

تصویربرداری فراصوتی با شکل‌دهی پرتو مبتنی بر تقریب کمینه واریانس و کاربرد آن در آزمون غیرمخرب لوله‌های بویلر

مهدی بکرانی^۱ وحید حمیتی واقف^۲

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی قم- قم- ایران

bekrani@qut.ac.ir

۲- استادیار- گروه پژوهشی فناوری اطلاعات و ارتباطات، پژوهشگاه نیرو- تهران- ایران

vvaghef@nri.ac.ir

چکیده: تصویربرداری فراصوتی با آرایه‌های فازی امروزه کاربرد وسیعی در آزمون‌های غیر مخرب صنعتی از جمله در تشخیص نقصها و ترکها در قطعات صنعتی و در بازرسی جوش پیدا کرده است. در این مقاله جهت بهبود دقت تشخیص نقص و کاهش نویز زمینه در تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی در آزمون غیر مخرب، روشی برای شکل‌دهی پرتوهای دریافتی آرایه مبتنی بر تقریبی از تکنیک کمینه واریانس ارائه می‌شود و در کاربرد بازرسی غیرمخرب لوله‌های بویلر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش، تقریب ماتریس معکوس، با استفاده از لم معکوس ماتریس به‌صورتی انجام می‌شود که شکل‌دهی پرتو متناسب با دامنه سیگنالهای دریافتی آرایه صورت گیرد. عملکرد روش پیشنهاد شده به‌صورت کمی و کیفی در آزمون نظری و عملی مورد ارزیابی قرار گرفته و با روشهای مشابه شکل‌دهی پرتو مقایسه می‌شود. نشان داده می‌شود که این روش قادر به کاهش نویز زمینه تصویر، با حفظ قدرت آشکارسازی نقص در مقایسه با روش شکل‌دهی پرتو مبتنی بر جمع و تاخیر و شکل‌دهی پرتو وفقی کمینه واریانس می‌باشد. همچنین سبب بهبود دقت تشخیص نقص در مقایسه با روش کمینه واریانس می‌گردد. پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی نسبت به روش متعارف و وفقی شکل‌دهی پرتو کمینه واریانس کمتر است.

واژه‌های کلیدی: آرایه فازی فراصوتی، شکل‌دهی پرتو، روش تمرکز کامل، لم معکوس ماتریس، آزمون غیر مخرب، لوله‌های بویلر

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.3.21

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: مهدی بکرانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- قم - دانشگاه صنعتی قم- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

تصویربرداری فراصوتی مبتنی بر شکل‌دهی پرتو در کاربردهای متعددی در صنعت نظیر بازرسی جوش، تشخیص عیوب مخازن تحت فشار و لوله‌های انتقال نفت و گاز، بررسی عیوب سطحی، بررسی ساختار مواد کامپوزیت، تعیین ضخامت و خواص مواد، پایش فرسودگی و همچنین اولتراسوند پزشکی مورد استفاده است [۱-۹]. از جمله کاربردهای حائز اهمیت تصویربرداری فراصوتی، بازرسی جوش لوله‌های بویلر^۱ است [۱-۳] که در مقاله حاضر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. یکی از عوامل مهم توقف تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی، بروز نشتی و یا پارگی لوله در بویلر می‌باشد که این امر به نوبه خود سبب کاهش عمر بویلر و صرف زمان طولانی جهت راه‌اندازی مجدد آن می‌شود که خسارت‌های هنگفت مالی به دنبال دارد. این موارد، اهمیت بالای بازرسی غیر مخرب لوله‌های بویلر نیروگاه‌های حرارتی را نمایان می‌سازد [۱۰].

برای تصویربرداری غیر مخرب از لوله‌های بویلر به طور کلی از دو روش رادیوگرافی و تصویربرداری فراصوتی با آرایه‌های فازی استفاده می‌شود [۱۱]. روش نخست، روشی پرهزینه و زمان‌بر است و در برخی موارد، دسترسی به پشت لوله‌های واتروال^۲ بویلر برای قرار دادن فیلم رادیوگرافی غیر ممکن و یا دشوار است.

در روش دوم پروب آرایه فازی فراصوتی بر روی سطح لوله قرار می‌گیرد و با ارسال و دریافت امواج فراصوتی، تصویر داخل قطعه ساخته می‌شود [۱۲]. در این روش تصویری دیجیتال با کیفیت بالا و بی‌درنگ حاصل می‌شود [۱۳] 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.

رویش مسطح، رویش قطاعی و رویش متمرکز، روشهای روبش متداول در تصویر برداری فراصوت هستند [۱۴-۱۶]. در روش روبش مسطح در هر روبش تعداد مشخصی از عناصر آرایه فازی به‌عنوان فرستنده و گیرنده فعال هستند که اصطلاحاً یک پنجره^۳ نامیده می‌شود. پنجره در طول آرایه فازی جابجا می‌شود و سبب روبش عرضی قطعه می‌شود. مزیت این روش حجم محاسباتی بسیار پایین آن و ضعف آن در قدرت تفکیک عرضی کم آن است.

روش روبش قطاعی [۱۶-۱۷] از تمامی عناصر برای چرخش پرتو در طول روبش زاویه‌ای استفاده می‌کند. برای محاسبه هر خط روبش (متناظر با یک زاویه روبش) در تصویر، سیگنال‌ها با تاخیرهای زمانی مناسب جمع می‌شوند تا جهت پرتو آرایه را در زاویه مطلوب مشخص کنند.

در روش روبش متمرکز [۱۸-۱۹] برای شکل‌دهی پرتو از اعمال تاخیرهای متناسب در سیگنال هر یک از عنصرهای آرایه فازی استفاده می‌شود، به‌صورتی که تمام پرتوها در یک زمان به نقطه هدف در ناحیه روبش برسند. از موثرترین روشهای روبش متمرکز در ایجاد تصاویر

فراصوتی روش تمرکز کامل (TFM)^۴ می‌باشد [۱۵، ۲۰، ۲۱]. این روش از جمله روشهای شکل‌دهی پرتو مبتنی بر جمع-تاخیر (DAS)^۵ است که در آن پرتو فراصوت در هر نقطه از ناحیه روبش مورد نظر متمرکز می‌شود و در نتیجه تصویری با قدرت تفکیک بالا ایجاد می‌گردد [۲۲].

با وجود همه قابلیت‌های تصویربرداری به روشهای مختلف روبش فراصوتی، تصاویر فراصوتی حاصل شده، به دلیل محدودیتهای سخت‌افزاری و بازتابهای موج فراصوتی درون قطعه تحت آزمون، دقت محدودی در آشکارسازی نقصهای ریز داشته و همچنین دارای نویز زمینه هستند. در صورت به‌کارگیری الگوریتم تصویربرداری TFM، تصویربرداری از ضخامت‌های اندک همزمان با ارائه کیفیت تصویر بهتر، امکان‌پذیر می‌شود [۲۱، ۲۳، ۲۴].

در [۲۵-۲۶] روش تمرکز کامل وزن‌دار (WTFM)^۶ مبتنی بر شکل‌دهی پرتو مبتنی بر تاخیر-وزن‌دهی جمع (WDS)^۷ برای آزمون غیر مخرب پیشنهاد شده است. وزن‌دهی با روش کمینه واریانس حاصل می‌شود. این روش از شکل‌دهی وفقی پرتو برای کاهش تداخل و نویز ناشی از پژواک‌های کاذب استفاده می‌کند و برای مواد ناهمگن نظیر فولاد ضد زنگ، کامپوزیت‌های کربنی و بتن مفید گزارش شده است. پژواک‌های کاذب در چنین موادی ناشی از پراکنده‌سازهای ذاتی موج با توزیع تصادفی هستند.

محاسبه کمینه واریانس نیاز به محاسبه ماتریس معکوس برای هر پیکسل تصویر دارد که علاوه بر حجم محاسباتی بالا، در شرایطی که ماتریس بدحالت^۸ باشد، می‌تواند سبب خطای قابل توجه در محاسبه معکوس ماتریس شود و به نوبه خود، سبب حذف بخشهایی از تصویر قطعه که شامل بازتابنده‌های ضعیف است شود.

به منظور بهبود در محاسبه ماتریس معکوس، در [۲] الگوریتم تمرکز کامل وزن‌دار وفقی (به اختصار ATFM^۹) ارائه شده است. در این روش برای محاسبه وزن‌ها از روشی بازگشتی استفاده می‌شود که به‌صورت وفقی از عناصر قطر اصلی و برخی قطرهای فرعی هم‌راستا با قطر اصلی برای تقریب ماتریس معکوس استفاده می‌کند. این روش اگر چه باعث کاهش حجم محاسبات می‌شود، اما در صورتی که تعداد تکرارهای الگوریتم زیاد باشد زمان اجرای قابل توجهی خواهد داشت.

در این مقاله برای رفع چالشهای ذکر شده، تقریبی از ماتریس معکوس با استفاده از لم معکوس ماتریس ارائه می‌شود که حجم محاسباتی پایینی داشته و وزن‌دهی را بر اساس میزان سطح روشنایی تصویر تنظیم می‌کند. دستگاه تصویر برداری فراصوتی طراحی شده جهت بازرسی غیر مخرب قادر به پیاده‌سازی روشهای مختلف روبش فراصوتی از جمله روشهای TFM و نسخه‌های بهبود یافته آنها می‌باشد.

روش پیشنهادی را می‌توان در تمامی کاربردهایی که شکل‌دهی پرتو با آرایه فازی قابل استفاده است و در ابتدای مقدمه به برخی از آنها اشاره شد، مورد استفاده قرار داد. در این مقاله کاربرد روش پیشنهاد شده در بازرسی جوش لوله‌های بویلر مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲-۲- روش روبش TFM

در روش TFM از شکل‌دهی پرتو DAS استفاده می‌شود. به این منظور در سیگنال هر یک از عناصر آرایه فازی تاخیرهای متناسبی اعمال می‌شود، به‌صورتی که تمام پرتوها در یک زمان به نقطه هدف در ناحیه روبش برسند. سپس شدت روشنایی تصویر در هر نقطه هدف با مختصات (x, z) با جمع سیگنال‌های دریافتی تاخیر یافته از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I(x, z) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{i,j} \left(\frac{d_{i,j}}{c} \right) \right| \quad (1)$$

در این رابطه، $||$ علامت قدر مطلق بوده و N تعداد عناصر آرایه فازی و c سرعت موج در قطعه مورد آزمون است. همچنین $h_{i,j}$ سیگنال ارسال شده توسط عنصر i ام و دریافت شده توسط عنصر j ام پس از بازتاب از قطعه بوده و $d_{i,j}$ طول مسیری که موج از عنصر i ام تا عنصر j ام می‌پیماید، می‌باشد. مقدار این پارامتر از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (z_i - z)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + (z_j - z)^2} \quad (2)$$

پارامترهای x_i و z_i به‌ترتیب مختصات طولی و عرضی عنصر فرستنده و x_j و z_j به‌ترتیب مختصات طولی و عرضی عنصر گیرنده می‌باشند. علامت جمع در رابطه (۱) روی تمام زوج‌های فرستنده-گیرنده که تعداد آن برابر است با N^2 ، انجام می‌شود. بنابراین این روش از حداکثر اطلاعات دریافتی از عنصرها برای هر نقطه هدف استفاده می‌کند [۱۸].

۲-۳- روش روبش WTFM

در روش WTFM به منظور وزن‌دهی به سیگنال‌های روبش-A، از شکل‌دهی پرتو فراصوت WDS به روش کمینه واریانس استفاده می‌شود. وزن‌دهی سبب کاهش قابل توجه نویز در مقایسه با روش TFM و بهبود تفکیک‌پذیری تصویر می‌گردد. این مزایا در ازای افزایش قابل توجه حجم محاسبات حاصل می‌شود.

برای توصیف این روش، فرض می‌شود تمام عنصرها در ارسال سیگنال نقش داشته باشند و بردار خروجی تاخیر یافته زمانی به فرم زیر باشد:

$$\mathbf{h}(k) = [h_1(k), h_2(k), \dots, h_N(k)]^T \quad (3)$$

که در آن $h_i(k)$ نمونه k ام سیگنال تاخیر یافته خروجی عنصر i ام ناشی از ارسال پالس توسط تمام N عنصر آرایه فازی می‌باشد. تاخیر در خروجی به گونه‌ای لحاظ می‌شود که تمام پرتوها در نقطه

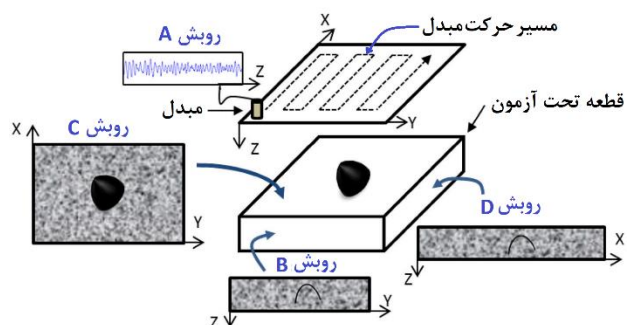
در ادامه روشهای تصویربرداری فراصوتی با شکل‌دهی پرتو به روش TFM و سپس روشهای WTFM و ATFM بررسی می‌شود. سپس روش پیشنهادی شرح داده می‌شود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمونهای عملی ارائه خواهد شد. نهایتاً جمع بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- تصویربرداری فراصوتی

۱-۲- تشکیل تصویر آرایه فازی

به منظور تشکیل تصویر آرایه فازی فراصوتی، هر عنصر آرایه توسط مدار فرستنده، تحریک و توسط مدار گیرنده قرائت می‌شود. در فرستنده، به هر عنصر آرایه، یک پالس با عرض و دامنه قابل تنظیم اعمال می‌شود. پالس اعمالی به هر عنصر 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 [۲۷]. با تغییر مقادیر تاخیرها، همفازی برای هر نقطه دلخواه از محیط مد نظر ایجاد می‌شود که اصطلاحاً به مقادیر تاخیرها، «قوانین کانونی» گفته می‌شود [۲۷].

امواج دریافتی از هر عنصر 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^{۱۱} گویند. با حرکت دادن پروب و تکرار این فرآیند، مجموعه‌ای از تصاویر روبش-B اخذ می‌شود، که به نمای بالا یا روبش-C^{۱۲} و نمای جانبی دوم یا روبش-D^{۱۳} منجر می‌شوند. شکل (۱) نمای روبش‌های A، B، C و D را نشان می‌دهد. روشهای روبش مبتنی بر شکل‌دهی پرتو که در ادامه توصیف می‌شوند، اساساً برای تولید تصویر روبش-B بکار می‌روند، اما با استفاده از مجموعه تصاویر روبش-B حاصل‌شده از حرکت پروب، تصاویر روبش‌های C و D نیز حاصل خواهند شد.



شکل (۱): انواع نماها در تصویربرداری به روش آرایه فازی فراصوتی

[۲۸]

در روابط فوق، n شماره تکرار بوده و η ثابت همگرایی و \mathbf{I} ماتریس همانی $N \times N$ می‌باشد. همچنین $\mathbf{R}'(k)$ تنها بخشی از $\mathbf{R}(k)$ است که شامل قطر اصلی و $0 \leq M < N$ قطر فرعی در بالا و پایین قطر اصلی و به موازات آن می‌باشد. درایه ij ام ماتریس $\mathbf{R}'(k)$ به صورت (۱۳) به دست می‌آید:

$$r_{ij}(k) = \begin{cases} E\{h_i(k)h_j(k)\} \approx h_i(k)h_j(k), & j = i \pm m, \\ 0, & j \neq i \pm m \end{cases} \quad (13)$$

که در آن $m = 0, 1, \dots, M$. در نهایت معکوس ماتریس در تکرار n ام با رابطه (۱۲) حاصل می‌شود. حداقل مقدار M برابر صفر است و در این حالت خاص، ماتریس معکوس تخمینی در این حالت همان معکوس عناصر قطر اصلی ماتریس همبستگی ورودی است [۲]. برای تقریب بهتر ماتریس معکوس، لازم است مقدار M بزرگتر و تعداد تکرار روابط (۱۰) و (۱۱) بیشتر باشد. با در نظر گرفتن p تکرار، مقدار وزن‌ها برابر است با:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}}(k) \approx \frac{\mathbf{R}_p^{-1}(k)\mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{R}_p^{-1}(k)\mathbf{a}} \quad (14)$$

بنابراین مقدار نهایی خروجی از جمع وزن‌دار نمونه‌های دریافتی عناصر به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$g(k) = \mathbf{w}_{\text{opt}}^T(k)\mathbf{h}(k) \quad (15)$$

۳- روش TFM پیشنهادی (ITFM)^{۱۵}

در این روش هدف ما اصلاح روش تقریب ماتریس معکوس در شکل‌دهی پرتو حفظ تصویر بازتاب‌های ضعیف قطعه و در عین حال کاهش نویز زمینه تصویر است. به این منظور در روش پیشنهادی، بجای ماتریس $\mathbf{R}(k) = \mathbf{h}(k)\mathbf{h}^T(k)$ ، ماتریس $\hat{\mathbf{R}}(k)$ را به فرم

$$\hat{\mathbf{R}}(k) = \lambda \mathbf{I} + (1 - \lambda)\mathbf{h}(k)\mathbf{h}^T(k) \quad (16)$$

در نظر می‌گیریم که در آن \mathbf{I} ماتریس همانی بوده و $0 \leq \lambda \leq 1$ ثابت مثبت است. به ازای دو مقدار حدی $\lambda = 0$ و $\lambda = 1$ ، به ترتیب الگوریتم‌های شکل‌دهی TFM و WTFM حاصل می‌شود.

برای بررسی اثر مقدار λ در رابطه (۱۶) با فرض اینکه درایه ردیف i ام و ستون j ام ماتریسهای $\mathbf{R}(k)$ و $\hat{\mathbf{R}}(k)$ به ترتیب $r_{ij}(k)$ و $\hat{r}_{ij}(k)$ نامیده شود، داریم:

$$\hat{r}_{ij}(k) = \begin{cases} r_{ij}(k) + \varepsilon_{ij}(k), & j = i \\ (1 - \lambda)r_{ij}(k), & j \neq i \end{cases} \quad (17)$$

که در آن $\varepsilon_{ij}(k) = \lambda(1 - r_{ij}(k))$. با فرض نرمالیزه بودن دامنه سیگنالهای بازگشتی، مقدار $r_{ij}(k)$ به ازای $i = j$ بین صفر و یک بوده و در نتیجه $\varepsilon_{ij}(k)$ دارای مقدار مثبت کوچکتر از یک است. بنابراین مطابق رابطه (۱۷) و بسته به مقدار λ درایه‌های قطری $\hat{r}_{ij}(k)$ بزرگتر از $r_{ij}(k)$ بوده و مقادیر غیرقطری $\hat{r}_{ij}(k)$ کوچکتر از $r_{ij}(k)$ خواهند بود. هر چه مقدار λ کوچکتر باشد، $\varepsilon_{ij}(k)$ به

هدف در ناحیه روبش متمرکز شوند. در این صورت خروجی شکل‌دهنده پرتو عبارتست از:

$$g(k) = \mathbf{w}^T(k)\mathbf{h}(k) \quad (4)$$

که در آن

$$\mathbf{w}(k) = [w_1(k), w_2(k), \dots, w_N(k)]^T \quad (5)$$

بردار وزن می‌باشد.

روش شکل‌دهی پرتو مبتنی بر کمینه واریانس، توان خروجی $E\{g^2(k)\}$ را با حفظ بهره واحد در نقطه کانونی کمینه می‌کند. این مساله بهینه‌سازی به صورت رابطه (۶) فرمول‌بندی می‌شود:

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^T(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{w}(k) \quad \text{با شرط} \quad \mathbf{w}^T(k)\mathbf{a} = 1 \quad (6)$$

که در آن $\mathbf{R}(k)$ ماتریس خودهمبستگی نمونه‌های خروجی عنصر-های آرایه فازی به فرم $\mathbf{R}(k) = \mathbf{h}(k)\mathbf{h}^T(k)$ می‌باشد. با توجه به اینکه داده‌ها قبلاً به اندازه لازم تاخیر داده شده‌اند که در نقطه مطلوب متمرکز شوند، \mathbf{a} بردار ستونی $N \times 1$ شامل مقادیر واحد است، یعنی:

$$\mathbf{a} = [1, 1, \dots, 1]^T \quad (7)$$

در این حالت مساله بهینه‌سازی (۶) با کمک نظریه ضرب‌کننده لاگرانژ [۲۹] منتهی به رابطه زیر برای وزن‌های بهینه $\mathbf{w}_{\text{opt}}(k)$ می‌شود:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}}(k) = \frac{\mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{a}} \quad (8)$$

برای اجتناب از بدحالتی ماتریس معکوس، از پارامتر تنظیم ε که عدد مثبت کوچکی است، استفاده می‌شود:

$$\mathbf{R}^{-1}(k) = [\mathbf{h}(k)\mathbf{h}^T(k) + \varepsilon \mathbf{I}]^{-1} \quad (9)$$

که در آن \mathbf{I} ماتریس همانی است.

۲-۴- روش روبش ATFM [۲]

در روش ATFM تقریب ماتریس معکوس به صورت فوقی انجام می‌شود، به گونه‌ای که تنها درایه‌هایی با نقش قابل توجه در محاسبه ماتریس معکوس در نظر گرفته شوند. با توجه به اینکه نمونه‌های مجاور در بردار $\mathbf{h}(k)$ همبستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های دور از هم دارند، درایه‌های قطر اصلی و قطرهای مجاور اصلی ماتریس همبستگی اهمیت بیشتری نسبت به سایر درایه‌ها در تقریب معکوس دارند. بر این اساس، تقریب ماتریس معکوس با مراحل زیر حاصل می‌شود:

$$\text{step 1: } \tilde{\mathbf{W}}_{n+1}(k) = \tilde{\mathbf{W}}_n(k) + \eta[\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{R}}_n(k)] \quad (10)$$

$$\text{step 2: } \tilde{\mathbf{R}}_n(k) = \tilde{\mathbf{W}}_n(k)\mathbf{R}'(k)\tilde{\mathbf{W}}_n^T(k) \quad (11)$$

$$\text{step 3: } \mathbf{R}_n^{-1}(k) \approx \tilde{\mathbf{W}}_n^T(k)\tilde{\mathbf{W}}_n(k) \quad (12)$$

در این صورت داریم:

$$\hat{\mathbf{R}}_M^{-1}(k) = \frac{1}{\lambda} \mathbf{I} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_M(k)}{\lambda \mathbf{h}^T(k) \mathbf{h}(k) + \frac{\lambda^2}{1-\lambda}} \quad (23)$$

رابطه (۲۳) روشی کلی برای تقریب معکوس ماتریس ارائه می‌دهد که در رابطه (۸) جهت شکل‌دهی پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش پیشنهادی شکل‌دهی پرتو، روشهای TFM و WTFM را نیز در بر دارد. به‌ازای $M = N - 1$ و با فرض $\lambda \rightarrow 0$ روش WTFM حاصل می‌شود. همچنین به‌ازای $\lambda \rightarrow 1$ روش TFM به‌دست می‌آید.

۳-۳- تقریب معکوس ماتریس در الگوریتم ITFM

برای بهبود قابلیت الگوریتم پیشنهادی ITFM در آشکارسازی نقاط بازتابنده و در عین حال تضعیف نویز زمینه، در دو مرحله معکوس ماتریس را تقریب می‌زنیم. در مرحله اول برای تمامی پیکسل‌ها از رابطه (۲۲) با $M = M_1$ استفاده می‌شود. بنابراین شدت روشنایی تمامی پیکسل‌ها به‌دست می‌آید.

در مرحله دوم برای کاهش نویز زمینه، برای پیکسل‌های با شدت روشنایی کمتر از یک مقدار آستانه از پیش تعیین شده I_0 ، معکوس ماتریس را با رابطه (۲۳) با $M = M_2 > M_1$ تقریب می‌زنیم. بنابراین می‌توان نوشت:

$$I(x, z) = \beta I_1(x, z) + (1 - \beta) I_2(x, z) \quad (24)$$

که در آن $I_1(x, z)$ مقادیر شدت روشنایی به‌ازای $M = M_1$ بوده و $I_2(x, z)$ مقادیر شدت روشنایی به‌ازای $M = M_2$ می‌باشد. همچنین

$$\beta = \begin{cases} 1 & I_1(x, z) \geq I_0 \\ 0 & I_1(x, z) < I_0 \end{cases} \quad (25)$$

که در آن آستانه I_0 از تعیین بیشینه $I_1(x, z)$ به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$I_0 = \alpha \max \{I_1(x, z), \forall x \in X, \forall z \in Z\} \quad (26)$$

در رابطه فوق X و Z مجموعه مختصات طولی و عرضی نقاط هدف در کل ناحیه روبش بوده و $0 < \alpha < 1$ ثابتی است که به‌صورت تجربی تعیین می‌شود. ما مقدار این ضریب را در آزمون‌ها برابر با $\alpha = 0.9$ در نظر می‌گیریم. شکل‌دهی پرتو در این حالت متناسب با دامنه سیگنال‌های دریافتی آرایه فازی خواهد بود.

۳-۴- پیچیدگی محاسباتی

جدول (۱) میزان پیچیدگی محاسباتی تقریب ماتریس معکوس در روش ITFM را بر حسب تعداد محاسبات جمع و ضرب، با روش محاسبه مستقیم معکوس ماتریس مقایسه می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول (۱) مشاهده می‌شود روش پیشنهادی تقریب

صفر نزدیکتر است و در نتیجه مطابق رابطه (۱۷) مقادیر درایه‌های $\hat{\mathbf{R}}(k)$ به مقادیر درایه‌های $\mathbf{R}(k)$ نزدیکتر است و بنابراین ماتریس $\hat{\mathbf{R}}(k)$ تقریبی از ماتریس $\mathbf{R}(k)$ است. بالعکس با افزایش مقدار λ تفاوت‌های مقادیر $\hat{r}_{ij}(k)$ نسبت به $r_{ij}(k)$ برای درایه‌های قطری و غیر قطری بیشتر شده و در نتیجه ماتریس $\hat{\mathbf{R}}(k)$ به ماتریس همانی نزدیکتر است.

با توجه به بحث بالا، انتخاب مقدار بهینه λ در الگوریتم پیشنهادی به‌صورت تجربی و برای حفظ مزایای الگوریتم‌های TFM و WTFM در شناسایی نقاط بازتاب‌کننده و حذف نویز زمینه تصویر صورت می‌گیرد.

علاوه بر این، برای کاهش حجم محاسبات ماتریس معکوس، از لم معکوس ماتریس که در ادامه تشریح می‌شود، استفاده می‌کنیم.

۳-۱- لم معکوس ماتریس

مطابق با لم معکوس ماتریس، اگر ماتریس دلخواه \mathbf{A} به‌صورت ترکیب ماتریسهای \mathbf{B} ، \mathbf{C} و \mathbf{D} به فرم زیر تعریف شود،

$$\mathbf{A} = \mathbf{B}^{-1} + \mathbf{C} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{C}^T \quad (18)$$

در این صورت معکوس آن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{C} (\mathbf{D} + \mathbf{C}^T \mathbf{B} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{B} \quad (19)$$

در روش پیشنهادی، برای محاسبه معکوس ماتریس $\hat{\mathbf{R}}(k)$ در رابطه (۱۶) با استفاده از لم معکوس ماتریس، روابط زیر را تعریف می‌کنیم:

$$\begin{cases} \mathbf{B}^{-1} = \lambda \mathbf{I} \\ \mathbf{C} = \mathbf{X}(k) \\ \mathbf{D} = (1 - \lambda)^{-1} \end{cases} \quad (20)$$

بنابراین از رابطه (۱۹) و به کمک رابطه (۲۰) خواهیم داشت:

$$\hat{\mathbf{R}}^{-1}(k) = \frac{1}{\lambda} \mathbf{I} - \frac{\mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k)}{\lambda \mathbf{h}^T(k) \mathbf{h}(k) + \frac{\lambda^2}{1-\lambda}} \quad (21)$$

۳-۲- تقریب معکوس ماتریس

به منظور کاهش حجم محاسبات معکوس ماتریس و پیشنهاد الگوریتم انعطاف‌پذیری که قابلیت‌های شکل‌دهنده‌های پرتو TFM و WTFM را داشته باشد، بجای محاسبه ماتریس $\mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k)$ در رابطه (۱۶)، تنها قطر اصلی آن و تعداد $0 \leq M < N$ قطر فرعی بالایی و پایینی قطر اصلی را در نظر می‌گیریم. درایه‌های ماتریس حاصل شده $\hat{\mathbf{R}}_M(k)$ فرم زیر را خواهد داشت:

$$r_{ij}(k) = \begin{cases} h_i(k) h_j(k), & i - M \leq j \leq i + M \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

۴- طراحی و پیاده‌سازی

طراحی و پیاده‌سازی شامل پروب آرایه فازی، اسکنر، مدارات الکترونیکی، محاسبه قوانین کانونی و الگوریتم تصویربرداری می‌باشد. پروب آرایه فازی فراصوتی از تعدادی عنصر 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 پروب نشان داده شده همراه با کفشک مخصوص آن در شکل (۳) استفاده شده‌است. این پروب که در نمونه‌های مشابه نیز به کار رفته‌است، دارای ارتفاع ۱۲ میلی‌متر و ۱۶ عنصر در فرکانس 7.5MHz می‌باشد که فاصله هر دو عنصر مجاور، برابر 0.5mm می‌باشد. این پروب در حال حاضر، تنها مدلی است که امکان به‌کارگیری برای بازرسی غیر مخرب لوله‌های واتروال بویلر را دارد [۳۲-۳۴].



شکل (۳): پروب مناسب بازرسی لوله‌های بویلر [۳۲-۳۴]

برای نگهداری پروب بر روی لوله‌های بویلر از پایه نگهدارنده (اسکنر) استفاده می‌شود که چرخش آن به دور لوله را ممکن می‌کند. در مدارهای الکترونیکی نرخ نمونه‌برداری مورد استفاده برابر 40MHz و هر نمونه به صورت ۱۲ بیتی انتخاب شده‌است. ابتدا مدار تحریک^{۱۶} ولتاژی با دامنه ۵۰ ولت به هر عنصر اعمال می‌کند. سیگنال دریافتی از آرایه که دامنه‌ای بین صفر تا حدود یک ولت دارد، وارد قطعه ADC می‌شود و ضمن تقویت، به معادل دیجیتالی تبدیل می‌شود. نرخ نمونه‌برداری ADC برابر 40MHz و به صورت ۱۲ بیتی است. 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. در شکل (۴) نمایی از برد الکترونیک ساخته شده، ارائه شده‌است. عملیات محاسباتی به چهار بخش (الف) دریافت داده‌ها، (ب) ذخیره‌سازی داده‌ها، (پ) انتقال داده‌ها و (ت) پردازش داده‌ها تقسیم می‌شود. 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 خارج از FPGA انجام می‌شود. برای انتقال ماتریس FMC به رایانه از کابل LAN استفاده می‌شود. سرعت متوسط انتقال LAN در این تحقیق در حدود ۵۰ Mbps است و در نتیجه حدود ۷۴ ms مدت زمان انتقال ماتریس FMC به رایانه است.

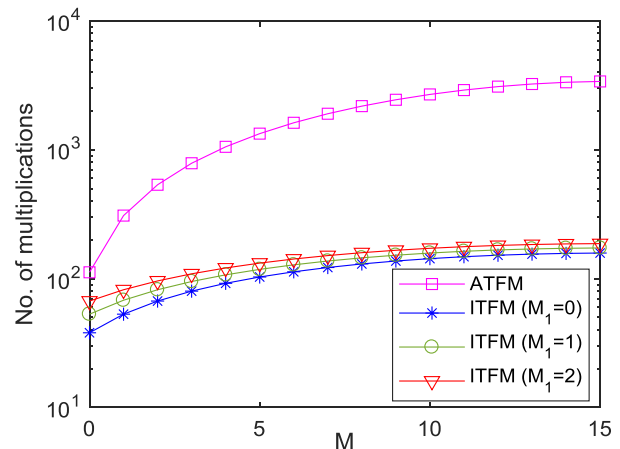
ماتریس معکوس پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به روش مستقیم محاسبه معکوس ماتریس - با پیچیدگی از مرتبه $O(N^3)$ - دارد.

جدول (۱): حجم محاسبات تقریب ماتریس معکوس

	تعداد ضرب	تعداد جمع
محاسبه مستقیم معکوس ماتریس	$O(N^3)$	$O(N^3)$
روش تقریب یک مرحله‌ای	$\left(N - \frac{M}{2}\right)(M+1) + 3$	$2N+1$
روش تقریب دو مرحله‌ای	$N(M_1 + M_2 + 2) - \frac{1}{2}(M_1^2 + M_2^2 + M_1 + M_2) + 6$	$4N+2$

شکل (۲) نمونه‌ای از حجم محاسبات تقریب ماتریس معکوس را بر حسب تعداد عملیات ضرب برای روش پیشنهادی ITFM برای $N=16$ به‌ازای $M_2=M$ و سه مقدار مختلف M_1 نشان می‌دهد. در این شکل برای مقایسه، حجم محاسبات روش ATFM به‌ازای تعداد تکرار $p=3$ نیز بر حسب مقدار M نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که تعداد محاسبات در روش ITFM به‌طور قابل توجهی کمتر از روش ATFM است. همچنین تعداد محاسبات با افزایش M به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای مثال، برای $M_1=2$ و $M=6$ ، تعداد عملیات ضرب در روش ITFM برابر با ۱۴۲ بوده در حالیکه در روش ATFM برابر با ۱۶۲۰ می‌باشد. بنابراین روش پیشنهادی شکل‌دهی پرتو نسبت به روش WTFM و ATFM، پیچیدگی محاسباتی کمتری دارد.

لازم به ذکر است که به لحاظ طراحی و پیاده‌سازی مداری، برای افزایش سرعت محاسبات، مصرف توان پایین، و کاهش مساحت مدار می‌توان از جمع‌کننده‌ها و ضرب‌کننده‌های غیر دقیق استفاده کرد [۳۱].

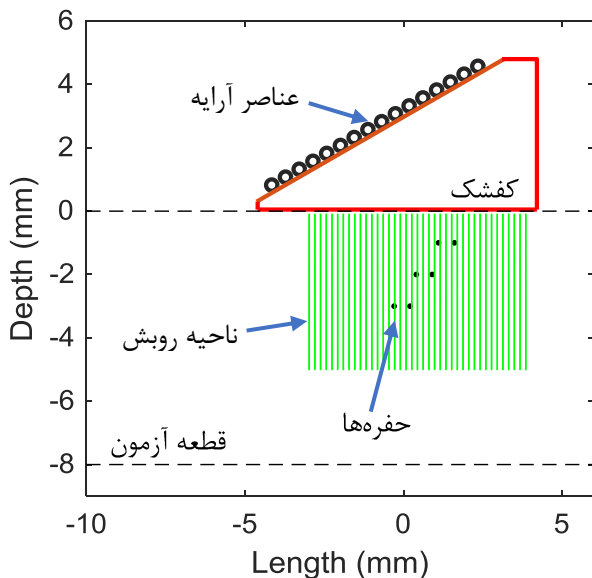


شکل (۲): حجم محاسبات تقریب ماتریس معکوس در ITFM با مقادیر $M_1=0,1,2$ و مقایسه با تقریب روش ATFM بر حسب تعداد عملیات ضرب

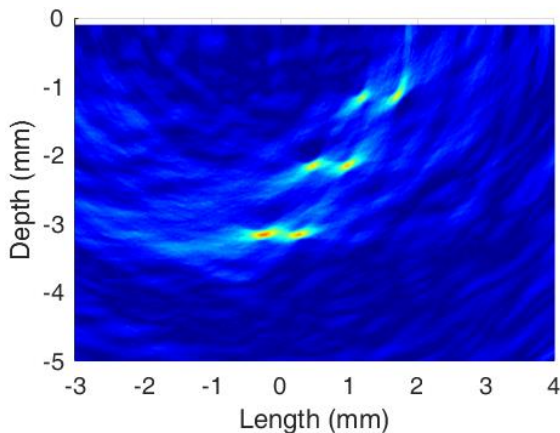
۵-۱- نتایج شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی‌ها فرض می‌شود آرایه فازی دارای ۱۶ عنصر با گام ۰.۵ میلیمتر است. قطعه مورد بررسی از جنس فولاد است و سیگنال دریافتی یک سینوسی با فرکانس ۱۵ MHz در نظر گرفته می‌شود. پروب آرایه فازی روی یک کفشک از جنس رگسولایت با زاویه ۳۰ درجه قرار گرفته است و سرعت صوت در فولاد و کفشک به ترتیب برابر با ۶۰۰۰ و ۳۰۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. شکل (۶) وضعیت آزمایشی مورد استفاده در شبیه‌سازی و ناحیه روبش و نقاط بازتابنده قطعه را نشان می‌دهد.

به منظور شبیه‌سازی بازتابهای کاذب که تشکیل نویز لکه‌ای در تصویر را می‌دهند، نویز همبسته گوسی با نسبت SNR برابر صفر دسی‌بل به سیگنالهای روبش A افزوده شده است. شکلهای (۷) تا (۱۰) تصاویر فراصوتی حاصل از روشهای روبش را نشان می‌دهد.



شکل (۶): وضعیت آزمایشی مورد استفاده در شبیه‌سازی

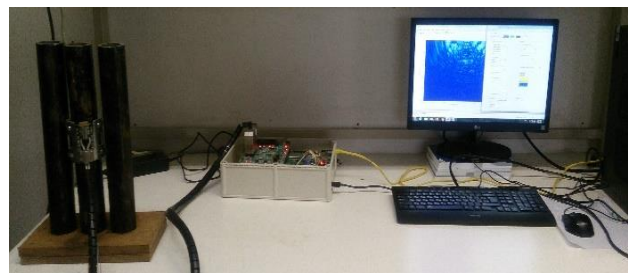


شکل (۷): تصویر فراصوتی حاصل از روش TFM در شبیه‌سازی



شکل (۴): بردهای الکترونیکی ساخته شده

داده‌های مذکور در رایانه گردآوری می‌شوند و سپس محاسبات مرتبط با روبش فراصوتی بر روی آنها انجام می‌شود. انجام این محاسبات با استفاده از نرم‌افزار MATLAB صورت می‌گیرد. شکل (۵) نمای کلی سیستم ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نمای کلی سیستم ساخته شده شامل لوله‌های فولادی آزمون، پروب و نگهدارنده، برد الکترونیکی، رایانه و کابل‌های ارتباطی

۵- نتایج

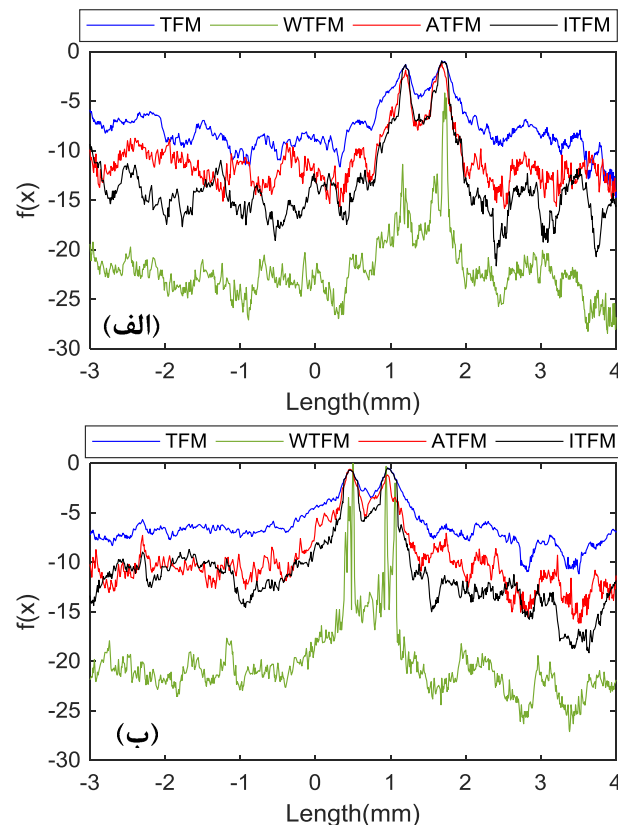
نتایج در دو بخش ارائه می‌شوند. در بخش نخست، نتایج نظری حاصل از یک قطعه فولادی شبیه‌سازی شده با شش حفره نقطه‌ای که دو به دو در مجاورت یکدیگر و در سه عمق ۱ mm و ۲ mm و ۳ mm در نظر گرفته شده‌اند، ارائه می‌شود. در بخش دوم نتایج اخذ شده آزمون بر روی یک قطعه لوله فولادی با قطر ۲.۵ اینچ که وضعیت لوله‌های بویلر نیروگاه را معادل‌سازی می‌کند در حضور تعدادی حفره تعمیدی ارائه می‌شود. در هر بخش، مقایسه‌ای میان نتایج اخذ شده از روش پیشنهادی و روشهای دیگر ارائه شده است. برای روش پیشنهادی $ITFM$, $M_1 = 0$, $M_2 = 6$, $\lambda = 0$ و در روش $ATFM$, $WTFM$, $M = 6$, $p = 4$, $\eta = 0.001$ و در نظر گرفته شده است. انتخاب مقادیر فوق به صورت تجربی و برای رسیدن به کیفیت بصری مناسب تصویر از نظر نویز زمینه و قابلیت آشکارسازی نقاط بازتابنده انتخاب شده است.

می‌توان دید روش ATFM از نظر نویز زمینه بهتر از روش TFM عمل می‌کند و دقت آشکارسازی آن بهتر از روش WTFM است، اما در مقایسه با روش WTFM نویز زمینه بیشتری دارد و تفکیک‌پذیری نقاط بازتابنده از یکدیگر ضعیف است. مطابق شکل (۱۰) روش پیشنهادی ITFM نسبت به روش ATFM نویز زمینه کمتر و تفکیک‌پذیری بهتری دارد.

به جهت مقایسه کمی روشهای مورد بررسی، تابعی از شدت روشنایی تعریف می‌شود که عبارت است از حداکثر مقدار شدت روشنایی در بازه‌ای از عمق تصویر که در مجاورت حفره است و برای هر طول x به‌طور مستقل طبق رابطه (۲۷) به‌دست آمده است:

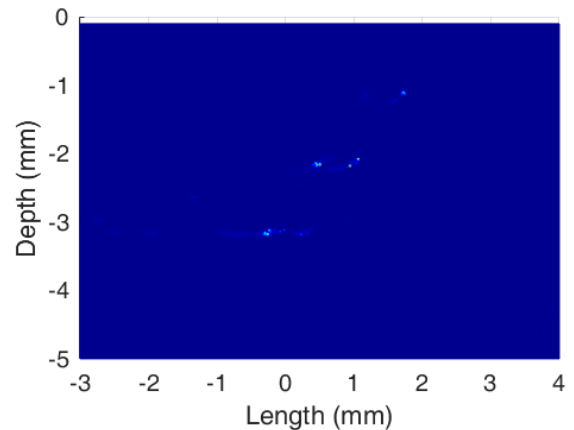
$$f(x) = \max \{I(x, z), \forall z \in Z\} \quad (27)$$

که در آن Z شامل مجموعه عمق‌های ناحیه روبش در بازه صفر تا ۰.۲۵ mm به مرکزیت عمق حفره می‌باشد. شکل (۱۱) مقدار تابع $f(x)$ را برای دو حفره بالایی تصویر (با عمق ۱ mm) و دو حفره میانی تصویر (با عمق ۲ mm) بر حسب دسی‌بل نشان می‌دهد.

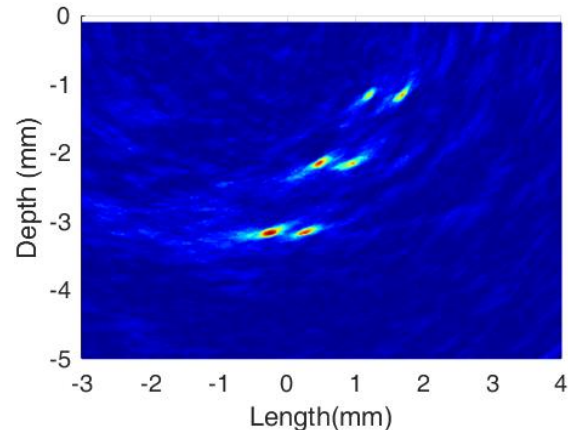


شکل (۱۱): مقایسه تابع روشنایی تصاویر فراصوتی در (الف) دو حفره بالایی تصویر قطعه و (ب) دو حفره میانی تصویر حفره شبیه‌سازی شده

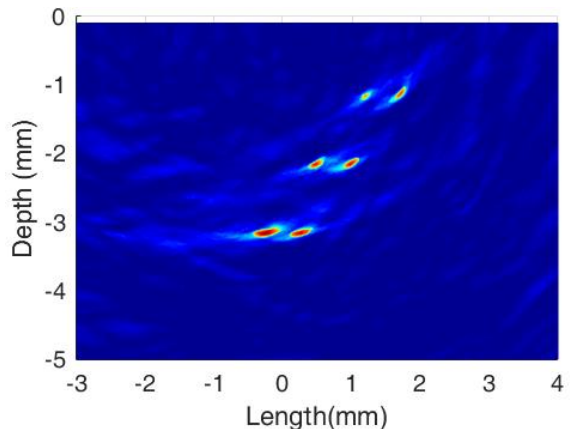
مطابق نتایج شکل (۱۱)، روشهای TFM و ITFM بیشترین دامنه تابع را در نقاط بازتابنده دارند که به معنی آشکارسازی قویتر نقاط بازتابنده است. بعد از آن روشهای ATFM و در نهایت روش WTFM در نقاط بازتابنده قله دارند. اما با توجه به قله ضعیفتر (به‌خصوص روش



شکل (۸): تصویر فراصوتی حاصل از روش WTFM در شبیه‌سازی



شکل (۹): تصویر فراصوتی حاصل از روش ATFM در شبیه‌سازی



شکل (۱۰): تصویر فراصوتی حاصل از روش پیشنهادی ITFM در شبیه‌سازی

با توجه به تصویر شکل (۷) مشاهده می‌شود روش TFM محل نقاط حفره را به‌خوبی نشان می‌دهد اما دارای نویز زمینه زیادی است و می‌تواند سبب آشکارسازی اشتباه شود. از طرف دیگر مطابق شکل (۸) روش WTFM به‌خوبی نویزهای زمینه را حذف می‌کند، اما در آشکارسازی نقاط حفره به‌خوبی عمل نکرده است و شدت روشنایی نقاط بازتابنده ضعیف است و این احتمال عدم آشکارسازی نقاط بازتابنده را بالا می‌برد. از مقایسه شکل (۹) با شکل‌های (۷) و (۸)

در این حالت به دلیل قرار گرفتن پروب بر روی کفشک، امواج فراصوتی به صورت مورب منتشر شده و بازتاب می‌شوند. این امواج پس از عبور از کفشک و ورود به قطعه فولادی، عمدتاً امواج عرضی بوده و سرعتی در حدود 3250 m/s دارند. برای تمرکز موثر پرتوها در ناحیه مورد روبش و تشکیل تصویر واضح‌تر می‌بایست مجموعه پروب و کفشک با فاصله‌ای از محدوده مورد بازرسی قرار گیرد. علت این امر، نامنظمی الگوی انتشار در میدان نزدیک پروب است که روی تمرکز پرتوها اثر می‌گذارد. در این آزمون فاصله بین کفشک پروب و حفره‌ها نسبت به سطح لوله حدود 25 mm می‌باشد.



شکل (۱۲): وضعیت آزمایشی مورد نظر (ساخت پژوهشگاه نیرو)

شکلهای (۱۳) تا (۱۶) تصاویر به دست آمده از روشهای روبش مبتنی بر شکل‌دهی پرتو TFM, WTFM, ATFM و روش پیشنهادی ITFM را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در تمامی شکلهای، تصویر دو حفره در عمق 7 mm و 10 mm دیده می‌شود که منطبق با محل حفره‌ها در لوله فولادی است. مشاهده می‌شود تصویر حفره‌ها در شکلهای (۱۳) تا (۱۶) کشیدگی دارد که به دلیل فاصله زیاد حفره‌ها از کفشک در مقایسه با طول آرایه فازی است. نواحی روشن در این تصاویر، بازتاب‌های کاذب ناشی از وجود نویز در سیگنال‌های دریافتی آرایه فازی و همچنین بازتاب‌های چندگانه پرتوهای ارسالی از جداره‌های داخلی لوله و حفره‌ها و نواحی ناهمگن قطعه می‌باشند. از مقایسه تصاویر شکلهای (۱۳) تا (۱۶) ملاحظه می‌شود نویز زمینه در روش ATFM، کمتر از TFM بوده و در روش WTFM بسیار کمتر شده است. از طرفی روش WTFM لبه‌های تصاویر را تضعیف می‌کند و حفره‌ها به خصوص حفره پایینی (با قطر 6 mm) را کم‌رنگ و محو نشان می‌دهد. در روش ITFM بازتاب‌های کاذب و نویز زمینه تصویر

WTFM در شکل الف)، در آشکارسازی حفره‌ها ضعیف‌تر عمل می‌کنند. همچنین به لحاظ نویز زمینه مشاهده می‌شود روش WTFM به خوبی و بهتر از سایر روشها نویز زمینه را کاهش می‌دهد (اما چنان که گفته شد در آشکارسازی حفره‌ها دارای ضعف است). مشاهده می‌شود روش پیشنهادی نویز زمینه کمتری نسبت به روشهای TFM و ATFM دارد که به معنی کیفیت تصویر بهتر و احتمال آشکارسازی کاذب کمتری خواهد بود. همچنین از نظر تمایز حفره‌های مجاور، دو روش ATFM و ITFM مشابه هم عمل می‌کنند و هر دو روش عملکرد بهتری نسبت به روشهای TFM و WTFM دارند.

زمان اجرای هر الگوریتم برای تولید تصاویر شکل (۷) تا (۱۰) با قدرت تفکیک 0.1 mm با نرم‌افزار MATLAB 2017a به کمک رایانه‌ای دارای پردازنده اینتل ۶۴ بیت با کلاک 1.8 GHz نوع Core (TM)i7 دارای حافظه RAM 12GB به قرار جدول (۲) است.

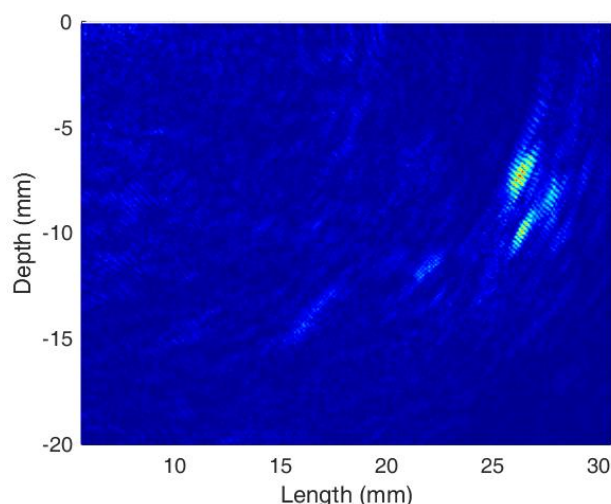
جدول (۲): ارزیابی تصاویر به دست آمده از روشهای روبش

روش روبش	زمان اجرا (ثانیه)
TFM	۰,۰۲
WTFM	۰,۲۹
ATFM	۰,۳۸
ITFM	۰,۱۲

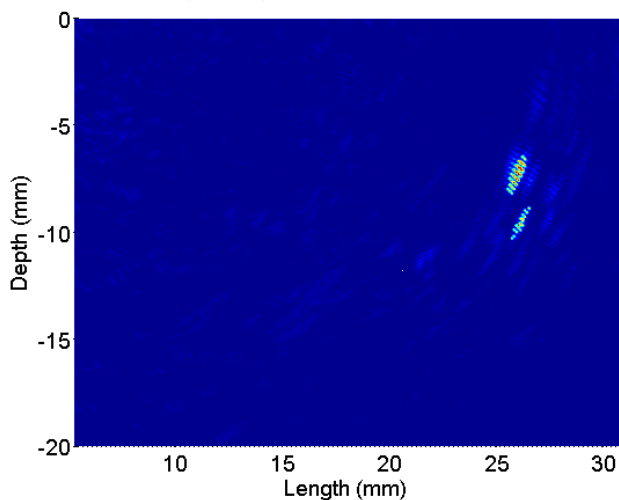
ملاحظه می‌شود سرعت اجرای روش پیشنهادی ITFM حدود ۳ برابر ATFM و حدود 2.4 برابر روش WTFM می‌باشد. بیشترین سرعت اجرای الگوریتم مربوط به روش TFM است که نیاز به محاسبه معکوس ماتریس ندارد، اما کیفیت تصویر پایین‌تری به دست می‌دهد.

۵-۲- نتایج آزمایش

در آزمایش‌ها از یک پروب آرایه فازی مدل Olympus دارای ۱۶ عنصر خطی در فرکانس 7.5 MHz که روی کفشکی از جنس رگسولایت با زاویه 38.5° درجه قرار گرفته است، استفاده می‌شود. عرض پالس اعمالی برابر نصف دوره تناوب پروب و برابر 67 ns و دامنه پالس اعمالی برابر 50 V است. فاصله بین عنصرهای آرایه 0.5 mm است. قطعه آزمون یک لوله استوانه‌ای از جنس فولاد با قطر 60 mm و ضخامت 15 mm می‌باشد. پالس‌های دریافت شده از قطعه، با نرخ 40 MHz نمونه برداری می‌شود. شکل (۱۲) وضعیت آزمایشی مزبور را که در پژوهشگاه نیرو ساخته شده است، نشان می‌دهد. در اینجا روشهای روبش با دو آزمایش مختلف ارزیابی و مقایسه می‌شود. در آزمایش اول دو حفره سراسری عمود بر محور استوانه در عمق‌های 7 mm و 10 mm با قطر به ترتیب 1 mm و 0.6 mm مطابق شکل (۱۲) تعبیه شده است. جهت حفره‌ها، عمود بر محور لوله و به صورت سراسری می‌باشد.



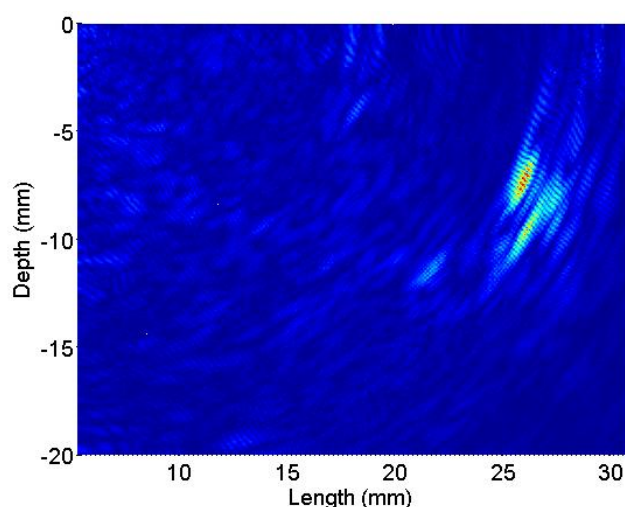
شکل (۱۵): تصویر حاصل از روبش به روش ATFM



شکل (۱۶): تصویر حاصل از روبش به روش پیشنهادی ITFM

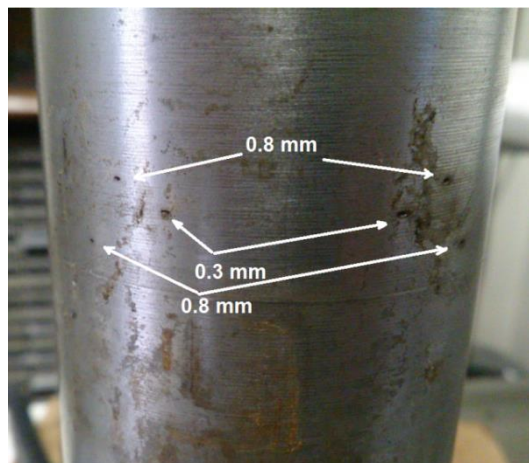
تا حد زیادی کاهش یافته است و تصویر حفره‌ها واضح‌تر از روش WTFM دیده می‌شود.

در آزمایش دوم حفره‌های ریز در فاصله‌های متفاوت از پروب آرایه فازی انتخاب می‌شود. در این حالت که میزان بازتاب‌های واقعی حفره‌ها متفاوت بوده و از حفره ریزتر ضعیف‌تر است، عملکرد الگوریتم‌ها ارزیابی می‌شود. برای این آزمایش سه حفره سرتاسری با قطرهای mm ۰٫۳، mm ۰٫۸ و mm ۰٫۸ به موازات محور لوله به صورت شکل (۱۷) در لوله فولادی تعبیه شده است. عمق حفره‌ها از سطح لوله به ترتیب برابر با mm ۲، mm ۵ و mm ۹ است.

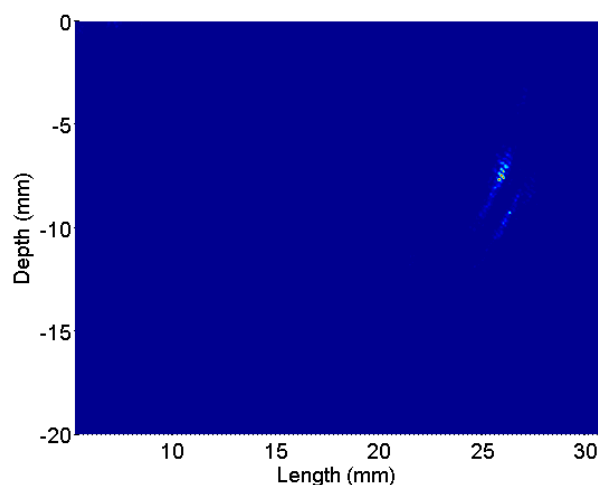


شکل (۱۷): تصویر حاصل از روبش به روش TFM

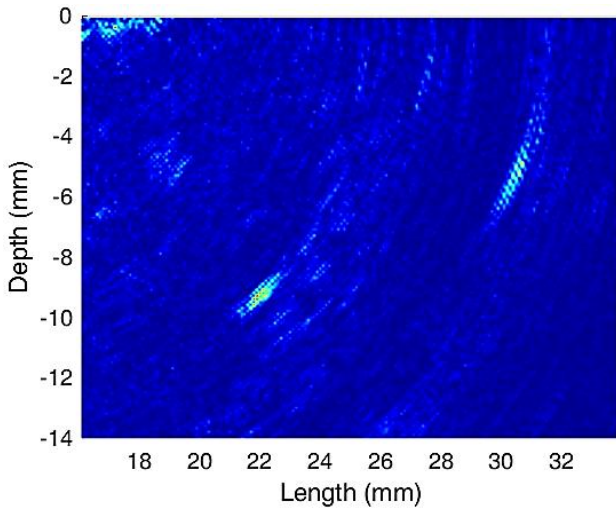
شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) تصاویر روش‌های روبش مبتنی بر شکل‌دهی پرتو TFM، WTFM، ATFM و روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. ناحیه نسبتاً روشن سمت چپ بالای تصویر، بخشی از بازه نزدیک به پروب، موسوم به "ناحیه مرده" ^{۱۷} است؛ زیرا کفشک پروب در همان مختصات طولی قرار گرفته است.



شکل (۱۸): بخش سه حفره‌ای لوله فولادی در آزمون دوم

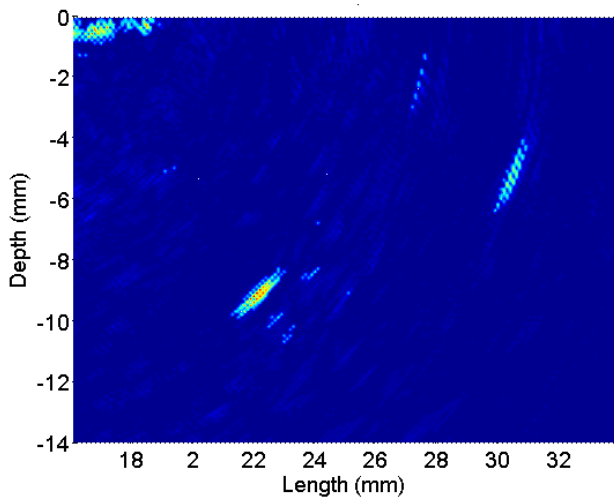


شکل (۱۹): تصویر حاصل از روبش به روش WTFM



شکل (۲۰): تصویر حاصل از روبش به روش ATFM

جدول (۳) روش‌های مورد بررسی را از نظر سطح نویز زمینه به‌طور کمی با یکدیگر مقایسه می‌کند. برای محاسبه سطح نویز زمینه از میانگین تابع نرمالیزه شده $I(x, z)$ در نقاط غیربازتابنده (نواحی که شامل حفره نیست) استفاده شده است. مطابق جدول مشاهده می‌شود سطح نویز زمینه در روش پیشنهادی به ترتیب حدود ۶ و ۵ دسی‌بل کمتر از روشهای TFM و ATFM بوده و نسبت به روش WTFM حدود ۳ دسی‌بل بیشتر است.

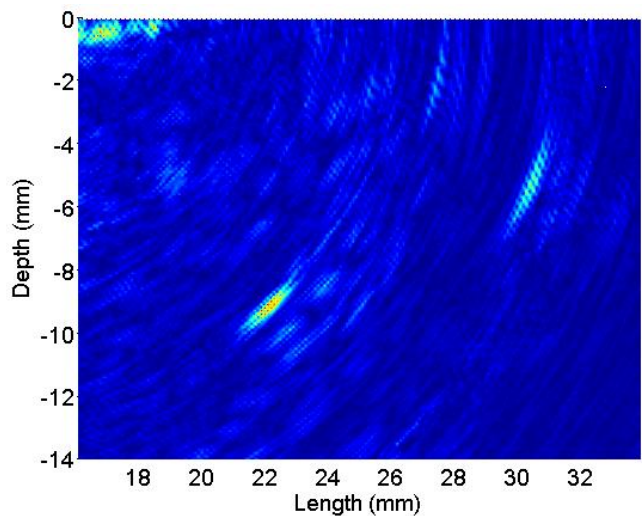


شکل (۲۱): تصویر حاصل از روبش به روش پیشنهادی ITFM

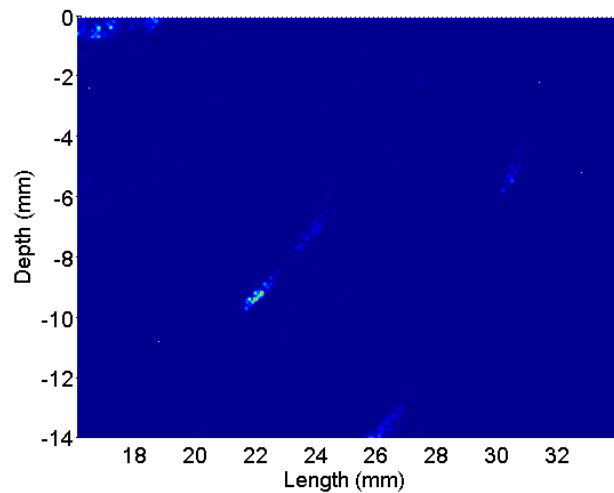
جدول (۳): ارزیابی تصاویر به‌دست آمده از روش‌های روبش

روش روبش	متوسط نویز زمینه (دسی‌بل)
TFM	-۱۴,۰۵
WTFM	-۲۳,۰۸
ATFM	-۱۵,۲۸
ITFM	-۲۰,۱۱

با توجه به شکل (۱۸) مشاهده می‌شود روش TFM تمام حفره‌ها را نشان می‌دهد، اما نویز زمینه نسبتاً زیاد است و به‌دلیل بازتاب‌های متعدد احتمال تشخیص حفره کاذب وجود دارد. همچنین وضوح حفره اول (با قطر ۳,۰ mm) نسبتاً پایین است. در روش روبش مبتنی بر WTFM در شکل (۱۹) نویز به‌خوبی کاهش یافته است، اما حفره اول به‌طور کامل محو شده است و وضوح حفره دوم نیز بسیار پایین آمده است. در روش ATFM در شکل (۲۰)، نویز زمینه اندکی کمتر از روش TFM است و تصاویر حفره‌ها واضحتر از روشهای TFM و WTFM دیده می‌شود. در روش پیشنهادی در شکل (۲۱) نویز زمینه بسیار کمتر از روشهای TFM و ATFM است و در عین حال وضوح تصاویر حفره‌ها حفظ شده است.



شکل (۱۸): تصویر حاصل از روبش به روش TFM



شکل (۱۹): تصویر حاصل از روبش به روش WTFM

۶- نتیجه

در این مقاله طراحی سیستم بازرسی غیر مخرب لوله‌های بویلر به روش تصویربرداری فراصوتی با آرایه فازی تشریح شد و به منظور بهبود کیفیت تصاویر فراصوت، روشی برای شکل‌دهی پرتو ارائه شد. در این روش، شکل‌دهی پرتو از نوع جمع- وزن‌دهی- تاخیر مبتنی بر تقریب کمینه واریانس می‌باشد. جهت محاسبه وزن از تقریب ماتریس معکوس استفاده شد. تقریب به‌صورتی اعمال شد که حجم محاسبات آن در مقایسه با روش متعارف محاسبه معکوس ماتریس کاهش یابد. همچنین نشان داده شد، با اعمال تقریب معکوس ماتریس در روش شکل‌دهی پرتو، نویز زمینه کاهش یافته و در عین حال تصویر نقص‌های قطعه تحت آزمون، وضوح بالایی دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، وظیفه خود می‌دانند از آقایان بهروز عبدلی و مهدی رضایی بابت همکاری در ساخت سخت افزار مراتب تشکر و قدردانی خود را ابراز نمایند. همچنین مراتب ویژه سپاسگزاری خود را از همکاران نیروگاه شهید مفتاح همدان، آقایان نریمانی، افشار، حسینی و جاودانی ابراز می‌دارند.

مراجع

- [۸] سارانی راد، و.، صنعتی، ش.، شیخ الاسلامی، ز.، سعادت‌مند طرزجان، م.، "روشی جدید برای تطبیق تصاویر پزشکی هم نوع بر پایه مدل های دگرپس پذیر و کاربرد آن برای تصاویر CT قفسه سینه"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۷.
- [۹] حشمت دهکردی، ا.، آزمون‌های غیر مخرب، روش فراصوتی، انتشارات انجمن خوردگی ایران، ۱۳۹۱.
- [۱۰] ولایی، ح.، ر.، زمانی، م.، ر.، وزیری، س.، عقیلی جم، ه.، "تاثیرات بازدیدهای دوره ای 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، ۱۳۹۲.
- [11] Ditchburn, R. J., Burke, S. K., Scala, C. M., "NDT of Welds: State of the Art", NDT & e International, Vol. 29, No.2, pp. 111-117, 1996.
- [12] Mole, M. D. C., "Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications", Québec, First Edition, R/D Tech, pp. 30 – 35, 2004.
- [13] Schmerr, L. W., Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, Springer Series in Measurement Science and Technology, 2016.
- [14] M. Marmonier, S. Robert, J. Laurent, C. Prada, "Real-Time 3D Imaging with Fourier-Domain Algorithms and Matrix Arrays Applied to Non-destructive Testing", Ultrasonics, Vol. 124, 2022.
- [15] Cui, W., Qin, K., "Real-Time Total Focusing Method Imaging for Ultrasonic Inspection of Three-Dimensional Multilayered Media", Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Apr. 2018.
- [16] Drinkwater, B. W., Wilcox, P. D., "Ultrasonic Arrays for Non-Destructive Evaluation: A Review" NDT&E International, Vol. 39, No. 7, pp. 525–541, 2006.
- [17] Jeune, L. L., Robert, S., Villaverde, E. L., Prada, C., "Plane Wave Imaging for Ultrasonic Non-Destructive Testing: Generalization to Multimodal Imaging", Ultrasonics, Vol. 64, 2016.
- [18] Holmes, C., Drinkwater, B. W., 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, pp. 701–711, 2005.
- [19] Lin, Y., 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.
- [20] Pérez, E., Kirchhof, J., Semper, S., Krieg, F., Römer, F., "Total Focusing Method with Subsampling in Space and Frequency Domain for Ultrasound NDT", Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Oct. 2019.
- [21] Piedade, L. P., Painchaud-April, G., Duff, A. L., Bélanger, P., "Minimum Transmission Events for Fast Ultrasonic TFM Imaging: A Comparative Study", NDT & E International, Vol. 128, 2022.
- [22] Sutcliffe, M., Weston, M., Dutton, B., Cooper, I., "Real-Time Full Matrix Capture with Auto-Focusing of Known Geometry Through Dual Layered Media", NDT&E International, Vol. 51, pp. 16-23, 2012.
- [23] Njiki, M., Elouardi, A., Bouaziz, S., Casula, O., Roy, O., "A Multi-FPGA Architecture-Based Real-Time TFM Ultrasound Imaging", Journal of Real-Time Image Processing, Vol. 16, No. 2, pp. 505-521, 2019.
- [24] Zhang, J., Drinkwater, B. W., Wilcox, P. D., Hunter, A. J., "Defect Detection using Ultrasonic Arrays: The Multi-Mode Total Focusing Method", NDT & E International, Vol. 43, No. 2, pp. 123-133, 2010.
- [۱] بکرانی، م.، حمیتی واقف، و.، تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی، مورد مطالعاتی: بازرسی جوش لوله‌های بویلر، تهران، انتشارات پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.
- [۲] بکرانی، م.، حمیتی واقف، و.، "ارائه روش بهبودیافته تصویربرداری فراصوتی در بازرسی جوش"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هفدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۹.
- [3] Anandamurugan, S., Sankar, S. Y., "Phased Array UT Application for Boiler Tube Inspection in Manufacturing and In-Service", Proc. 14th Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing, India, Nov. 2013.
- [4] Hansen-Shearer, J., Lerendegui, M., Toulemonde, M., Tang, M. X., "Ultrafast 3-D Ultrasound Imaging Using Row-Column Array-Specific Frame-Multiply-and-Sum Beamforming", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 69, No. 2, pp. 480-488, 2022.
- [5] Thon, S. H., Hansen, R. E., Austeng, A., "Detection of Point Scatterers in Medical Ultrasound", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 69, No. 2, pp. 617-628, 2022.
- [6] Laroche, N., Bourguignon, S., Idier, J., Carcreff, E., Duclos, A., "Fast Non-Stationary Deconvolution of Ultrasonic Beamformed Images for Nondestructive Testing", IEEE Transactions on Computational Imaging, Vol. 7, pp. 935-947, 2021.
- [7] Villaverde, E. L., Croxford, A. J., Velichko, A., "Optimal Extraction of Ultrasonic Scattering Features in Coarse Grained Materials", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 68, No. 6, pp. 2238-2250, 2021.

- [25] Li, M., Hayward, G., "Ultrasound Nondestructive Evaluation (NDE) Imaging with Transducer Arrays and Adaptive Processing", *Sensors*, Vol. 12, No. 1, pp. 42-54, 2012.
- [26] Li, M., Hayward, G., "Adaptive Array Processing for Enhanced Ultrasonic Non-destructive Evaluation (NDE) and Imaging", *Proc. American Institute of Physics (AIP) Conference*, Vol. 2102, pp. 100007/1 – 100007/8, May. 2019.
- [27] Olympus, N.D.T, "Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. D Tech Guideline", Olympus NDT, 2004.
- [28] Khelil, M., Thomas, J. H., Simon, L., Guerjouma, R., Boudraa, M., "Characterization of Structural Noise Patterns and Echo Separation in the Time-Frequency Plane for Austenitic Stainless Steels", *Journal of Nondestructive Evaluation*. Vol. 36, No. 2, 2017.
- [29] Arora, J. S., *Introduction to Optimum Design*, New York: McGraw-Hill, Inc., 1989.
- [30] Haykin, S., *Adaptive Filter Theory*, 5th Ed., Pearson, 2014.

[۳۱] صیدی، س.، آذریپوند، ع.، "طراحی جمع‌کننده و ضرب‌کننده تقریبی مناسب برای کاربردهای پردازش تصویر"، *مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران*، سال هجدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۰.

- [32] <http://www.inspection-robotics.com>, Apr. 2020.
- [33] <https://www.olympus-ims.com/en/scanners/cobra/>, Apr. 2020.
- [34] <https://www.phoenixisl.com/product/bracelet/>, Apr. 2020.

زیر نویس‌ها

- ¹ Boiler
- ² Water-wall tubes
- ³ Aperture
- ⁴ Total Focusing Method
- ⁵ Delay-And-Sum
- ⁶ Weighted Total Focusing Method
- ⁷ Weighted Delay-And-Sum
- ⁸ Ill-conditioned
- ⁹ Adaptive Total Focusing Method
- ¹⁰ A-scan
- ¹¹ B-scan
- ¹² C-scan
- ¹³ D-scan
- ¹⁴ Regularization
- ¹⁵ Improved TFM
- ¹⁶ Pulser
- ¹⁷ Dead-zone