مقاله

آزمون فراصوت آرایهٔ فازی در بازرسی جوش مخازن تحت فشار

جهان تقی‌زاده*
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی قم
taghizadeh@qut.ac.ir

جواد راستی
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی قم
rastinik@gmail.com

عطا شاکری
دانش‌آموختهٔ کارشناسی مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی قم
atashakery2@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۳

چکیده

طراحی و تولید مخازن تحت فشار، که امروزه در صنایع به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند، استانداردها و بازرسی‌های سخت‌گیرانه‌ای دارند. در این میان، بررسی و رصد انواع جوش مخازن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش فراصوت، به‌خصوص فراصوت آرایهٔ فازی، به‌دلیل دقت، کیفیت و توانایی نمایش طیف وسیعی از عیوب، گزینهٔ مناسبی برای بازرسی جوش‌های مخازن است. در این مقاله سعی شده است تا علاوه بر معرفی اجمالی روش آرایهٔ فازی، مزایای این روش در بازرسی‌های غیرمخرب بیان شود. سپس قابلیت‌ها و روش‌هایی که به‌منظور مناسب‌سازی و بهینه‌سازی بازرسی مخازن تحت فشار در کنار روش آرایهٔ فازی وجود دارند معرفی گردد. بیان مزایا و معایب این روش و امکانات الحاقی از دیگر مطالب بررسی شده در این مقاله است. در پایان، روش آرایهٔ فازی به‌عنوان راهکاری مناسب و قابل اجرا برای بازرسی غیرمخرب معرفی می‌شود؛ روشی که می‌تواند پاسخگوی دقت و نیاز بازرسی طیف وسیعی از صنایع حساس، به‌ویژه مخازن تحت فشار باشد.

واژگان کلیدی: فراصوت، آرایهٔ فازی، مخازن تحت فشار، بازرسی

۱. مقدمه

امروزه در حوزه‌های متنوع صنعت، مخازن تحت فشار به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر کجا که صحبت از سیستم‌های حرارتی، مواد شیمیایی، سیستم‌های نیروگاهی، لوله‌کشی‌ها، افزایش فشار، ذخیره‌سازی سیال و جز این‌ها باشد، مخازن تحت فشار نیز جزیی جدایی‌ناپذیر از آن صنعت خواهد بود. به‌دلیل ماهیت کاری، این ادوات در بسیاری از موارد با سیالاتی در فشار و حرارت بالا یا سیالاتی با ماهیت اسیدی یا سمی سروکار دارند و از طرفی هرگونه اختلال در سیستم‌های شامل این مخازن می‌تواند آسیب‌های پرهزینه و جدی به دیگر بخش‌ها وارد کند. لذا مهندسان طراح با موردی مواجهند که می‌تواند خسارت‌های بالایی، چه از بعد جانی و زیست محیطی و چه از بعد صنعتی و اقتصادی، ایجاد کند. بنابراین طراحی و ساخت این مخازن به استانداردها و بازرسی‌های سخت‌گیرانه‌ای نیاز دارند تا بتواند ضریب امنیت مورد نیاز برای این مخازن را لحاظ کند و مانع ایجاد خطرات احتمالی شود [۴].

مخازن تحت فشار انواع و روش‌های تولید گوناگونی دارند. در این بین روش جوشکاری دارای جایگاه ویژه‌ای است و در تولید طیف وسیعی از مخازن نقش دارد. چون جوشکاری معمولاً توسط عامل انسانی انجام می‌شود و در محیط و سطوحی انجام می‌شود که گاه آثاری منفی بر کیفیت جوش دارند، لذا به‌طور طبیعی توان بالقوهٔ بالایی در داشتن عیوب دارد و بسیاری از این عیوب می‌تواند خطرناک باشد. پس باید بازرسی‌های کامل و دقیقی از جوشکاری‌ها به‌عمل آید تا اطمینان حاصل شود که جوش‌ها کیفیت لازم و استحکام پیش‌بینی شده در طراحی را دارند.

در بحث بازرسی جوش، روش‌های بسیاری مطرح است که هر یک ویژگی‌های خاص خود را دارند؛ ویژگی‌هایی چون دقت، زمان اجرای فرایند، هزینه، آموزش اپراتور، نوع عیب تشخیصی، محدودیت‌ها و جز این‌ها. از طرفی بازرسی‌ها به دو روش مخرب[1] و غیرمخرب[2] تقسیم می‌شوند. روش مخرب به‌دلیل آسیب به جوش و محصول نهایی، همچنین فاکتورهایی چون هزینهٔ بالا، مشکل‌بودن، زمان‌بر بودن و عدم امکان اجرا در تمامی موارد نمی‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. پس باید روش مناسبی از آزمون‌های غیرمخرب را انتخاب کرد تا بتوان به اطمینان مد نظر در بازرسی دست یافت.

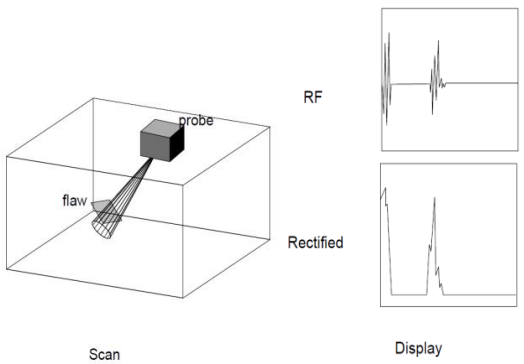
در میان روش‌های غیرمخرب، روش فراصوت[3] روشی بسیار مناسب است؛ زیرا در میان دیگر روش‌های تست غیرمخرب از نکات مثبتی چون طیف وسیع موارد استفاده، مناسب‌بودن برای جوش مخزن، دقت و هزینهٔ مناسب برخوردار است. از طرفی، درمیان روش‌های فراصوت، تکنیک آرایهٔ فازی دارای مزایای دیگری برای انتخاب است که می‌تواند گزینهٔ انتخابی ما برای بازرسی جوش مخزن باشد [۲].

در این مقاله سعی شده است تا علاوه بر معرفی اجمالی فراصوت آرایهٔ فازی و مزایای آن، سازوکارها و قابلیت‌های این آزمون غیرمخرب، در بازرسی جوش مخازن تحت فشار بررسی شود.

۲. معرفی فراصوت و فراصوت آرایهٔ فازی

آزمایش فراصوتی توسط موج منتشرشده از یک مبدل (بلور کوارتز)، که مشابه یک موج صوتی اما با گام و فرکانس بالاتری است، انجام می‌شود. امواج فراصوتی از داخل قطعهٔ مورد آزمایش عبور داده می‌شوند و با هرگونه تغییر در تراکم داخلی قطعه منعکس می‌شوند. این امواج توسط یک مبدل پیزوالکتریک (بلور کوارتز که تحت جریان متناوب قرار داد) که به یک واحد جستجوگر متصل‌شده تولید می‌شوند. امواج منعکس‌شده (پژواک‌ها) به‌صورت برجستگی‌هایی نسبت به خط مبنا، روی صفحهٔ نمایش دستگاه ظاهر می‌شوند.

وقتی واحد جستجوگر به مصالح مورد نظر متصل می‌شود، دو نوع پژواک روی صفحهٔ نمایش ظاهر می‌شود. ضربان نخست انعکاس صدا از سطح رویی جسم، که در تماس با دستگاه است، می‌باشد. ضربان دوم اما مربوط به انعکاس موج از سطح مقابل است. فاصلهٔ بین این دو ضربان با دقت کالیبره می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که مصالح در شرایط مناسبی از نظر معایب و نواقص داخلی قرار دارد. هنگامی‌که یک عیب یا ترک داخلی توسط واحد جستجو پیدا شود، ضربان سومی تولید می‌کند که بین ضربان اول و دوم روی صفحهٔ نمایش ثبت می‌شود [۱].

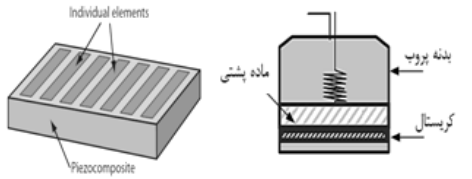


شکل ۱. نمایی از آزمون فراصوت در فراصوت به روش قدیمی

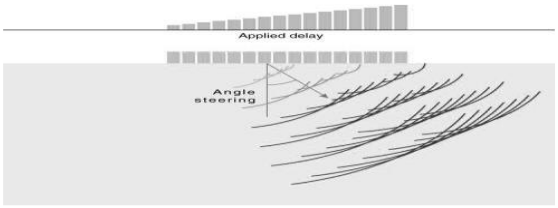
معمولاً یک یا نهایتاً دو مبدل پیزوالکتریک (به‌صورت جداگانه وظیفهٔ دریافت و ارسال امواج فراصوت را برعهده دارد. این روش هنوز هم کاربرد دارد و برای تشخیص نوع

و اندازهٔ عیب کاربرد وسیعی دارد، اما برای صنعت امروز و تولید محصولاتی که دقت بالایی دارند، به روش‌های دقیق‌تر و جدیدتر تست‌های غیرمخرب نیاز است.

به چینش خاصی از هر شی آرایه گفته می‌شود. روش آرایهٔ فازی نیز بر همین اساس نامگذاری شده است. این روش ابتدا در پزشکی رواج یافت، اما با پیشرفت صنایع، در این حوزه نیز معرفی شد. اساس ایدهٔ آرایهٔ فازی بدین‌گونه است که اگر به‌جای یک مبدل منفرد، که در روش معمولی استفاده می‌شود، تعدادی مبدل به‌صورتی خاص (مثلاً همچون شکل ۲ به‌صورت خطی) آرایش داده شود، می‌توان به قابلیت‌های جدیدی دست یافت. روش آرایهٔ فازی از نظر تئوری بر همان قانون برهم نهی امواج، که توسط توماس یانگ کشف شد، استوار است. بدین‌گونه که اگر تعدادی منبع مولد موج در دست باشد، با تنظیم فرکانس و تأخیر زمانی آنها، بنا بر قانون برهم نهی می‌توان امواج را هدایت یا خم کرد و یا اینکه در نقطهٔ خاصی آنها را تقویت یا تضعیف نمود [۲-۳].



شکل ۲. پروب آرایهٔ فازی در برابر پروب معمولی با مبدل



شکل ۳. نمونه‌ای از هدایت امواج در روش آرایهٔ فازی

۳. قابلیت‌ها و مزایای خاص روش آرایهٔ فازی

مزایای این شیوه را می‌توان به دو دستهٔ مزایای اجرایی و مزایای فنی تقسیم کرد. در ادامه به این موارد اشاره می‌شود.

۳-۱. مزایای بازرسی

روش آرایهٔ فازی نسبت به روش معمول و دیگر روش‌ها مزایایی دارد که قابلیت بازرسی را در این روش بالا می‌برد و سبب بهبود آن می‌شود. در حالت آرایهٔ فازی به‌دلیل برخورداری از قابلیت هدایت امواج می‌توان در صورت نیاز عمق، تمرکز و زاویهٔ امواج را دستکاری کرد که به بالارفتن درصد تشخیص عیب و بازرسی کمک می‌کند. همچنین این روش دو شیوهٔ نمایش مخصوص به‌خود دارد که عبارت‌اند از: نمایش اسکن خطی و نمایش S اسکن. این دو شیوه براساس کنترل عناصر موجود در پروب شکل می‌گیرند؛ بدین‌گونه که در اسکن خطی المان‌ها پشت سر هم به‌ترتیب فعال می‌شوند و بدون اینکه به حرکت برنامه‌ریزی‌شدهٔ پروب نیاز باشد تصویری مشابه B اسکن در حالت فراصوت معمولی می‌دهد. در حالت S اسکن هم به‌دلیل تأثیر متقابل امواج به شیوه‌ای از نمایش می‌رسیم که یک محوطهٔ کیک‌شکل از داخل قطعه در تصویر موجود است تا در صورت وجود عیب بتوان آن را مشاهده کرد. چون تولید امواج در روش S اسکن با حالت معمول فراصوت (A اسکن) تفاوتی کلی نمی‌کند و فقط تأثیر متقابل امواج باعث ایجاد این شیوهٔ نمایش می‌شود، می‌توان تصویر موج ارسالی را هم در کنار تصویر S اسکن داشت و تا از مزایای روش معمولی هم بی‌بهره نبود [۴].

۳-۲. مزایای اجرایی

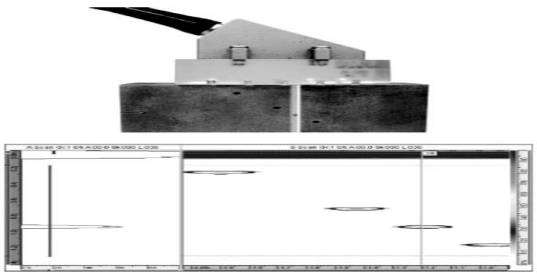
علاوه بر قابلیت‌های بازرسی ذکرشده، روش آرایهٔ فازی از منظر اجرای فرایند بازرسی هم چند ویژگی دارد که برتری‌هایی را برای این روش به‌همراه دارد. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

۱. دستگاه‌های این روش اندازه و وزن مناسبی داشته، این قابلیت را دارند تا اطلاعات بازرسی را ذخیره کنند تا به‌صورت مدرک روی لوح فشرده ثبت شود.

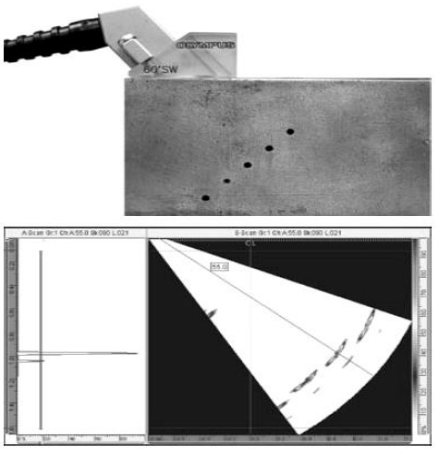
۲. بالارفتن سرعت بازرسی. این روش توانایی نمایش چند اسکن همزمان را دارد. همچنین امکان استفادهٔ

نرم‌افزارهای کمکی بازرسی، که اطلاعاتی دقیق از اندازه و موقعیت عیب در اختیار بازرس قرار می‌دهند وجود دارد و همچنین زمان کم آماده‌سازی سبب افزایش سرعت عملیات بازرسی و تفسیر اطلاعات آن می‌شود.

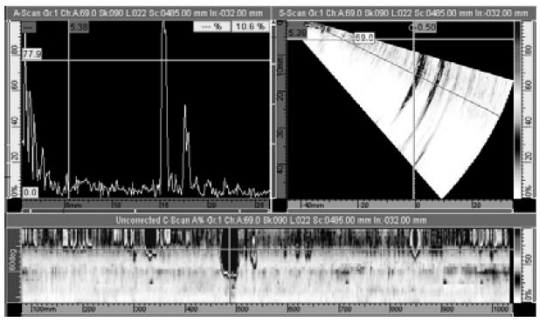
۳. روش آرایهٔ فازی توانایی بازرسی قطعات ضخیم را دارد و دسترسی به یک طرف قطعه برای اجرای آن کافی است و هم اینکه خطرات جانی و نکات ایمنی خاصی برای اجرا ندارد.



شکل ۴. نمونه‌ای از نمایش اسکن خطی



شکل ۵. نمونه‌ای از نمایش S اسکن



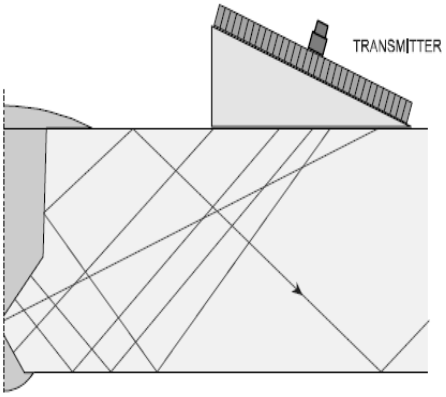
شکل ۶. نمایش ترکیبی شامل اطلاعات موج ارسالی و S اسکن

۴. تکنیک‌های بازرسی قابل اجرا با روش آرایهٔ فازی

علاوه بر توانایی‌ها و مزایای خاص روش آرایهٔ فازی، این روش قابلیت اجرای تکنیک‌های گوناگون بازرسی با روش فراصوت را نیز دارد. هر کدام از این تکنیک‌ها می‌توانند باعث اجاد مزیت در تشخیص یک نوع عیب خاص شوند یا اینکه دقت بازرسی و تفسیر اطلاعات را بالا ببرند. روش آرایهٔ فازی از منظر اجرای این تکنیک‌ها هم روش مناسبی است و نه‌تنها محدودیت خاصی را نسبت به روش معمولی ندارد، که باعث کیفیت اجرا نیز می‌شود. در ادامه به معرفی برخی از تکنیک‌های رایج و قابل استفاده در بازرسی مخازن می‌پردازیم.

۴-۱. شناخت ناحیه[۴]

روش آرایهٔ فازی مانند روش معمول فراصوت، که از چند پروب برای شناخت ناحیهٔ بازرسی استفاده می‌کند، قابلیت اجرای این تکنیک را دارد، با این تفاوت که پروب‌های آرایهٔ فازی بهتر جفت می‌شوند و سرعت بازرسی بالاتری دارند [۵].

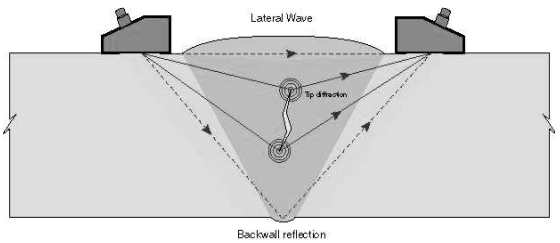


شکل ۷. نمایی از تکنیک شناخت ناحیه با روش آرایهٔ فازی

۴-۲. روش زمان پرواز پراش[۵]

در این روش، که به تافد معروف است، دو پروب در دو سمت جوش قرار می‌گیرند که یکی فرستنده و دیگری گیرنده است و در صورت وجود ترک در مسیر ارسال امواج پراش اتفاق می‌افتد و این مسئله خود را به‌صورت پالس

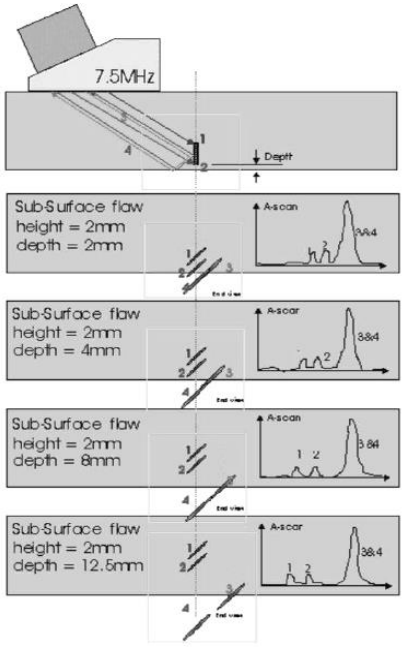
اضافی نمایش می‌دهد و باعث تشخیص ترک می‌شود. این روش اطمینان مناسبی دارد و برای تشخیص ترک و بازرسی مقاطع ضخیم کاربردی است. با دستگاه‌های آرایهٔ فازی این تکنیک با سرعت و دقت بیشتر اجرا می‌شود. در شکل ۸ نمایی از این تکنیک مشاهده می‌شود [۵].



شکل ۸ نمایی از تکنیک زمان پرواز پراش

۴-۳. تکنیک پراش پشت[۶]

این تکنیک هم با روش آرایهٔ فازی قابل اجراست. این روش بدین‌گونه عمل می‌کند که امواج را در ارتفاع‌های مختلف ارسال می‌کند و اگر عیبی وجود داشته باشد، خود را به‌صورت پالس اضافی نمایش می‌دهد. در روش آرایهٔ فازی این تکنیک بهتر اجرا می‌شود و به حرکت نیاز ندارد و تنظیمات بهتر صورت می‌گیرد [۵].



شکل ۹. نمایی از تکنیک پراش پشت

۵. سازوکارها و امکانات الحاقی به روش آرایهٔ فازی به‌منظور بازرسی جوش مخازن تحت فشار

با توجه به حجم زیاد بازرسی و همچنین شکل معمولاً منظم (کروی یا استوانه‌ای) مخازن تحت فشار، سازوکارهایی برای بازرسی مخازن تحت فشار به روش آرایهٔ فازی اضافه شده‌اند تا علاوه بر کاهش خطا و کاهش زمان بازرسی، سبب بهبود کیفیت بازرسی و اجرای بهتر روش‌ها شوند. این سازوکارها، همراه با تکنیک‌های موجود وقتی به روش آرایهٔ فازی افزوده شوند، برای بازرسی ترکیبی قابل اطمینان و اقتصادی ایجاد می‌کنند.

۵-۱. پروب‌های نگه داشته شده با دست[۷]

از جمله ساده‌ترین روش‌ها برای افزایش قابلیت روش آرایهٔ فازی افزودن یک انکـدر[۸] به پروب است که باعث می‌شود و در انجام تنظیمات تکنیک‌های گوناگون و حرکت دقیق پروب راحت‌تر عمل کنیم. در شکل ۱۰ یک پروب آرایهٔ فازی را که به این شیوه بهبود پیدا کرده مشاهده می‌شود.

شکل ۱۰. یک پروب آرایهٔ فازی همراه با یک انکدر کوچک

۵-۲. اسکنرهای دستی[۹]

از جمله شیوه‌های ارزان و ساده برای بازرسی، اسکنرهای دستی هستند. در این روش یک قاب که مجموعه‌ای از پروب‌ها (می‌توان از پروب‌های معمولی و روش تافد هم استفاده کرد، اما روش آرایهٔ فازی باعث بهبود و کیفیت بهتر آن می‌شود) روی آن سوار شده، در دست است. این اسکنرها باعث بازرسی بهتر و آسانتر شده و خطاهای

حرکتی بازرس را اصلاح می‌کنند. همچنین معمولاً قابلیت پمپاژ آب به‌عنوان مادهٔ واسط را برای بازرسی بهتر دارند.

۵-۳. حلقهٔ جوشکاری[۱۰]

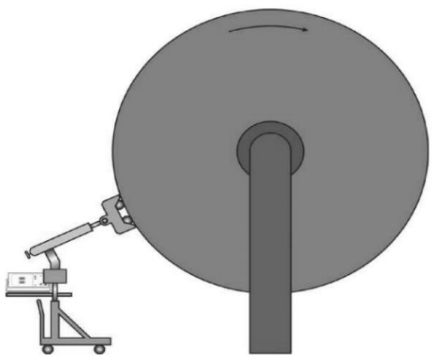
در بسیاری از موارد، در جوشکاری‌های مخازن و لوله‌ها با جوشکاری در مقاطع یکنواخت استوانه‌ای روبرو می‌شویم. حال اگر یک حلقهٔ فلزی را روی لوله سوار کنیم و یک مجموعه پروب داشته باشیم که روی حلقه مستقر شده و روی خط جوش دور بزند، به این شیوه اسکن شکل می‌گیرد. این شیوهٔ اسکن به‌خصوص در جوشکاری خط لوله‌ها باعث سرعت و دقت بازرسی شده و بعد از نصب و تنظیم عملیات را به‌صورت خودکار انجام می‌دهد. تنها محدودیت این روش قطر مقطع بازرسی است که نباید از ۲ متر بیشتر شود.

۵-۴. مخزن چرخان[۱۱]

در این روش لوله یا مخزن می‌چرخد و اسکنر در یک موقعیت خاص مستقر است و اسکن انجام می‌شود. این شیوه جزء شیوه‌هایی است که دقت و کنترل بالایی دارد و در مواردی که با مخازن بزرگ روبرو هستیم، روش مناسبی می‌باشد و محدودیت کمتری نسبت به روش روش حلقهٔ جوشکاری در زمینهٔ اندازه و قطر دارد.

شکل ۱۱. بازرس در حال استفاده از اسکنر دستی

شکل ۱۲. سازوکار حلقهٔ جوشکاری مستقر روی لوله به‌منظور بازرسی



شکل ۱۳. نمایی از روش مخزن چرخان

۵-۵. اسکنر با چرخ مغناطیسی[۱۲]

این شیوه در مخازن بسیار بزرگ کاربرد دارد که به‌دلیل اندازه و وزن، نه می‌توان از روش حلقهٔ جوشکاری استفاده کرد و نه می‌توان آنها را با شیوهٔ مخزن چرخان بازرسی نمود. راه‌حل این مشکل اسکنر یا چرخ‌های مغناطیسی است که با نیروی مغناطیسی به سطح مخزن می‌چسبد و با کمک یک سیستم رباتیک حرکت و اسکن را انجام می‌دهد و نتایج به‌صورت مستقیم به کامپیوتر متصل به تست منتقل و توسط بازرس تحلیل می‌شود.

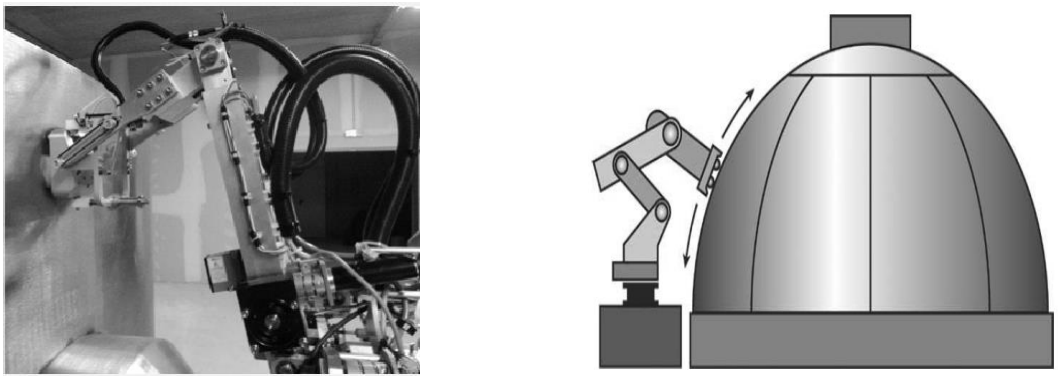
۵-۶. شیوهٔ تمام‌رباتیک[۱۳]

گاهی، به‌دلائلی چون بزرگی مخازن، شکل پیچیده و یا جنس مخزن که برای اتصال مغناطیسی مناسب نیست، نمی‌توان از هیچ یک از روش‌های قبل استفاده کرد. در این حالت پیچیده‌ترین و گران‌ترین شیوهٔ اسکن اجتناب‌ناپذیر است و لذا شیوهٔ تمام‌رباتیک استفاده می‌شود. در این روش یک بازوی رباتیک پروب را به‌صورت برنامه‌ریزی‌شده توسط اپراتور حرکت می‌دهد و نتایج را نمایش می‌دهد. در شکل ۱۵ نمایی شماتیک و واقعی از این روش نمایش داده شده است.

۶. جمع‌بندی

از ویژگی‌های بارز قرن حاضر، پیشرفت در تمامی عرصه‌ها و تغییر و تکامل امکانات است. وسائلی که تا چند سال پیش اهمیت چندانی نداشتند، امروز جزئی جدایی‌ناپذیر از حوزهٔ کاری خود هستند. این موج فناوری، حوزهٔ بازرسی را نیز بی‌بهره نگذاشته است. در فرایند بازرسی هنوز هم تکیهٔ بسیاری از استانداردها به روش رادیوگرافی است و روش فراصوت از نظر امکانات و قطعیت به این روش نمی‌رسد، اما با تکامل این روش و ظهور و بروز امکانات و تکنیک‌های جدید اکنون شاهد این اتفاق هستیم که روش گران، پردردسر و محدود رادیوگرافی کم‌کم به حاشیه رفته و روش فراصوت، به‌خصوص حالت آرایهٔ فازی آن، کامل‌تر و رایجتر شده است. شیوهٔ آرایهٔ فازی راهکاری مناسب و قابل اجراست که می‌تواند پاسخگوی دقت و نیاز بازرسی طیف وسیعی از مخازن تحت فشار باشد و نیاز بسیاری از صنایع را برآورد. تمام تلاش این مقاله در ارائه و شناساندن یک شیوهٔ جدید بازرسی است که در سال‌های اخیر در حال رشد بوده است. در کشورهای نفت‌خیز و کشورهای فعال در صنایع نیروگاهی و تأسیساتی، به‌دلیل استفادهٔ گسترده از مخازن تحت فشار و خطوط طویل لوله، روش فراصوت آرایهٔ فازی و سازوکارهای معرفی شده برای این روش می‌توانند گزینه‌ای مناسب و اقتصادی باشد که موجب بهبود سرعت و کیفیت بازرسی مخازن می‌شود.

شکل ۱۴. تصویر اسکنر با چرخ مغناطیسی و فرایند بازرسی آن



شکل ۱۵. نمای شماتیک و واقعی از روش تمام‌رباتیک

۷. مآخذ

[۱] مرکز منابع تخصصی مهندسی جوش، مجموعه ۴: تولید و مهندسی کاربردی، جلد ۷: آزمون‌های غیرمخرب.

[2] Olympus NDT. Introduction to phase array ultrasonic technology application: R/D tech guideline.waltham, MA: Olympus NDT, 2007.

[3] Olympus NDT. Advance in phase array ultrasonic technology applications.waltham, MA: Olympus NDT, 2007.

[4] Lafontaine G., F. Cancre. "Potential of Ultrasonic Phased Arrays for Faster, Better and Cheaper Inspections." *NDT.net*, vol 5, No. 10, October 2000.

[5] Moles, M., S. Labbé. "Ultrasonic Inspection of Pressure Vessel Construction Welds using Phased Arrays", Olympus NDT Canada, Quebec, Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, 27-30 Nov 2005.

[6] Papadakis, E., *Ultrasonic Instruments and Devices: Reference for Modern Instrumentation, Techniques, and Technology*, Academic Press, 2000.

[۷] شاکری، عطا. "تست فراصوت آرایهٔ فازی در بازرسی جوش مخازن تحت فشار"، پروژهٔ کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، تابستان ۱۳۹۴.

پی‌نوشت

1. destructive testing (DT)
2. non destructive testing (NDT)
3. ultrasonic
4. zone discrimination
5. time-of-flight diffraction
6. back diffraction
7. hand held arrays
8. encoder
9. handscaners
10. welding band
11. rotate the vessel
12. magnetic wheel scanners
13. full robotics