

روشی نوین در طراحی و پیاده‌سازی دستگاه بازرسی غیر مخرب جوش لوله‌های بویلر به روش تصویربرداری با آرایه فازی فراصوتی

وحید حمیتی واقف^۱، مهدی بکرانی^۲

^۱ استادیار گروه فناوری اطلاعات و ارتباطات، پژوهشگاه نیرو، تهران، vvaghef@nri.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، bekrani@qut.ac.ir

چکیده

بازرسی غیر مخرب لوله‌های بویلر به جهت فنی و اقتصادی از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال، دسترسی دشوار به لوله‌های بویلر و مشکلات استفاده از روش رادیوگرافی، نیاز به سیستم بازرسی جایگزین را افزایش داده است. در این مقاله، روشی نوین برای طراحی و پیاده‌سازی دستگاه بازرسی غیر مخرب جوش لوله‌های بویلر با استفاده از آرایه‌های فازی فراصوتی تشریح می‌شود.^۱ در این روش از تکنیک روبش تمرکز کامل (TFM) فیلترگذاری شده، به منظور بهبود کیفیت تصاویر فراصوتی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در انتخاب ناحیه روبش فراصوت، کاهش مساحت ناحیه مرده و کاهش نویز تصویر نسبت به نمونه‌های تجاری موجود، استفاده شده است. علاوه بر این، طراحی مدارهای الکترونیکی در یک ساختار یکپارچه انجام شده است که نویز و پیچیدگی کمتر، سهولت تعمیرات و توسعه سیستم را در پی دارد. قابلیت حمل آسان، امکان بازرسی جوش لوله‌های بویلر کلیه نیروگاه‌ها با قطر ۱،۵ اینچ تا ۲،۵ اینچ و قابلیت چرخش کامل به دور لوله بویلر بدون نیاز به دسترسی به پشت آن از دیگر ویژگی‌های این پیاده‌سازی نسبت به نمونه‌های پیشین است. مجموعه این نوآوری‌ها سبب افزایش انعطاف‌پذیری در انتخاب ناحیه روبش و تولید تصاویر با کیفیت شده است. مطابق نتایج اخذ شده، این دستگاه امکان تصویربرداری با کیفیت مناسب از حفره‌هایی با قطر ۰،۳ میلی‌متر را با تفکیک‌پذیری ۰،۰۵ میلی‌متر داراست.

کلیدواژه

دستگاه بازرسی غیر مخرب جوش لوله‌های بویلر، آرایه فازی فراصوتی، روش تمرکز کامل، تصاویر روبش-A و روبش-B و روبش-C، نمای جانبی، نمای بالایی.

^۱ به جز پراب، این دستگاه به طور کامل در پژوهشگاه نیرو و به سفارش نیروگاه شهید مفتاح همدان طراحی و ساخته شده است.

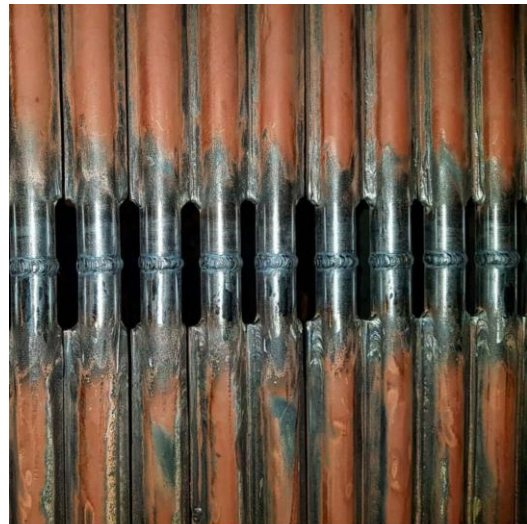
مقدمه

تصاویر دیجیتالی از کیفیت پایینتری برخوردار هستند و بررسی آنها، نیازمند دقت و تخصص بالایی می‌باشد [5][4][3]. سوم آنکه در رادیوگرافی لوله، ضروری است تا عملیات تابش اشعه از دو نمای روبرو و جانبی انجام شود تا تاثیر افزایش ضخامت دیده شده توسط اشعه در کناره‌های لوله حذف شود. در لوله‌های بویلر به دلیل چینش آنها در یک ردیف خاص، تابش اشعه از کنار، امکان‌پذیر نمی‌باشد و در نتیجه بازرسی کناره‌های لوله به روش رادیوگرافی به خوبی انجام نمی‌شود. چهارم آنکه عملیات ظهور فیلم بلافاصله انجام نمی‌شود و از هنگام تصویربرداری تا ظهور تصویر تاخیر زمانی در حد یک یا دو شبانه‌روز وجود دارد. پنجم آنکه اگر فیلم اخذ شده به هر دلیل معیوب باشد یا از کیفیت کافی برخوردار نباشد، تا زمان ظهور تصویر مشخص نمی‌شود و بنابراین در صورت وجود هر گونه ایراد، مجدداً باید کل فرآیند و به خصوص تخلیه کارکنان تکرار شود. ششم آنکه مستندسازی این فرآیند نیز به صورت رایانه‌ای امکان‌پذیر نیست و باید حتماً در قالب همان فیلم‌های رادیوگرافی صورت گیرد و نگهداری آنها نیز مطابق استانداردهای خاصی صورت گرفته و هزینه‌بر است [4]. هفتم آنکه در برخی موارد، دسترسی به پشت لوله‌های واتروال بویلر برای قرار دادن فیلم غیر ممکن و یا دشوار است و به همین دلیل استفاده از رادیوگرافی دیجیتالی در لوله‌های بویلر امکان‌پذیر نیست.

روش دیگر تصویربرداری در بازرسی غیر مخرب، استفاده از آرایه‌های فازی فراصوتی (PAUT) است [6]. در این روش پراب آرایه فازی فراصوتی بر روی سطح لوله قرار می‌گیرد و با ارسال و دریافت امواج فراصوتی، تصویر داخل قطعه را نشان می‌دهد که دارای مزایای زیر است. نخست آنکه مخاطرات استفاده از اشعه X برطرف شده و نیازی به تخلیه محوطه از حضور کارکنان نیست. دوم آنکه کیفیت تصویر، دیجیتالی و بالا بوده و نیاز به جهت دیگری برای بازرسی مجدد ندارد. سوم آنکه تصویر بلافاصله به دست می‌آید و در رایانه دستگاه ذخیره می‌شود و لذا بازرسی فنی بلافاصله می‌تواند آن را ارزیابی نماید و در صورت وجود هر گونه ایراد در تصویر، بلافاصله نسبت به اخذ تصویری دیگر اقدام نماید. بنابراین عملیات بازرسی و رفع ایرادات احتمالی به طور همزمان انجام شده و نیاز به استفاده از فیلم‌های رادیوگرافی و هزینه اضافه مرتفع می‌شود. ضمن آنکه کلیه تصاویر در حافظه دستگاه به صورت رایانه‌ای ذخیره می‌شوند و نیاز به مستندسازی فیزیکی برطرف شده است. سبک‌تر بودن دستگاه‌های آرایه فازی نسبت به دستگاه‌های رادیوگرافی و حمل آسانتر آنها از دیگر مزایای این روش می‌باشد.

یکی از عوامل مهم توقف تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی، بروز نشتی و یا پارگی لوله در بویلر می‌باشد. در صورت وقوع این پدیده‌ها، جان پرسنل نیروگاه به خطر افتاده، تولید برق متوقف می‌شود و راه‌اندازی مجدد بویلر مستلزم صرف زمانی بین ۲ تا ۷ روز است که موجب خسارت هنگفت مالی می‌شود. به علاوه، هر بار خاموش شدن و راه‌اندازی مجدد ناخواسته بویلر سبب کاهش عمر آن و ورود خسارت دیگری به نیروگاه می‌شود. این موارد، اهمیت بالای بازرسی غیر مخرب لوله‌های بویلر نیروگاه‌های حرارتی را نمایان می‌سازند [۱].

دسترسی دشوار به تمام سطح لوله‌های بویلر به دلیل فواصل اندک آنها از یکدیگر و چینش خاص آنها در کنار ضرورت چرخش کامل سیستم بازرسی به دور لوله، سبب می‌شود تا بازرسی غیر مخرب آنها با پیچیدگی بالایی همراه باشد [۲]. فاصله لوله‌های واتروال از یکدیگر در برخی از واحدهای بخار، در حدود ۱۴ میلی‌متر است و این فاصله اندک نیز با فین پوشانده می‌شود (شکل ۱) [۲].



شکل ۱. لوله واتروال بویلر نیروگاه

به طور کلی برای تصویربرداری غیر مخرب از لوله‌های بویلر، دو روش در حال حاضر وجود دارد [3]. روش نخست، با استفاده از فیلم رادیوگرافی است. در این روش ابتدا منبع رادیواکتیو ساطع‌کننده اشعه در محل مناسب نسبت به قطعه قرار می‌گیرد و سپس در پشت قطعه از یک فیلم حساس به اشعه رادیواکتیو استفاده می‌شود. مزیت مهم این روش، ارائه تصویر از لوله بویلر است. لیکن چندین ایراد عملیاتی به آن وارد است. نخست آنکه به دلیل به کارگیری اشعه رادیواکتیو در این روش، باید محوطه مورد بازرسی غیر مخرب تا شعاع مشخصی از حضور کارکنان تخلیه شود و بنابراین سبب اختلال در سایر فعالیت‌های داخل آن محوطه می‌شود. دوم آنکه فیلم‌های رادیوگرافی در مقایسه با

تصویر نیز ساخته شده‌اند. سوم آنکه نمونه‌های خارجی از روش TFM بهره نمی‌برند و لذا کیفیت تصاویر آنها پایینتر از نمونه داخلی است و چنانچه در بخش نتایج مشاهده می‌شود قابلیت مشاهده ایرادات کوچک و سطحی را اساساً ندارند. ضمن اینکه پیاده‌سازی روش TFM در این تحقیق، به روشی متفاوت نسبت به مطالعات قبلی انجام شده‌است که از حیث پیاده‌سازی آن را تسهیل می‌نماید. چهارم آنکه نمونه کف دستی که بیشترین شباهت را با این سیستم دارد، برای بازرسی لوله‌های از قطر ۱،۵ اینچ تا ۳ اینچ، نیازمند سه نوع اسکنر جداگانه می‌باشد، در حالی که در این تحقیق، تقریباً تمام بازه بازرسی فوق در دسترس است. پنجم آنکه در طراحی مدارهای الکترونیکی نمونه ساخته شده در این مقاله، بر خلاف نمونه‌های خارجی، از قطعات یکپارچه استفاده شده‌است و از این حیث نسبت به اغلب نمونه‌های خارجی ممتاز است. به کارگیری قطعات الکترونیکی یکپارچه سبب می‌شود تا بخش قابل توجهی از مدارهای مورد نیاز در یک قطعه گردآوری شوند و در نتیجه نویز کمتر، پیچیدگی کمتر، سهولت ساخت و تعمیرات را در پی دارد؛ ضمن اینکه توسعه سیستم نیز تسهیل می‌شود. در کنار مزایای فوق، به کارگیری روش پیشنهادی، سبب پیچیدگی‌هایی می‌شود. اولاً برد مدار چاپی دستگاه پیچیده می‌شود. کوچکی قطعات سبب می‌شود تا فناوری مورد نیاز برای ساخت این مدار چاپی نیز بالا رود که عامل دیگری در افزایش پیچیدگی آن خواهد بود. دوم آنکه به کارگیری روش پیشنهادی سبب می‌شود تا فرکانس انتقال داده‌ها میان اجزای مدار، تقریباً ۱۰ برابر فرکانس مدارهای نمونه‌های رایج فعلی شود که مستلزم به کارگیری تمهیدات خاص در هنگام طراحی مدار چاپی آن است. سوم آنکه روش پیشنهادی نیازمند حجم بالایی از حافظه در داخل FPGA است و در نتیجه، FPGA به کار رفته پیچیده‌تر خواهد بود که خود منجر به افزایش پیچیدگی برد مدار چاپی نیز می‌شود. چهارم آنکه حجم پردازش روش پیشنهادی بیشتر از روش‌های مشابه است و در نتیجه نیازمند رایانه با توان پردازشی بالا می‌باشد. هزینه تمام شده این دستگاه نسبت به نمونه خارجی کمتر و به طور همزمان کیفیت تصاویر آن بالاتر است که از دیگری ویژگی‌های مهم آن به شمار می‌رود.

مروری بر روش‌های تصویربرداری فراصوتی

تشکیل تصویر آرایه فازی

به منظور تشکیل تصویر آرایه فازی فراصوتی، هر جزء آرایه توسط مدار فرستنده تحریک شده و توسط مدار گیرنده قرائت می‌شود. در فرستنده، به هر جزء آرایه، یک پالس با عرض و

علیرغم همه مزایای فوق، تصویربرداری آرایه فازی فراصوتی رایج، به علت وجود «ناحیه مرده» در ضخامت‌های کمتر از ۱۰ میلی‌متر مانند لوله‌های واتروال بویلر دشوار می‌باشد. ناحیه مرده، ناحیه‌ای است در نزدیکی سطح قطعه که امکان متمرکز کردن امواج فراصوتی در آن وجود ندارد. بنابراین، تشکیل تصویر در این ناحیه غیر ممکن یا با کیفیت پایین است. این ناحیه در اغلب تجهیزات رایج تصویربرداری فراصوتی در حدود ۵ تا ۷ میلی‌متر از ضخامت اولیه قطعه را شامل می‌شود. در صورت به کارگیری الگوریتم تصویربرداری «تمرکز کامل (TFM)»، ناحیه مرده به حدود ۲ میلی‌متر اولیه از ضخامت قطعه محدود می‌شود و تصویربرداری از ضخامت‌های اندک همزمان با ارائه کیفیت تصویر بهتر، امکان‌پذیر می‌شود [7]. در این زمینه، پیشتر فعالیت‌هایی در سطح جهان صورت گرفته‌است که می‌توان آنها را در دو گروه «بازرسی لوله‌های بویلر» و «بازرسی جوش لوله‌های بویلر» دسته‌بندی نمود. در گروه «بازرسی لوله‌های بویلر»، سیستم‌هایی مبتنی بر روش MFL^۴ [9][8]، جهت بازرسی هدر و مبتنی بر ورود به داخل لوله [12][11][10]، مبتنی بر سنسورهای GMR^۵ و MFL [13]، سه ربات فشرده جهت اجزای مختلف نیروگاه و بویلر [14] و ربات تمیزکاری و بازرسی [15] را می‌توان نام برد. علیرغم مزایای متعدد این سیستم‌ها از قبیل تمیزکاری سطح لوله‌ها، بازرسی غیر مخرب و تعیین نقاط خوردگی و...، هیچ‌یک امکان تصویربرداری غیر مخرب از جوش لوله بویلر و چرخش به دور آن را ندارند.

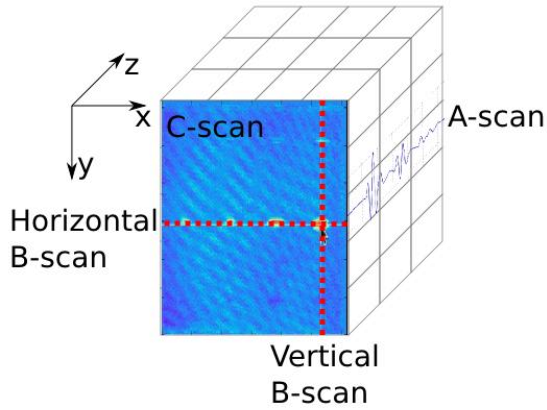
در گروه «بازرسی جوش لوله‌های بویلر»، اسکنر کف دستی - [15]، اسکنر کبرا [16] و اسکنر دستبندی [17] پیشتر ساخته شده‌است. این اسکنرها، امکان ورود به فواصل اندک بین لوله‌ها و بازرسی جوش را فراهم می‌آورند. در این مقاله ضمن طراحی ساخت کلیه اجزای دستگاه بازرسی غیر مخرب به روش تصویربرداری فراصوتی در داخل کشور (به استثنای پراب آرایه فازی)، اسکنر مناسبی نیز بدین منظور ساخته شده‌است تا امکان بازرسی اغلب لوله‌های بویلر نیروگاه‌های کشور از قطر ۱،۵ اینچ تا ۲،۵ اینچ را داشته باشد. در مقایسه با - [16][17][15]، اولاً هیچ یک از اجزای نمونه خارجی در دسترس نبوده‌است و کلیه اجزای آن در داخل کشور از نو طراحی شده‌است. دوم آنکه نمونه خارجی فقط اسکنر را ساخته‌است و آن را بر روی یک دستگاه PAUT آماده قرار داده‌است، در حالی که در این تحقیق، اسکنر و مدارهای الکترونیکی مربوط به ارسال و دریافت امواج فراصوتی و تشکیل

^۳ Total focusing method

^۴ Magnetic flux leakage

^۵ Giant magnetoresistance

کل اجزای آرایه، P تعداد پیکسل‌های تصویر، t زمان نمونه-برداری بر حسب میکروثانیه، f فرکانس نمونه‌برداری بر حسب مگاهرتز و m تعداد بیت هر نمونه می‌باشد. منظور از حجم پردازش، زمان لازم برای تشکیل و نمایش ماتریس FMC با نرخ به‌روزرسانی R بار در ثانیه می‌باشد.



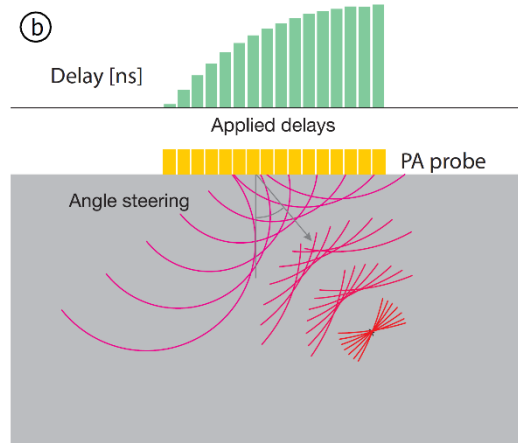
شکل ۳. انواع نماها در تصویربرداری به روش آرایه فازی فراصوتی [18]
 در روش رایج، در هر روبش، کلیه اجزاء با تاخیر مناسب تحریک می‌شوند تا در یک نقطه خاص، متمرکز شوند. سیگنال‌های دریافتی از همه اجزاء منجر به N روبش-A می‌شوند که با یکدیگر با تاخیرهای مناسب جمع شده و در نهایت، مقدار روشنایی را در آن نقطه که در واقع پیکسل تصویر است، مشخص می‌کنند. بنابراین، برای هر پیکسل به حافظه‌ای برای نگهداری N روبش-A نیاز است و پس از محاسبه روشنایی آن پیکسل نیز نیازی به آن حافظه نمی‌باشد.

در روش «TFM»، هر بار یک جزء آرایه تحریک می‌شود و امواج فراصوتی را ارسال می‌کند، ولی همه اجزای آن، امواج بازگشتی را قرائت می‌کنند. چنانچه تعداد اجزای آرایه برابر N باشد، در هر بار تحریک آرایه، N جزء در دریافت حضور دارند و در نتیجه N روبش-A حاصل می‌شود. به این ترتیب، روشنایی هر پیکسل پس از تکرار این فرآیند برای همه اجزای آرایه قابل محاسبه می‌باشد و تکرار فرآیند مذکور منجر به N^2 روبش-A می‌شود و در «ماتریس کامل گردآوری» با عنوان FMC^y ذخیره می‌شوند. سپس با استفاده از رابطه (۱)، روشنایی هر پیکسل تصویر محاسبه می‌شود [20]:

$$I(P_k) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N A_{ij}(t_{ip_k} + t_{pj}) \quad (1)$$

که در آن A_{ij} ، روبش-A مربوط به تحریک جزء شماره i و دریافت از جزء شماره j است و t_{ip_k} ، مدت زمان طی مسیر از جزء شماره i تا پیکسل شماره k می‌باشد و t_{pj} مدت زمان طی مسیر از پیکسل k تا جزء j می‌باشد.

دامنه قابل تنظیم اعمال می‌شود. آرایه به کار رفته در این تحقیق در فرکانس 7.5MHz کار می‌کند و عرض پالس اعمالی برابر نصف دوره تناوب پراب و برابر 66ns و دامنه پالس اعمالی برابر ۵۰ ولت است. پالس اعمالی به هر جزء آرایه، به موج فراصوتی تبدیل شده و در محیط داخل قطعه منتشر می‌شود و امواج بازگشتی آنها ذخیره می‌شوند. فاصله مکانی اجزای آرایه، سبب می‌شود تا امواج در هنگام ارسال و دریافت، هم‌فاز نباشند. چنانچه اختلاف زمانی ناشی از فواصل مکانی با اعمال تاخیر اصلاح شود، هم‌فازی در یک نقطه خاص حاصل می‌شود [19]. با تغییر مقادیر تاخیرها، هم‌فازی برای هر نقطه دلخواه از محیط مد نظر ایجاد می‌شود که اصطلاحاً به مقادیر تاخیرها، «قوانین کانونی» و به این روش، «رویش الکترونیکی» گفته می‌شود (شکل ۲) [19].



شکل ۲. تاخیر الکترونیکی به آرایه فازی جهت تمرکز در سایر نقاط [19]
 امواج دریافتی از هر جزء آرایه، ذخیره شده و به آنها اصطلاحاً روبش-A گفته می‌شود. در روش تصویربرداری آرایه فازی رایج، برای هر نقطه از فضای داخل قطعه، به تعداد اجزای آرایه، روبش-A اخذ می‌شود و با اعمال قوانین کانونی، شدت روشنایی تصویر برای آن نقطه به دست آمده و با تکرار این فرآیند برای همه نقاط داخل فضای قطعه، تصویر جانبی تشکیل می‌شود که به آن روبش-B گویند. با حرکت دادن پراب و تکرار این فرآیند، مجموعه‌ای از تصاویر روبش-B اخذ می‌شود، که به نمای بالا یا روبش-C منجر می‌شوند (شکل ۳).

روش‌های تشکیل تصویر فراصوتی

بر اساس آنکه چه تعداد فرستنده و گیرنده به طور همزمان تحریک شوند، روش‌های متعددی برای تشکیل تصویر وجود دارند. مهمترین روش‌های مورد استفاده، روش «رایج آرایه‌های فازی» و روش «TFM» می‌باشند. در جدول ۱، خلاصه‌ای از ویژگی‌های این دو روش ارائه شده‌است. در این جدول، N تعداد

دو برابر شود و در نتیجه تعداد پیسکل‌های تصویر ۴ برابر شوند، حجم پردازش نسبت به تحقیق حاضر، ۱۶ برابر می‌شود که نتیجه مستقیم آن کاهش R (به‌روزرسانی‌های تصویر در هر ثانیه) به میزان 5/16 و یا تقریباً 0.25 خواهد بود که یعنی در هر ۴ ثانیه، فقط یک تصویر نمایش داده می‌شود. این تحلیل نشان می‌دهد که چنانچه توسعه سیستم حاضر مد نظر باشد، باید اصلاحاتی در نحوه پردازش صورت گیرد که موضوع مطالعات آتی محققان در این حوزه می‌باشد.

جدول ۱ روش‌های مختلف روبش فراصوتی و تشکیل تصویر
(N=16, P=60,000, f = 40MHz, m=12, t=30μs, R=5)

تحقیق حاضر	TFM	رایج	روش
256	N^2	P	تعداد دفعات ارسال پالس (غیرهمزمان)
1	1	N	تعداد اجزا شرکت‌کننده در هر ارسال
16	N	N	تعداد اجزای شرکت‌کننده در هر دریافت
256	N^2	NP	تعداد کل روبش-A
3.93	$N^2 t f m$	Nfm	حافظه مورد نیاز در FPGA (Mbit)
184.3	$N^2 P m$	0	حافظه مورد نیاز برای قوانین کانونی (Mbit)
76.8	$N^2 P R$	NPR	حجم پردازش (میلیون بار در ثانیه)

طراحی و پیاده‌سازی

طراحی و پیاده‌سازی شامل پراب آرایه فازی، اسکنر، مدارات الکترونیکی، محاسبه قوانین کانونی و الگوریتم TFM می‌باشد که هر یک در ادامه تشریح می‌شوند.

پرآب آرایه فازی فراصوتی

پرآب آرایه فازی فراصوتی از تعدادی جزء پیزوالکتریک تشکیل می‌شود که عملیات تولید، ارسال و دریافت امواج فراصوتی و تبدیل آنها به امواج الکتریکی را بر عهده دارند. به دلیل فاصله اندک میان لوله‌های واتروال بویلر، از پرآب نشان داده شده همراه با کفشک مخصوص آن در شکل ۴ استفاده شده‌است. این پرآب که در نمونه‌های مشابه نیز به کار رفته‌است، دارای ارتفاع 12mm و ۱۶ جزء در فرکانس 7.5MHz می‌باشد که فاصله هر دو جزء مجاور، برابر 0.5mm می‌باشد. این پرآب در حال حاضر، تنها مدلی است که امکان به‌کارگیری برای بازرسی غیر مخرب لوله‌های واتروال بویلر را دارد [15][17][16].



شکل ۴. پرآب مناسب بازرسی لوله‌های بویلر [15][17][16]

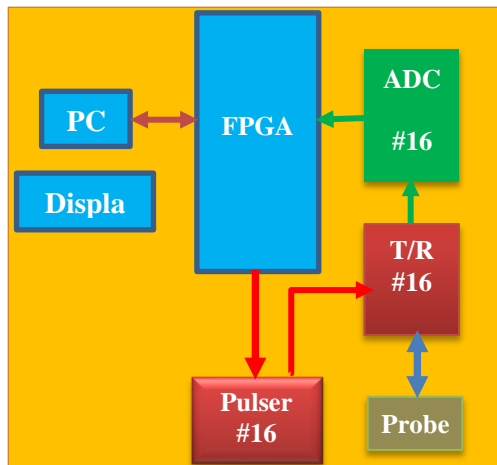
مطابق جدول ۱ حجم حافظه و حجم پردازش روش TFM، N برابر روش رایج است. همچنین، کل این حجم حافظه باید ابتدا تکمیل شود و سپس پردازش‌های لازم برای اجرای رابطه (۱) انجام می‌شود که موجب زمانبری اضافه می‌گردد.

چنانچه مشاهده می‌شود اجرای الگوریتم TFM از پیچیدگی بالایی برخوردار است که خود موضوع تحقیقات متعدد است - [20][21] و در بخش بعد تشریح می‌شود. لیکن در قبال پردازش و پیچیدگی بیشتر، با استفاده از روش TFM، امکان مشاهده عیوب قطعات با ضخامت اندک لوله‌های بویلر و با کیفیت تصویر بالاتر فراهم می‌شود.

با توجه به اینکه تنها پرآب موجود در بازار که ارتفاع آن امکان قرارگیری در فضای بین دو لوله واتروال کنار هم را داراست و در شکل ۴ نشان داده شده‌است، دارای ۱۶ جزء بوده و در فرکانس 7.5MHz کار می‌کند، در تحقیق حاضر، N=16 است. فرکانس نمونه‌برداری نیز تقریباً ۵ برابر فرکانس پرآب و برابر با f=40MHz در نظر گرفته شده‌است تا از افزایش بیش از حد تعداد نمونه‌ها نیز احتراز شود. این تجهیز برای بازرسی لوله‌های واتروال بویلر به کار می‌رود که دارای ضخامت بین 5mm تا 20mm هستند. سرعت موج عرضی فراصوتی در داخل فولاد تقریباً برابر 3220m/s می‌باشد. زاویه اعمال پرتوهای ارسالی نیز به نحوی است که طول مسیر طی شده حداکثر تا دو برابر نسبت به ضخامت جداره لوله، افزایش می‌یابد. لذا زمان رفت و برگشت پرتوها حداقل برابر با 25μs خواهد بود. با توجه به اینکه بخشی از زمان عبور پرتوها در داخل کفشک پرآب است، در این تحقیق برای اطمینان زمان نمونه‌برداری برابر t=30μs در نظر گرفته شده‌است. در لوله‌ای با قطر ۲،۵ اینچ، محیط لوله تقریباً 200mm است. لذا چنانچه در این محیط، پنجره‌ای از لوله با طول تقریبی 30mm مشاهده شود، مناسب است. ضخامت جداره لوله نیز برابر حداکثر 20mm می‌باشد. چنانچه تفکیک-پذیری تصویر نیز برابر 0.1mm باشد، مستطیلی که برای مشاهده نمای جانبی باید مش‌بندی شود، دارای $N_x=200$ و $N_y=300$ و در نتیجه تصویر دارای P=60,000 پیکسل خواهد بود. تعداد بیت‌های مبدل آنالوگ به دیجیتال نیز برابر m=12bit انتخاب شده‌است تا ضمن حفظ کیفیت، حجم داده نمونه‌برداری شده نیز بیش از حد بالا نرود. چنانچه در بخش‌های بعدی ذکر شده‌است، زمانبری محاسبات بر روی رایانه به کار رفته در این تحقیق، در حدود 200ms می‌باشد که معادل با نرخ به‌روزرسانی برابر R=5 می‌باشد. روابط حاکم بر این مقادیر، در جدول ۱ ارائه شده‌است. ملاحظه می‌شود که در صورت افزایش ۲برابری تعداد اجزاء آرایه از ۱۶ به ۳۲، حجم حافظه مورد نیاز، ۴ برابر می‌شود. همچنین، حجم پردازش نیز ۴ برابر می‌شود. چنانچه در این وضعیت، ابعاد تصویر از هر دو بعد طول و عرض،

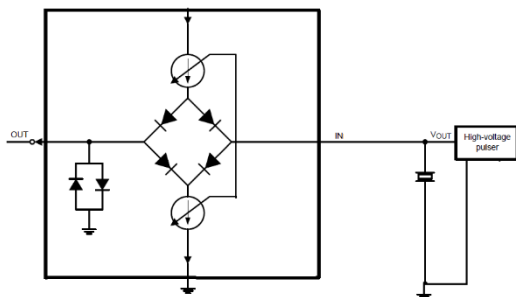
طراحی اسکنر

اگر داده‌ها به صورت سریال منتقل شوند، تنها نیازمند ۱۶ بیت خواهد بود و قابلیت توسعه آن نیز به آسانی وجود دارد ولی نرخ انتقال داده برابر 480Mbps خواهد بود. لذا در این تحقیق، انتقال داده از نوع سریال انتخاب شده‌است. با توجه به آنکه چنین نرخ انتقال داده‌ای فقط با استفاده از FPGA قابل پیاده‌سازی است، از قطعه XC4VSX55 استفاده شده‌است. بلوک دیاگرام بخش الکترونیک در شکل ۶ نشان داده شده‌است.



شکل ۶. بلوک دیاگرام بخش الکترونیک

در شکل ۶، ابتدا تحریک‌کننده (Pulsar) ولتاژی با دامنه ۵۰ ولت به هر جزء اعمال می‌کند. با توجه به آنکه مسیر ارسال و دریافت سیگنال در پراب یکسان است، با استفاده از قطعه مجزاساز T/R، مسیر ارسال و دریافت از یکدیگر مجزا می‌شوند. در غیر این صورت، ولتاژ بالای بخش فرستنده مستقیماً وارد بخش گیرنده می‌شود و به مدارات آن آسیب وارد می‌کند. این موضوع با استفاده از یک پل دیودی بایاس شده محقق می‌شود (شکل ۷). توجه شود که دو دیود خروجی، موجب می‌شوند تا گستره ولتاژ ورودی به مدار تقویت‌کننده در حداکثر $\pm 0.7V$ محدود شود.



شکل ۷. مدار مجزاساز [22]

سیگنال دریافتی از آرایه، وارد قطعه ADC می‌شود و ضمن تقویت، به معادل دیجیتالی تبدیل می‌شود. نرخ نمونه‌برداری ADC برابر 40MHz و به صورت ۱۲ بیتی و از نوع DDR است

اسکنر، پراب را بر روی لوله‌های بویلر نگه داشته و چرخش آن به دور لوله را ممکن می‌کند. ارتفاع اسکنر برابر ارتفاع پراب و 12mm است و برای نصب و چرخش به دور لوله‌های واتروال که دارای فاصله 14mm می‌باشند، مناسب است. همچنین مسیره‌های آبرسانی مورد نیاز پراب در آن تعبیه شده‌است. جهت انطباق با لوله‌هایی با قطر کوچکتر، طراحی اسکنر به صورتی است که دو فک آن در هنگام کار با لوله‌هایی با قطر کوچکتر بسته می‌شوند (شکل ۵). کل فرآیند طراحی و پیاده‌سازی اسکنر در داخل کشور صورت گرفته‌است.



(الف) (ب)

شکل ۵. اسکنر پراب آرایه فازی. الف) فک بسته برای قطر ۱.۵ اینچ، ب) فک باز برای قطر ۲.۵ اینچ

طراحی و پیاده‌سازی مدارهای الکترونیکی

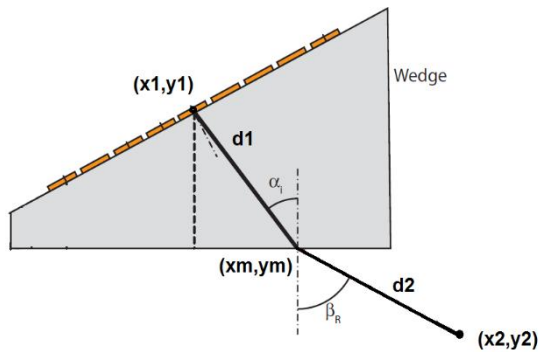
نرخ نمونه‌برداری مورد استفاده برابر 40MHz و هر نمونه به صورت ۱۲ بیتی انتخاب شده‌است. بنابراین، با توجه به وجود ۱۶ جزء در پراب، پهنای باند داده دریافتی عبارتست از:

$$16 \times 12 \times 40 = 7.68 \frac{\text{Gbits}}{\text{s}} \quad (۲)$$

پهنای باند فوق برای انتقال زیاد است. با توجه به آنکه در حدود $30\mu\text{s}$ نیز نیاز به نمونه‌برداری می‌باشد، حافظه مورد نیاز برای ذخیره FMC بر اساس جدول ۱ عبارتست از:

$$16 \times 7.68 \times 10^9 \times 30 \times 10^{-6} = 3.6864 \text{ Mbit} \quad (۳)$$

و به دلیل ضرورت کار در فرکانس 40MHz، باید از حافظه داخلی FPGA برای آن استفاده شود. در رابطه (۳)، عدد ۱۶ به جهت به کارگیری روش TFM ضرب شده‌است و موید تکرار داده‌گیری برای همه ۱۶ جزء آرایه می‌باشد. برای طراحی این قسمت باید بین دو نوع انتقال داده سریال و یا موازی در مبدل آنالوگ به دیجیتال تصمیم‌گیری شود. اگر انتقال داده مبدل آنالوگ به دیجیتال از نوع موازی باشد، فرکانس کار پایین می‌آید و می‌توان هر ۱۶ جزء را با نرخ 40MHz قرائت نموده و به حافظه منتقل نمود. این حالت منجر به ۱۹۲ بیت خروجی و پیچیدگی طراحی مدار چاپی مجموعه شده و توسعه چنین طرحی نیز دشوار خواهد بود، چرا که تبدیل آن به مجموعه سازگار با مثلاً ۶۴ جزء، نیازمند ۷۶۸ بیت است. در نقطه مقابل



شکل ۹. محاسبه زمان عبور موج از نقطه ۱ به نقطه ۲ [19]

بر اساس پارامترهای مندرج در شکل ۹، برای محاسبه زمان گذر پرتوهای فراصوتی از جزء فرستنده در نقطه ۱ با مختصات (x_1, y_1) به گیرنده در نقطه ۲ با مختصات (x_2, y_2) (قانون کانونی)، بر اساس قانون اسنل داریم:

$$\sin(\alpha) = \frac{v_1 \sin \beta}{v_2} \quad (4)$$

که در آن α, β به ترتیب زاویه تابش و زاویه شکست امواج در مرز بین کفشک و قطعه بوده و v_1, v_2 به ترتیب سرعت امواج فراصوتی در داخل کفشک و داخل قطعه می‌باشند. برای محاسبه فاصله زمانی از نقطه ۱ به نقطه ۲، لازم است تا ابتدا مختصات نقطه m (نقطه شکست موج در مرز بین کفشک و قطعه) محاسبه شود. فاصله هندسی بین نقطه ۱ و m با مختصات (x_m, y_m) و نیز فاصله بین نقطه ۲ و نقطه m عبارتند از:

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2} \quad (5)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2}$$

با توجه به شکل ۹ داریم:

$$\sin(\alpha) = \frac{x_1 - x_m}{d_1} \quad (6)$$

$$\sin(\beta) = \frac{x_2 - x_m}{d_2}$$

با ادغام رابطه‌های (۴) و (۵) داریم:

$$\left(v_2 \frac{x_1 - x_m}{d_1}\right)^2 = \left(v_1 \frac{x_2 - x_m}{d_2}\right)^2 \quad (7)$$

و با تلفیق رابطه فوق با رابطه (۶) داریم:

$$(8)$$

$$v_2^2 \frac{(x_1 - x_m)^2}{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2} = v_1^2 \frac{(x_2 - x_m)^2}{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2}$$

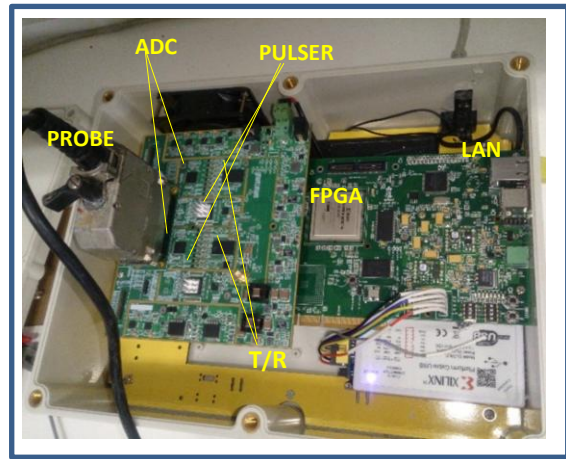
در رابطه فوق، $y_m = 0$ است و مقدار x_m مجهول می‌باشد. بازنویسی رابطه فوق، منجر به رابطه درجه چهارم به صورت زیر می‌شود:

$$Ax_m^4 + Bx_m^3 + Cx_m^2 + Dx_m + E = 0 \quad (9)$$

که در آن:

که خروجی دیجیتالی را در هر دو لبه بالارونده و پایین رونده ارائه می‌دهد. سپس داده خروجی ADC در نرخ 480Mbps به FPGA منتقل می‌شود. داده‌های دریافتی در FPGA گردآوری می‌شوند و پس از پردازش در رایانه، تصویر در نمایشگر نشان داده می‌شود.

قطعات تحریک‌کننده، مبدل آنالوگ به دیجیتال و مجزاساز، همگی دارای ۸ کانال هستند. بنابراین، در حالی که کلیه اجزای مورد نیاز برای پشتیبانی از آرایه با ۱۶ جزء را دارا هستند، تنها با ۶ قطعه الکترونیکی ساخته شده‌است که منجر به یکپارچگی بالاتر این تحقیق نسبت به کارهای پیشین شده‌است. در شکل ۸ نمایی از برد الکترونیک ساخته شده ارائه شده‌است.



شکل ۸. بردهای الکترونیکی ساخته شده

محاسبه قوانین کانونی

به منظور محاسبه قوانین کانونی، محیط داخل قطعه، به صورت یک مستطیل در نظر گرفته می‌شود. داخل مستطیل مش بندی می‌شود به طوری که طول آن به N_x و عرض آن به N_y قسمت تقسیم می‌شود. مقادیر N_x, N_y طوری انتخاب می‌شوند که دو نقطه مجاور، هم در طول و هم در عرض به فاصله r از یکدیگر باشند. به عنوان مثال اگر مستطیل مذکور دارای ابعاد $30\text{mm} \times 20\text{mm}$ باشد و $r=0.1\text{mm}$ ، آنگاه $N_x=200, N_y=300$ خواهد بود و تعداد پیکسل‌های تصویر حاصل نیز برابر 60,000 می‌باشند. برای هر نقطه، فاصله مکانی از هر یک از اجزاء پراب، محاسبه شده و مطابق رابطه (۱)، مقادیر t_{ip} برای هر جزء آرایه تا هر یک از نقاط مستطیل فوق‌الذکر، تعیین می‌شوند. با توجه به وجود ۱۶ جزء در این تحقیق، برای کل مش مورد ارزیابی، $16.N_x.N_y$ داده محاسبه می‌شود که حجم سنگینی از محاسبات است.

در شکل ۹ نمایی از نحوه عبور این امواج از پراب به داخل کفشک و سپس به داخل قطعه، نشان داده شده‌است. چنانچه ملاحظه می‌شود، در عبور از مرز بین کفشک و محیط داخل قطعه، شکست امواج صوتی رخ می‌دهد.

هر نوع نویز خارجی می‌شود.

الگوریتم TFM به دو روش کلی برخط و خارج‌خط قابل پیاده‌سازی است. روش خارج‌خط ساده‌تر می‌باشد و محاسبات مربوط به رابطه (۱) پس از اتمام بازرسی انجام می‌شود و در نتیجه چندان کاربردی نیست.

در روش برخط، محاسبه رابطه (۱) بلافاصله پس از تشکیل ماتریس FMC انجام می‌شود. یک چالش مهم این محاسبات آن است که در رابطه (۱)، تعداد قوانین کانونی بسیار زیاد است. به عنوان مثال اگر مستطیل مذکور دارای ابعاد 300x200 باشد، با توجه به آنکه پراب نیز دارای ۱۶ جزء است، آنگاه تعداد قوانین کانونی برابر است با:

$$300 \times 200 \times 16 = 960,000 \quad (11)$$

با توجه به رابطه (۱)، باید برای هر جفت قانون کانونی، دو محاسبه جمع انجام شود که حجم بسیار زیادی از محاسبات نیاز خواهد بود. ضمن اینکه اگر هر قانون کانونی ۱۶ بیتی باشد، در مجموع کل حافظه مورد نیاز برابر است با:

$$960K \times 16 = 15.63Mbit \quad (12)$$

و حجم عملیات محاسباتی مورد نیاز نیز برابر است با:

$$300 \times 200 \times 16^2 = 15.63M \text{ operation} \quad (13)$$

که حجم نسبتاً زیادی است.

عملیات محاسباتی به چهار بخش الف) دریافت داده‌ها، ب) ذخیره‌سازی داده‌ها، پ) انتقال داده‌ها و ت) پردازش داده‌ها تقسیم می‌شود. بر اساس اینکه هر بخش به چه صورتی پیاده‌سازی شود، شیوه‌های مختلفی برای آن وجود دارد. به علت نرخ داده بالا، بخش الف همواره بر روی FPGA پیاده‌سازی می‌شود. اما بخش‌های ب) تا ت) می‌توانند بر روی FPGA (موازی) یا رایانه (ترتیبی) اجرا شوند. اگر همه بخش‌ها بر روی FPGA پیاده‌سازی شوند، حجم حافظه و منابع مورد نیاز برای اجرا بسیار زیاد می‌شود و در نتیجه منجر به افزایش قیمت و پیچیدگی سخت‌افزار و برنامه مرتبط می‌شود. لیکن در ازای این هزینه و پیچیدگی، سرعت بالا حاصل می‌شود [20]. اگر بخش‌های ب) تا ت) بر روی رایانه پیاده‌سازی شوند، از FPGA کوچکتر می‌توان بهره برد و برنامه‌نویسی در رایانه نیز آسان‌تر انجام می‌شود و هزینه اجرای سخت‌افزار نیز کاهش یافته و به علاوه توسعه طرح نیز آسان‌تر می‌باشد؛ لیکن سرعت پردازش پایین می‌آید.

در این پروژه، به جهت جلوگیری از پیچیدگی و حفظ سرعت، بخش الف) و ب) در FPGA انجام شده و بخش پ) و ت) در رایانه انجام می‌شود. با توجه به رابطه (۳) و با توجه به وجود ۳۲۰ بلوک حافظه 16Kbit در FPGA به شماره XC4VSX55، کل حافظه این FPGA برابر 5.12Mbit بوده و برای ذخیره کل ماتریس FMC به میزان 3.6864Mbit کافی می‌باشد. برای

$$Dv_1 = \frac{v_1^2}{v_2^2 - v_1^2}, Dv_2 = \frac{v_2^2}{v_2^2 - v_1^2}$$

$$a = Dv_2 (y_2^2), b = Dv_1 (y_1^2)$$

$$A = 1$$

$$B = -2(x_1 + x_2)$$

$$C = x_1^2 + x_2^2 + 4x_1x_2 + a - b$$

$$D = -2x_1x_2(x_1 + x_2) - 2ax_1 + 2bx_2$$

$$E = x_1^2x_2^2 + ax_1^2 - bx_2^2$$

رابطه (۹) دارای چهار ریشه است که از بین آنها، دو ریشه مختلط هستند و غیرقابل قبول می‌باشند. از دو ریشه حقیقی باقیمانده نیز، فقط یکی از ریشه‌ها در بازه قابل قبول $[0, X_{end}]$ قرار دارند. X_{end} بیانگر مختصات طولی آخرین جزء آرایه است و فرض می‌شود اولین جزء در مختصات طولی صفر قرار دارد.

ملاحظه می‌شود که محاسبه قانون کانونی برای هر جفت (جزء آرایه، نقطه در داخل قطعه)، نیازمند حجم زیادی از محاسبات است. بدین منظور، با استفاده از روش‌های پردازش برداری، زمانبری محاسبات به میزان قابل توجهی کاهش یافته‌است. این محاسبات فقط یکبار به صورت خارج‌خط انجام شده و حاصل آن در حافظه ذخیره می‌شود تا در محاسبه شدت روشنایی هر پیکسل تصویر با استفاده از رابطه (۱) به صورت برخط مورد استفاده قرار گیرد. زمانبری برخی حالات بر روی رایانه‌ای با پردازنده Intel core i7 در فرکانس 4GHz و سرعت RAM برابر 2.4GHz در جدول ۲ ارائه شده‌است. چنانچه مشاهده می‌شود، پیچیدگی محاسباتی قوانین کانونی تقریباً خطی است و زمانبری محاسبه تقریباً 0.3sec/kpixel است.

جدول ۲. زمانبری محاسبه قوانین کانونی در این تحقیق

Lx (mm)	Ly (mm)	Resolution	Pixels	Runtime (sec)
25	20	0.1	50000	15.42
45	20	0.1	90000	28.22
45	20	0.05	360000	110.75
45	20	0.2	22500	7.33
25	20	0.2	12500	4.16

طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم TFM فیلترگذاری شده

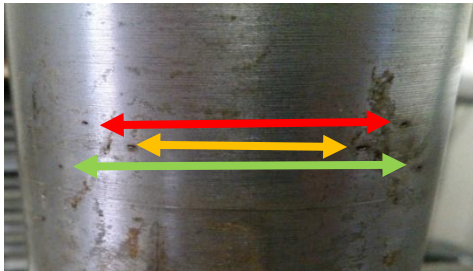
به منظور کاهش نویزهای ناشی از بازتابهای چندمسیره در قطعه آزمون و بازتابهای کاذب، پیش از اعمال روش TFM از فیلترگذاری میان‌گذر با فرکانس مرکزی برابر با فرکانس هارمونیک اصلی پالس ارسالی روی سیگنالهای دریافتی عناصر آرایه فازی استفاده شده‌است. در این تحقیق، فرکانس اصلی برابر با 7.5MHz است و بازه فیلتر میان‌گذر برابر 6-8MHz در نظر گرفته شده‌است. این فیلتر علاوه بر حذف بازتابها و سایه های کاذب در تصویر، سبب کاهش نویز مدارهای الکترونیکی و

نتایج

نتایج در سه بخش ارائه می‌شوند. در بخش نخست، نتایج آزمون بر روی یک قطعه لوله‌ای در حضور تعدادی حفره تعمدی ارائه می‌شود. در بخش دوم، نتایج اخذ شده از سه لوله با قطر ۲،۵ اینچ در کنار یکدیگر که وضعیت لوله‌های بویلر نیروگاه را معادل‌سازی می‌کنند و دارای عیوب جوش تعمدی هستند، ارائه می‌شود. در بخش سوم، مقایسه‌ای میان نتایج اخذ شده از این دستگاه و نمونه خارجی ارائه شده است. کلیه آزمایش‌ها در دمای اتاق (محدوده ۲۰ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت شهر تهران در تابستان در محدوده تقریبی ۴۰٪ انجام گرفته‌اند.

لوله فولادی

در این قسمت از یک لوله فولادی با سه حفره به ترتیب با قطر 0.3mm, 0.6mm, 0.8mm در جهت عمود بر محور لوله استفاده شده است. این لوله همراه با حفره‌های آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. قطر لوله در این وضعیت، ۶۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۵ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۰. لوله فولادی همراه با ۳ حفره به قطر ۰،۳ و ۰،۶ و ۰،۸ میلی‌متر. راستای هر حفره در داخل لوله با خطوط قرمز برای قطر ۰،۶ میلی‌متر، زرد برای قطر ۰،۸ میلی‌متر و سبز برای قطر ۰،۳ میلی‌متر مشخص شده است. اسکندر همراه با پراب متصل به آن در وضعیت نصب شده بر روی لوله فولادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. لوله فولادی دارای عیوب تعمدی همراه با اسکندر

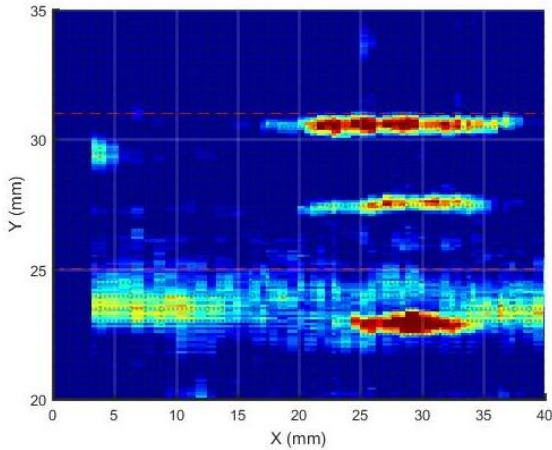
انتقال ماتریس FMC به رایانه از کابل LAN استفاده می‌شود. سرعت متوسط انتقال LAN در این تحقیق در حدود 50Mbps است و در نتیجه حدود 74ms زمانبری انتقال ماتریس FMC به رایانه است.

داده‌های مذکور در رایانه گردآوری می‌شوند و سپس محاسبات مرتبط با رابطه (۱) بر روی آنها انجام می‌شود. انجام این محاسبات در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است و در آن از کلیه ویژگی‌های پردازش برداری بهره‌برداری شده است تا حداکثر سرعت ممکن حاصل شود. زمانبری متوسط این محاسبات نیز بر روی رایانه‌ای با پردازنده در فرکانس 4GHz و سرعت RAM برابر 2400MHz، در حدود 100ms است. در نتیجه زمانبری کل پردازش، در حدود 154ms می‌باشد. سایر زمانبری‌های الگوریتم، زمان کل پردازش را به حدود 200ms می‌رسانند. در جدول ۳ الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است و مطابق با آن، ابتدا گام صفر اجرا شده و قوانین کانونی برای همه اجزاء و پیکسل‌ها محاسبه می‌شوند. این گام به صورت خارج-خط و فقط در ابتدای الگوریتم انجام می‌شود. سپس در گام‌های ۱ تا ۴، فرآیند داده‌برداری انجام می‌شود و پالس‌هایی به اجزاء آرایه اعمال شده و سیگنال‌های دریافتی پس از تقویت، به معادل دیجیتال تبدیل شده و در حافظه داخلی FPGA ذخیره می‌شوند. پس از تکرار این فرآیند برای همه ۱۶ جزء آرایه، داده‌های مذکور از طریق ارتباط LAN برای رایانه ارسال می‌شوند (گام ۵) و پس از دسته‌بندی و مرتب شدن، ماتریس FMC را تشکیل می‌دهند (گام ۶). سپس بر روی ماتریس FMC، فیلترگذاری میان‌گذر اعمال می‌شود (گام ۷). پس از آن با استفاده از قوانین کانونی محاسبه شده در گام ۱ و رابطه (۱)، مقادیر همه پیکسل‌های تصویر محاسبه می‌شوند (گام ۸) و تصویر نمایش داده شده (گام ۹) و مجدداً فرآیند فوق تکرار می‌شود (گام ۱۰).

جدول ۳. الگوریتم پیشنهادی

گام	عملیات
۰	محاسبه قوانین کانونی بر اساس روابط (۹) و (۱۰)
۱	$n=1$
۲	ارسال پالس به جزء n ام
۳	دریافت داده‌ها از همه اجزاء (۱۶ جزء) و ذخیره آنها در حافظه FPGA $n=n+1$
۴	تکرار گامهای ۲ تا ۳ تا وقتی که $n=16$
۵	ارسال داده‌های ذخیره شده در FPGA به رایانه از طریق LAN
۶	ذخیره داده‌های دریافتی از LAN در ماتریس FMC توسط رایانه
۷	فیلترگذاری میان‌گذر
۸	محاسبه رابطه (۱) توسط رایانه برای تمام پیکسل‌های تصویر
۹	نمایش تصویر
۱۰	تکرار گامهای ۱ تا ۸

شده‌است. در هنگام جوش کاری، عیوبی تعمودی در جوش ایجاد شده‌است. چنانچه ملاحظه می‌شود، طراحی اسکرنر به نحوی بوده‌است که به آسانی امکان چرخش به دور لوله‌ها برای آن فراهم آید؛ بدون آنکه نیازی به دسترسی به پشت لوله‌ها باشد.



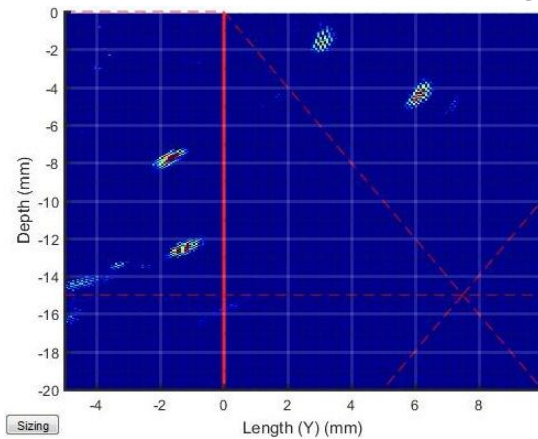
شکل ۱۳. نمای بالایی حاصل از آزمایش بر روی لوله فولادی با عیوب تعمودی



شکل ۱۴. نمایی از سیستم معادل‌سازی شده لوله‌های واتروال بویلر به قطر ۲,۵ اینچ

نتیجه بازرسی در نیمه نخست لوله شماره ۲ در شکل ۱۵ نشان داده شده‌است. با توجه به آنکه محیط لوله تقریباً به اندازه ۲۰۰ میلی‌متر است، در هر تصویر نتیجه حاصل از نیم دور چرخش به دور لوله به میزان ۱۰۰ میلی‌متر ارائه شده‌است. کلیه تصاویر روبش-C و مربوط به نمای بالایی می‌باشند. در این تصاویر باید توجه داشت که فقط نقاط با رنگ قرمز و تیره، نشانگر وجود عیوب هستند. عیوبی با طول چندین سانتی‌متر در شکل ۱۵ مشاهده می‌شوند. در این تصویر عیوب قرار گرفته در فاصله $X=30\text{mm}$ to 75mm ، یکپارچه نیستند و در واقع چهار تکه شده‌اند. عیوب دیگری نیز در فاصله $X=0$ to 15mm ، قرار گرفته‌اند. هر دو دسته عیب در نوار $Y=26.5$ to 30.5mm قرار گرفته‌اند.

در شکل ۱۲ نتایج آزمایش بر روی لوله ۲,۵ اینچ با حفره‌های تعمودی از نمای جانبی (روبش-B) نشان داده شده‌است. محور عمودی (Depth)، عمق داخل قطعه را نشان می‌دهد و محور افقی (Y)، ناحیه جانبی قطعه است. تصویر در محوطه‌ای به ابعاد 20×15 میلی‌متر با تفکیک‌پذیری ۰,۱ میلی‌متر نشان داده می‌شود. هر سه حفره در تصویر به خوبی مشاهده می‌شوند. بر خلاف اغلب سیستم‌های رایج، شکل حفره‌ها به دلیل به‌کارگیری روش TFM، به حالت دایروی شبیه‌تر است تا حالت هلالی. گزینه اندازه‌زنی در پایین تصویر، امکان اندازه‌گیری ابعاد عیوب را ایجاد می‌کند. خط‌چین‌های داخل تصویر نشان‌گر منطقه مربوط به بازتاب‌های اول و دوم می‌باشند^۹. نشانه^۹ مشاهده شده در عمق ۱۲ میلی‌متری، ناشی از بازتاب کفشک می‌باشد. محل حفره‌ها در عمق تقریبی ۱,۵، ۴,۵ و ۷,۵ میلی‌متر می‌باشند.



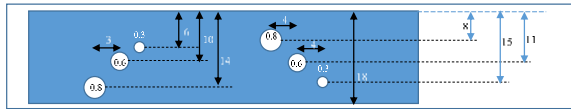
شکل ۱۲. نمای جانبی (روبش-B) حاصل از آزمایش بر روی لوله ۲,۵ اینچ در شکل ۱۳ نتایج اخذ شده از نمای بالایی (روبش-C) نشان داده شده‌است. در این تصویر، محور افقی (X) بیانگر محور حرکت پراب بر روی لوله و محور عمودی (Y)، همان محور افقی در نمای جانبی می‌باشد. تصویر نشان داده شده در شکل ۱۳، حاصل حرکت به اندازه ۵۰ میلی‌متر به دور لوله می‌باشد. محل قرارگیری پراب در این تصویر، به صورتی بوده‌است که تصویر حاصل از دو حفره به خوبی قابل مشاهده می‌باشد و حفره سوم به دلیل قرار گرفتن در نقطه‌ای بالاتر از محل پراب به صورت کمرنگ مشاهده می‌شود.

لوله‌های معادل‌سازی شده بویلر ۲,۵ اینچ

لوله‌های معادل‌سازی شده بویلر در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است. قطر هر لوله برابر ۲,۵ اینچ و فاصله میان لوله‌ها بر اساس فاصله لوله‌های واتروال بویلر برابر ۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته

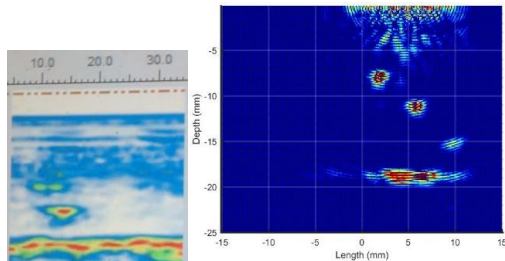
^۹ این دو بازتاب را اصطلاحاً Leg1 و Leg2 گویند [19].

^۹ Indication



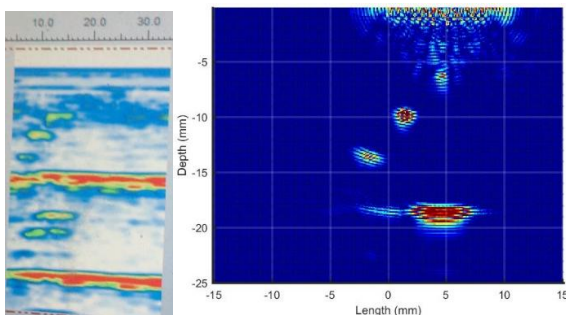
(ب)

شکل ۱۷. قطعه فولادی تخت با دو دسته حفره، الف) قطعه فولادی، ب) نحوه قرارگیری حفره‌ها در قطعه فولادی تخت
در شکل ۱۸ الف، تصویر دریافتی از دستگاه نمونه خارجی در هنگام بررسی دسته حفره‌های سمت چپ نشان داده شده در شکل ۱۷ الف، ارائه شده‌است. توجه شود که تصویر حالت آینه-ای دارد و در نتیجه تصویر دسته حفره سمت چپ، در راستای معکوس قرار می‌گیرند. ملاحظه می‌شود که نمونه خارجی قادر به تشخیص حفره نزدیک به سطح (حفره 0.3mm) در دسته حفره‌های سمت چپ نیست، زیرا این حفره قطر کمی دارد و تقریباً در «ناحیه مرده» دستگاه نمونه خارجی قرار گرفته‌است. کیفیت بالاتر تصویر حاصل از این تحقیق در مقایسه با نمونه خارجی و نویز کمتر آن در شکل ۱۸ قابل ملاحظه می‌باشد.



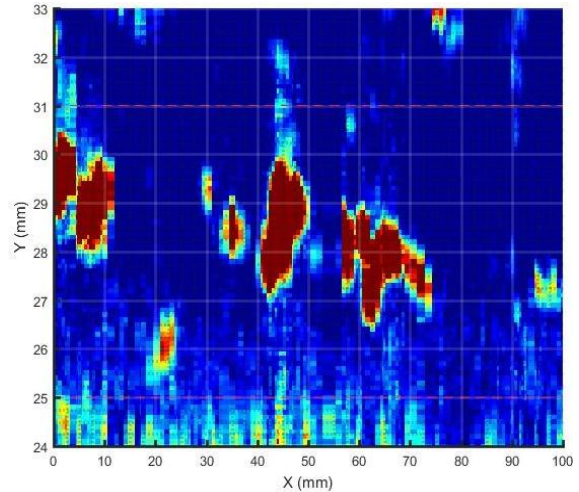
(الف) (ب)

شکل ۱۸. مقایسه تصاویر دریافتی حاصل از آزمایش دسته حفره‌های سمت چپ در شکل ۱۷ الف) نتیجه نمونه خارجی، ب) نتیجه این تحقیق
در شکل ۱۹، تصویر حاصل از نمونه خارجی با تصویر دستگاه حاصل از این تحقیق برای دسته حفره‌های سمت راست در شکل ۱۷ الف، مقایسه شده‌است. این بار، نمونه خارجی هر سه حفره را نشان می‌دهد، لیکن همچنان کیفیت تصویر محصول این تحقیق بالاتر و دارای نویز کمتر است. علت آن به‌کارگیری قطعات یکپارچه در طراحی سخت‌افزار و نیز استفاده از روش TFM می‌باشد که برتری‌های فوق را به دستگاه حاصل از این تحقیق داده‌است.



(الف) (ب)

شکل ۱۹. مقایسه تصاویر دریافتی حاصل از آزمایش دسته حفره‌های سمت راست در شکل ۱۷ الف) نتیجه نمونه خارجی، ب) نتیجه محصول این تحقیق



شکل ۱۵. نمای بالایی حاصل از بازرسی نیمه نخست لوله شماره ۲ به قطر ۲،۵ اینچ

به جهت صحت‌سنجی نتایج اخذ شده، تصویر رادیوگرافی لوله-های مذکور در شکل ۱۶ ارائه شده‌است. چنانچه ملاحظه می‌شود، تصاویر فوق ایرادات موجود در فیلم رادیوگرافی را با وضوح و کیفیت بالاتری نشان می‌دهند.



شکل ۱۶. فیلم رادیوگرافی مربوط به لوله شماره ۲ با قطر ۲،۵ اینچ

مقایسه نتایج با نمونه مشابه

به جهت بررسی عملکرد دستگاه، مقایسه‌ای میان نتایج محصول این تحقیق و دستگاه TD Focus-Scan phased array ساخت شرکت Technology design صورت گرفته‌است [23]. برای مقایسه عملکرد دو دستگاه از یک قطعه فولادی تخت که دارای حفره‌های عمودی با قطر 0.8mm, 0.6mm, 0.3mm هستند، استفاده شده‌است. تصویری از قطعه فولادی و نحوه قرارگیری این حفره‌ها در شکل ۱۷ نشان داده شده‌است.



(الف)

نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی و ساخت سیستم بازرسی غیر مخرب لوله‌های بویلر به روش تصویربرداری فراصوتی با آرایه فازی تشریح شد. اجزای مختلف سیستم شامل پراب آرایه فازی، اسکنر، مدارهای الکترونیکی یکپارچه و برنامه نرم‌افزاری آن به اختصار تشریح شدند. الگوریتم «تمرکز کامل فیلترگذاری شده» و نحوه پیاده‌سازی آن که سبب بهبود کیفیت تصاویر می‌شود، نیز تشریح شده و در بخش نتایج، تصاویر اخذ شده از آن ارائه شده و با نمونه‌های خارجی نیز مقایسه شدند. بر اساس نتایج اخذ شده، سیستم ساخته شده در ارائه تصویر نقص‌های اعمال شده در لوله‌های فولادی یا آلومینیومی کاملاً موفق است. بازه اندازه‌گیری دستگاه برای لوله‌هایی با قطر ۱,۵ اینچ تا ۲,۵ اینچ است و با دقت 0.05mm می‌باشد. همچنین به دلیل طراحی خاص آن برای لوله‌های واتروال بویلر، چرخش و تصویربرداری آن به دور لوله‌های بویلر به آسانی امکان‌پذیر می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله، نتیجه قرارداد تحقیقاتی میان پژوهشگاه نیرو و نیروگاه شهید مفتاح همدان می‌باشد که نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از آن نیروگاه به عنوان تامین‌کننده مالی این تحقیق، ابراز می‌دارند. همچنین مراتب ویژه سپاسگزاری خود را از همکاران نیروگاه شهید مفتاح همدان، آقایان نریمانی، افشار، حسینی و جاودانی ابراز می‌دارند. همچنین نویسندگان این مقاله، وظیفه خود می‌دانند از آقایان مرتضی ثانی خانی و میثم علیزاده از شرکت پیشگامان فنون پارس به دلیل مشاوره‌های فنی در اجرای این پروژه و در اختیار قرار دادن نمونه خارجی جهت مقایسه عملکرد دو دستگاه، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

مراجع

- اساسی، اولین کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در مهندسی مکانیک، تهران.
- [3] R.J. Ditchburn, S. K. Burke, and C. M. Scala, "NDT of welds: state of the art," *Ndt & e International*, vol. 29, no.2, pp. 111-117, 1996.
 - [4] R. Pincu, "Digital radiography and its advantages in field NDT inspections today," In 17th World Conference on Non-Destructive Testing, pp. 25-28, Oct. 2008.
 - [5] P. Kah, B. Mvola, J. Martikainen, and R. Suoranta, "Real time non-destructive testing methods of welding," *Advanced Materials Research*, vol. 933, pp. 109-116, 2014.
 - [6] M. D. C. Mole, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications*, Québec, First Edition, R/D Tech, pp. 30 – 35, 2004.
 - [7] J. Zhang, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox, and A. J. Hunter, "Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method," *NDT & e International*, vol. 43, no. 2, pp. 123-133, 2010.
 - [8] X.C. Song, X.J. Wu, and Y.H. Kang, "An inspection robot for boiler tube using magnetic flux leakage and ultrasonic methods," *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 46, no. 5, pp.275-278, 2004.
 - [9] M. Friedrich, L. Gatzoulis, G. Hayward, and W. Galbraith, "Small inspection vehicles for non-destructive testing applications," In *Climbing and Walking Robots*, Springer, pp. 927-934, 2006.
 - [10] L. Xueqin, Q. Rongfu, L. Gang, H. Fuzhen, "The Design of an Inspection Robot for Boiler Tubes Inspection", *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, 2009.
 - [11] L. Xueqin, L. Gang, and L. Shangqing, "The development of the boiler water wall tube inspection," 3rd Int. Conf. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2008), Nanjing, China, pp. 2415-2420, April 2008.
 - [12] K. S. M. Sahari, A. Anuar, S. S. K. Mohideen, M. Z. Baharuddin, I. N. Ismail, et al, "Development of robotic boiler header inspection device," In the 6th IEEE International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems, Toyama, Japan, pp. 769-773, Nov. 2012.
 - [13] W.S. Singh, B. P. Rao, C.K. Mukhopadhyay, and T. Jayakumar, "Detection of localized damage in water wall tubes of thermal power plants using GMR sensor array based magnetic flux leakage technique," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 34, no. 3, pp. 19, 2015.
 - [14] G. Caprari, A. Breitenmoser, W. Fischer, C. Hürzeler, F. Täche, R. Siegart, O. Nguyen, R. Moser, P. Schoeneich, and F. Mondada, "Highly compact robots for inspection of power plants," *Field Robotics*, vol. 29, no. 1, pp.47-68, 2012.
 - [15] <http://www.inspection-robotics.com>, Feb. 2022.
 - [16] <https://www.olympus-ims.com/en/scanners/cobra/>, Feb. 2022.
 - [17] <https://www.phoenixisl.com/product/bracelet/>, Feb. 2022.
 - [18] L.W. Schmerr, "An ultrasonic system," *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Springer, pp. 1-13, 2016.
 - [19] Olympus, N.D.T, "Introduction to phased array ultrasonic technology applications. D Tech Guideline", Olympus NDT, 2004.
 - [20] M. Njiki, A. Elouardi, S. Bouaziz, O. Casula, and O. Roy, "A multi-FPGA architecture-based real-time TFM ultrasound imaging," *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 16, no. 2, pp.505-521, 2019.
 - [21] H. Hu, J. Du, N. Xu, H. Jeong, and X. Wang, "Ultrasonic sparse-TFM imaging for a two-layer medium using genetic

- [۱] ولایی، حمیدرضا؛ محمدرضا زمانی؛ سعید وزیری و هاشم عقیلی جم، ۱۳۹۲، تاثیرات بازدیدهای دوره‌ای بر کاهش خطرات حاصل از خوردگی در بویلرهای فشار بالا و کنترل پدیده FAC در بویلرهای HRS، چهارمین همایش بازرسی و ایمنی در صنایع نفت و انرژی، تهران.
- [۲] راهیمی اله آبادی، علی و محمد تناسان، ۱۳۹۷، بررسی فنی و تجربیات فرایند تعویض لوله‌های رهیتور بویلر یک نیروگاه بخار ۱۵۰ مگاواتی در تعمیرات نیمه

- thickness,” Instrumentation Science and Technology, vol. 38, no. 6, pp. 411-420, 2010.
- [23] <https://www.technologydesign.com/td-scan-software/>, Feb. 2022.
- algorithm optimization and effective aperture correction,” NDT & E International, vol. 90, pp.24-32, 2017.
- [22] E. A. Aydın, and İ. Güler, “Design of PIC-Controlled pulsed ultrasonic transmitter for measuring gingiva