

پیاده‌سازی سیستم تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی

وحید حمیتی واقف^۱، مهدی بکرانی^۲

^۱ استادیار، مهندسی الکترونیک، پژوهشگاه نیرو

^۲ استادیار، مهندسی الکترونیک، دانشگاه صنعتی قم

* vvaghef@nri.ac.ir

چکیده

تصویربرداری فراصوتی با آرایه‌های فازی یکی از آزمون‌های بسیار مهم در مجموعه آزمون‌های غیرمخرب است. در این مقاله سیستم تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی طراحی و ساخته شده است. پیاده‌سازی با استفاده از مدارهای مجتمع انجام شده است که سبب کیفیت بالاتر تصویر، نویز کمتر، قیمت تمام شده کمتر و ابعاد و وزن کمتر نسبت به اغلب سیستم‌های فعلی، می‌شود. سیستم ساخته شده امکان اتصال به هر نوع پروب با کانکتور استاندارد را دارا بوده و حداکثر تا ۱۶ المان را با نرخ نمونه‌برداری 40MHz پشتیبانی می‌نماید و قابلیت ارتقاء برای به کارگیری تعداد المان‌های بیشتر را نیز دارد. تصویربرداری نیز با روش تمرکز کامل در آن انجام می‌شود و بنابراین تصاویر آن دارای نویز کمتر و تفکیک بهتر نسبت به تصاویر معمول آرایه فازی می‌باشد. قابلیت حمل و جابجایی آسان و امکان توسعه سیستم به منظور به کارگیری آن برای انواع آزمون‌های غیرمخرب، همراه با هزینه تمام شده بسیار کمتر نسبت به نمونه خارجی از ویژگی‌های مهم این تحقیق می‌باشد. در نتیجه آزمایش‌های انجام شده، این دستگاه سه حفره به قطرهای ۰٫۸، ۰٫۶ و ۰٫۳ میلی‌متر را به خوبی تشخیص داده و تصویر با کیفیت از آنها ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: تصویربرداری فراصوتی، آرایه‌های فازی آلتراسونیک، روبش نمای (A-scan) A، روبش نمای (B-scan) B، روش تمرکز کامل

۱- مقدمه

مانند رادیوگرافی دیجیتالی و کامپیوتری و توموگرافی، تصویربرداری فراصوتی با آرایه‌های فازی و ... وجود دارد [۱][۲][۳]. از میان روش‌های مذکور، دو روش رادیوگرافی و آزمون‌های فراصوتی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش رادیوگرافی با تاباندن اشعه X بر قطعه، اثری بر روی فیلم رادیوگرافی ایجاد می‌شود که در نهایت منجر به تصویر رادیوگرافی می‌شود. در کنار هزینه نسبتاً اندک، دیگر مزیت مهم این روش، ارائه تصویر کامل از داخل قطعه است. لیکن چندین ایراد عملیاتی به آن وارد است. نخست آنکه به دلیل به کارگیری اشعه X در این روش، باید محوطه مورد استفاده تا شعاع مشخصی از حضور سایر کارکنان تخلیه شود و بنابراین سبب اختلال در سایر فعالیت‌های داخل آن محوطه می‌شود. دوم آنکه عملیات ظهور فیلم رادیوگرافی و اخذ تصویر آن، بلافاصله انجام نمی‌شود و معمولاً انجام آن در محل انجام آزمون امکان‌پذیر نیست. بنابراین وقفه قابل توجهی از هنگام آغاز آزمون تا تشکیل

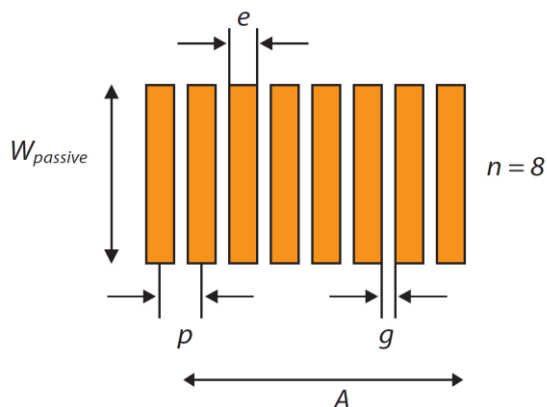
آزمون‌های غیرمخرب نقش مهمی در صنایع نیروگاهی، نفت، گاز، پتروشیمی، پالایشگاهی، آب و فاضلاب، ریلی، هسته‌ای، بتون، هوایی، نظامی، مهندسی پزشکی و ... دارند. از بین انواع آزمون‌های غیرمخرب، آزمون‌های فراصوتی و از میان آنها نیز تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی، بیشترین توجه را در صنعت به خود جلب کرده‌اند. امکان مشاهده عمق قطعه، عدم نیاز به هر نوع ابزارهای جانبی، سهولت استفاده و مستندسازی و امکان به کارگیری تقریباً بلافاصله پس از عملیات اصلی مانند جوشکاری، از مهمترین ویژگی‌های این روش است. ضمن آنکه با استفاده از این روش، می‌توان تصاویر سه بعدی از داخل قطعه نیز تهیه نمود و تقریباً کلیه اجزای داخلی قطعه را بدون کوچکترین آسیب به آن مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. برای تصویربرداری از داخل قطعات روش‌های مختلفی مانند برش‌گرافی^۱، ترموگرافی، رادیوگرافی و مشتقات آن

¹ Shearography

به منظور ارزیابی جوش لوله‌های واتروال بویلر انجام شده- است، ارائه می‌شود. سیستم ساخته شده از روش تمرکز کامل جهت تشکیل تصویر بهره می‌برد و از این روی کیفیت تصاویر آن نسبت به تصاویر معمول آرایه‌های فازی فراصوتی نويز کمتری دارد.

۲- تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی

۱-۲- پروب آرایه فازی فراصوتی خطی
 پروب آرایه فازی فراصوتی دارای انواع بسیار زیادی است. در این تحقیق از یک پروب آرایه فازی خطی استفاده شده- است که در آن تعداد n المان پیزوالکتریک در گام p و ارتفاع W از یکدیگر قرار گرفته‌اند. شکل ۱ نمایی از این پروب را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مشخصات کلی یک پروب آرایه فازی آلتراسونیک

۲-۲- نحوه تشکیل تصویر و روبش الکترونیکی در تصویربرداری فراصوتی، جهت اخذ تصویر، یک پالس به یک المان یا تعدادی از آنها یا همه المان‌های پروب اعمال می‌شود. معمولاً دوره تناوب این پالس برابر نصف دوره تناوب فرکانس پروب است تا بیشترین تحریک برای پروب اتفاق افتد. بسته به اینکه چه تعداد المان تحریک شده باشد، انواع روش‌های تصویربرداری وجود دارند [۵][۶][۷]. برخی از این روش‌ها موجب بهبود کیفیت تصویر شده و برخی دیگر سبب بهبود سرعت تشکیل تصویر می‌شود ولی تقریباً همه آنها باید بین سرعت تشکیل تصویر و کیفیت آن مصالحه کنند [۸][۹].

بر اثر تحریک المان‌های آرایه، امواج فراصوتی تولید شده و در محیط قطعه منتشر شده و پس از بازتاب از محیط داخل قطعه، بازتاب می‌شوند. این بازتاب‌ها توسط کلیه المان‌ها دریافت می‌شوند و پس از تبدیل به سیگنال‌های

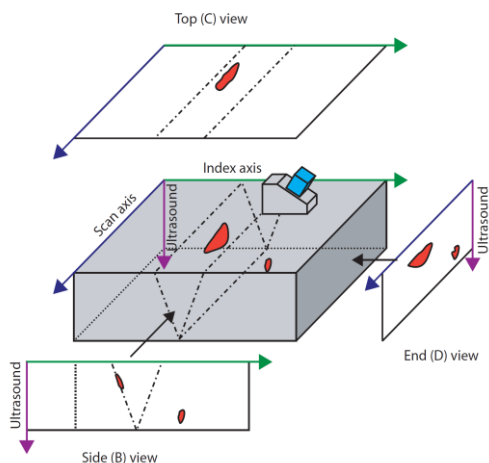
تصویر و در نهایت تفسیر آن به وجود می‌آید. سوم آنکه اگر فیلم اخذ شده به هر دلیل معیوب باشد، تا زمان ظهور تصویر مشخص نمی‌شود و بنابراین در صورت وجود هر گونه ایراد، مجدداً باید کل فرآیند تکرار شود. در نهایت آنکه مستندسازی این فرآیند نیز به صورت رایانه‌ای امکان‌پذیر نیست و باید حتماً در قالب همان فیلم‌های رادیوگرافی صورت گیرد. بنابراین، چنانچه نیاز به اخذ مشاوره از سایر متخصصان آن حوزه باشد، تنها راه حل مراجعه حضوری ایشان است. بنابراین از مجموعه ایرادات فوق، نتیجه می‌شود که در روش رادیوگرافی، امکان انجام آزمون و اصلاح آن معمولاً به طور همزمان وجود ندارد و اغلب موجب اختلال در عملکرد عادی مجموعه نیز می‌شود که در برخی موارد موجب تحمیل هزینه و صرف زمان قابل توجه می‌شود.

روش دوم تصویربرداری با استفاده از آرایه‌های فازی فراصوتی (PAUT) است. این روش نسبت به روش رادیوگرافی جدیدتر است. در این روش یک پروب آرایه فازی فراصوتی مورد استفاده قرار گرفته و با ارسال و دریافت امواج فراصوتی، تصویر داخل قطعه را به دست می‌دهد. بنابراین، اولاً هیچ یک از مخاطرات استفاده از اشعه X را ندارد و نیازی به تخلیه محوطه از حضور سایر کارکنان نیست. ثانیاً تصویر بلافاصله به دست می‌آید و در رایانه دستگاه ذخیره می‌شود و لذا مفسر آزمون بلافاصله می‌تواند آن را ارزیابی نماید و در صورت وجود هر گونه ایراد در تصویر، بلافاصله نسبت به اخذ تصویری دیگر اقدام نماید. با توجه به عدم نیاز به استفاده از فیلم‌های رادیوگرافی، هزینه‌ای نیز از این جهت متوجه سیستم نمی‌باشد. ضمن آنکه کلیه تصاویر در حافظه دستگاه به صورت رایانه‌ای ذخیره می‌شوند و نیاز به مستندسازی فیزیکی مرتفع شده و امکان استفاده از مشاوران خبره به صورت دور نیز میسر می‌شود. معمولاً دستگاه‌های آرایه فازی نسبت به دستگاه‌های رادیوگرافی کوچکتر و سبکتر هستند و بنابراین استفاده و حمل و آنها آسانتر از روش رادیوگرافی می‌باشد.

در این زمینه پیشتر ساخت سیستم روبشگر در داخل کشور گزارش شده‌است که اگرچه تصویر روبش B اخذ شده‌است، لیکن تنها روبشگر مکانیکی آن ساخته شده‌است و اجزای الکترونیکی به صورت آماده از قبل مورد استفاده قرار گرفته‌است [۴].

در این مقاله طراحی و ساخت یک سیستم تصویربرداری مبتنی بر آرایه‌های فازی که با موفقیت در پژوهشگاه نیرو و

تکرار این فرآیند، مجموعه‌ای از تصاویر B-scan اخذ می‌شود، که به نمای بالا یا C-scan منجر می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳: انواع تصاویر آرایه فازی آلتراسونیک [۱۰]

۳- سخت‌افزار و نرم‌افزار

در این بخش، روش به کار رفته جهت اخذ تصاویر و سخت‌افزار و نرم‌افزار پیاده‌سازی شده، تشریح می‌شوند.

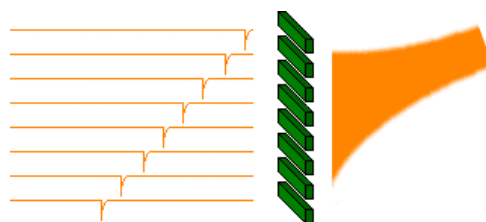
۳-۱- روش تمرکز کامل

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش پیشین، اگر فرض شود که آرایه فازی دارای n المان است و در هر بار تشکیل تصویر، همه آنها در عملیات ارسال و دریافت مشارکت دارند، برای هر نقطه از فضای داخل قطعه، باید n تاخیر و n عملیات جمع اعمال شود. چنانچه فضای داخل قطعه نیز به k نقطه تقسیم شده‌باشد، در مجموع نیاز به nk عملیات تاخیر و جمع است که حجم قابل توجهی از پردازش را شامل می‌شود و روش متداول تشکیل تصویر فراصوتی با استفاده از آرایه فازی است. چون در این روش در هر بار تشکیل تصویر، n روبش A گردآوری می‌شود و پس از تعیین روشنایی نقطه مورد نظر، دیگر نیازی به آن حافظه نیست، بنابراین حافظه مورد نیاز برای نگهداری روبش‌های A و انجام پردازش، با n متناسب خواهد بود.

با این حال، روشی جدید در این زمینه معرفی شده‌است که در آن به جای تکرار عملیات ارسال و دریافت برای هر نقطه، این عملیات فقط یک بار برای کل فضای داخل قطعه انجام می‌شود و سپس تصویر آن تشکیل می‌شود [۱۵-۱۲]. در این روش که با عنوان روش تمرکز کامل مشهور است، هر بار فقط یک المان آرایه تحریک می‌شود ولی همه المان‌ها در عملیات دریافت حضور دارند. بنابراین در هر بار تحریک یک المان، اطلاعات n روبش A ، دریافت می‌شود.

الکترونیکی دیجیتالی توسط برنامه مربوط مورد پردازش قرار گرفته و تصویر را تشکیل می‌دهند.

یکی از ویژگی‌های مهم تصویربرداری فراصوتی با پروب آرایه فازی آن است که بدون نیاز به جابجایی فیزیکی و تنها با اعمال تاخیر در سیگنال اعمالی به مدارات الکترونیکی، می‌توان از آن تصویر اخذ نمود [۱۰][۱۱]. بدین منظور، کافی است تا در هنگام تحریک المان‌های آرایه فازی، به نحوی پالس ارسالی آنها با یکدیگر تاخیر داشته باشند که همه آنها به طور همزمان در یک نقطه متمرکز گردند و اصلاحاً به آن قانون کانونی (Focal law) اطلاق می‌شود (شکل ۲) [۱۰][۱۱]. نکته مهم آن است که می‌توان علاوه بر ایجاد تمرکز، با استفاده از تاخیرهای الکترونیکی مذکور، تمرکز را در هر نقطه دلخواهی از محیط مد نظر ایجاد نمود که اصطلاحاً به آن روبش الکترونیکی گفته می‌شود (شکل ۲).

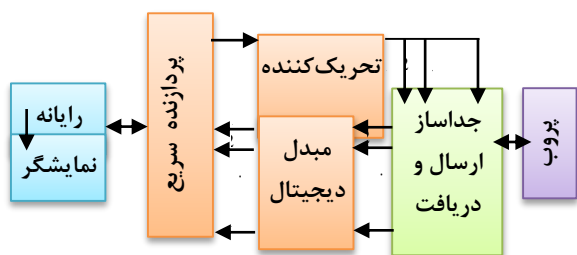


شکل ۲: اعمال تاخیر الکترونیکی به آرایه فازی جهت تمرکز امواج آن [۱۰]

۳-۲- انواع نما و تصاویر فراصوتی

پالس ارسالی به هر المان در بازگشت نیز به صورت پالس دریافت شده و ذخیره می‌شود. به این ترتیب سیگنال دریافتی، در واقع یک شکل موج است که محور افقی در آن از جنس زمان است. با توجه به اینکه سرعت انتشار امواج صوتی در قطعه مشخص هستند، می‌توان محور افقی را از نوع فاصله مکانی در نظر گرفت. بنابراین شکل موجی حاصل می‌شود که به آن نمای روبش A یا A-scan گفته می‌شود. بسته به اینکه چه تعداد المان در عملیات ارسال و دریافت در هر بار تشکیل تصویر فعال شوند، برای هر نقطه از فضای داخل قطعه، تعدادی A-scan اخذ می‌شود. این نماهای روبش A ابتدا بسته به فاصله از نقطه مورد بررسی، به میزان کافی تاخیر می‌یابند و سپس با یکدیگر جمع می‌شوند تا شدت روشنایی تصویر برای آن نقطه به دست آید. تکرار این فرآیند برای همه نقاط داخل فضای قطعه، منجر به تشکیل تصویری جانبی از قطعه می‌شود که به آن نمای روبش B و یا B-scan گفته می‌شود (شکل ۳). با حرکت دادن پروب و

480Mbps می‌شود. به علاوه مجموعه دارای ۱۶ المان می‌باشد که نرخ داده خروجی را به 7.68Gbps می‌رساند. این نرخ بالای انتقال داده، سبب می‌شود تا مجموعه نیازمند یک پردازنده سریع باشد. پردازنده سریع داده‌ها را گردآوری کرده و برخی عملیات اولیه را بر روی آنها انجام می‌دهد. سپس این اطلاعات به رایانه ارسال شده و با اعمال تاخیرها بر اساس الگوریتم روش تمرکز کامل، تصویر تشکیل شده و در نمایشگر نشان داده می‌شود. بر این اساس، بلوک دیاگرام بخش الکترونیک در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، ابتدا تاخیرها در رایانه محاسبه شده و به قطعه تحریک‌کننده منتقل می‌شوند و سپس به پروب اعمال می‌شوند. با توجه به آنکه مسیر ارسال و دریافت سیگنال در پروب یکسان است، قطعه جداساز، مسیر ارسال و دریافت را از یکدیگر مجزا می‌کند. سپس سیگنال دریافتی از پروب وارد مبدل دیجیتال شده و به معادل دیجیتالی تبدیل شده و به پردازنده سریع منتقل می‌شود. در شکل ۵ نمایی از برد الکترونیک پیاده‌سازی شده نشان داده شده است.



شکل ۴: بلوک دیاگرام بخش الکترونیک



شکل ۵: نمایی از بردهای الکترونیکی ساخته شده در پژوهشگاه نیرو

۳-۳- برنامه نرم‌افزاری

برنامه نرم‌افزاری وظیفه دریافت داده‌های مربوط به آرایه فازی، محاسبه تاخیرها، اعمال آنها و تشکیل تصویر را بر

با تکرار این فرآیند برای همه المان‌ها، در مجموع n^2 روبش A دریافت می‌شود که حافظه‌ای بسیار بزرگتر و n^2 برابر روش رایج نیاز دارد. سپس تاخیرها برای هر دسته از این روبش‌ها اعمال می‌شود که منجر به تشکیل تصویر با کیفیت بسیار بهتری از کل فضای داخل قطعه می‌شود. بهبود کیفیت تصویر روش تمرکز کامل، به چندین علت است. نخست آنکه چون امواج المان‌ها در یک نقطه خاص متمرکز نمی‌شوند، در نتیجه از سایر نقاط فضای داخل قطعه نیز اطلاعاتی به دست می‌آید؛ بر خلاف روش رایج که برای بررسی هر نقطه داخل قطعه باید حتما در آن نقطه تمرکز اتفاق افتد و این موضوع برای همه نقاط امکان‌پذیر نیست. دوم آنکه چون همه المان‌ها تحریک نمی‌شوند، اثر الکترونیکی فرستنده آنها نیز حذف می‌شود که به لحاظ پیاده‌سازی الکترونیکی بسیار مفید است. در واقع در روش رایج، فعال شدن همه فرستنده‌ها که معمولا در ولتاژ و جریان بالایی کار می‌کنند، سبب می‌شود تا نویزهایی بسیار قوی در مدارها منتشر شوند که حذف آنها دشوار است و اگر حذف نشوند تاثیر بسیار مخربی در ابتدای تصویر خواهند داشت. در واقع به همین دلیل در همه سیستم‌های رایج، ناحیه مرده از مساحت بزرگی برخوردار است. بنابراین سومین مزیت به کارگیری روش تمرکز کامل، کاهش حجم ناحیه مرده می‌باشد. چهارمین مزیت آن است که اگرچه حجم حافظه مصرفی و پردازش مورد نیاز نیز افزایش بسیار زیادی نسبت به روش‌های رایج می‌یابد، امکان استفاده از پردازش موازی با استفاده از مدارهای پیشرفته رایج امروزی نیز فراهم می‌شود؛ در حالی که روش‌های رایج از این موضوع نیز بی‌بهره هستند. در این مقاله از این روش برای تشکیل تصویر استفاده شده است.

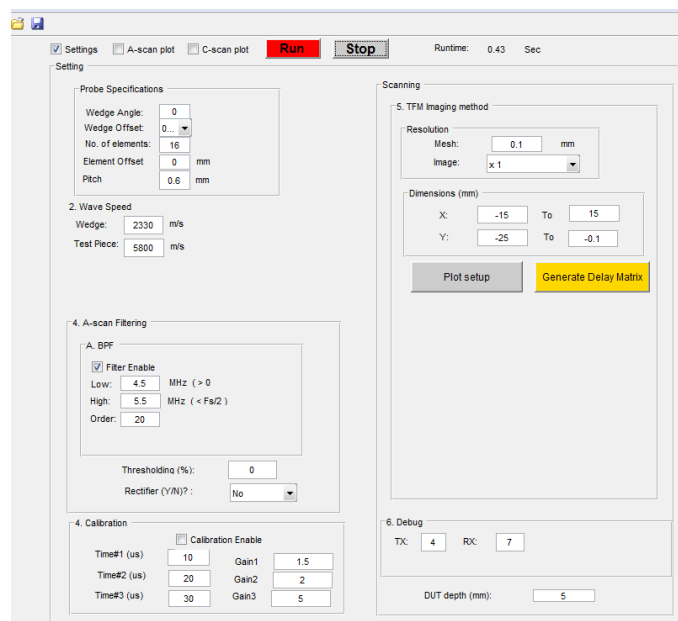
۲-۳- سخت‌افزار مجموعه

پروپ مورد استفاده در این تحقیق در فرکانس کاری 5MHz کار می‌کند و دارای ۱۶ المان می‌باشد. نرخ نمونه برداری برابر 40MHz و هر نمونه به صورت ۱۲ بیتی می‌باشد. پس از تحریک هر المان، سیگنال دریافتی از آن، ابتدا از یک قطعه جداساز حالت ارسال و دریافت عبور می‌کند و سپس به مبدل داده دیجیتالی وارد می‌شود. داده‌های خروجی مبدل دیجیتال به واحد پردازنده سریع منتقل می‌شوند. با توجه به نرخ نمونه‌برداری 40MHz و تعداد ۱۲ بیت در هر نمونه، نرخ انتقال داده برای هر المان برابر

محاسبات است و به علاوه فضای قابل توجهی نیز برای ذخیره‌سازی احتیاج دارد. البته این محاسبات تنها در آغاز بازرسی، انجام می‌شود و خارج خط هستند. پس از تعیین کلیه تاخیرها، داده‌های دریافتی از پروب، به رایانه منتقل می‌شوند و سیگنال‌های A-scan برای کلیه المان‌ها تشکیل می‌شوند. سپس با استفاده از تاخیرهای محاسبه شده، برای تک تک نقاط مش، مقدار روشنایی تصویر محاسبه می‌شود و تصویر مذکور نمایش داده می‌شود.

به جهت سهولت بیشتر، نرم‌افزار مجهز به رابط کاربری مناسبی می‌باشد که در شکل ۶ نشان داده شده است. با کمک این رابط کاربری، می‌توان کلیه پارامترهای مورد نیاز در تصویربرداری فراصوتی را تعیین نمود.

عهده دارد. بدین منظور، ابتدا فضای داخل قطعه مش‌بندی شده و به تعدادی نقطه تقسیم می‌شود که از یکدیگر فاصله دارند. در این حالت محیط مذکور به صورت یک مستطیل در نظر گرفته می‌شود که تعداد N_x , N_y به ترتیب تعداد نقاط محیط مذکور در راستای دو محور افقی و عمودی هستند. به عنوان مثال اگر مستطیل مذکور دارای ابعاد $30\text{mm} \times 20\text{mm}$ باشد و $r=0.1\text{mm}$ ، آنگاه $N_y=300$ و $N_x=200$ خواهد بود. سپس برای هر نقطه، فاصله مکانی از هر یک از المان‌های پروب، محاسبه شده و تاخیرهای زمانی برای هر المان به نحوی که موج ارسالی المان‌ها همزمان به نقطه مذکور برسند، تعیین می‌شود. با توجه به وجود ۱۶ المان در این تحقیق، برای کل مش مورد ارزیابی، المان $16.N_x.N_y$ داده محاسبه می‌شود که حجم سنگینی از



شکل ۶: نمایی از رابط کاربری

جهت بررسی عملکرد مجموعه، ابتدا از یک پروب تخت فولادی همراه با تعدادی حفره استفاده شده است (شکل ۷). این پروب دارای ۶۴ المان در فرکانس 5MHz و با فاصله المان‌های برابر 0.6mm است که در این تحقیق از ۱۶ المان ابتدایی آن استفاده می‌شود. قطعه فولادی نیز به ضخامت 18mm می‌باشد و در آن از دو دسته سه تایی از حفره‌ها استفاده شده است. در کلیه آزمایش‌های این قسمت، پروب تخت بدون کفشک مورد استفاده قرار گرفته است و بنابراین، امواج فراصوتی به صورت نرمال و بدون زاویه وارد آن شده‌اند.

۴- نتایج

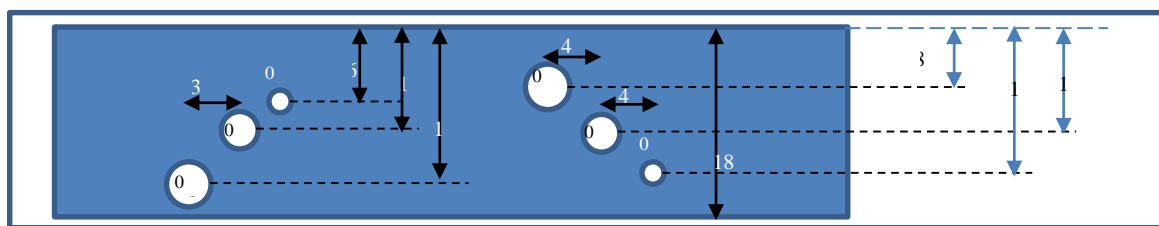
با توجه به آنکه این تحقیق جهت بازرسی جوش لوله‌های واتروال بویلر انجام شده است، دو نوع آزمون تخت و لوله‌ای برای آن انجام شده است که در ادامه تشریح می‌شوند. در کلیه تصاویر دریافتی، رزولوشن تصویر برابر 0.1mm و ابعاد تصویر برابر 20mmx30mm می‌باشد. بنابراین در مجموع ۶۰ هزار نقطه در تصویر نهایی نمایش داده می‌شود و زمانبری تشکیل هر تصویر در حدود 0.3 ثانیه بر روی رایانه-ای با پردازنده‌ای در فرکانس 4GHz است.

۴-۱ مجموعه آزمایشی پروب تخت و نتایج آن



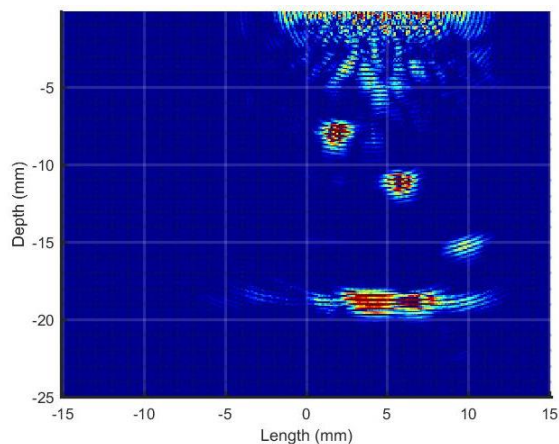
شکل ۷: مجموعه آزمایشی پروب تخت و قطعه فولادی

در شکل ۸ وضعیت حفره‌های ایجاد شده بر روی مجموعه آزمایشی پروب تخت نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که دو دسته حفره به قطرهای 0.8mm, 0.6mm, 0.3mm در سمت راست و چپ آن ایجاد شده‌است، به نحوی که در سمت راست، حفره بزرگتر بالاتر است و در سمت چپ پایینتر. دسته حفره‌های سمت راست قطعه تخت، به ترتیب در عمق 8mm, 11mm, 15mm قرار دارند و دسته حفره‌های سمت چپ به ترتیب در عمق 6mm, 10mm, 14mm واقع شده‌اند.

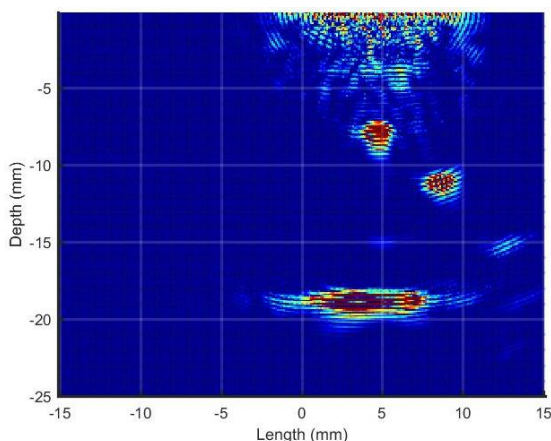


شکل ۸: وضعیت حفره‌های مجموعه آزمایشی نسبت به یکدیگر در قطعه تخت

یا سیگنال دریافتی آنها تضعیف شده‌است و در نتیجه تصویر دریافتی از حفره در عمق 15mm تضعیف شده‌است. با توجه به آنکه پروب به میزان 3mm جابجا شده‌است، تصویر حفره‌ها نیز به همین میزان جابجا می‌شود که مورد انتظار است. در حقیقت در این حالت، گویی دوربین تصویری از داخل قطعه، 3mm جابجا شده‌است که در نتیجه تصویر حفره‌ها جابجا شده و کیفیت نمایش آنها نیز به نسبت دور یا نزدیکی از حفره‌ها تغییر می‌یابد.



شکل ۹: تصویر دریافتی از پروب تخت و سه حفره سمت راست آن



شکل ۱۰: تصویر سه حفره سمت راستی قطعه تخت پس از 3mm جابجایی پروب

در شکل ۹ نتایج انجام آزمایش با استفاده از پروب تخت نشان داده شده‌است. در این شکل، تصویر B-scan از سه حفره جانبی سمت راست قطعه تخت، نشان داده شده‌است و به طور واضح قابل تشخیص هستند. توجه شود که ناحیه پررنگ در عمق 18mm، کف قطعه می‌باشد. سایه‌های موجود در تصویر، از ویژگی‌های تصویری فراسوتی می‌باشند.

با جابجایی پروب به میزان 3mm، تصویر شکل ۱۰ حاصل می‌شود که در آن به علت عبور پروب از روی پایین‌ترین حفره، تعدادی از المان‌ها سیگنالی از آن دریافت نمی‌کنند،

نگهدارنده مکانیکی که در داخل کشور ساخته شده است و همراه با پروب متصل به آن و سیستم آبرسانی بر روی لوله میانی نصب شده است. پروب مورد استفاده در این مجموعه، همراه با یک کفشک به زاویه ۶۰ درجه مورد استفاده قرار گرفته است و بنابراین، امواج فراصوتی از نوع عرضی و با زاویه ۶۰ درجه وارد قطعه می شوند.

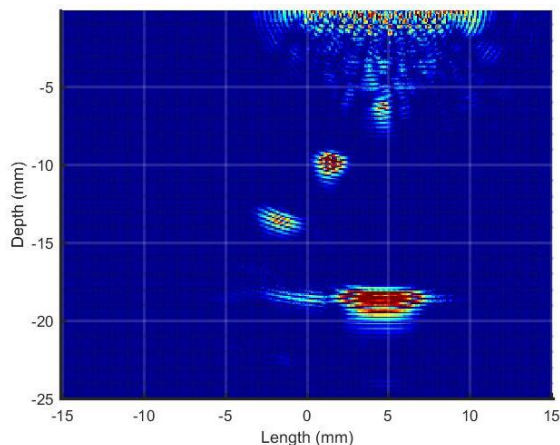
جهت بررسی عملکرد مجموعه دو حفره در لوله میانی که نگهدارنده مکانیکی بر روی آن نصب شده است، تعبیه شده است. جهت حفره ها، عمود بر محور لوله و همراستا با محور چرخش پروب بوده و به صورت سرتاسری می باشند. مجموعه حفره ها و نحوه تعبیه آنها بر روی لوله در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



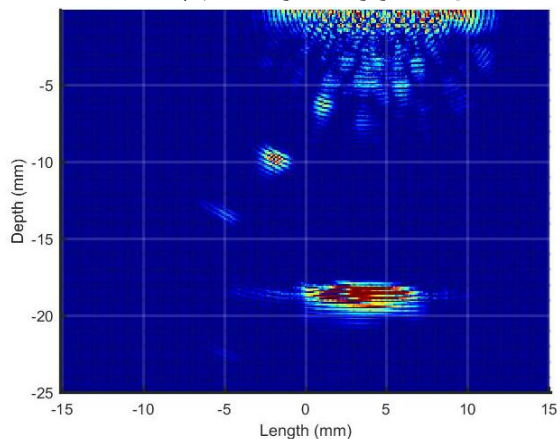
شکل ۱۳: (بالا) نمایی از مجموعه شبیه ساز لوله های واتروال بویلر همراه با نگهدارنده مکانیکی بر روی آن، (پایین) نمایی از دو حفره بر روی لوله میانی

در این حالت به دلیل قرار گرفتن پروب بر روی کفشک، امواج فراصوتی به صورت مورب منتشر شده و بازتاب می شوند و در نتیجه پروب در فاصله تقریبی افقی در حدود 5mm از حفره ها قرار می گیرد. تصویر اخذ شده از آزمایش های انجام شده بر روی مجموعه شبیه سازی شده در شکل ۱۴ بالا ارائه شده است که در آن، تصویر دو حفره به خوبی

در آزمونی دیگر، حفره های سمت چپ قطعه تخت مد نظر قرار می گیرند که تصویر آنها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بار دیگر، پروب به میزان 4mm جابجا می شود و تصویر دیگری حاصل می شود که در آن مجدداً تصویر پایین ترین حفره تضعیف شده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: تصویر سه حفره سمت چپ قطعه تخت



شکل ۱۲: تصویر سه حفره سمت چپ قطعه تخت پس از 4mm جابجایی

در ارتباط با نتایج ارائه شده در این قسمت، ذکر این نکته ضروری است که به دلیل به کارگیری الگوریتم تمرکز کامل، تصاویر از کیفیتی بسیار بالا برخوردار هستند و تفکیک پذیری آنها قابل توجه است. چنانچه ملاحظه می شود در کلیه تصاویر فوق، حفره به قطر 0.3mm به خوبی قابل تشخیص است.

۲-۴ مجموعه شبیه ساز لوله های واتروال بویلر و نتایج آن به جهت شبیه سازی لوله های واتروال بویلر از سه قطعه لوله به قطر 60mm و ضخامت 8mm استفاده شده است (شکل ۱۳ راست). این لوله ها مشابه لوله های واتروال بویلر، در فاصله 14mm از یکدیگر قرار داده شده اند تا وضعیت بویلر را شبیه سازی نمایند. مجموعه با استفاده از یک

گرفته می‌شود، تشریح شد. اجزای مختلف سیستم شامل پروب آرایه فازی، مدارهای الکترونیکی و برنامه نرم‌افزاری آن تشریح شدند. سپس در بخش نتایج با استفاده از دو مجموعه آزمایشی تدارک دیده شده در آزمایشگاه پژوهشگاه نیرو، تصاویر اخذ شده از مجموعه ارائه شدند. بر اساس نتایج اخذ شده، سیستم ساخته شده در ارائه تصویر نقص‌های اعمال شده در لوله‌های فلزی اعم از فولادی یا آلومینیومی کاملاً موفق است. همچنین به دلیل طراحی خاص آن برای لوله‌های واتروال بویلر، چرخش و تصویربرداری آن از دور لوله‌های بویلر به آسانی امکان‌پذیر می‌باشد. به دلیل به کارگیری روش تمرکز کامل، کیفیت تصاویر آن نیز بهتر از روش متداول اخذ تصاویر فراصوتی می‌باشد. بهبود کیفیت تصویر از طریق اعمال پردازش‌های بیشتر و بهبود نرم‌افزار کاربری آن جهت اندازه‌گیری‌های بیشتر و دقیق‌تر و دستیابی به تفکیک‌پذیری بالاتر با بهبود سخت‌افزار ساخته شده، مواردی است که در تحقیقات آتی نویسندگان مورد توجه قرار خواهد گرفت.

۶- قدردانی و تشکر

نویسندگان این مقاله، وظیفه خود می‌دانند مراتب ویژه سپاسگزاری خود را از آقایان مهدی رضایی و بهروز عبدلی به عمل آورند. همچنین کمال سپاسگزاری و قدردانی را از آقایان امیر نریمانی و اسماعیل افشار از نیروگاه شهید مفتاح همدان که در اجرای این تحقیق همکاری بسیار با نویسندگان داشتند، ابراز می‌دارند. همچنین وظیفه خود می‌دانند از مشاوره و راهنمایی‌های آقایان مرتضی ثانی خانی و میثم علیزاده که در به ثمر رسیدن این تحقیق نقش به سزایی داشتند، نیز کمال تشکر و قدردانی را داشته باشد.

۷- منابع

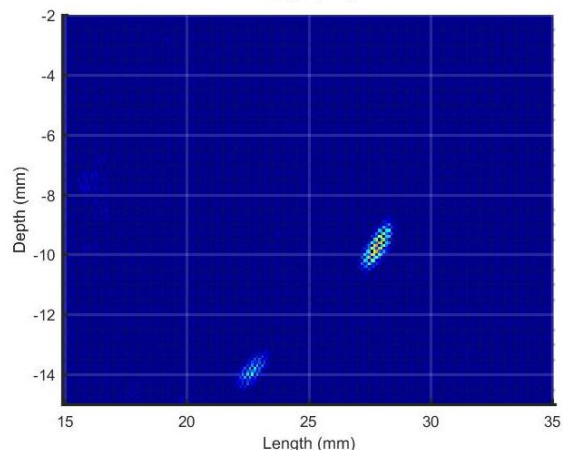
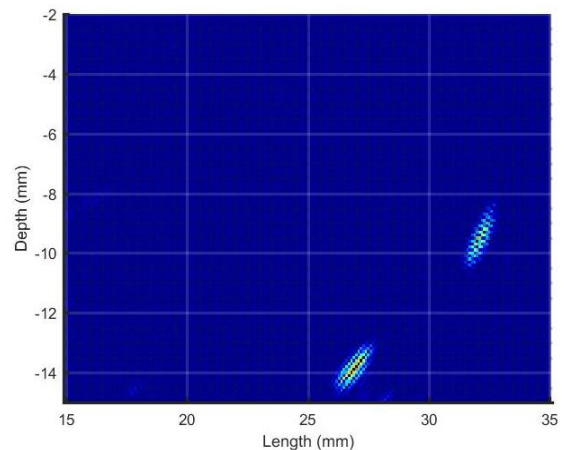
W. Du, Y. Zhao, R. Roy, S. Addepalli, and Lawrence Tinsley, "A review of miniaturised Nondestructive Testing technologies for in-situ inspections," *Procedia Manufacturing*, vol. 16, pp. 16-23, 2018.

I. Amenabar, A. Mendikute, A. López-Arriaza, M. Lizaranzu, and J. Aurrekoetxea, "Comparison and analysis of Nondestructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades," *Composites: Part B*, vol. 42, no. 5, pp. 1298-1305, 2011.

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.

حقیقی، و.، هنرور ف.، (۱۳۸۶)، "طراحی و ساخت روبشگر فراصوتی بمنظور تهیه تصاویر روبش B به کمک تکنیک TOFD"، هشتمین

و به ترتیب در عمق 9mm و 14mm قابل مشاهده هستند. در صورت چرخش نگهدارنده به دور لوله، تغییری در تصویر ایجاد نمی‌شود ولی اگر نگهدارنده در راستای محور لوله حرکت کند، به علت دور شدن تدریجی آرایه فراصوتی از محل حفره، تصویر حفره تضعیف می‌شود. این موضوع در شکل ۱۴ پایین نشان داده شده است که در آن مجموعه پروب و کفشک به میزان 5mm به حفره نزدیک شده است و در نتیجه در این حالت کاملاً بر روی حفره قرار گرفته است. با توجه به آنکه امواج با زاویه ۶۰ درجه وارد قطعه می‌شوند، در این حالت، برخورد کمی با حفره‌ای که کاملاً زیر قطعه وجود دارد، دارند و در نتیجه بازگشت‌ها ضعیف شده و منجر به تضعیف تصویر دریافتی می‌شود.



شکل ۱۴: بالا) تصویر دو حفره روی لوله، پایین) تصویر دو حفره مذکور پس از جابجایی مجموعه پروب و کفشک به میزان 5mm در راستای محور لوله و تضعیف تصویر حفره پایینی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و ساخت سیستم تصویربرداری فراصوتی که با موفقیت در پژوهشگاه نیرو ساخته شده است و به منظور بازرسی جوش لوله‌های واتروال بویلر به کار

L.W. Schmerr, "An ultrasonic system," *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Springer, pp. 1-13, 2016.

J. Zhang, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox, "Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance," *NDT&E International*, vol. 44, pp.361-368, 2011.

C. Holmes, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox, "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmitreceive array data for Nondestructive evaluation," *NDT & E International*, vol. 38, no. 8, pp. 701-711, 2005.

Y. Javadi, et al. "Ultrasonic phased array inspection of wire plus arc additive manufacture(WAAM) samples using conventional and total focusing method (TFM) imaging approaches," 57th The British Institute of Nondestructive Testing Annual Conference, East Midlands, 2018.

S.L. Crawford, M.T. Anderson, A.A. Diaz, M.R. Larche, M.S. Prowant, and A.D. Cinson, "Ultrasonic Evaluation and Imaging," *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection*, Springer, London, pp. 393-412, 2015.

کنفرانس ملی جوش و بازرسی ایران، تهران، انجمن جوشکاری و آزمایشهای غیرمخرب.

S. M. Sakhaei, "A decimated minimum variance beamformer applied to ultrasound Imaging," *Ultrasonics*, vol. 59, pp. 119-127, 2015.

M. Li, and G. Hayward, "Ultrasound Nondestructive Evaluation (NDE) Imaging with Transducer Arrays and Adaptive Processing," *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 42-54, 2012.

بکرانی، م.، حمیتی واقف، و.، (۱۳۹۷)، "طراحی و پیاده‌سازی شبیه-ساز انواع روش‌های تصویربرداری فراصوتی آزمون‌های غیرمخرب"، *مجله صوت و ارتعاش*، سال هفتم، شماره ۱۳.

بکرانی، م.، حمیتی واقف، و.، (۱۳۹۷)، "ارائه روش بهبودیافته تصویربرداری فراصوتی در بازرسی جوش"، پذیرفته شده در نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران.

Ziksari, M. S., and B. Mohammadzadeh-Asl, "Combined phase screen aberration correction and minimum variance beamforming in medical ultrasound," *Ultrasonics*, vol. 75, pp. 71-79, 2017.

Olympus, N.D.T, "Introduction to phased array ultrasonic technology applications. D Tech Guideline", Olympus NDT, 2004.

Implementation of an Imaging System Using Ultrasonic Phased Array

Vahid Hamiyati Vaghef¹, Mahdi Bekrani²,

¹Assistant professor, Niroom Research Institute; vvaghef@nri.ac.ir

² Assistant professor, Industrial University of Qom, bekrani@qut.ac.ir

Abstract

Ultrasonic imaging using phased arrays is a crucial Nondestructive test. In this paper, a phased array ultrasonic system is designed and implemented. It is implemented using integrated electronic circuits which results in higher image quality and lower noise, lower cost, lower weight and smaller dimensions with respect to current systems. The implemented system supports all phased array probes with standard connector up to 16 elements and its sampling rate is 40MHz and is capable of upgrading to higher number of elements and sampling frequencies. Imaging is implemented using total focusing method which results in higher quality images with lower noise in comparison to regular phased array images. Portability, development to use in all Nondestructive imaging tests and a lower price in comparison to current imaging systems, are major features of this product. The experimental results demonstrate that the system easily distinguishes between three holes with 0.8mm, 0.6mm and 0.3mm diameter.

Keywords: Ultrasonic imaging, Ultrasonic phased array, A-scan, B-scan, Total focusing method.