

طراحی و پیاده‌سازی شبیه‌ساز انواع روش‌های تصویربرداری فراصوتی

آزمون‌های غیرمخرب

مهدی بکرانی*
عضو هیات علمی
دانشگاه صنعتی قم
bekrani@qut.ac.ir

وحید حمیتی واقف
عضو هیات علمی
پژوهشگاه نیرو
vvaghef@nri.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۲

چکیده

روش‌های نوین آزمون غیرمخرب، مبتنی بر تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی می‌باشند. با توجه به تنوع روش‌های تصویربرداری، بررسی و مقایسه آنها تاکنون کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله ضمن معرفی انواع روش‌های تصویربرداری فراصوتی، شبیه‌ساز آزمون غیرمخرب معرفی می‌شود. این شبیه‌ساز علاوه بر پیاده‌سازی روش‌های تصویربرداری فراصوتی، به یک سخت افزار تصویربرداری فراصوتی ساخته شده در آزمایشگاه مرتبط می‌شود و امکان مقایسه روش‌های مختلف را از منظر کیفیت تصویر، میزان نویز زمینه، دقت تشخیص عیوب، سرعت اجرا و میزان پیچیدگی محاسباتی فراهم می‌آورد. قابلیت تنظیم کلیه پارامترهای مرتبط با تصویربرداری فراصوتی، امکان شکل‌دهی پرتو و آستانه‌گذاری، و همچنین سهولت استفاده از آن، از جمله ویژگی‌های مهم این شبیه‌ساز است. نتایج استخراج شده از این شبیه‌ساز در یک مطالعه موردی نشان می‌دهند میزان نویز زمینه تصویر در روش تمرکز کامل مبتنی بر شکل‌دهی پرتو برابر با $19/3 \text{ dB}$ است که نسبت به روش متعارف تمرکز کامل به میزان 14 dB بهبود یافته است. همچنین تابع شدت روشنایی حفره در روش تمرکز کامل^۱ (TFM) متعارف به میزان $2/2 \text{ dB}$ بهتر از روش مبتنی بر شکل‌دهی پرتو است که به معنای حساسیت بیشتر در تشخیص حفره‌ها و عیوب می‌باشد.

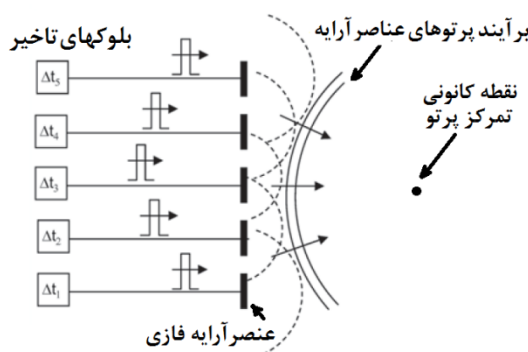
واژگان کلیدی: آرایه فازی فراصوتی، شبیه‌ساز تصویربرداری فراصوتی، آزمون غیرمخرب، شکل‌دهی پرتو، روبش.

۱. مقدمه

آنها انجام می‌شود. از کاربردهای رایج آزمون غیرمخرب می‌توان به بازرسی جوش، بررسی سلامت فیزیکی قطعات

آزمون‌های غیرمخرب در صنعت برای بررسی ساختمان داخلی قطعات و هندسه آنها بدون ایجاد تغییر و تصرف در

ارسالی، عناصر آرایه به صورتی تحریک می‌شوند که تمام پرتوها در نقطه‌ای به نام کانون متمرکز شوند و به همین جهت به این نوع آرایه‌ها، «آرایه فازی» اطلاق می‌شود (شکل ۱). بر اساس اینکه همه عناصر آرایه فعال شوند، و یا هر بار فقط تعدادی از آنها در عملیات ارسال و دریافت شرکت کنند، روش‌های مختلفی برای تحریک آنها وجود دارد [۴]. عناصر فعال در روش‌های صفحه‌ای و متمرکز، در هر روبش تغییر می‌کنند و بنابراین از مجموعه روبش‌ها با عناصر فعال متغیر، یک تصویر فراصوتی از ناحیه مورد نظر ساخته می‌شود. [۴]. در روبش قطاعی محدوده‌ای از «زوایا» جاروب می‌شود. در این نوع روبش، زاویه ارسال پرتو توسط تاخیرهای مشخص به عناصر آرایه فازی تعیین می‌شود [۳-۴]. بنابراین در روبش قطاعی، تصویر یک قطاع از قطعه مورد آزمون تشکیل می‌شود.



شکل ۱. نمایش یک آرایه فازی و نحوه تمرکز پرتو با اعمال

تاخیر [۱]

روش تمرکز کامل، روشی نوین در تصویربرداری فراصوتی است و کیفیت بهتری نسبت به روش‌های معرفی شده در بالا ارائه می‌دهد. در این روش، تمرکز به صورت محاسباتی حاصل می‌شود. برای این منظور در هر دوره ارسال-دریافت، یک عنصر آرایه، ارسال‌کننده پالس بوده و تمامی عناصر دریافت‌کننده خواهند بود و این روند برای تک تک عناصر آرایه تکرار می‌شود. سپس با اعمال تاخیرهای لازم، پرتوها در تمامی نقاط هدف متمرکز می‌شوند [۲].

در خط تولید، و بررسی خوردگی اشاره کرد. یکی از پرکاربردترین انواع آزمون‌های غیرمخرب، استفاده از امواج فراصوتی است. برخورد امواج ارسالی فراصوتی به موانع داخلی و دیواره‌های موجود در قطعه تحت آزمون، سبب بازتاب و تغییر شکل بخشی از امواج می‌شود که با دریافت آن می‌توان موانع و نقایص موجود در قطعه را تشخیص داد. آزمون فراصوتی بر اساس تعداد عنصرهای^۲ به کار رفته، به دو دسته «تکی» و «آرایه‌ای» تقسیم‌بندی می‌شود. در آزمون «تکی» تنها یک عنصر پیزوالکتریک تحریک شده و شکل موج پاسخ دریافتی از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد؛ در حالی که در آزمون «آرایه‌ای» مجموعه‌ای از عناصر مجاور یکدیگر، تشکیل آرایه فازی فراصوتی^۳ را می‌دهند [۱]. حضور آرایه‌ای از عناصر، ضمن آنکه امکان تصویربرداری از فضای داخل قطعات مختلف را پدید می‌آورد، انواع روش‌های تحریک/دریافت داده‌ها و تشکیل تصویر فراصوتی را نیز به وجود می‌آورد.

توانایی آرایه‌های فازی در ایجاد تصویر یکپارچه از قطعه مورد آزمون به صورت آنی یکی از ویژگی‌های مهم و برجسته آنها محسوب می‌شود. در مقایسه با روش رادیوگرافی به عنوان دیگر روش رایج تصویربرداری از داخل قطعات در آزمون‌های غیرمخرب، تصویربرداری فراصوتی با آرایه‌های فازی، منجر به حذف اشعه X شده و سرعت بازرسی و مستندسازی آزمون را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

بر اساس نحوه تحریک عناصر آرایه فازی و نحوه دریافت داده‌ها و تشکیل تصویر، تصویربرداری فراصوتی با روش‌های متعددی انجام می‌شود که هر یک مزایا و معایب خود را دارند. برخی از این روش‌ها عبارتند از روش روبش صفحه‌ای^۴ [۲]، روش روبش قطاعی^۵ [۳] و روش روبش متمرکز^۶ [۴]، روش تمرکز کامل (TFM) [۲-۶] و روش حداقل واریانس^۷ [۷]. در روبش صفحه‌ای، همه عناصر آرایه، هم‌زمان با یکدیگر تحریک می‌شوند و در نتیجه پرتوهای مسطح تشکیل می‌شود. اما در روبش متمرکز، با اعمال تاخیر به پالس‌های

از چالش‌های مهم در تصویربرداری فراصوتی در آزمون غیرمخرب، تفکیک صحیح بازتاب‌های واقعی ناشی از عیوب قطعه از بازتاب‌های کاذب ناشی از ساختار قطعه و پراکنده‌سازهای^۸ موجود در آن می‌باشد. وجود بازتاب‌های کاذب سبب ایجاد نویز زمینه در تصویر فراصوتی شده و تشخیص عیوب را دشوار و یا حتی غیرممکن می‌سازد. با توجه به ویژگی‌های بازتاب کاذب ناشی از پراکنده‌سازها و توزیع فرکانسی آن، روش‌های متعددی برای بهبود دقت آشکارسازی ارائه شده است.

با توجه به اینکه پراکنده‌سازها می‌توانند موجب جابه‌جایی طیف فرکانسی یک بازتاب فراصوتی پهن باند به سمت فرکانس‌های بالا شوند، در مرجع [۸] از پردازش ساختارشناسانه^۹ برای تخمین جابه‌جایی طیفی بازتاب ناشی از آنها استفاده شده است. استفاده از فیلتر وقتی مبتنی بر الگوریتم حداقل میانگین مربعات نرمالیزه با دو ورودی متشکل از سیگنال دریافتی دو عنصر مجاور هم در آرایه، در [۹] مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه میزان همبستگی نویز ناشی از بازتابنده‌های کاذب در این دو سیگنال کم‌تر از میزان همبستگی سیگنال‌های بازتاب واقعی است، از این خاصیت در مرجع [۹] برای شناسایی سیگنال‌های بازتاب واقعی از نویز و در نتیجه بهبود نسبت سیگنال به نویز استفاده شده است. همچنین فیلتر وقتی با ساختار فوق در حوزه تبدیل فوریه به منظور بهره‌گیری از ویژگی‌های طیفی سیگنال و بهبود بازتاب‌های واقعی در [۱۰] پیشنهاد شده است.

استفاده از تبدیل موجک گسسته برای تجزیه زمان-فرکانس سیگنال و ویژگی مقیاس‌بندی در حوزه موجک به منظور جداسازی بازتاب‌های نقص از بازتاب‌های کاذب دیگر فعالیت صورت گرفته در این زمینه است [۱۱]. با توجه به اینکه داده‌های مرتبط با بازتاب‌های کاذب عمدتاً در فرکانس‌های بالا موجود است، انتظار می‌رود داده‌های مربوط به بازتاب نقص‌ها اغلب در فرکانس‌های پایین قرار گرفته باشد. از این

ویژگی برای جداسازی داده‌های فراصوتی بازتاب‌های واقعی بهره‌گیری شده است [۱۱]. استفاده از توزیع زمان-فرکانس سیگنال‌ها از دیگر روش‌های پیشنهادی می‌باشد که در آن، نواحی شامل زیر مجموعه‌ای از مؤلفه‌ها بر مبنای مشخصه‌های فرکانسی بازتاب‌های نقص و کاذب به حوزه زمان نگاشت می‌شود و سپس یک مرحله پردازش پسین با کمک آمارگان مرتبه (حداقل‌سازی، میانه و حداکثرسازی) برای برجسته‌سازی بازتاب‌های نقص انجام می‌شود [۱۲].

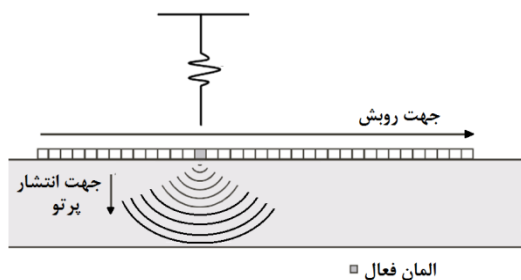
در مرجع [۱۳] به منظور تفکیک نمونه‌های سیگنال‌های بازتاب نقص و نویز، هر سیگنال دریافتی روبش به بخش‌های کوچک بخش‌بندی می‌شود و هر یک از این بخش‌ها با تکنیک بازشناسی الگو دسته‌بندی شده و بر اساس آن بازتابنده واقعی از نویز تشخیص داده می‌شود. برای این منظور اطلاعات طیفی هر بخش به وسیله تبدیل فوریه کوتاه دوره^{۱۰} استخراج شده و برای دسته‌بندی به کار می‌رود. استفاده از شبکه عصبی روشی دیگر است که بر اساس آن یک شبکه عصبی پیشخور^{۱۱} سه لایه برای آشکارسازی بازتاب‌های نقص استفاده شده است [۱۴]. در این روش سیگنال ورودی ابتدا به وسیله فیلترهای میان‌گذر به باندهای مختلف فرکانسی تقسیم‌بندی می‌شود و سیگنال‌های زیرباندی^{۱۲} حاصل شده، به گره‌های ورودی شبکه عصبی اعمال می‌شوند. شبکه عصبی برای ممانعت از بازتاب‌های کاذب و حفظ یکپارچگی بازتاب‌های نقص‌ها بر مبنای آمارگان و تغییرات سیگنال بازتاب کاذب آموزش می‌بیند. خروجی شبکه عصبی پس از طی فرایند یادگیری، مکان بازتاب‌های نقص را از بین بازتاب‌های پراکنده‌سازها و بازتاب‌های واقعی مشخص می‌کند.

روش‌هایی نیز بر مبنای شکل‌دهی پرتو مبتنی بر تاخیر، وزن‌دهی و جمع برای تصویربرداری فراصوتی پیشنهاد شده است که بر مبنای نظریه حداقل واریانس سیگنال‌ها، وزن‌دهی می‌شوند [۷، ۱۵]. مقادیر وزن‌ها با استفاده از تحلیل آماری نمونه‌های داده بر مبنای نظریه حداقل واریانس حاصل

که دارای XY نقطه است که X تعداد نقاط افقی یا زاویه‌ای و Y تعداد نقاط عمودی یا شعاعی می‌باشد.

۲-۱. روش تمرکز روزنه مصنوعی (SAFT)

روش تمرکز روزنه مصنوعی جزء اولین روش‌های استفاده شده در آزمون غیرمخرب به صورت تک عنصری بوده و امروزه در آرایه‌های فازی نیز توسعه یافته است. این روش با روبش تنها یک عنصر پیزوالکتریک در طول پروب اجرا شده و تصویر ناحیه هدف ایجاد می‌شود [۱۹]. بدین منظور، ناحیه مد نظر برای تصویربرداری به صورت دو بعدی مش‌بندی می‌شود و سپس زمان ارسال و دریافت سیگنال از «هر عنصر» آرایه به «هر نقطه» شبکه محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر در هر بار تحریک مجموعه، یک عنصر تحریک و بازتاب آن از یک نقطه مش مذکور، مد نظر قرار می‌گیرد. شکل ۲ نحوه ارسال پرتو در روبش تمرکز روزنه مصنوعی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. پرتو ارسالی در روش تمرکز روزنه مصنوعی

نحوه محاسبه روشنایی هر نقطه از تصویر در ادامه تشریح می‌شود. فاصله انتشار از عنصر ارسال کننده تا نقطه هدف با مختصات (X_{ref}, Z_{ref}) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + z_{ref}^2} \quad (1)$$

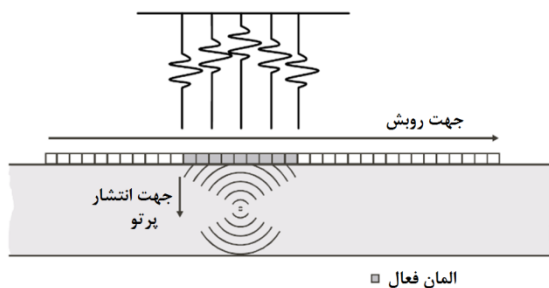
که در آن Z_{ref} عمق روبش و X_{ref} طول روبش است و x_i مختصات طولی عنصر i ام فرستنده می‌باشد. با در نظر گرفتن $h_i(k)$ به عنوان سیگنال دریافت شده توسط عنصر i ام، برای یک آرایه خطی با N عنصر، شدت روشنایی تصویر در

می‌شوند و سپس روی سیگنال‌های عناصر آرایه اعمال می‌شوند. این عمل سبب کاهش قابل توجه نویز و بهبود تفکیک‌پذیری تصویر می‌گردد [۷]. با توجه به مؤثر بودن این روش‌ها در حذف تداخل و نویز، به پژوهش‌های حوزه فراصوتی پزشکی نیز توسعه یافته‌اند [۱۶-۱۸].
علیرغم توسعه قابل توجه روش‌های تصویربرداری فراصوتی، مقایسه مناسبی میان انواع این روش‌ها صورت نگرفته است. در این مقاله با استفاده از سیستم اخذ تصاویر فراصوتی مبتنی بر آرایه فازی ساخته شده در پژوهشگاه نیرو، یک شبیه‌ساز طراحی و پیاده‌سازی شده است که امکان به‌کارگیری و مقایسه انواع روش‌های تصویربرداری را ایجاد می‌کند. جهت مقایسه میان روش‌های مختلف، معیارها و شاخص‌هایی در این مقاله ارائه می‌شوند که با استفاده از آنها امکان مقایسه روش‌های مختلف تصویربرداری از منظر کیفیت تصویر ناحیه روبش، میزان نویز زمینه و دقت تشخیص عیوب قطعه آزمایشی فراهم می‌شود.

ادامه مطالب این مقاله به ترتیب زیر ارائه شده است: ابتدا در بخش ۲ روش‌های روبش در تصویربرداری فراصوتی تشریح می‌شوند و سپس در بخش ۳ تکنیک‌های وزن‌دهی و آستانه‌گذاری و استفاده از آنها در روش‌های تصویربرداری فراصوتی بررسی می‌شود. در بخش ۴ شبیه‌ساز طراحی شده، ارائه شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های عملی بررسی و مقایسه می‌گردد. نهایتاً در بخش ۶ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه می‌شود.

۲. بررسی روش‌های تصویربرداری فراصوتی

در ادامه برخی از روش‌های متداول تصویربرداری فراصوتی بررسی می‌شوند. در کلیه روش‌های ارائه شده فرض بر آن است که پروب آرایه فازی دارای N عنصر است و ناحیه مد نظر برای تصویربرداری به صورت مستطیل یا قطاعی است



شکل ۳. پرتو متمرکز در روش B-Scan متمرکز [۳]

مطابق شکل ۳ در هر روبش فقط تعداد مشخصی از عنصرها به عنوان فرستنده و گیرنده فعال هستند که اصطلاحاً پنجره^{۱۵} نامیده می‌شوند. سپس پنجره در طول آرایه جابه‌جا می‌شود و سبب می‌شود تفکیک عرضی در تصویر B-scan نهایی ثابت و برابر گام عنصر^{۱۶} باشد. بنابراین این روش مشابه روش تمرکز روزنه مصنوعی است، با این تفاوت که در اینجا تعدادی از عنصرها در هر بار روبش فعال می‌شوند. دامنه هر نقطه مقابل پنجره با جمع کردن سهم هر زوج عنصر فرستنده-گیرنده محاسبه می‌گردد. برای کنترل ناحیه کانونی از روش تمرکز عمقی پویا^{۱۷} (DDF) توسط عنصرهای گیرنده استفاده می‌شود [۳]. این روش به صورت پویا فاصله کانونی را در سیگنال‌های بازگشتی به پروب آرایه فازی با استفاده از اعمال تاخیرهای اضافی تغییر می‌دهد. DDF به‌طور قابل توجهی میدان عمقی و نسبت سیگنال به نویز را بهبود می‌دهد [۲۴]. اما از طرفی قدرت تفکیک ناحیه کانونی در نقاطی که دور از کانون هستند، نسبت به نقطه کانونی و نقاط مجاور آن، کاهش می‌یابد. با فرض این که نقطه هدف در مختصات (x_{ref}, z_{ref}) باشد، فاصله انتشار از ارسال‌کننده تا بازتابنده و سپس تا عنصر گیرنده برای هر زوج فرستنده-گیرنده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + z_{ref}^2} + \sqrt{(x_j - x_{ref})^2 + z_{ref}^2} \quad (3)$$

هر نقطه تصویر با مختصات (x_{ref}, z_{ref}) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

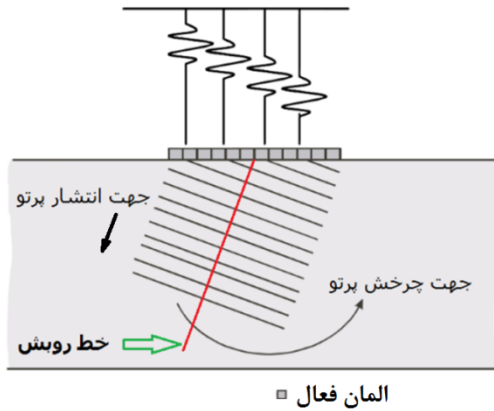
$$I(x_{ref}, z_{ref}) = \left| \sum_{i=1}^N h_i \left(\frac{2d_i}{c} \right) \right| \quad (2)$$

در این رابطه c سرعت موج فراصوت می‌باشد. سیگنال $h_i(k)$ ناشی از ارسال پالس از عنصر i ام و سپس دریافت سیگنال توسط همان عنصر در اثر بازتاب از ماده مورد آزمایش می‌باشد. مطابق رابطه ۲ عملیات جمع روی سیگنال‌های دریافتی تمام N عنصر اعمال می‌شود. فرآیند فوق برای هر نقطه تصویر تکرار می‌شود و بنابراین در مجموع XY بار رابطه ۲ باید تکرار شود.

یکی از مزایای منحصر به فرد روش روزنه مصنوعی این است که با توجه به امکان جابه‌جایی فیزیکی عنصرها، عرض روزنه ساخته شده بسیار بیشتر از عرض حقیقی آرایه می‌تواند باشد، بنابراین این روش به‌طور قابل توجهی تفکیک عرضی^{۱۴} را بهبود می‌دهد [۲۰-۲۱]. همچنین به دلیل دریافت داده‌های فراصوتی از مکان‌های متعدد، نسبت سیگنال به نویز را نیز بهبود می‌بخشد [۲۲]. مزیت دیگر این روش، حجم حافظه مصرفی مورد نیاز آن برای نگهداری اطلاعات است که مستقل از X و Y بوده و با N^2 متناسب است.

۲-۲. روش B-scan متمرکز

روش B-scan متمرکز روشی متداول در تشخیص عیوب می‌باشد و در منابع مختلف به آن اشاره شده است [۳-۲۳، ۴-۲۴] شکل ۳ نحوه تمرکز پرتو در تشکیل تصویر B-scan متمرکز را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۴. روبش قطاعی [۳]

به مجموعه پیکسل‌هایی از تصویر که در راستای یک خط مستقیم از مرکز آرایه تا شعاع جاروب مورد نظر در قطعه با زاویه‌ای یکسان باشند، «خط روبش» اطلاق می‌شود [۳]. بنابراین برای هر زاویه، یک «خط روبش» در تصویر نهایی وجود خواهد داشت (شکل ۴). برای محاسبه هر خط روبش در تصویر، سیگنال‌ها با تاخیرهای زمانی مناسب جمع می‌شوند تا جهت پرتو آرایه را در زاویه مطلوب نمایش دهند. شدت روشنایی تصویر روبش قطاعی نهایی $I(r, \theta)$ در مختصات قطبی با درون‌یابی خطی سیگنال‌های زمانی با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$I(r, \theta) = \left| \sum_{i=1}^N h_i \left(\frac{2r + x_i \sin \theta + x_j \sin \theta}{c} \right) \right| \quad (5)$$

در این رابطه r فاصله انتشار در جهت پرتو اندازه‌گیری شده از مرکز آرایه و θ زاویه ارسالی است [۲۹]. تعداد نقاط مش‌بندی شده در راستای زاویه‌ای برابر با تعداد تکرار رابطه ۵، کل تصویر را به دست می‌آید. با هر بار اجرای (۵)، N عنصر تحریک می‌شوند، بنابراین هر بار روبش نیاز به N بار جمع نمونه‌های تاخیر یافته دارد و حجم حافظه مصرفی نیز برابر N است.

که در آن x_i و x_j نیز به ترتیب مختصات طولی عنصرهای فرستنده و گیرنده می‌باشند. برای شبیه‌سازی انتشار امواج لازم است این میزان تاخیر به پالس ارسالی افزوده شود. بنابراین شدت روشنایی تصویر B-scan متمرکز با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$I(x_{\text{ref}}, z_{\text{ref}}) = \left| \sum_{i=M_1}^{M_2} \sum_{j=M_1}^{M_2} h_i \left(\frac{d_{i,j}}{c} \right) \right|, x_{\text{ref}} \in X \quad (4)$$

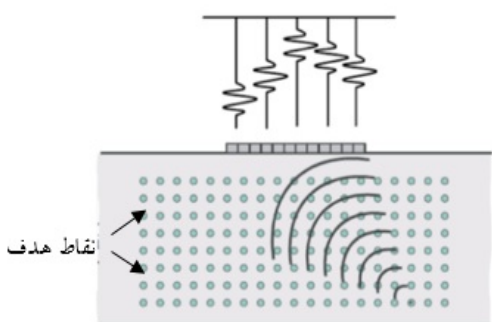
در این رابطه $h_i(k)$ سیگنال دریافتی عنصر i ام و X طول ناحیه کانونی حول نقطه کانونی تمرکز پرتو را نشان می‌دهد. همچنین M_1 و M_2 به ترتیب شماره اولین و آخرین عنصر فعال پنجره است. با تغییر مقادیر M_1 و M_2 نقطه کانونی جابه‌جا می‌شود و در نتیجه X نیز جابه‌جا می‌شود و تصویر ایجاد می‌گردد. اگر تعداد عنصرهای فعال در هر بار روبش برابر $M_2 - M_1 = N_d$ باشد، آنگاه:

رابطه ۴ باید $(N - N_d + 1)Y$ بار تکرار شود که به ظاهر کم‌تر از روش SAFT است ولی در عمل به دلیل آنکه رابطه ۴ خود دارای N_d^2 عمل جمع می‌باشد، عملاً بر اساس مقدار N_d ممکن است حجم محاسبات بیشتر از روش SAFT شود. حافظه مصرفی این روش نیز با N_d^2 متناسب است.

۲-۳. روبش B-scan قطاعی (S-scan)

رویش S-scan از روش‌های بسیار رایج برای تصویربرداری فراصوتی است [۲۵-۲۹]. روبش B-scan قطاعی نسبت به روش‌های B-scan متمرکز و نامتمرکز متفاوت است، زیرا در این روش از تمامی عنصرها برای چرخش پرتو در طول روبش زاویه‌ای استفاده می‌شود. شکل ۴ چگونگی روبش را نشان می‌دهد [۳].

در این رابطه $h_{i,j}(k)$ سیگنال ارسال شده توسط عنصر N ام و دریافت شده توسط عنصر N ام پس از بازتاب از حفره‌ها یا عیوب قطعه مورد آزمون می‌باشد. پارامتر $d_{i,j}$ فاصله انتشار از عنصر ارسال‌کننده تا بازتابنده و سپس تا عنصر گیرنده برای هر زوج فرستنده-گیرنده طبق رابطه ۳ می‌باشد. علامت جمع در رابطه ۶ روی تمام زوج‌های فرستنده-گیرنده انجام می‌شود و تعداد آنها برابر با N^2 است. بنابراین در این روش از حداکثر اطلاعات موجود برای هر نقطه هدف استفاده می‌شود [۳].



شکل ۵. نحوه تمرکز پرتو در روش TFM [۳]

در هر دو روش تمرکز روزنه مصنوعی و تمرکز کامل، پرتو متمرکز می‌شود، اما با این تفاوت که روش تمرکز کامل از اطلاعات تمام عنصرها به صورت فرستنده-گیرنده استفاده می‌کند، ولی روش تمرکز روزنه مصنوعی فقط از اطلاعات هر تک عنصر به صورتی که خودش هم فرستنده و هم گیرنده است، استفاده می‌کند. به عبارت دیگر، حجم محاسبات تمرکز کامل از مرتبه N^2 است، اما برای روش تمرکز روزنه مصنوعی از مرتبه N می‌باشد [۲۰]. در جدول ۱ روش‌های روبش فوق‌الذکر با هم مقایسه شده است. در این جدول، N تعداد عنصرهای آرایه فازی بوده و $N_d = M_2 - M_1 + 1$ تعداد عنصرهای فعال در پنجره را برای روش B-scan متمرکز نشان می‌دهد. همچنین تعداد خطوط روبش برای روش B-scan قطاعی برابر N_s تعریف شده است.

رویش قطاعی با پرتو متمرکز نیز امروزه استفاده می‌شود که روش پیشرفته‌تری است [۳۰]. در این روش تاخیر زمانی سیگنال‌ها برای هر زاویه روبش به گونه‌ای محاسبه می‌شود که تمام پرتوها در یک نقطه با شعاع ثابت متمرکز شوند، درحالی‌که در روش نامتمرکز برای هر زاویه روبش مشخص، تاخیر زمانی از یک عنصر به عنصر مجاور عدد ثابتی است و سبب می‌شود پرتو در راستای ثابتی منتشر شود. دقت تصویر در روش نامتمرکز در تمامی نقاط خط روبش یکسان است ولی در روش متمرکز، دقت تصویر در حوالی نقطه کانونی روی خط روبش بهتر است. حجم محاسبات و حافظه مصرفی این روش با روش نامتمرکز تفاوتی ندارد، لیکن در صورتی که روبش متمرکز برای فواصل کانونی مختلفی اجرا شود حجم محاسبات و حافظه مصرفی آن متناسب با تعداد فواصل کانونی افزایش می‌یابد.

۲-۴. روش تمرکز کامل (TFM)

در روش TFM (۲-۶-۲۶-۲۹) با تحریک یکایک عنصرها به صورت مجزا و دریافت اطلاعات همه آنها، بدون اعمال تاخیر، کلیه اطلاعات موجود در ناحیه روبش اخذ می‌شود. بنابراین در این روش تمرکز به صورت مستقیم صورت نگرفته بلکه با استفاده از معادله ریاضی که در ادامه معرفی می‌شود، اعمال می‌شود. برای تمرکز پرتو از اعمال تاخیرهای متناسب در سیگنال دریافتی هر یک از عنصرهای آرایه فازی استفاده می‌شود، به صورتی که تمام پرتوها در یک زمان به نقطه هدف برسند و این موضوع در معادله ریاضی مرتبط مستتر است. بنابراین پرتو در هر نقطه از ناحیه هدف مطابق شکل ۵ متمرکز می‌شود. سپس شدت روشنایی تصویر در هر نقطه هدف با مختصات (x_{ref}, z_{ref}) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I(x_{ref}, z_{ref}) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{i,j} \left(\frac{d_{i,j}}{c} \right) \right| \quad (6)$$

۳. وزن‌دهی و آستانه‌گذاری در روش‌های تصویربرداری فراصوتی

وزن‌دهی به سیگنال‌های دریافتی عنصرهای آرایه، برای شکل‌دهی وزن‌دار پرتو فراصوتی استفاده می‌شود [۷]. مقادیر وزن‌ها با استفاده از تحلیل آماری نمونه‌های داده بر مبنای نظریه حداقل واریانس حاصل می‌شوند. به کارگیری این تکنیک در روش تمرکز کامل سبب کاهش نویز در مقایسه با روش متعارف گردیده و در نتیجه تفکیک‌پذیری تصویر بهبود می‌یابد. البته این مزیت در قبال حجم محاسباتی بیشتری به دست می‌آید [۷]. در ادامه این قسمت نحوه وزن‌دهی تشریح می‌شود.

برای توصیف روش وزن‌دهی فرض می‌شود پس از اعمال تاخیرهای مورد نظر به سیگنال‌های ارسالی و دریافتی بر اساس روش روبش و ناحیه روبش مورد نظر، بردار خروجی تاخیر یافته زمانی برای عنصرهای فعال آرایه فازی به صورت رابطه ۷ باشد:

$$\mathbf{h}(k) = [\tilde{h}_1(k), \tilde{h}_2(k), \dots, \tilde{h}_M(k)]^T \quad (7)$$

که در آن $\tilde{h}_i(k)$ عبارتست از نمونه k ام سیگنال تاخیر یافته خروجی مربوط به i امین عنصر فعال آرایه فازی. بنابراین در روش B-scan متمرکز $M=N_d$ بوده و در سایر روش‌های مورد بررسی $M=N$ می‌باشد. در این صورت حاصل جمع

درایه‌های $\mathbf{h}(k)$ منتهی به شکل‌دهی پرتو فراصوتی می‌شود. جمع وزن‌دار این درایه‌ها منتهی به شکل‌دهی وزن‌دار پرتو به صورت:

$$g(k) = \mathbf{w}^T(k) \mathbf{h}(k) \quad (8)$$

می‌شود، که در آن:

$$\mathbf{w}(k) = [w_1(k), w_2(k), \dots, w_M(k)]^T \quad (9)$$

بردار وزن می‌باشد که در روش حداقل واریانس از رابطه زیر بدست می‌آید [۷]:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}}(k) = \frac{\mathbf{R}^{-1}(k) \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{R}^{-1}(k) \mathbf{a}} \quad (10)$$

که در آن $\mathbf{R}(k)$ تابع خودهمبستگی نمونه‌های خروجی عنصرهای آرایه فازی به صورت رابطه ۱۱ می‌باشد:

$$\mathbf{R}(k) = E \{ \mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k) \} \quad (11)$$

نماد $E\{\cdot\}$ نشان‌دهنده میانگین‌گیری آماری است؛ همچنین در رابطه ۱۰، \mathbf{a} بردار ستونی $N \times 1$ شامل مقادیر واحد است، یعنی:

$$\mathbf{a} = [1, 1, \dots, 1]^T_N \quad (12)$$

جدول ۱. بررسی و مقایسه ویژگی‌های روش‌های مختلف روبش فراصوتی و تشکیل تصویر

روش	تعداد دفعات ارسال پالس (غیرهمزمان)	تعداد عنصرهای ارسال‌کننده در هر بار ارسال	تعداد دفعات دریافت پالس (غیرهمزمان)	تعداد عنصرهای دریافت‌کننده در هر دریافت	حجم پس‌پردازش (میزان عملیات جمع-تاخیر روی سیگنال‌های A-scan برای تشکیل هر نقطه تصویر)
B-scan متمرکز	$N - N_d + 1$	N_d	$N - N_d + 1$	N_d	N_d
B-scan قطاعی	N_s	N	N_s	N	N
تمرکز کامل	N	۱	N^2	N	N^2
تمرکز روزنه-مصنوعی	N	۱	N	۱	N

در روش‌های روبش وزن‌دهی شده، از وزن‌دهی سیگنال‌های دریافت شده توسط هر عنصر از رابطه ۱۰ استفاده می‌کنند. بر این اساس روش SAFT وزن‌دار^{۱۸} (WSAFT)، روش B-scan وزن‌دار^{۱۹} (WB-scan)، روش S-scan وزن‌دار^{۲۰} (WS-scan)، و روش TFM وزن‌دار^{۲۱} (WTFM) حاصل می‌شود. همچنین به منظور آستانه‌گذاری روی سیگنال دریافت شده از عنصر i ام به صورت رابطه ۱۳ آستانه‌گذاری شده و برای تشکیل تصویر استفاده می‌شود:

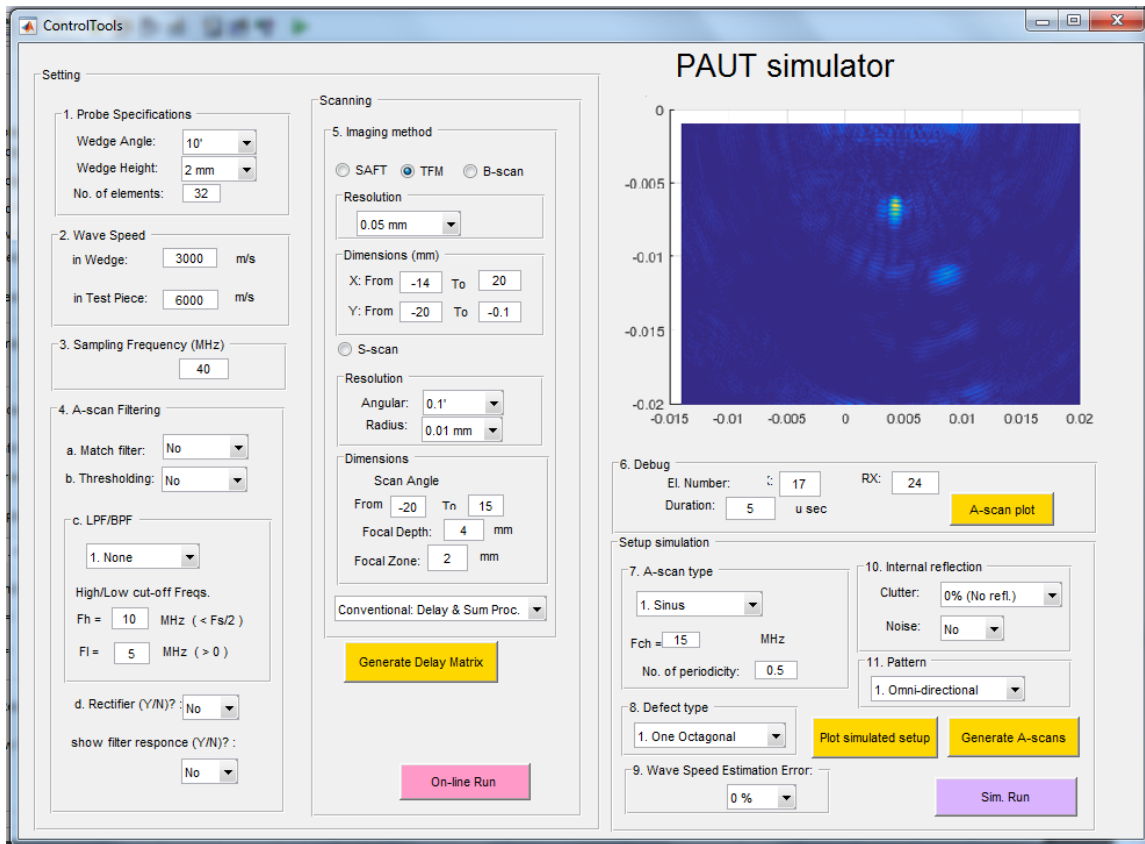
$$\tilde{h}_i(k) = \begin{cases} h_i(k), & |h_i(k)| \geq T \\ 0, & |h_i(k)| < T \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

که در آن پارامتر T عدد ثابت مثبتی است که آستانه برش سیگنال‌های $h_i(k)$ می‌باشد. بنابراین روش‌های روبش TFM آستانه‌گذاری شده^{۲۲} (CTFM)، روش SAFT آستانه‌گذاری شده^{۲۳} (CSAFT) و روش قطاعی مبتنی بر آستانه‌گذاری^{۲۴} (CS-scan) از سیگنال‌های $\tilde{h}_i(k)$ در رابطه ۱۳ برای محاسبه شدت روشنایی استفاده می‌کنند. آستانه‌گذاری با صفر کردن مقادیر دامنه‌های کم‌تر از سطح آستانه، به کاهش نویز موجود در ساختار ناهمگن و در نتیجه بهبود آشکارسازی حفره‌ها و نقص‌های واقعی در قطعه آزمون کمک می‌کند. انتخاب آستانه باید به صورتی انجام شود که در عین حذف نویز زمینه، جزئیات تصویر حفظ گردد. نحوه

انتخاب آستانه را می‌توان به صورت تجربی با ملاحظه میزان حذف نویز زمینه و کیفیت تصویر نقص‌های استاندارد در بلوک‌های آزمون انجام داد.

۴. شبیه‌ساز روش‌های روبش فراصوتی

شبیه‌ساز طراحی شده، دارای یک واسطه گرافیکی است که با استفاده از نرم‌افزار متلب^{۲۵} پیاده‌سازی شده است (شکل ۶) و همچنین یک بخش سخت‌افزاری که برای ارسال و دریافت داده‌ها در آزمون عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۷). قابلیت‌های این شبیه‌ساز به این شرح است: (۱) انتخاب زاویه و ارتفاع آرایه فازی و تعداد عنصرهای آن، (۲) سرعت موج در کفشک و قطعه آزمون، (۳) فرکانس نمونه‌برداری، (۴) امکان فیلتر کردن سیگنال‌ها و آستانه‌گذاری و فیلترینگ تطبیقی برای کاهش اثرات نویز، (۵) انتخاب قدرت تفکیک تصویر خروجی و ناحیه روبش، (۶) امکان بررسی سیگنال‌های دریافتی برای اشکال‌زدایی، (۷) نوع سیگنال ارسالی و فرکانس آن، (۸) هندسه و چینش عیوب در قطعه (در حالت شبیه‌سازی)، (۹) درصد خطای تخمین سرعت موج در کفشک و قطعه، (۱۰) افزودن نویز به عنوان اثرات غیرایده‌آل و ناهمگن قطعه به سیگنال‌های دریافتی (در حالت شبیه‌سازی)، و (۱۱) انتخاب الگوی پرتو عنصرها.



شکل ۶. واسط گرافیکی مورد استفاده برای آزمون روش‌های مختلف روبش.



شکل ۷. سخت‌افزار مورد استفاده ساخت پژوهشگاه نیرو

۵. اجرای شبیه‌سازی

این شبیه‌ساز برای تشکیل تصویر با استفاده از هر یک از روش‌های مختلف تصویربرداری، به دو صورت داده‌های ورودی را تهیه می‌کند.

در روش اول که در این مقاله از آن با عنوان «شبیه‌سازی شده» نام برده شده است، داده‌های مذکور توسط شبیه‌ساز تولید می‌شوند؛ در حالی که در روش دوم، داده‌ها مستقیماً از سیستم سخت‌افزاری ساخته شده، دریافت می‌شوند و تحت عنوان «آزمون عملی» به کار گرفته می‌شود.

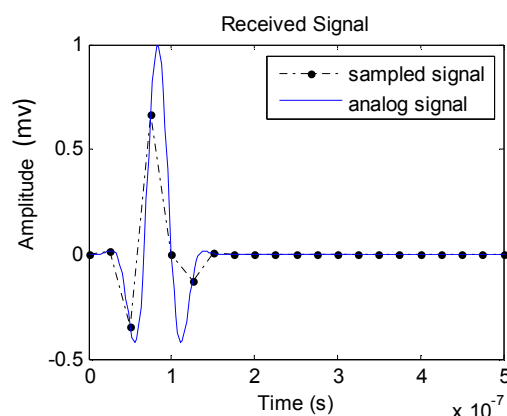
در هر دو حالت، تاخیرهای مورد نیاز جهت تشکیل تصویر بر اساس هندسه به کار گرفته شده و تنظیمات شبیه‌ساز، محاسبه می‌شوند.

۵-۱. مفروضات حالت شبیه‌سازی شده

در این حالت، مفروضاتی مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته می‌شود. شکل موج بازگشتی از یک نقطه بازتابنده بدون در نظر گرفتن تاخیر و تضعیف به همراه سیگنال نمونه‌برداری شده برای یک جفت عنصر دلخواه نیز در شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول ۲. مفروضات مورد استفاده در شبیه‌سازی

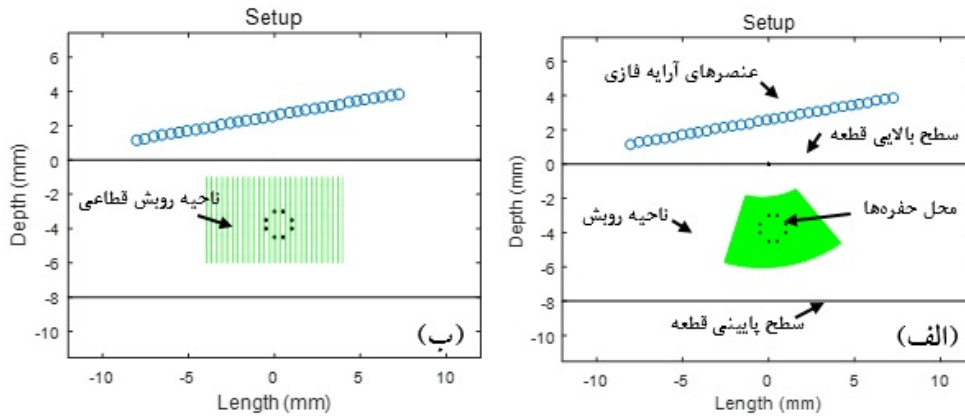
جنس قطعه	فولاد
ارتفاع قطعه (mm)	۸
تعداد عنصرهای آرایه	۳۲
راستای انتشار موج آرایه	چند سوپه ^{۲۶}
گام عنصرها (mm)	۰/۵
نوع سیگنال دریافتی	میراشونده سینوسی با ۲/۵ دوره تناوب
فرکانس پروب (MHz)	۱۵
نرخ نمونه‌برداری (MHz)	۴۰
سرعت صوت در فولاد (m/s)	۵۸۰۰
جنس کفشک	رکسولایت ^{۲۷}
سرعت صوت در کفشک (m/s)	۲۳۵۰
قدرت تفکیک تصویر (mm)	۰/۰۵



شکل ۸. شکل موج فرضی یک بازتاب به صورت سیگنال سینوسی میراشونده همراه با سیگنال نمونه‌برداری شده.

وضعیت آزمایشی نیز به صورت شکل ۹ است. در این شکل زاویه کفشک برابر با ۱۵ درجه و ارتفاع آن تا نزدیک‌ترین عنصر به قطعه برابر با ۵ mm است. حد فاصل بین آرایه فازی و قطعه آزمون، کفشک پروب قرار دارد.

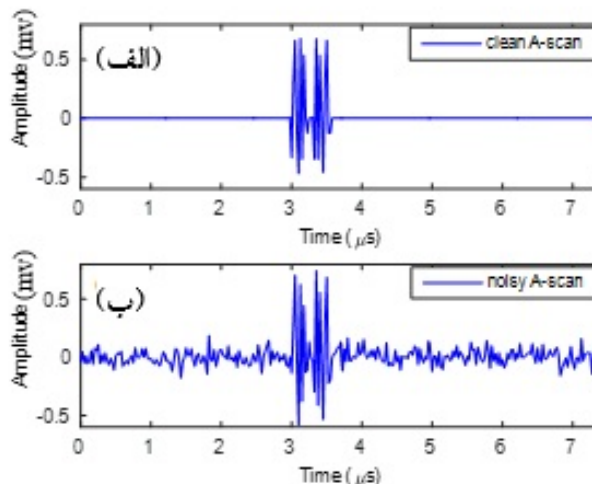
با توجه به سرعت موج و فرکانس مرکزی سیگنال اعمالی، طول موج سیگنال در قطعه فولادی برابر $\lambda = c/f = 0.39$ mm می‌شود و حداکثر قدرت تفکیک بین دو نقطه بازتاب‌کننده برابر با 0.39 mm خواهد شد.



شکل ۹. وضعیت آزمایشی مورد نظر برای الف) روش‌های روبش غیرقطاعی ب) روش‌های روبش قطاعی

برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف، نواحی بازتابنده در قطعه به صورت نقاطی با حداقل فاصله 0.5 mm در نظر گرفته می‌شود (شکل ۹) که اندکی بیشتر از طول موج است و بنابراین اجازه تفکیک آنها را در تصویر می‌دهد. ناحیه روبش برای روش‌های روبش غیرقطاعی به صورت شکل ۹-الف و برای روش‌های قطاعی به صورت شکل ۹-ب

در نظر گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی شرایط واقعی، به سیگنال‌های دریافتی نویز سفید گوسی با واریانس ۱۰٪ واریانس موج بازگشتی اضافه شده است. شکل ۱۰ سیگنال دریافتی از عنصر شماره ۱۰ را پس از ارسال پالس از عنصر شماره ۳ نشان می‌دهد. شکل الف) بدون اعمال نویز و شکل ب) پس از اعمال نویز میباشد.



شکل ۱۰. الف) سیگنال دریافتی عنصر دهم که از عنصر سوم ارسال شده است، ب) همان سیگنال، آغشته به نویز ایستان گوسی سفید

۵-۲. بحث و مقایسه روش‌های تصویربرداری

شکل ۱۱ تصاویر به دست آمده از اعمال روش‌های استاندارد (ستون سمت چپ)، نسخه وزن‌دهی شده (ستون وسط) و نسخه آستانه‌گذاری شده را نشان می‌دهد. ردیف اول شکل‌ها روش روبش TFM، ردیف دوم روش SAFT، ردیف سوم روش B-scan و ردیف چهارم روش روبش S-scan را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، تصویر حاصل از روش TFM متعارف (شکل ۱۱-الف) محل تمامی حفره‌ها را نشان می‌دهد، اما قدرت تفکیک پایینی داشته و علاوه بر آن در نواحی که حفره وجود ندارد تصویر دارای نویز زمینه واضحی است که می‌تواند باعث شود به اشتباه، حفره یا عیوب اضافی تعبیر شود.

از سوی دیگر، در شکل ۱۱-ب تصویر حاصل از روش WTFM نویز زمینه را به خوبی کاهش می‌دهد، اما وضوح تصویر حفره‌ها و در نتیجه دقت تفکیک حفره‌ها کمتر شده است. در شکل ۱۱-ج روش CTFM با سطح آستانه برابر با ۱۵٪ را نشان می‌دهد و در آن شدت‌های روشنایی کمتر از ۱۵٪ شدت روشنایی ماکزیمم صفر شده‌اند. در این حالت مشاهده می‌شود که نویز زمینه به خوبی کاهش می‌یابد، اما نویز در اطراف پیک‌ها زیاد بوده و ممکن است برخی پیک‌ها وضوح کافی برای تمایز از یکدیگر را نداشته باشند. همچنین ممکن است پیک‌های با دامنه کمتر از آستانه در این روش نادیده گرفته شوند.

شکل ۱۱ ردیف دوم، تصاویر به دست آمده از اعمال روش‌های SAFT متعارف، WSAFT، و CSAFT را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، تصویر حاصل از روش SAFT متعارف (شکل ۱۱-د) نیز محل تمامی حفره‌ها را نشان می‌دهد، اما قدرت تفکیک پایینی دارد.

همچنین به دلیل نویز زمینه زیاد در این روش، روشنایی تصویر در نواحی فاقد حفره، می‌تواند منجر به عدم آشکارسازی نقص‌های ریز شده و یا باعث شود برخی نقاط

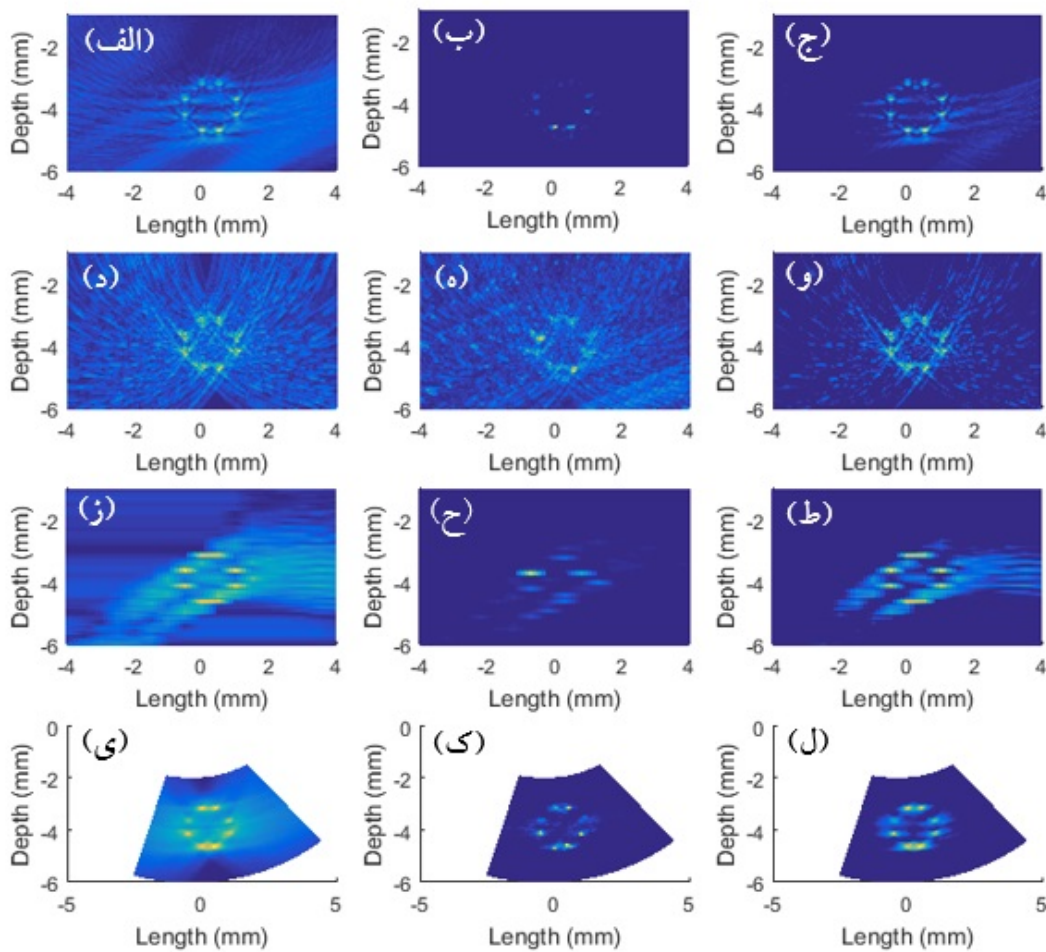
به اشتباه به عنوان حفره اضافی یا نقص اضافی تعبیر شود. در مقایسه با روش TFM، روش SAFT دارای نویز زمینه بیشتری می‌باشد که دلیل آن عدم استفاده از تمامی اطلاعات موجود در عنصرهای آرایه می‌باشد. روش WSAFT (شکل ۱۱-ه) برخلاف روش WTFM نمی‌تواند نویز زمینه را به طور مؤثری کاهش دهد و میزان وضوح تصویر نیز کم است. تصویر حاصل از روش CSAFT (شکل ۱۱-و) به خوبی نویز زمینه را کاهش می‌دهد اما همان مشکل روش CTFM یعنی ضعف قدرت تفکیک حفره‌ها را دارد و ممکن است یک یا چند حفره به اشتباه نادیده گرفته شوند.

شکل ۱۱ ردیف سوم، روش‌های B-scan را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود دقت و کیفیت تصاویر B-scan در مقایسه با دو روش قبل بسیار کمتر است که علت آن استفاده از عنصرهای کم‌تری از آرایه در هر بار تشکیل تصویر می‌باشد و بنابراین زمان‌بری و حجم محاسباتی این روش هم در مقایسه با روش‌های قبل بسیار کمتر است.

در روش B-scan متعارف (شکل ۱۱-ز) محل تقریبی حفره‌ها مشخص است اما قدرت تفکیک حفره‌ها بسیار پایین است. در روش وزن‌دار (شکل ۱۱-ح) نمی‌تواند به خوبی حفره‌ها را تمیز دهد و برخی حفره‌ها محو می‌شوند. روش مبتنی بر آستانه‌گذاری (شکل ۱۱-ط) نویز زمینه را کاهش می‌دهد اما قدرت تفکیک تصویر بهبودی نمی‌یابد. در ردیف چهارم شکل ۱۱ نتایج حاصل از روبش قطاعی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روش متعارف (شکل ۱۱-ی) اگر چه تمامی حفره‌ها را نشان می‌دهد اما در مقایسه با روش TFM متعارف قدرت تفکیک کم‌تری دارد و علاوه بر آن شدت روشنایی حفره‌ها یکسان نیست و برخی حفره‌ها بیشتر تضعیف می‌شوند که بر روی دقت تشخیص آنها تاثیر نامطلوب دارد.

روش WS-scan (شکل ۱۱-ک) نویز زمینه را کاهش داده و قدرت تفکیک بهتری ارائه می‌دهد، اما همچنان برخی حفره‌ها دارای شدت روشنایی کم هستند و نویز در مجاورت حفره‌ها به خوبی حذف نمی‌شود. روش CS-scan (شکل ۱۱-ل) می‌تواند به خوبی نویز زمینه را حذف کند، اما قدرت تفکیک پایین‌تری نسبت به روش وزن‌دار دارد. با توجه به نتایج به دست آمده از شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت روش TFM نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد و اعمال روش آستانه‌گذاری باید به صورت تجربی در حین آزمون

انجام شود و سطح آستانه باید به صورت تجربی به دست آید تا بهترین نتیجه را از نظر حذف نویز و افزایش قدرت تفکیک داشته باشد. روش WTFM در حذف نویز زمینه موفق عمل می‌کند، اما برای بهبود شدت روشنایی نقص‌ها باید در نحوه وزن‌دهی اصلاحاتی نظیر روش‌های پیشنهاد شده در [۳۱-۳۴] انجام شود. جدول ۳ خلاصه بحث فوق را برای ارزیابی و مقایسه کیفی تصاویر به دست آمده از روش‌های مختلف ارائه می‌دهد.

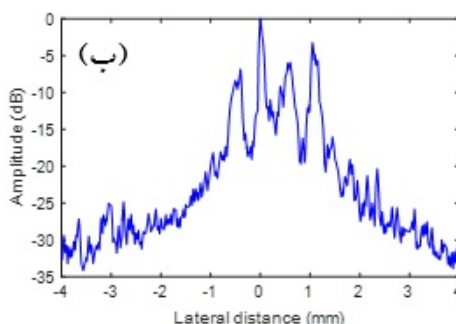
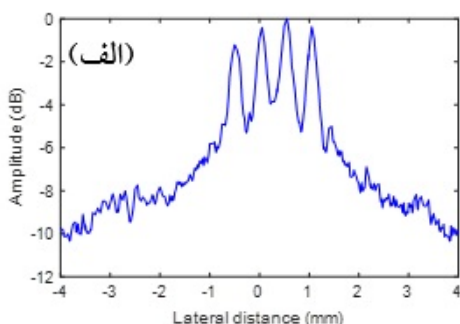


شکل ۱۱. ردیف اول به ترتیب از چپ به راست، تصویر حاصل از روش الف) TFM (ب) WTFM (ج) CTFM. ردیف دوم به ترتیب از چپ به راست، تصویر حاصل از روش الف) SAFT (ب) WSAFT (ج) CSAFT. ردیف سوم به ترتیب از چپ به راست، تصویر حاصل از روش الف) B-scan (ب) B-scan وزن‌دار (ج) B-scan آستانه‌گذاری شده. ردیف چهارم به ترتیب از چپ به راست، تصویر حاصل از روش الف) S-scan (ب) WS-scan (ج) CS-scan.

جدول ۳. ارزیابی کیفی تصاویر به دست آمده از روش‌های رویش

		TFM	SAFT	B-scan	S-scan
روش متعارف	قدرت تشخیص حفره	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد
	میزان نویز زمینه	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
وزن‌دهی شده	قدرت تشخیص حفره	متوسط	کم	کم	متوسط
	میزان نویز زمینه	کم	زیاد	کم	کم
آستانه‌گذاری شده	قدرت تشخیص حفره	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد
	میزان نویز زمینه	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط

۱۲- الف ملاحظه می‌شود که دامنه پیک‌ها در روش TFM به صفر دسی‌بل نزدیک می‌باشد و بنابراین تمام پیک‌ها قابل آشکارسازی هستند، اما قدرت تفکیک پیک‌ها کم بوده و سطح روشنایی مناطق بدون بازتاب، به خصوص در مجاورت حفره‌ها (پیک‌های تصویر) زیاد بوده و می‌تواند سبب آشکارسازی اشتباه شود. از طرف دیگر بررسی نمودار روش WTFM نشان می‌دهد سطح بازتاب در نواحی غیربازتابنده در این روش کم بوده و میزان تضعیف نواحی غیربازتابنده تا حدود ۳۵ dB- است که بسیار پایین‌تر از روش TFM می‌باشد. در نتیجه نویز زمینه را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و سبب کاهش قابل توجه خطا در بررسی‌های بصری می‌گردد، اما از طرف دیگر دامنه پیک‌ها یکنواخت نبوده و برخی پیک‌ها طبق شکل ۱۲-ب تا ۹ dB- تضعیف شده‌اند که عاملی برای احتمال اشتباه در تشخیص حفره‌ها می‌باشد.



شکل ۱۲. تابع شدت روشنایی $F(x_{ref})$ بر حسب دسی‌بل در الف) روش TFM ب) روش WTFM

به منظور بررسی کمی، یک تابع خروجی شدت روشنایی بر حسب دسی‌بل تعریف می‌کنیم. این تابع عبارتست از حداکثر شدت روشنایی در بازه عمق تصویر که برای هر طول x_{ref} طبق رابطه ۱۴ به دست می‌آید:

$$F(x_{ref}) = \max\{I(x_{ref}, z), \forall z \in Z\} \quad (14)$$

که در آن Z_i شامل مجموعه عمق‌های ناحیه رویش می‌باشد. شکل ۱۲ نمودار تابع فوق را به صورت نرمالیزه شده و بر حسب دسی‌بل برای روش‌های TFM و WTFM نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، در محل حفره‌ها (معادل با مختصات x_{ref}) پیک‌های بزرگی تشکیل می‌شود و در سایر نواحی که بازتاب از قطعه مورد آزمون صورت نمی‌گیرد، سطحی با دامنه‌های کم تشکیل شده است که متناظر با دامنه‌های نویز تصویر می‌باشد. با توجه به شکل

جدول ۴ روش‌های مورد بررسی را از نظر میزان تضعیف پیک و سطح نویز زمینه با یکدیگر مقایسه می‌کند. در این مقایسه نمودار بر اساس حداکثر دامنه پیک‌ها به صفر دسی‌بل نرمالیزه شده است.

جدول ۴. ارزیابی تصاویر به دست آمده از روش‌های روش

		TFM	SAFT	B-scan	S-scan
روش متعارف	تضعیف پیک	۰/۶۶	۰/۴۱	۰/۶۵	۰/۷۸
	متوسط نویز زمینه	-۵/۲	-۴/۷	-۴/۲	-۵/۳۵
	حداکثر سطح نویز	-۱/۹	-۱/۳	-۰/۷	-۲/۵
وزن‌دهی شده	تضعیف پیک	۲/۸۶	۲/۵۳	۱/۷	۴/۸
	متوسط نویز زمینه	-۱۹/۳	-۹/۴۵	-۵/۱	-۱۳/۲۸
	حداکثر سطح نویز	-۵/۶۲	-۴/۹۷	-۱/۸۴	-۸/۶
آستانه‌گذاری شده	تضعیف پیک	۰/۶۶	۰/۴۱	۰/۶۵	۰/۷۸
	متوسط نویز زمینه	-۱۵/۴	-۱۳/۹	-۱۲/۱	-۱۶
	حداکثر سطح نویز	-۱/۹	-۱/۳	-۰/۷	-۲/۵

جدول ۵ زمانبری اجرای الگوریتم‌ها را با توجه به قدرت تفکیک تصاویر (تعداد نقاط هدف) با هم مقایسه می‌کند. برای اجرای الگوریتم از رایانه‌ای دارای پردازنده ۶۴ بیت ۴ GHz نوع i7 و RAM 16GB استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۵ مشاهده می‌شود، روش‌های متعارف نسبت به روش‌های وزن‌دهی شده سریع‌تر عمل می‌کنند. همچنین روش B-scan از سایر روش‌ها سریع‌تر است که علت آن استفاده از حداقل اطلاعات برای تشکیل تصویر است. روش‌های آستانه‌گذاری شده به‌طور متوسط حدود ۲ ms کندتر از روش‌های متعارف هستند که این زمان اضافی صرف عملیات آستانه‌گذاری می‌شود. در صورت استفاده از سخت‌افزار سریع می‌توان الگوریتم‌های متعارف و آستانه‌گذاری شده را برای مقاصد آزمون‌های بی‌درنگ پیاده‌سازی کرد. روش‌های وزن‌دار چنانچه در [۳۱-۳۴] نشان داده شده است، امکان کاهش پیچیدگی و در نتیجه پیاده‌سازی برخط را دارا هستند.

با توجه به جدول، سطح نویز زمینه در روش WTFM پایین‌ترین مقدار ممکن را دارد، اما تضعیف پیک نیز به ۲/۸۶ دسی‌بل رسیده است. روش WS-scan نیز نویز زمینه پایینی دارد، اما تضعیف پیک شدیدی دارد. بنابراین روش‌های وزن‌دار برای بررسی ترک‌های موجود در قطعه آزمون توصیه نمی‌شوند. بررسی حداکثر سطح نویز نشان می‌دهد روش B-scan متعارف احتمال تشخیص حفره کاذب بیشتری در قیاس با سایر روش‌ها دارد. همچنین در روش‌های B-scan متعارف و وزن‌دار، از آنجا که فاصله بین تضعیف پیک و حداکثر سطح نویز کم است، احتمال ادغام حفره‌های متمایز اما نزدیک به هم در تصویر وجود دارد. در روش‌های مبتنی بر آستانه‌گذاری، نواحی وسیعی از تصویر دارای شدت روشنایی صفر هستند و بنابراین مقدار متوسط نویز زمینه نسبت به روش‌های متعارف کاهش قابل توجهی دارد. اما از نظر معیار تضعیف پیک و حداکثر سطح نویز تفاوتی با روش متعارف ندارند.

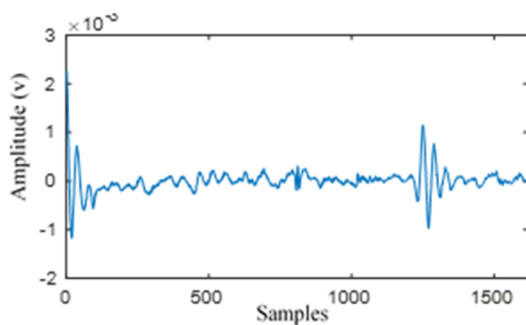
جدول ۵. بررسی زمان اجرای الگوریتم‌ها

	زمان اجرای الگوریتم (ثانیه)			
	TFM	SAFT	B-scan	S-scan
روش متعارف	۰/۷۴	۰/۰۲۳	۰/۰۰۸	۰/۲۲
وزن دهی شده	۱/۴۴	۰/۵۵	۰/۰۹۶	۰/۳۸
آستانه گذاری شده	۰/۰۷۵	۰/۰۲۶	۰/۰۱	۰/۲۳

به طول ۳۰ mm و عمق از ۱ mm تا ۱۹ mm در نظر گرفته شد.

برای روش B-scan طول پنجره شامل عنصرهای فعال برابر ۸ و طول کل آرایه برابر ۱۶ در نظر گرفته شده است. با توجه به طول آرایه فازی، طول ناحیه روبش از ۲/۲ mm تا ۹/۸ mm در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۴ سیگنال دریافتی از عنصر دوم در اثر تحریک عنصر چهارم را نشان می‌دهد. تصاویر حاصل از روش‌های روبش TFM، WTFM، SAFT و B-scan در شکل ۱۵ آمده است. روش روبش قطاعی به دلیل محدودیت‌های سخت‌افزاری، پیاده‌سازی نشده است. همچنین چون آستانه‌گذاری می‌تواند موجب تضعیف لبه‌های حفره‌های تصویر شود بنابراین در اینجا از آن استفاده نمی‌کنیم، و این موضوع می‌تواند برای کاربرد عملی به صورت سعی و خطا در هر آزمون انتخاب شود.

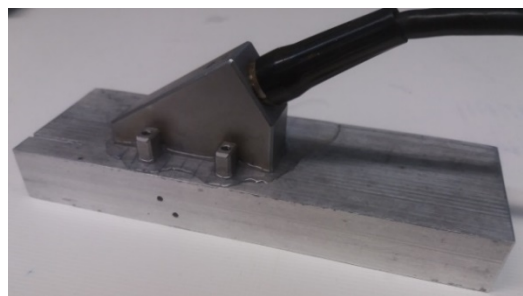


شکل ۱۴. سیگنال به دست آمده از ارسال عنصر ۲ که توسط عنصر ۴ دریافت شده است.

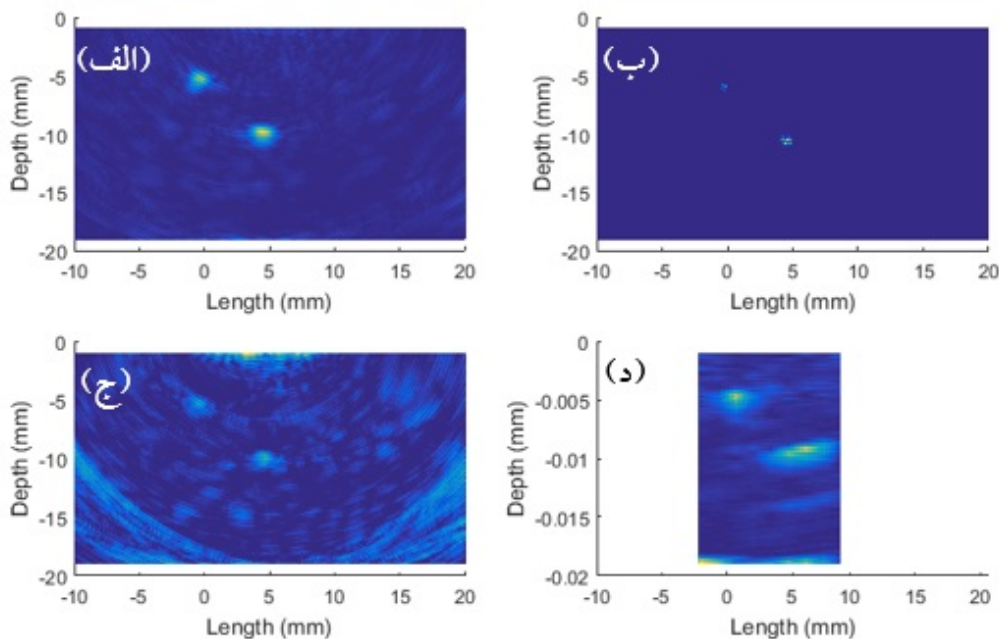
۳-۵. آزمون عملی وضعیت آزمایشی

به منظور بررسی عملی نتایج، از یک پروب آرایه فازی ساخت شرکت Olympus با ۶۴ عنصر و گام ۰/۶mm استفاده می‌شود. قطعه تحت آزمون یک قطعه مکعب مستطیلی از جنس آلومینیوم با ابعاد ۱۵۰ mm × ۵۰ mm × ۲۰ mm است و دو حفره سراسری (به طول ۵۰ mm) در یک دیواره آن طبق شکل ۱۳ تعبیه شده است. این حفره‌ها دارای قطر ۲ mm بوده و در عمق ۵ mm و ۱۰ mm می‌باشند.

به دلیل محدودیت سیستم ساخته شده، فقط از ۱۶ عنصر پروب استفاده شده است و محل پروب در سراسر آزمایش ثابت است. سیگنال‌های ارسالی از نوع پالس‌های مربعی با دامنه ۱۰۰ ولت و عرض پالس ۳۰ ns و فرکانس پالس ۱۰ kHz می‌باشد. ناحیه روبش با توجه به ابعاد قطعه برای روش‌های TFM و WTFM و SAFT ناحیه مستطیلی



شکل ۱۳. وضعیت آزمایشی و تجهیزات مورد استفاده برای آزمون عملی



شکل ۱۵. تصاویر فراصوتی حاصل از روش‌های روبش الف) TFM ب) WTFM ج) SAFT د) B-scan در آزمون عملی

نویز زمینه در روش B-scan (شکل ۱۵-د) نیز قابل توجه بوده و می‌تواند سبب تشخیص اشتباه حفره شود. همچنین لبه‌های حفره‌های واقعی را به خوبی نشان نمی‌دهد و تصویر دچار کشیدگی افقی شده است. با توجه به تصاویر به دست آمده در مجموع می‌توان نتیجه گرفت روش TFM (شکل ۱۵-الف) عملکرد بهتری در کیفیت و دقت تشخیص نقص دارد.

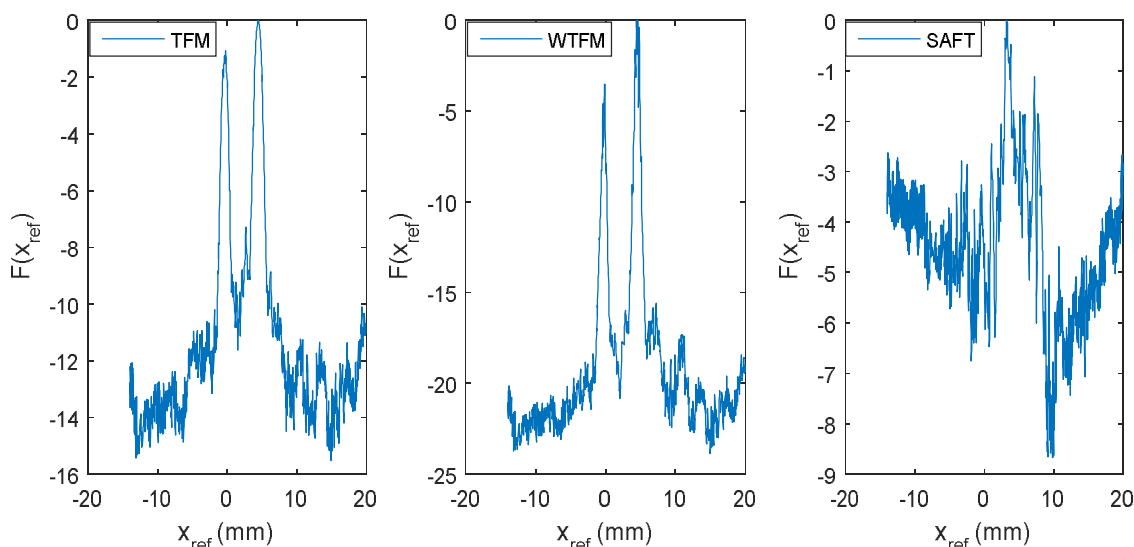
شکل ۱۶ تابع $F(x_{ref})$ را برای روش‌های TFM, WTFM, SAFT با هم مقایسه می‌کند. نتایج به دست آمده از شکل‌های ۱۶ نشان می‌دهد میزان متوسط تضعیف نویز زمینه در روش‌های TFM, WTFM و SAFT به ترتیب برابر با $-11/4$ dB, $-19/3$ dB و $-4/5$ dB می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه اختلاف سطح روشنایی حفره و ناحیه مجاور در روش WTFM بیشتر از سایر روش‌ها است بنابراین قدرت تشخیص حفره در روش WTFM بالاتر از سایر روش‌ها است.

پردازش مورد استفاده در رسم این شکل‌ها فیلترگذاری میان‌گذر می‌باشد تا نویزهای فرکانس پایین و فرکانس بالای سیگنال‌های دریافتی حذف شوند. بررسی‌ها نشان داد که انتخاب مناسب فرکانس‌های قطع بالا و پایین توسط کاربر منتهی به تصاویر با نویز زمینه کم و کیفیت بهتر می‌گردد. در آزمایش‌ها فرکانس قطع پایین و بالا به ترتیب برابر 4 MHz و 8 MHz در نظر گرفته شده است.

ملاحظه می‌شود که روش WTFM (شکل ۱۵-ب) به خوبی نویز زمینه را حذف کرده است، اما نظیر روش آستانه‌گذاری لبه‌های تصویر حفره‌ها را از بین می‌برد. از طرفی با توجه به شکل ۱۵-ج ملاحظه می‌شود که روش SAFT نویز زمینه زیادی داشته و اگر چه حفره‌ها قابل شناسایی هستند اما نویز زمینه می‌تواند سبب تشخیص حفره کاذب گردد. ذکر این نکته لازم است که روش وزن‌دهی حداقل واریانس روی روش روبش SAFT تأثیر مثبتی ندارد و بنابراین استفاده از آن توصیه نمی‌گردد.

شبیه‌سازی نشان می‌دهد مشکل تضعیف بازتابنده‌ها در هر دو وجود دارد. نتایج روش SAFT در هر دو آزمون عملی و شبیه‌سازی نشان‌دهنده نویز زمینه زیاد و احتمال آشکارسازی اشتباه می‌باشد. همچنین نتایج روش B-scan در هر دو آزمون عملی و شبیه‌سازی نشان‌دهنده کشیدگی تصویر بازتابنده‌ها و پایین بودن قدرت تفکیک حفره‌ها می‌باشد.

مقایسه نتایج آزمون عملی با شبیه‌سازی نشان می‌دهد، روش TFM در حالت عملی نتیجه بهتری نسبت به حالت شبیه‌سازی دارد، زیرا میزان بازتاب از حفره‌ها به دلیل سطح مقطع آنها بسیار بیشتر از بازتاب در حالت شبیه‌سازی است. این سبب شده نویز زمینه در قیاس با پیک‌های مربوط به حفره در آزمون عملی تضعیف قابل توجهی داشته باشد. نتایج به دست آمده از روش WTFM در هر دو آزمون عملی و



شکل ۱۶. تابع شدت روشنایی $F(x_{ref})$ بر حسب دسی‌بل در روش TFM، WTFM و SAFT

۶. نتیجه‌گیری

در نهایت روش‌های تمرکز کامل متعارف و وزن‌دار و تمرکز روزنه مصنوعی و روش B-scan به‌طور عملی مورد ارزیابی قرار گرفت و بر اساس نتایج ارائه شده، روش TFM مبتنی بر فیلترگذاری میان‌گذر، کیفیت مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

۷. قدردانی

بدین‌وسیله از آقایان بهروز عبدلی و مهدی رضایی بابت همکاری در ساخت سخت‌افزار سیستم آزمون غیرمخرب فراصوتی در پژوهشگاه نیرو تشکر می‌شود.

در این مقاله یک شبیه‌ساز تصویربرداری فراصوتی برای آزمون غیرمخرب مبتنی بر آرایه فازی فراصوتی ارائه شد. روش‌های نوین تصویربرداری فراصوتی شامل روش تمرکز کامل، تمرکز پنجره مصنوعی، روش B-scan و روش قطاعی در تصویربرداری فراصوتی برای آزمون غیرمخرب معرفی شده و عملکرد آنها با این شبیه‌ساز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. وزن‌دهی مبتنی بر روش حداقل واریانس و آستانه‌گذاری برای هر روش معرفی و اعمال شدند و نتایج به دست آمده با توجه به دقت تشخیص پیک‌ها و سطح نویز زمینه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. همچنین زمان‌بری و پیچیدگی محاسباتی روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شدند.

- [1] Schmerr-Jr., L. W., "Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays", *Springer Series in Solid Mechanics and Its Applications*, 2015.
- [2] Jobst, M., and Connolly, G., "Demonstration of the Application of the Total Focusing Method to the Inspection of Steel Welds," *European Conference on Non-Destructive Testing*, 2010, pp.1-11.
- [4] Holmes, C., Drinkwater, B. W., and Wilcox, P. D., "Post-processing of the Full Matrix of Ultrasonic Transmit-Receive Array Data for Non-Destructive Evaluation," *NDT&E International*, Vol.38, No.8, 2005, pp.701-711.
- [5] Drinkwater, B. W., and Wilcox, P. D., "Ultrasonic Arrays for Non-Destructive Evaluation: A Review," *NDT&E International*, Vol.39, No.7, 2006, pp.525-541.
- [6] Lambert, J., P'edron, A., Gens, G., Bimbard, F., Lacassagne, L., and Lakovleva, E., "Performance Evaluation of Total Focusing Method on GPP and GPU," *Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP)*, 2012, pp.1-8.
- [7] Jeune, L., Robert, S., Dumas, P., Membre, A., and Prada, C., "Adaptive Ultrasonic Imaging with the Total Focusing Method for Inspection of Complex Components Immersed in Water," *AIP Conf. Proc.*, Vol.1650, 2015, pp.1037-1046.
- [8] Li, M., and Hayward, G., "Ultrasound Nondestructive Evaluation (NDE) Imaging with Transducer Arrays and Adaptive Processing," *Sensors*, Vol.12, No.1, 2012, pp.42-54.
- [9] Saniie, J., Wang, T., and Bilgutay, N. M., "Analysis of homomorphic processing for ultrasonic grain signal characterizations," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.36, 1989, pp.365-375.
- [10] Zhu, Y., and Weight, J. P., "Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Highly Scattering Materials Using Adaptive Filtering and Detection," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.41, No.1, 1994, pp.26-33.
- [11] Lu, Y., and Saniie, J., "Adaptive filtering and Fractional Fourier transform for ultrasonic signal processing and flaw detection," *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2014, pp.1932-1935.
- [12] Oruklu, E., and Saniie, J., "Ultrasonic Flaw Detection Using Discrete Wavelet Transform for NDE Applications," *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2004, pp.1054-1057.
- [13] Oruklu, E., Aslan, S., and Saniie, J., "Applications of Time-Frequency Distributions for Ultrasonic Flaw Detection," *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2009, pp.2000-2003.
- [14] Gongzhang, R., Li, M., Lardner, T. and Gachagan, A., "Robust Defect Detection in Ultrasonic Nondestructive Evaluation (NDE) of Difficult Materials," *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2012, pp.467-470.
- [15] Yoon, S., Oruklu, E., and Saniie, J., "Performance Evaluation of Neural Network Based Ultrasonic Flaw Detection," *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2007, pp.1579-1582.
- [16] Li, M., Hayward, G., and He, B., "Adaptive Array Processing for Ultrasonic Non-Destructive Evaluation," *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2011, pp.2029-2032.
- [17] Ziksari, M. S., and Mohammadzadeh-Asl, B., "Combined phase screen aberration correction and minimum variance beamforming in medical ultrasound," *Ultrasonics*, Vol.75, 2017, pp.71-79.
- [18] Sakhaei, S. M., "A decimated minimum variance beamformer applied to ultrasound Imaging," *Ultrasonics*, Vol.59, 2015, pp.119-127.

- [19] Zhao, J., Wang, Y., Yu, J., Guo, W., Li, T., and Zheng, Y. P., "Subarray coherence based postfilter for eigenspace based minimum variance beamformer in ultrasound plane-wave imaging," *Ultrasonics*, Vol.65, 2016, pp.23-33.
- [20] Stepinski, T., "Synthetic Aperture Focusing Technique in Ultrasonic Inspection of Coarse Grained Materials," *SKI Report*, 2007.
- [21] Engle, B., "Quantitative flaw characterization with ultrasonic phased arrays," *Graduate Theses and Dissertations*, IOWA state Uni. 2013.
- [22] Stepinski, T., and Lingvall, F., "Synthetic aperture focusing techniques for ultrasonic imaging of solid objects," *8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 2010, pp.438-441.
- [23] Fendt, K. T., Mooshofer, H., Rupitsch, S. J., Ermert, H., "Ultrasonic Defect Characterization in Heavy Rotor Forgings by Means of the Synthetic Aperture Focusing Technique and Optimization Methods," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.63, No.6, 2016, pp.874-885.
- [24] Chahbaz, A., and Sicard, R., "Comparative evaluation between ultrasonic phased array and synthetic aperture focusing techniques," *AIP Conference Proceedings*, Vol.657, No.1, 2002, pp.769-776.
- [25] Lin, Y., and Volker, H., "Self-Monitoring Ultrasonic Gas Flow Meter Based on Vortex and Correlation Method," *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, Vol.56, No.6, 2007, pp.2420-2424.
- [26] Dube, Noel. "Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline." *R/D Tech Co*, 2004.
- [27] Simões, M. J., Santos, F., and Santos, J. B., "FPGA-Based Control System of an Ultrasonic Phased Array," *Journal of Mechanical Engineering*, Vol.57, No.2, 2011, pp.135-141.
- [28] Robert, S., Casula, O., Njiki, M., and Roy, O., "Assessment of Real-Time Techniques for Ultrasonic Non-Destructive Testing," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1430, 2012, pp.1960-1967.
- [29] Jeune, L. Le, Robert, S., Villaverde, E. L., and Prada, C., "Plane Wave Imaging for Ultrasonic Non-Destructive Testing: Generalization to Multimodal Imaging," *Ultrasonics*, Vol.64, 2016, pp.128-138.
- [30] Sutcliffe, M., Weston, M., Dutton, B., and Cooper, I., "Real-Time Full Matrix Capture with Auto-Focusing of Known Geometry through Dual Layered Media," *NDT&E International*, Vol.51, 2012, pp.16-23.
- [31] Ditchburn, R. J., and Ibrahim, M. E., "Ultrasonic Phased Arrays for the Inspection of Thick-Section Welds," *Published by Maritime Platforms Division*, Defense Science and Technology Organization, 2009.

[۳۲] بکرانی، م، حمیتی واقف، و، "ارائه روشی نوین برای تصویربرداری و استخراج عیوب توسط آرایه‌های فازی آلتراسونیک"، کنفرانس فیزیک ریاضی ایران، دانشگاه صنعتی قم، آبان ۱۳۹۵.

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

[۳۴] بکرانی، م، حمیتی واقف، و، "بهبود کیفیت تصاویر فراصوتی در آزمون غیر مخرب با روش حداقل واریانس اصلاح شده"، دهمین کنفرانس بینایی ماشین و پردازش تصویر ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، آذر ماه ۱۳۹۶.

[۳۵] بکرانی، م، حمیتی واقف، و، "روش بهبود یافته تمرکز روزنه مصنوعی برای تصویربرداری فراصوتی با آرایه فازی"، بیست و ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه صنعتی سجاد، اردیبهشت ماه ۱۳۹۷.

1. Total focusing method (TFM)
2. Elements
3. Phased array
4. Plane B-scan
5. Sector-scan (S-scan)
6. Focused B-scan
7. Minimum variance
8. Scatterer
9. Homomorphic
10. Short-term Fourier transform (STFT)
11. Feedforward neural network
12. Subband
13. Synthetic aperture focusing technique (SAFT)
14. Lateral resolution
15. Aperture
16. Pitch
17. Dynamic depth focusing (DDF)
18. Weighted SAFT
19. Weighted B-scan
20. Weighted S-scan
21. Weighted TFM
22. Clipped TFM
23. Clipped SAFT
24. Clipped S-scan
25. MATLAB
26. Omnidirectional
27. Rexolite