

به نام خدا

بازرسی مخازن تحت فشار با استفاده از التراسونیک به روش

Phased Array

مهندس مرتضی ثانی خانی (مدیر عامل) و مهندس صفا صبح
شناسایی (مدیر آموزش)
شرکت پیشگامان فنون پارس

× خلاصه :

تکنولوژی **Phased Array** ارائه دهنده یک مزیت تکنیکی در بازرسی جوش در مقایسه با روش قدیمی اولتراسونیک است . پرتو صوتی در **Phased Array** توانایی راهنمایی شدن ، اسکن کردن ، پیچ خوردن و متمرکز شدن را بصورت الکترونیکی دارد . توانایی راهنمایی شدن پرتو ، زاویه های پرتوهای انتخابی را بگونه ای هدایت می کند که در حین حرکت بصوت عمود به بعضی عیوب قابل پیش بینی برخورد کرده و آنها را نمایان سازد که این امر خصوصاً در مورد LOF قابل بیان است . اسکن الکترونیکی (Liner یا در حالت خطی) این قابلیت را دارد که به سرعت جوش ها را پوشش دهد . اسکن زاویه ای (که معمولاً بصورت Sectional یا Azimuthally بیان می گردد) این توانایی را دارد که یک نقشه (Map) کلی از جوش ها تحت زاویه مناسب بدست دهد تا اکثر عیوب احتمالی در آن دیده شود . تمرکز الکترونیکی (Electronic Focusing) این قابلیت را ایجاد می کند که شکل و اندازه عیوب در محلهایی که انتظار داریم را نمایش بدهد . در هرحال تکنیک **Phased Array** قابلیت عیب یابی را در حداقل زمان ممکن را دارد .

مقاله حاضر نحوه بازرسی جوش های مخازن تحت فشار را مورد بررسی قرار می دهد . این تکنیک دارای مزایای بهتری نسبت به شیوه معمولی UT حتی در حالت اتوماتیک آ» می باشد . برای بازرسی مقاطع ضخیم از نماهای " بالا - کنار - انتها - " و یا " بالا - کنا - TOFD" استفاده می کنیم . البته سایر نماها نیز قابل استفاده هستند .

بازرسی های خاص به راحتی به روش **Phased Array** قابل انجام هستند به این صورت که با افزودن دسته پرتو صوتی برای پوشش دادن سطح بیشتری از جوش ، تحت زاویه گوناگون ، بازرسی های متقارن و یا حتی تست توسط چند تست توسط چند پروب پشت سر هم (Tandem Probe) انجام می شوند . به همین منظور سیستم ها و تجهیزات مناسب این روش ها نیز قابل استفاده هستند . برای حالت Fitness For Service نیازمند اندازه سنجی بسیار دقیق می باشیم بطور کلی تکنیک **Phased Array** قابلیت کنار هم گذاردن نتایج هر یک از حالت ذکر شده بالا در کنار هم را نیز دارد .

× مقدمه :

انواع مختلفی از مخازن تحت فشار در صنایع مختلفی از جمله پتروشیمی، صنایع دفاعی، نفت و گاز، انرژی اتمی و صنایع عمومی استفاده می شوند. این مخازن معمولاً از ورق های فولادی (معمولاً فولادهای فریتی) که به هم جوش خورده اند ساخته می شوند. اما متأسفانه جوشکاری همواره با ایجاد عیب می باشد که تعمیرات و در بعضی مواقع خرابی کامل آن باعث هدر رفتن زمان می شود که بسیاری از تخریب ها نیز ناگهانی ایجاد می شوند. معمولاً جهت بازرسی عیوب جوش از استاندارد ASME استفاده می شود. برای این منظور از ASME Sec.5 استفاده می شود که بخش 4 و 5 آن (Article 4,5) برای بازرسی جوش مخازن تحت فشار.

× چرا التراسونیک :

رادیو گرافی مدتها به عنوان اصلی ترین پروسه بازرسی مخازن تحت فشار به حساب می آمد. اما رادیوگرافی دارای معایب معین و فراوانی است: بسیار خطرناک است، کارکنان هنگام انجام آن نباید در محل حضور داشته باشند، مخزن جهت آزمایش باید به محلی بی خطر حمل بشود، رادیوگرافی در حین انجام پروسه تولید را به تاخیر می اندازد و مرحله پروسس و تفسیر آن نیز زمان بر است، رادیوگرافی فقط زمانی توانائی اندازه گیری نمایش عیوبی مانند ترک و یا LOF را دارد که در راستای مناسبی قرار گرفته باشد، رادیو گرافی توانایی اندازه گیری عمیق عیب را ندارد که تحت این شرایط توانائی ارزیابی های بحرانی خصوصاً جهت " مکانیک شکست " از بین می رود، هر قطعه ای (با توجه به بسیاری شرایط مثلاً عدم توانائی رادیوگرافی کرد اسکلت فلزی ساختمانها در شهر) قابلیت رادیوگرافی ندارد، قیمت بالای تجهیزات و زمان بالای تابش هم جزو محدودیت های RT می باشد. اما در مقایسه با رادیو گرافی، اولتراسونیک کاملاً بی خطر است، قابل اجرا در سایت می باشد، قابل انجام دادن پس از سرد شدن جوش می باشد، تاخیر در تولید به حداقل زمان ممکن می رسد و قابلیت نمایش دادن میزان عمیق و ارتفاع عیوب بطور دقیق را دارد.

از زمانی که صنایع هسته ای در دو دهه گذشته شروع بکار کردند و اولتراسونیک اتوماتیک را توسعه دادند، به تجربه اپراتور وابسته بود، اولتراسونیک مکانیزه و یا اتوماتیک (AUT) گاهی اوقات در دسترس بود اما باز هم سرعت تست پایین بود و قیمت تمام شده نیز بسیار بالا بود و توانائی استفاده هر روزه را سلب می کرد. اما با گذشت زمان سرعت بالا رفت و هزینه ها کاهش یافت، عموماً AUT ثابت کرده است که نسبت به VT معمولی کاملاً تکرار پذیر است. روش هائی مانند TOFD نیز جهت تحلیل در مورد مکانیک شکست کاملاً دقیق هستند و مورد استفاده قرار می گیرند.

امروزه، التراسونیک به روش **Phased Array** بصورتی کاملاً اجرائی و تجاری درآمده است و جهت تست مخازن تحت فشار مورد استفاده قرار می گیرد که باعث بالا رفتن راندمان کار نیز شده است. تکنیک **Phased Array** بخاطر مزایایی که دارد نفوذ خوبی در بازار داشته و در کلیدی ترین کاربردها مورد استفاده قرار می گیرد اما تنها مشکل آن عدم آشنائی اپراتورها می باشد که باید آموزش ببینند. البته هزینه این روش نیز به نسبت بالاست اما در حال کاهش یافتن است، با این همه از بسیاری از جهات از RT هزینه کمتری درآید.

× استاندارد ASME , AUT :

معمولاً ASME Sec.V جهت UT معمولی بکار می رود اما بخش هائی از آن نیز به AUT اختصاص دارد. به عنوان مثال Article 4 Appendix E - 410 به "تکنیک ها تصویر سازی کامپیوتری" ارجاع داده است همچنین Article 4 به بیان جزئیاتی از مکانیزمهای ثبت اطلاعات و اسکن کردن می پردازد که شامل توضیحاتی در مورد رویه های اجرائی نیز هست. به عنوان مثال ASME Sec.V استفاده از تکنیکهای مختلف رسم DAC، طراحی بلوکهای کالیبراسیون را مجاز شمرده

است. در حقیقت ASME Sec.V Article 4 Appendix E 474 اشاره کرده سایر تکنیک ها نیز قابل استفاده هستند در همین حال Sec.V Article 1 T - 110 مشخص نموده که روش های جایگزین حتماً باید برابر یا بهتر از تکنیک های مندرج در استاندارد باشند و یک بازرسی تأیید شده باید رویه های اجرائی (و اسناد) را مرود تأیید قرار بدهد. آزمونهای UT که انجام می شوند باید تحت استاندارد ASME Pressure Vessel and Power Piping انجام شوند بخش های یک، سه، هشت و یازده در مورد خطوط لوله است که نیازمندیهای B31.1، B31.3 را بیان می کند. این بازرسی ها معمولاً بیانگر (Raster Scanning) در مد پالس - اکو می باشد که از دو زاویه مناسب با تغییرات 10 درجه نسبت بهم استفاده می شود تا پوشش کاملاً مناسبی بدهد.

× استاندارد ASME بخش 2235:

امروزه استاندارد ASME کدهائی را منتشر کرده که استفاده از روش Non amplitude, Computer recorded را مجاز شمرده که در واقع همان روش TOFD (Time of Flight Diffraction) است. Cod Case 2235 بعنوان گزینه جایگزین تست رادیوگرافی است که در Fitness for Service مورد استفاده قرار می گیرد. البته این Code Case نیز اعلام می دارد که حداقل 3 عدد Reference Reflector جهت اجرا نیازمند است.

× سایر استانداردها:

بغیر از موارد ذکر شده از ASME استانداردهای API510 (Pressure vessel), API572 (inspection if resell), API 570 (Piping) و همچنین استاندارد های اروپائی مورد استفاده قرار می گیرند.

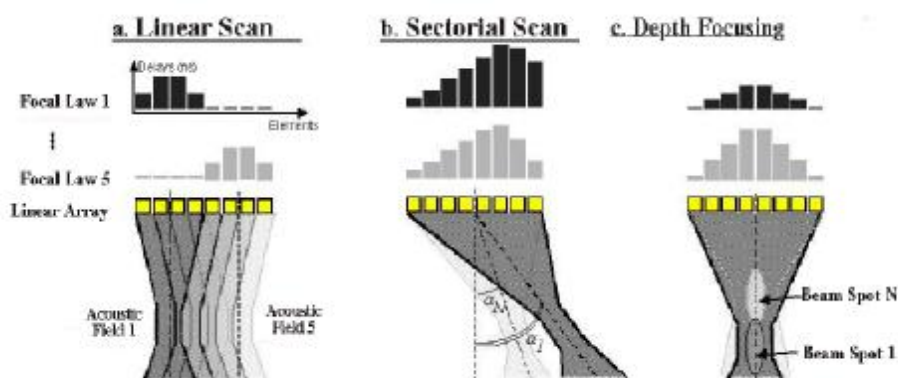
التراسونیک به روش Phased Array

× چگونه Phased Array کار می کند:

اولتراسونیک Phased Array از نظر قواعد کلی کاملاً شبیه Phased Array برای رادارها، سونار و سایر کاربردها فیزیکی صوت می باشد. اما بهر حال اولتراسونیک از نظر توسعه یافتگی بسیار عقب مانده تر از سایر کاربردهای فیزیکی صوت است که دلایل آن نیز بازار کم این روش، استفاده از امواج با طول موج کوتاه در این روش، تغییرات مد و همچنین نیازمند بودن به مجموعه ای از قطعات می باشد و به همین خاطر تا چند سال قبل تکنیک Phased Array زیاد مورد استفاده قرار نم گرفت. اما از نقطه نظر علمی اولتراسونیک به روش ی یکی از روش های مهم تولید و دریافت صوت با فرکانس های بالاست. چه بسا رفتار صوت در داخل ماده فارغ از روش تولید آن می باشد حال تفاوتی نمی کند که در اینصورت توسط یک پیزو الکتریک، الکترو مغناطیس، لیزر و یا Phased Array تولید شده باشد با این حال جزئیات بازرسی به روش UT بدون تغییر باقی ماند. به عنوان مثال اگر در یک آزمون اولتراسونیک فرکانس مطلوب مورد استفاده 7.5 MHz باشد توسط Phased Array نیز همین فرکانس استفاده می شود. در مورد فاصله کانونی، زاویه برخورد قاعده کلی یکی است. Phased Array از تعدادی کریستال استفاده می کند که هر یک از آنها به سیمی متصل است و قطع و وصل می شود و بر حسب زمان کار می کنند. این کریستالها می توانند در گروههای 4 تا 32 و بیشتر کار کنند و معمولاً برای خطوط لوله از 16

کریستالی استفاده می شود و همچنین برای سهولت هر چه بیشتر استفاده کننده (User – friendly بودن) می توان جهت استفاده زمان تاخیر را از ورودی توسط اپراتور دریافت کند ، همچنین می توان از فایل هایی که در قبل مورد استفاده قرار گرفته و یا زاویه ، فاصله کانونی و یا انواع اسکن کردن که بصورت الگو در داخل دستگاه پیش بینی شده استفاده نمود . (شکل 1)

مقدار Delay نیز توسط خود دستگاه با استفاده از روش TOFD از نقطه کانونی محاسبه می شود ، به این ترتیب اسکن از طریق قوانین ابتدائی نقطه کانونی (Focal laws) پایه ریزی می گردد.



شکل (1) تصویر شماتیک نحوه تولید اسکن های Sartorial , linear به روش PA

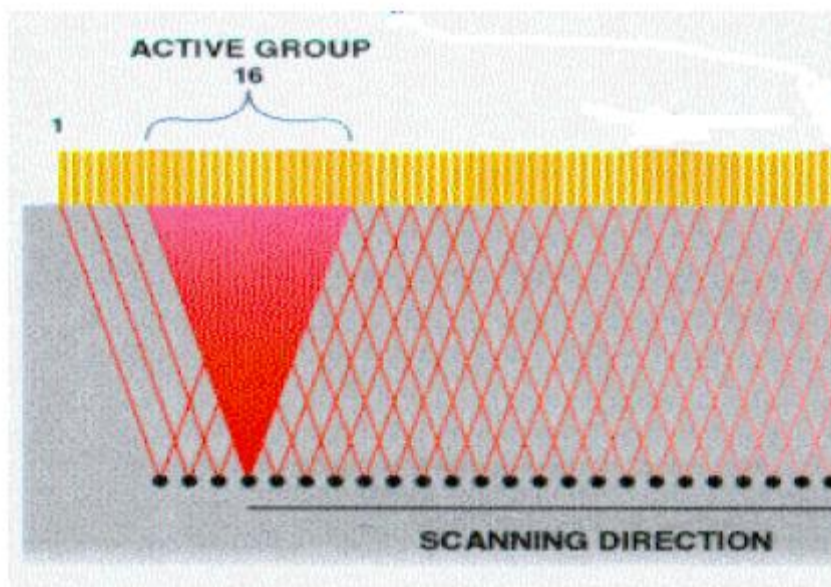
اگر چه جهت Set up کردن دستگاه نیازمند زمان است ، اما این Set up می تواند در دستگاه ذخیره شود و برای استفاده های بعدی در کمترین زمان ممکن دوباره بار گذاری گردد همچنین اعمال تغییرات در این Set up بسیار ساده تر از تنظیم دستگاه های قدیمی می باشد .

× انواع اسکن :

بدلیل تولید و دریافت صوت بصورت الکترونیکی موقعیت برای ایجاد الگو های مختلف اسکن فراهم می گردد .

× اسکن های الکترونیک :

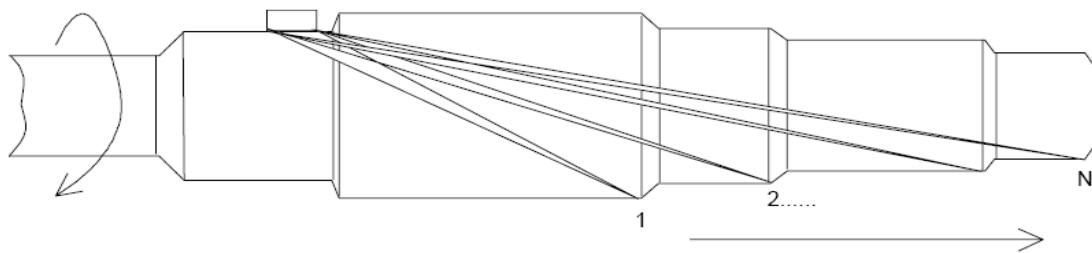
مجموعه ای از کریستال های این اسکن الکترونیک را تولید می کنند (شکل 2) می توان 128 عدد از کریستال ها را در کنار هم داشته باشیم که در گروه های 8 تا 16 تایی فعال باشند ، اسکن الکترونیکی قابلیت پوشش دهی سریع قطعات را با داشتن کوچکترین نقطه کانونی فراهم می کند . اگر کریستال ها بصورت خطی و تخت باشند اسکن را با نام B-Scan می شناسیم . اگر کریستال ها دارای انحنا باشند اسکن نیز به صورت منحنی وار انجام خواهد شد . حرکت برای اسکن های خطی بصورت مستقیم صورت می گیرد ، بعنوان مثال توانائی برنامه ریزی برای برای تست تجوش با ایجاد موج عرضی (برشی) با زاویه های 45 درجه و 60 درجه را دارد که همین خاصیت باعث رقابت آن UT معمولی شده است .



شکل (2) توضیح شماتیک اسکن الکترونیک (خطی)

× اسکن مدور (Sectarian Scan) :

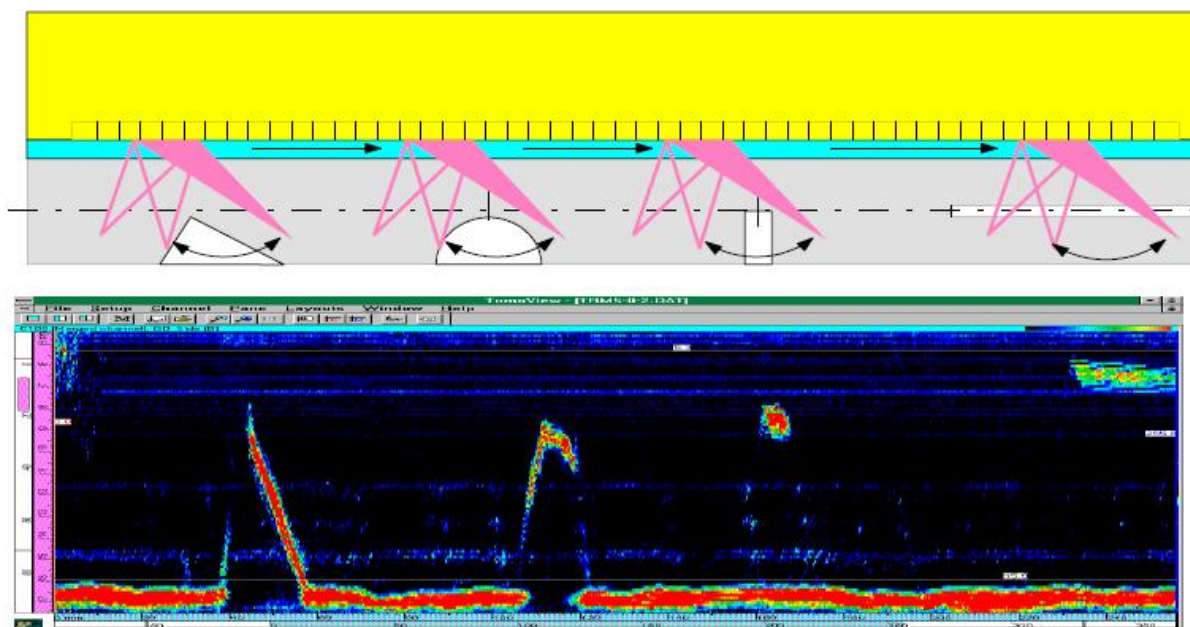
در این حالت نیز کریستالها به همان حالت قبل هستند اما با ایجاد تغییرات در زمان تاخیر (Delay time) باعث بوجود آمدن صوت تحت زاویه های متفاوت می شود (شکل 3) حرکت در این حالت نیز بصورت مستقیم برنامه ریزی شده است. کاربردی که این روش دارد برای اسکن کردن قطعاتی مورد استفاده قرار می گیرد که دارای اجزاء غیر قابل دسترس برای تست کردن می باشند. (به عنوان مثال اسکن کردن ریشه Blade در توربین) که با این روش هم می توان یک Map از قطعه بدست آورد و هم عیوب احتمالی داخل آنرا مشخص نمود. با این روش می توان صوت را تحت زاویه های ± 20 تا ± 80 تولید نمود و به داخل قطعه فرستاد که در این حالت کاملاً به فرکانس تولیدی کریستالها و فضای بین آنها بستگی دارد.



شکل (3) نمایش شماتیک یک اسکن مدور استفاده شده در رولور توربین

× ترکیب اسکن ها :

ترکیب اسکن خطی و مدور باعث ایجاد تصویری ترکیبی خواهد شد (شکل 4) همچنین مطلوب ترین زاویه ها را می توان انتخاب کرد تا بهترین و کاربردی ترین تصاویر را جهت بهترین ارزیابی ها تولید کند . برای بازرسی جوش ها معمولاً زوایای معینی مورد نیازند که بر اساس پروفایل جوش انتخاب می شوند . برای اینگونه کاربردها معمولاً زاویه های مشخصی از پرتو های صوتی برنامه ریزی می شوند تا با توجه به ظاهر جوش و محل آن مورد استفاده قرار گیرند .



شکل (4) بالا : اگر اولتراسونیک برای اسکن های خطی و مدور - پایین : تصویر اولتراسونیک بدست آمده از ترکیب کلیه اطلاعات با یکدیگر

سیستم های چند پروپی و **Phased Array** از اسکن خطی استفاده می کنند . در این حالت پروپ بصورت خطی به دور و یا در طول جوش حرکت می کند تا هر یک از کریستالها مشاحت مشخصی از جوش را اسکن نمایند . همین حالت باعث می شود که سرعت AUT از UT های تک پروپی بسیار بالا باشد . آزمون **Phased Array** بر روی جوش های خطی از نظر قاعده مطابق یا قوانین سیستم چند پروپی است ، در حالی که در این حالت حتی بسیار کوچکتر نیز می باشد ، و به علاوه **Phased Array** بصورت قابل ملاحظه ای انعطاف پذیرتر از AUT می باشد . بسیار ساده تر می توان تنظیمات Set up را تغییر داد و یا می توان از فایل های قبلی برای کارهای در دست اقدام استفاده نمود ، همچنین امکان استفاده از دسته پرتو های صوتی بسیار بیشتر نیز فراهم است .

× ارزیابی استاندارد ASME برای التراسونیک

راههای فراوانی برای تشخیص و درک این موضوع که اولتراسونیک چگونه عیوب را شناسایی می کند و اندازه سنجی می کند امتحان شده است . بسیاری از این روشها ابتدا توسط صنایع هسته ای مورد تحقیق قرار گرفته اند ، گسترده ترین و پر هزینه ترین تحقیقات و کوشش ها مربوط به برنامه PISC II بود که در برگیرنده 30 تیم کاری و تعداد زیادی از قطعات ضخیم بود . بسیاری از بازرسی ها با استفاده از استاندارد ASME (رویه های اجرائی مرتبط ، تکنیک های جایگزین) انجام

می شود . با اطلاعات بدست آمده می توان در مورد احتما تشخیص عیوب و یا تکنیک های قابل استفاده جهت عیب یابی بحث و تبادل نظر کرد .

برنامه PISC و سایر اینگونه برنامه ها و تلاش ها کمک شایانی به ارزیابی ها و تکنیک ها و رویه ها اجرایی می کند .
Phased Array را به عنوان تکنیکی می توان د نظر گرفت که با انواع روش ها و رویه ها اجرایی (پروسجر ها) می تواند کار کند . اولتراسونیک اتوماتیک مشخصاً از زمانی پیشرفت کرد که کوشش های هسته ای از سال 1980 در حال انجام بود که حاصل آن تولید کریستالهای متمرکز ، بهبود رویه های اجرایی و تکنیک ها (Tandem , TOFD) بدست آوردن اطلاعات بهتر و تصاویر بهتر می باشد .

× راههای انجام بازرسی :

بر اساس انعطاف پذیری موجود **Phased Array** می تواند از استاندارد ASME استفاده نماید . برای اینکار می توان بازرسی را به 3 بخش تقسیم کرد.

1. اسکن بر اساس ASME CC 2235 TOFD :

ساده ترین راه حل ایجاد اسکن خطی TOFD با استفاده از **Phased Array** است . برای بازرسی مناسب باید منطقه مرده (Dead Zone) با روش TOFD در خارج و داخل مخزن مشخص شود . مراکز تحقیق و توسعه به ترکیب TOFD و روش Pulse -Echo معتقد هستند بازرسی به این طریق نیازمند تعداد محدودی از وسائل و تجهیزات است .

2. بازرسی به روش Phased Array:

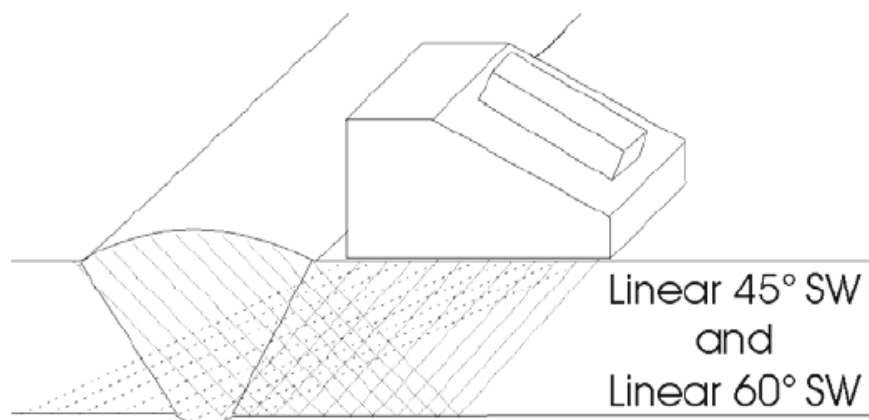
این روش با استفاده از قابل انعطاف بودن P.A به منظور اسکن جوش ها جهت پوشش دادن خواسته های ASME Sec V انجام شود. اسکن خطی در طول جوش انجام می شود و کریستالها نیز اسکن الکترونیکی (خطی) را به منظور پوشش دادن پروفایل جوش از چند زاویه انجام می دهند. در کنار اسکن های معمولی و TOFD ممکن است جهت دیدن بعضی از عیوب خاص به روشهای خاصی نیز سطح جوش را اسکن کنیم . (بعنوان مثال اسکن عرضی و یا روش pitch-catch برای یافتن عیوب عمودی)

3. بازرسی به روش Phased Array برای ECA

(توضیح: ECA یا Engineering Critical Assessment که به مکانیک شکست نیز نامیده می شود.)

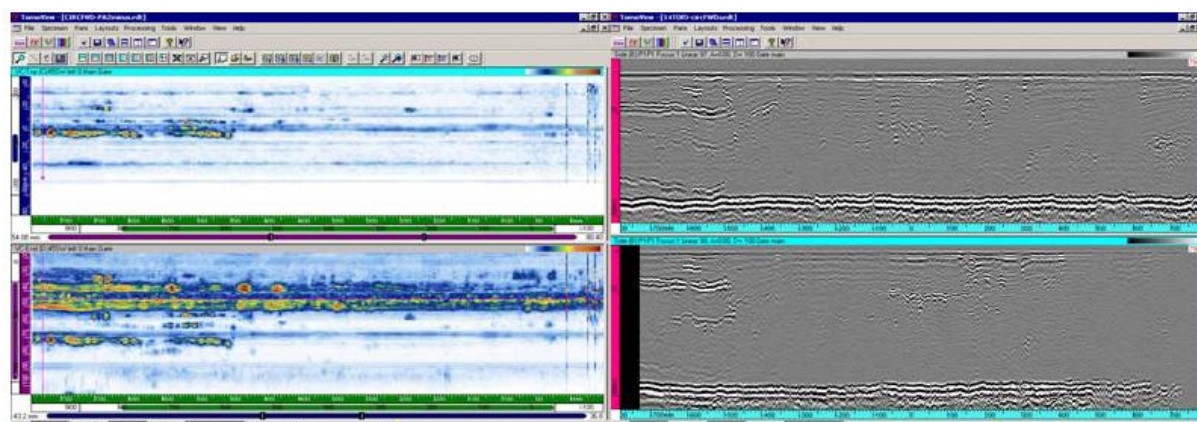
گاهی برای Fitness for Purpose به دقت بالایی نیاز داریم بنابراین بازرسی قابل اعتمادی نیز باید انجام دهیم. به همین خاطر توسط روش Phased Array میتوان سیستم هایی با تنظیمات دلخواه را طراحی کرد که بصورت ترکیبی باشند اما هر یک از متدهای مورد استفاده در این ترکیب خود بصورت کاملاً مجزا و مستقل عمل نمایند و تمامی سطوح را پوشش دهند (سطح خارجی، سطح داخلی، دیواره های میانی، عیوب عرضی) بعلاوه استفاده از تکنیک های خاص تفرق برای اندازه سنجی می توان استفاده کرد. این سیسم ها قابلیت دادن بیشترین احتمال عیب را در قطعه با بالاترین سرعت می دهند.

شکل 5 در زیر روش اسکن الکترونیکی (خطی) را جهت پوشش دادن نیازمندیهای خواسته شده در استاندارد (ASME Sec V) را نمایش می دهد. در این حالت مشاهده می شود که تحت زاویه های 45° , 60° اسکن در حال انجام است . با انتخاب تمامی امواج در اشکال مختلف تصویر نهایی با کنار هم قرار دادن اطلاعات ساخت می شود.



شکل 5: حرکت پروب و پرتو دهی تحت دو زاویه و اسکن خطی

نتایجی که از روی آزمایش اولتراسونیک یک مخزن تحت فشار معمولی بدست آمده در شکل 6 نمایش داده شده است. این نتایج از ترکیب اسکن تحت زاویه $45^\circ, 60^\circ$ از قسمت های "بالا و کنار" بدست آمده است. به علاوه دو تصویر از روش TOFD نیز آمده است.



شکل 6: چپ تصویر "بالا - کنار" از یک جوش به همراه عیب راست: اسکن به روش TOFD از همان جوش

سرعت اسکن به عواملی بستگی دارد: نوع اسکن (Zone Discrimination , TOFD , Raster) ، مقدار اطلاعات بدست آمده حین اسکن، تعداد پالس ها، ...

× سیستم های جانبی و کمکی اولتراسونیک

1. اسکنرهای دستی:

اینها نیز مانند مخازن تحت فشار انواع مختلفی دارند. ساده ترین آنها اسکنر دستی است که در شکل زیر نمایش داده شده بوسیله این اسکنر می توان از یک جفت کریستال استفاده نمود بعلاوه TOFD و یا سایر پروب ها ، این اسکنر مطابق ASME CC 2235 می باشد و برای تست به شیوه Raster و مخازن نازک مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل 7: پیکره بندی اسکنر دستی

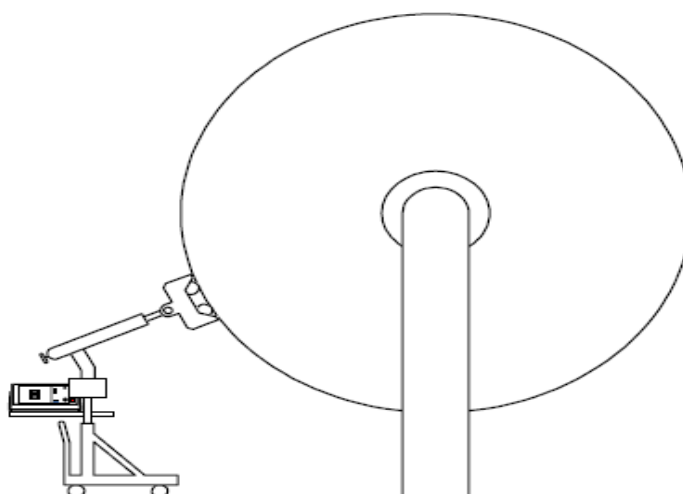
2- اسکنر با کمر بند:

از این نوع اسکنر می توان جهت خطوط لوله و مخازنی استفاده نمود که قطر آنها حداکثر 105 متر می باشد. بطور قطع استفاده از این نوع اسکنر در مخازن قطور بسیار مشکل خواهد بود. شکل 8 نمایش دهنده یک لوله جوش خورده با اتصال Girth است که در حال بازرسی شدن می باشد. سرعت حرکت این نوع اسکنر از اسکنر دستی بیشتر است.



شکل 8: بازرسی خط جوش یک لوله با اتصال Girth

برای مخازن بزرگ ساده ترین و ارزانه ترین راه حل برای بازرسی، چرخاندن مخزن می باشد که در شکل زیر بصورت شماتیک نمایش داده شده . نکته قابل توجه این حالت این است که از تماس خوب پروب و مخزن همواره باید اطمینان حاصل کنیم.



شکل 9: تصویر شماتیک چرخش یک مخزن جهت تست جوش

3- اسکنر با چرخهای آهنربایی:

در شکل 10 نمایشگر یک اسکنر با چرخهای آهنربایی است که در حال بازرسی جوش یک مخزن می باشد .



شکل 10: بازرسی یک جوش عمودی با اسکنر دارای چرخهای آهنربایی

نتیجه گیری:

اولتراسونیک به روش اتوماتیک (AUT) امروزه برای تست جوش بسیاری از مخازن بکار می رود و قطعاً دارای مزایای قابل اعتنایی نسبت به رادیوگرافی دارد:

- نیاز به تمهیدات ایمنی ندارد.
- به سرعت پس از جوشکاری می توان تست را شروع کرد.
- احتمال عیب یابی بالا
- امکان عمق یابی و ارتفاع سنجی عیوب
- امکان استفاده از نتایج در تحلیل های مورد نیاز در مکانیک شکست.

Phased Array نیز دارای پتانسیل خوبی جهت بازرسی جوش مخازن تحت فشار دارد:

- قابلیت انجام دو شیوه TOFD، اسکن Raster مورد نظر ASME Sec V را دارد.
- سرعت بازرسی از تمامی روش های قبلی بالاتر است.
- اکثر قطعات در هر موقعیتی که باشند قابلیت تست شدن را دارند.
- امکان بازرسی و تحلیل از هر نقطه دلخواه فراهم است.
- تنها محدودیت این شیوه قیمت بالای تجهیزات آن و کمبود اپراتور ماهر و آموزش دیده است.

References

ASME 2001, ASME Boiler and Pressure Vessel code, Section V, Non destructive Examination, 2001 Edition, July 1, 2001, The American Society of Mechanical Engineers.
ASME 2001, ASME Code Case 2235-4, November 30, 2001, The American Society of Mechanical Engineers.
ASME 2001 a, ASME Code Case 2235-4, November 30, 2001, The American Society of Mechanical Engineers. See Section I, Para. PW-11; Section VIII, Division 1, para. UW-11(a); and Section VIII, Division 2, Table AF-241.1.
Ciorau P., D. MacGillivray, T. Hazelton, L. Gilham, D. Craig and J. Poguet, "In-situ examination of ABB I-0 blade roots and rotor steeple of low-pressure steam turbine, using phased array technology", 15th World Conference on NDT, Rome, Italy, October 11-15, 2000.
Clay A.C., S-C. Wooh, L. Azar and J-Y. Wang, "Experimental Study of Phased Array Beam Characteristics", Journal of NDE, vol 18, no. 2, June 1999, page 59.

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

<http://www.ndt.net/article/v05n10/lafont2/lafont2.htm>

R.W. Nichols and S. Crutzen, "Ultrasonic Inspection of Heavy Section Steel Components - The PISC II Final Report", Kluwer Academic Publishers, 1988.
Wüstenberg H, A. Erhard and G. Shenk, "Some Characteristic Parameters of Ultrasonic Phased Array Probes and Equipments", NDT.net, vol 4, no. 4,
<http://www.ndt.net/article/v04n04/wuesten/wsuesten.htm>