پذیری اتصالات جوش نیز می‌شود. لازم به ذکر است که برخی نقص‌های دیگر معمولاً در سطح جوش‌ها رخ می‌دهند، مانند اضافه جوش و پاشش، که به‌طور معمول به‌عنوان نواقص شناخته می‌شوند، اما در اینجا مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

۲-۳ ماهیت امواج منتشر شده

شکستن مغز مداد بر روی صفحه باعث ایجاد و انتشار امواج الاستیک در آن می‌شود. در حالت کلی پاسخ انتشار امواج مطابق رابطه (۱)، بیان می‌گردد: [۱۲]

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

که در آن u_P ، u_{SV} و u_{SH} به ترتیب نشان دهنده‌ی موج فشاری، موج برشی در صفحه‌ی عمودی و موج برشی در صفحه افقی می‌باشد. همچنین جایابی \vec{u} را می‌توان به صورت رابطه (۲)، در نظر گرفت.

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

که در آن φ و \vec{H} به ترتیب توابع پتانسیل اسکالر و برداری، ∇ نمایانگر اپراتور گرادیان و $\nabla \times$ نشان دهنده‌ی اپراتور کرل می‌باشد. با جاگذاری معادلات حاکم بر امواج منتشر مطابق رابطه (۳)، حاصل می‌شود.

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

که در آن چگالی، λ و μ ضرایب لامه^۴ نامیده می‌شوند. با ساده‌سازی و صرف نظر کردن از یک بعد به علت ضخامت ناچیز صفحه مورد آزمایش در مقایسه با دو بعد دیگر رابطه (۴)، حاصل می‌شود.

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

حال با اعمال شرط کرنش صفحه‌ای معادلات به شکل رابطه (۵)، ساده می‌شود [۱۳].

$$C_p^2 \nabla^2 \varphi = \ddot{\varphi}, \quad C_p = (\lambda + 2\mu)/\rho \quad \text{و} \quad C_s^2 \nabla^2 H_z = \ddot{H}_z, \quad C_s = \mu/\rho. \quad (5)$$

که در آن C_p و C_s به ترتیب نشان دهنده‌ی سرعت انتشار موج فشاری و برشی در محیط می‌باشد. برهم کنش میان دو موج نشان داده شده در رابطه ۵ و بازتاب‌های آن‌ها از سطوح صفحه باعث ایجاد امواج لمب^۵ می‌شوند. انتشار امواج لمب به‌صورت مجموع دو پاسخ متقارن و نامتقارن در نظر گرفته می‌شود. با توجه روابط نشان داده شده شکستن مغز مداد باعث ایجاد و انتشار امواج الاستیک از نوع لمب در دو مود متقارن و نامتقارن می‌شود [۱۴]. امواج منتشر شده که به‌وسیله میکروفون به‌صورت یک سیگنال زمانی ذخیره می‌شود، شامل اطلاعات هر دو مود منتشر شده در صفحه می‌باشد.

¹ P-wave

² Shear-Vertical wave

³ Shear-Horizontal wave

⁴ lame

⁵ Lamb Waves

۲-۴ نتایج آزمایش و بحث

هدف این آزمایش تشخیص ایراد جوش در اتصالات جوشکاری لب‌به‌لب است. سیگنال‌های آکوستیکی که توسط شکست نوک مداد ایجاد شده و به‌صورت امواج لمب در منطقه جوش منتشر می‌شوند، توسط یک حسگر ثبت دریافت و ذخیره می‌شوند. در اولیه مرحله و به‌منظور ایجاد امکان مقایسه سیگنال‌های ذخیره شده، پس از نرمالایز نمودن داده‌ها انرژی سیگنال‌ها 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 می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش بازه زمانی انتگرال فوق که از این بعد "مدت زمان" نامیده می‌شود، از ۰/۲۷۲ تا ۰/۴۹۸ ثانیه با گام ثابت تغییر کرده و در هر گام انرژی سیگنال‌ها محاسبه و در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱. انرژی سیگنال ذخیره شده در صفحه با اتصال بدون ایراد و دارای ایراد. (میانگین ۷ مرتبه تکرار آزمایش).

درصد تغییر	میانگین	مدت زمان (میلی ثانیه)			نوع صفحه
		۴۹۸	۴۰۸	۲۷۲	
۱۰۰	۴۵۸/۷۰	۴۷۵/۹۱	۴۶۱/۵۵	۴۳۸/۶۵	بدون ایراد
۱۰۳	۴۷۳/۷۷	۵۱۹/۵۷	۴۹۰/۷۵	۴۱۰/۹۹	دارای ایراد

برای برجسته کردن تأثیر ایراد جوش، نتایج ثبت شده با نتایج مربوط به صفحه بدون نقص مقایسه شده است. مطابق داده‌های گزارش شده در جدول (۱)، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش مدت زمان انرژی سیگنال در هر دو حالت اتصال بدون ایراد و اتصال دارای ایراد، افزایش یافته است. وجود ایراد در اتصال جوش تأثیر بسیار کمی در انرژی سیگنال از خود نشان داده است، به‌نحوی که تنها موجب تغییر ۳ درصدی در نتایج شده است. از آنجایی که انرژی سیگنال کارایی موثری در تفکیک اتصالات دارای ایراد از اتصالات سالم از خود نشان نداد به‌عنوان راه حل جایگزین از گشتاورهای آماری مرتبه بالای سیگنال کمک می‌گیریم.

گشتاور آماری مرتبه سوم میزان عدم تقارن تابع چگالی احتمال داده‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد، این کمیت برای آشکارسازی قطعاتی از سیگنال که در آن یک گذر سریع از مقدار حداقل به مقدار حداکثر وجود دارد، بسیار کارآمد است. گشتاور آماری مرتبه سوم در رابطه (۷) بیان شده است.

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

گشتاور آماری مرتبه چهارم رابطه (۸)، نشان دهنده مقدار توزیع یکنواخت نمونه‌ها و یا مقدار ضربه‌وار بودن آن‌ها می‌باشد. با استفاده از آن، می‌توان نواحی با شیب بیشینه یا کمینه سیگنال را به دست آورد.

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

گشتاورهای آماری مرتبه سوم و چهارم در صفحات بدون ایراد و دارای ایراد محاسبه و در جدول (۲) گزارش شده است. مطابق داده‌های گزارش شده در جدول (۲)، مشابه انرژی سیگنال، مقادیر گشتاورهای آماری مرتبه سوم و چهارم با افزایش مدت زمان در تمامی حالات افزایش می‌یابند. اگرچه هر دو گشتاور آماری عملکرد خوبی از خود در نمایش ایراد جوش نشان دادند، در این بین گشتاور آماری مرتبه سوم با کاهش حدودی ۷۱ درصدی تغییر بارزتری نسبت به گشتاور آماری مرتبه چهارم با کاهش ۴۶ درصدی، در مواجهه با اتصال دارای نقص از خود نشان داد.

جدول ۱. گشتاورهای آماری مرتبه سوم و چهارم سیگنال در صفحه با اتصال بدون ایراد و دارای ایراد. (میانگین ۷ مرتبه تکرار آزمایش).

درصد تغییر	میانگین	مدت زمان (میلی ثانیه)			گشتاور مرتبه	نوع صفحه
		۴۹۸	۴۰۸	۲۲۷		
۱۰۰	۰/۱۵۱۸	۰/۱۷۰۸	۰/۱۵۶۷	۰/۱۲۸۱	سوم	بدون ایراد
- ۷۱/۱	۰/۰۴۳۸	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۶۵	۰/۰۳۷۶		دارای ایراد
۱۰۰	۴۵/۵۴	۵۷/۸۰	۴۷/۲۹	۳۱/۵۴	چهارم	بدون ایراد
- ۴۶/۵۷	۲۴/۳۳	۳۰/۷۹	۲۵/۱۹	۱۷/۰۱		دارای ایراد

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به پایش و بررسی تجربی سلامت اتصال جوش به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های اتصال در صنایع با روش انتشار امواج آکوستیک پرداخته شد. دو صفحه 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 انرژی و گشتاورهای آماری مرتبه بالای سیگنال ذخیره شده توسط حسگرهای نصب شده روی صفحه محاسبه و چگونگی نرخ تغییرات آن در شرایط حضور و عدم حضور عیب در اتصال جوش بحث شد. همچنین به‌منظور کاهش اثر تغییرات کوچک بر پاسخ نهایی هر آزمایش چندین مرتبه تکرار شد. نتایج به دست آمده نشان از عدم تأثیر وجود عیب جوش در انرژی سیگنال ذخیره شده دارد، در صورتی که گشتاورهای آماری مرتبه بالا به‌خوبی حضور عیب در اتصال جوش را نشان دادند. لازم به یادآوری می‌باشد بررسی و پایش کیفیت اتصال جوش با تأکید بر استفاده از حسگرهای نرخ داده‌برداری پایین، در قدم‌های ابتدایی خود می‌باشد. این مهم نیازمند پژوهش‌های منسجم و هدفمندتری است که از فرصت پژوهش حاضر خارج است. انتظار می‌رود در آینده نزدیک با فراهم کردن اسباب و لوازم سخت افزاری مورد نیاز توفیق بررسی جامع و دقیق‌تری فراهم گردد.

مراجع

1. C. Ji, H. Wang, H. Li, "Defects detection in weld joints based on visual attention and deep learning", *NDT & E International* 133, 102764 (2023).
2. K. Kim, K.S. Kim, H.-J. Park, "Multi-branch deep fusion network-based automatic detection of weld defects using non-destructive ultrasonic test", *IEEE Access* (2023).
3. A. Aboali, M. El-Shaib, A. Sharara, M. Shehadeh, "Screening for welding defects using acoustic emission technique", *Advanced Materials Research* 1025, 7–12 (2014).
4. M.A. Fakh, S. Mustapha, J. Tarraf, G. Ayoub, R. Hamade, "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 (2018).
5. H. Sun, P. Ramuhalli, R.E. Jacob, "Machine learning for ultrasonic nondestructive examination of welding defects: A systematic review", *Ultrasonics* 127, 106854 (2023).
6. F. Cruz, E. F. Simas Filho, M. C. S. Albuquerque, I. C. Silva, C. T. T. Farias, L. L. Gouvea, "Efficient feature selection for neural network based detection of flaws in steel welded joints using ultrasound testing", *Ultrasonics* 73, 1–8 (2017).
7. J.K. Lee, D. Bae, S. Pill Lee, J. Hyun Lee, "Evaluation on defect in the weld of stainless steel materials using nondestructive technique", *Fusion Engineering and Design* 89(7-8), 1739–1745 (2014).

8. Z. Ren, S. Li, X. Liu, X. Zhao, H. Chang, Q. Yue, "Fatigue damage evolution model of stainless-steel-cruciform-joint with weld defect using AE signal", *Journal of Constructional Steel Research* 214, 108499 (2024).
9. C. Mandache, D. Levesque, L. Dubourg, P. Gougeon, "Non-destructive detection of lack of penetration defects in friction stir welds", *Science and Technology of Welding and Joining* 17(4), 295–303 (2012).
10. J. Huang, Z. Zhang, R. Qin, Y. Yu, G. Wen, W. Cheng, X. Chen, "Interpretable real-time monitoring of pipeline weld crack leakage based on wavelet multi-kernel network", *Journal of Manufacturing Systems* 72, 93–103 (2024).
11. S.A. Hoseini Sabzevari, M. Moavenian, "Sound Localization in Glass Plate Using Low Sampling Rate", *Modares Mechanical Engineering* 15(12), 387–393 (2016).
12. S.A.H. Sabzevari, M. Moavenian, "Locating the acoustic source in thin glass plate using low sampling rate data", *Ultrasonics* 70, 1–11 (2016).
13. E. Dieulesaint, D. Royer, "Elastic waves in solids: applications to signal processing", J. Wiley New York (1980).
14. H. Nakatani, T. Hajzargarbashi, K. Ito, T. Kundu, N. Takeda, "Locating point of impact on an anisotropic cylindrical surface using acoustic beamforming technique", *Key Engineering Materials* 558, 331–340 (2013)