نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 132-115

تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی به روش تمرکز کامل بهبودیافته مبتنی بر شکل‌دهی پرتو در آزمون غیرمخرب

مهدی بکرانی *

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم.

(دریافت مقاله: 1398/02/20 ؛ پذیرش مقاله: 1398/04/08)

چکیده

یکی از روش‌های نوین روبش فراصوتی با آرایه فازی جهت تصویربرداری فراصوتی در آزمون غیرمخرب، روش روبش تمرکز کامل است. این روش دقت بالایی در آشکارسازی عیوب قطعه مورد آزمون دارد که به دلیل استفاده از تمام داده‌های دریافتی ناشی از ارسال پالس از هر المان آرایه فازی بطور مجزا می‌باشد. علی‌رغم برتری این روش نسبت به روش‌های متعارف روبش، قدرت تفکیک آن به دلیل ایجاد نویز زمینه در تصویر فراصوتی محدود است و در تشخیص عیوب واقعی از نویز و بازتاب‌های کاذب، ضعیف عمل می‌کند. در این مقاله روشی با حجم محاسباتی پایین برای بهبود روبش تمرکز کامل ارائه می‌شود که پرتوهای دریافتی از قطعه تحت آزمون را شکل‌دهی می‌کند و سبب کاهش نویز زمینه و افزایش دقت آشکارسازی عیوب قطعه می‌شود. به این منظور از تکنیک آستانه‌گذاری و برش سه‌سطحی داده‌های دریافتی المان‌های آرایه، برای تقریب معکوس ماتریس همبستگی با حجم محاسباتی پایین به منظور شکل‌دهی پرتو استفاده می‌شود. نتایج آزمون عملی به منظور آشکارسازی حفره‌های سوراخکاری‌شده روی لوله فولادی نشان‌دهنده کاهش میزان نویز زمینه به میزان 4/45 دسی‌بل نسبت به روش تمرکز کامل و بهبود تفکیک‌پذیری تصویر حفره‌ها به میزان 3 دسی‌بل است. همچنین مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، حداقل فاصله قابل تفکیک دو نقطه بازتابنده مجاور در روش پیشنهادی به 0/21 میلی‌متر می‌رسد که نسبت به روش تمرکز کامل به میزان 0/23 میلی‌متر بهبود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: آرایه فازی فراصوتی، آزمون غیر مخرب، بازرسی جوش، روش تمرکز کامل، شکل‌دهی پرتو.

Phased array ultrasonic imaging using an improved beamforming based total focusing method for non destructive test

M. Bekrani*

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

(Received 10 May 2019 ; Accepted 29 April 2019)

Abstract

One of the novel ultrasonic phased array based scanning methods for ultrasonic imaging in non-destructive test is total focusing method (TFM). This method employs maximum available information of the phased array elements and leads to an improved defect detection accuracy compared to conventional scanning methods. Despite its high detection accuracy, TFM behaves weak in distinguishing the real defects from noise which is because of its high background noise level. In this paper, a low complexity technique is presented for performance improvement of TFM which

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: bekrani@qut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

employs a beamforming method on the phased array received signals and leads to a reduction of the background noise and increase in the accuracy of the defect detection. To this end, a thresholding technique along with three-level clipping of the array received data is applied for low-complexity approximation of the correlation matrix inverse employed in the beamforming. Experimental results for detection of drilled holes on a steel pipe show a background noise reduction of 4.45 dB and improvement in the hole distinction of about 3 dB in comparison to those of TFM. In addition, as shown in the simulation results, the minimum distinguishable distance between two neighbor reflector points for the proposed method is 0.21 mm which is 0.23 mm lower than that for TFM.

Keywords: Ultrasonic phased array, Non-destructive testing, Welding inspection, Total focusing method, Beamforming.

1- مقدمه

تصویربرداری فراصوتی آرایه‌های فازی در سال‌های اخیر توسعه قابل توجهی در آزمون غیرمخرب صنعتی به‌منظور تشخیص عیوب یافته است. آزمون‌های فراصوتی در کاربردهای وسیعی نظیر بازرسی جوش، آزمون‌های فراصوتی خوردگی، بازرسی سلامت قطعات صنعتی از نظر عیوب داخلی و دیگر کاربردها مفید هستند. توانایی آرایه‌های فازی در ایجاد تصویر یکپارچه از قطعه مورد آزمون به‌صورت آنی، از جمله مزایای تصویربرداری آرایه فازی در مقایسه با روش‌های سنتی مبتنی بر تک المان است.

در سیستم‌های آرایه فازی می توان از اعمال تاخیرهای زمانی به المان‌های آرایه در مراحل ارسال و دریافت برای ایجاد پرتو متمرکز و ناحیه کانونی با شدت بالا استفاده کرد. سیگنال‌های دریافتی توسط المان‌ها پس از اعمال تاخیر معین با هم جمع می‌شوند. در این روش پرتوها در عمق مشخصی متمرکز می‌شوند و چنانچه میزان تاخیر اعمال‌شده روی سیگنال‌های دریافتی برابر با همان تاخیری باشد که در ارسال لحاظ شده است، تصویر خروجی نیز فقط شدت روشنایی نقطه کانونی را نشان می‌دهد.

در تصویربرداری فراصوتی، علاوه بر بازتاب‌های اصلی ناشی از بازتاب پالس‌های ارسالی از سطح حفره یا نقص در قطعه آزمون که تصویر حفره یا نقص را می‌سازد، بازتاب‌های فرعی ناشی از امواج خزشی که در پیرامون حفره یا نقص شکل می‌گیرند و امواجی که داخل حفره با ضریب شکست متفاوت وارد و خارج می‌شوند و هم‌چنین بازتابهای چندمسیره ناشی از پراکنده‌سازها در ساختار قطعه نیز وجود دارد [1]. این بازتاب‌های به اصطلاح کاذب، مسیر طولانی‌تری را نسبت به بازتاب‌های اصلی می‌پیمایند و بنابراین سبب ایجاد روشنایی کاذب در نواحی دیگر تصویر فراصوتی (به جز مکان واقعی حفره در تصویر) می‌شوند. علاوه بر این، نوسانات پالس‌های دریافتی از بازتاب‌کننده‌ها خود می‌تواند سبب ایجاد سایه‌هایی در اطراف تصویر بازتاب‌کننده‌ها شود.

روش‌های روبش با توجه قواعد تاخیر که در محاسبه روشنایی نقاط هدف مورد استفاده قرار می‌دهند، می‌توانند سبب ایجاد نواحی روشن ناخواسته ناشی از بازتاب‌های دریافتی کاذب توسط آرایه فازی در تصویر فراصوتی شوند. از چالش‌های مهم در تصویربرداری فراصوتی در آزمون غیرمخرب، تشخیص صحیح بازتاب‌های واقعی ناشی از عیوب قطعه از بازتاب‌های کاذب است. وجود بازتاب‌های کاذب سبب ایجاد نویز زمینه در تصویر فراصوتی می‌شود و تشخیص عیوب را دشوار و یا حتی غیرممکن می‌سازد [2-4].

از جمله روش‌های نوین روبش فراصوتی به کمک آرایه‌های فازی روش تمرکز کامل (TFM)[1] نام دارد که اولین بار در سال 2002 ارائه شد [5] و تاکنون در کاربردهای مختلف آزمون غیرمخرب مورد ارزیابی و توسعه قرار گرفته است [6-9]. در این روش از حداکثر اطلاعات دریافتی از المان‌ها برای هر نقطه هدف استفاده می‌شود [6] و در نتیجه در مقایسه با روش‌های متعارف روبش فراصوتی، نظیر روش روبش قطاعی و روبش متمرکز [10 و 11]، کیفیت تصویر و دقت تشخیص عیب

1- Total focusing method

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

بالاتری فراهم می‌آورد، اما هنوز نویز زمینه قابل توجهی در تصویر به‌دلیل تداخل پرتوها و بازتاب‌های کاذب ایجاد می‌شود.

به منظور بهبود کیفیت تصاویر فراصوتی در برابر نویز و تداخل، در حوزه فراصوت پزشکی روش‌هایی بر مبنای شکل‌دهی پرتو مبتنی بر تاخیر، وزن‌دهی و جمع پیشنهاد شده است [12-14] که از اصل حداقل واریانس جهت شکل‌دهی پرتو استفاده می‌شود. اخیرا این روش در آزمون غیرمخرب نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و نشان داده شده است که شکل‌دهی مبتنی بر نظریه حداقل واریانس می‌تواند به بهبود کیفیت تصاویر کمک کند [15]. پژوهش‌های اخیر ما نشان می‌دهد این روش در کاربردهای آزمون غیر مخرب دارای دو ایراد اساسی است: اولاً حجم محاسباتی بالایی دارد و برای کاربردهای برخط فرکانس بالا، نظیر بازرسی جوش، پیاده‌سازی سخت‌افزاری پرهزینه‌ای دارد، ثانیاً اگر چه نویز زمینه را به‌خوبی حذف می‌کند، اما مناسب شناسایی بازتاب‌های ضعیف ناشی از نقص‌های کوچک، مانند ترک‌های ریز در قطعه مورد آزمون نیست [16 و 17].

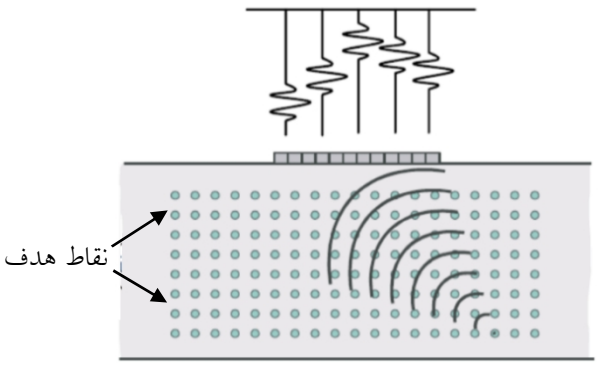
در این مقاله روشی برای تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی طراحی و پیاده‌سازی شده است که از اصلاح روش روبش تمرکز کامل بر مبنای شکل‌دهی پرتو حاصل شده است. در این روش برای شکل‌دهی پرتو بر مبنای نظریه حداقل واریانس، از محاسبه تقریبی معکوس ماتریس همبستگی داده‌های دریافتی المانها استفاده می‌شود. به این منظور از آستانه‌گذاری و برش سه‌سطحی داده‌های دریافتی استفاده می‌شود که علاوه بر شکل‌دهی پرتو که باعث بهبود دقت آشکارسازی می‌شود، حجم محاسباتی ماتریس معکوس بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. روش پیشنهادی تصویربرداری فراصوتی حجم محاسبات پایینی دارد و مناسب پیاده‌سازی برای کاربردهای برخط آزمون غیرمخرب نظیر بازرسی جوش می‌باشد.

ادامه مطالب این مقاله به‌ترتیب زیر ارائه شده‌است:

ابتدا دربخش 2 روش تمرکز کامل در تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی تشریح می‌شود و سپس در بخش 3، TFM به همراه تکنیک وزن‌دهی و شکل‌دهی پرتو بررسی می‌شود. در بخش 4 محاسبه وزن‌ها در الگوریتم تمرکز کامل وزن‌دار به روش بازگشتی وفقی تشریح می‌شود. در بخش 5 روش پیشنهادی تمرکز کامل بهبود یافته در تصویربرداری ارائه می‌شود. در بخش 6 اجزاء سیستم تصویربرداری فراصوتی مورد استفاده در آزمون در حالت عملی و حالت ایده‌آل تشریح می‌شود. در بخش 7 روش‌های تصویربرداری فراصوتی با توجه به معیارهای مختلف از قبیل کیفیت تصویر و پیچیدگی محاسباتی و زمان اجرای الگوریتم، بررسی شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های عملی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نهایتاً در بخش 8 نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه می‌شود.

2- TFM

در TFM پرتو در هر نقطه از ناحیه هدف مطابق شکل (1) متمرکز می‌شود [6 و7 و 18-21]. به این منظور برای تمرکز پرتو از اعمال تاخیرهای متناسب در سیگنال هر یک از المان-های آرایه فازی استفاده می‌شود، به‌صورتی که تمام پرتوها در یک زمان به نقطه هدف برسند.



شکل1- نحوه تمرکز پرتو در روش TFM [9]

برای محاسبه میزان تاخیر، با در نظر گرفتن فاصله بین یک المان مفروض از آرایه و نقطه هدف مورد نظر، و همچنین سرعت موج در قطعه، زمان مورد نیاز موج فراصوتی برای طی مسافت بین المان و نقطه هدف بدست می‌آید. در صورت استفاده از کفشک، زمان مورد نیاز برای طی مسافت کفشک و قطعه با هم جمع می‌شود. به همین ترتیب زمان مورد نیاز برای تمام المان‌ها تا نقطه هدف محاسبه می‌شود. سپس در ارسال

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

پالس، برای هر المان ارسال‌کننده تاخیری برابر با تفاضل زمان مورد نیاز آن المان و حداکثر زمان لازم برای رسیدن موج به نقطه هدف بین تمامی المان‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این صورت پرتوهای حاصل از ارسال پالس از المانهای آرایه، همگی در یک زمان به نقطه هدف می‌رسند [1 و 10].

روش معادل دیگر این است که زمان‌های محاسبه شده روی سیگنال‌های دریافت شده اعمال شود. در این حالت با فرض این‌که نقطه هدف در مختصات $(x_{\text{ref}}, z_{\text{ref}})$ باشد، شدت روشنایی تصویر در نقطه هدف در TFM از رابطه زیر محاسبه می‌شود [10]:

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

در این رابطه $d_{i,j}$ فاصله انتشار از المان ارسال‌کننده iام تا نقطه هدف در مختصات $(x_{\text{ref}}, z_{\text{ref}})$ و سپس تا المان گیرنده jام است و $h_{i,j}(\cdot)$ سیگنال دریافت شده توسط المان jام پس از ارسال توسط المان iام و بازتاب از قطعه است. همچنین N تعداد المانهای آرایه و c سرعت موج فراصوتی در قطعه تحت آزمون هستند. علامت جمع در رابطه (1) روی تمام زوج‌های فرستنده-گیرنده که تعداد آن‌ها برابر با $N \times N$ است، انجام می‌شود. بنابراین واضح است که این روش از حداکثر اطلاعات موجود برای هر نقطه هدف استفاده می‌کند [10]. روش روبش تمرکز کامل با توجه به رابطه (1) نیاز به $N^2 - 1$ عمل جمع برای محاسبه هر پیکسل تصویر (روشنایی هر نقطه هدف) دارد.

3- بررسی تکنیک وزن‌دهی در TFM

تکنیک وزن‌دهی به سیگنال‌های دریافتی المان‌های آرایه، برای شکل‌دهی وزن‌دار پرتو فراصوتی استفاده می‌شود [15]. مقادیر وزن‌ها با استفاده از تحلیل آماری نمونه‌های داده بر مبنای نظریه حداقل واریانس حاصل می‌شوند. در روش شکل‌دهی پرتو مبتنی بر نظریه حداقل واریانس، با حفظ بهره واحد در نقطه کانونی، توان خروجی شکل‌دهنده پرتو حداقل می‌شود.

با تعریف بردار خروجی تاخیریافته آرایه فازی به‌صورت $\mathbf{h}(k) = \left[h_1(k), h_2(k), \ldots, h_N(k)\right]^{\mathrm{T}}$، که در آن $h_i(k)$ عبارتست از نمونه kام سیگنال تاخیریافته خروجی مربوط به iامین المان آرایه فازی، مقادیر بردار وزن $\mathbf{w}(k) = \left[w_1(k), w_2(k), \ldots, w_N(k)\right]^{\mathrm{T}}$ به صورت رابطه (2) حاصل می‌شود [15]:

$$\mathbf{w}(k) = \frac{\mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{a}}{\mathbf{a}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{a}} \qquad (2)$$

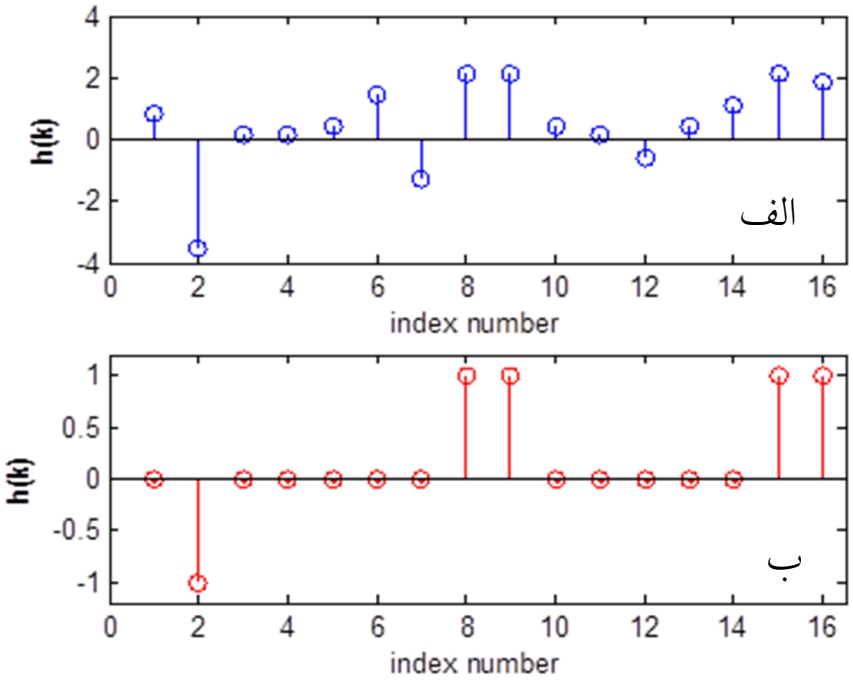
که در آن $\mathbf{R}(k) = E\left\{\mathbf{h}(k)\mathbf{h}^{\mathrm{T}}(k)\right\} \approx \mathbf{h}(k)\mathbf{h}^{\mathrm{T}}(k)$ ماتریس همبستگی نمونه‌های خروجی المانها است، همچنین $\mathbf{a}$ بردار ستونی $N \times 1$ شامل مقادیر واحد است، یعنی $\mathbf{a} = [1, 1, \ldots, 1]_N^{\mathrm{T}}$.

روش روبش وزن‌دهی شده تمرکز کامل(WTFM)، از وزن‌دهی سیگنال‌های دریافت شده توسط هر المان و سپس اعمال TFM استفاده می‌کند. بر این اساس روش WTFM حاصل می‌شود. به کارگیری این تکنیک سبب کاهش نویز در مقایسه با روش متعارف تمرکز کامل می‌شود و در نتیجه تفکیک‌پذیری تصویر بهبود می‌یابد.

در روش WTFM محاسبه معکوس ماتریس $\mathbf{R}(k)$ در صورتی که تعداد المان‌های آرایه زیاد باشد، حجم محاسباتی قابل توجهی خواهد داشت. علت این امر این‌است که پیچیدگی محاسباتی عملیات محاسبه ماتریس معکوس با روش‌های متعارف نظیر روش مبتنی بر محاسبه دترمینان و ماتریس همسازه و یا روش حذفی جردن، از مرتبه $O(N^3)$ است. به‌علاوه این حجم از محاسبه برای هر پیکسل تصویر تکرار می‌شود که پیچیدگی محاسباتی را P برابر می‌کند (P: تعداد کل نقاط هدف) و بار محاسباتی بالایی را به سخت‌افزار تحمیل می‌کند.

با توجه به اینکه فریم‌های تصویر بدست آمده در کاربردهایی نظیر بازرسی جوش باید به‌صورت برخط بروزرسانی شوند، این حجم از محاسبات، سخت‌افزار بسیار پرهزینه‌ای را می‌طلبد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل2- نمونه ای از سیگنال $\mathbf{h}(k)$ (شکل الف) و سیگنال برش یافته $\tilde{\mathbf{h}}(k)$ با آستانه برش $\delta = 0.4$ (شکل ب)

علاوه بر این، مشاهدات نشان می‌دهد این روش در تشخیص بازتاب‌های ضعیف و نقص‌های کوچک در قطعه مورد آزمون به‌خوبی عمل نمی‌کند و می‌تواند سبب محو نقاط بازتابنده در تصویر شود [16 و 17]. بر این اساس در پژوهش قبلی روش تمرکز کامل وزن‌دار وفقی (ATFM) [16] پیشنهاد شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

4- بررسی روش ATFM

در مقاله [16] نشان داده‌ایم که برای افزایش سرعت اجرای WTFM، در محاسبه وزن‌ها می‌توان به‌جای ماتریس خودهمبستگی داده‌های دریافتی $\mathbf{R}(k)$، فقط عناصر قطر اصلی و قطرهای مجاور قطر اصلی حاوی اطلاعات بیشتر را در نظر گرفت. محاسبه ماتریس معکوس به صورت بازگشتی انجام شود و در نتیجه حجم محاسباتی کاهش می‌یابد و نهایتاً الگوریتم تسریع می‌شود. نسخه ساده‌تر این الگوریتم در حالت خاص که فقط عناصر قطر اصلی در نظر گرفته شوند، در [22] بررسی شده است که به‌این ترتیب یک ماتریس قطری تشکیل می‌شود. بنابراین معکوس‌سازی آن فقط نیاز به معکوس‌سازی عناصر قطری آن دارد که دارای پیچیدگی محاسباتی از مرتبه $O(N)$ است.

با افزایش تعداد قطرهای مجاور برای رسیدن به نتیجه مطلوب، حجم محاسباتی این روش نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر آن طول گام و تعداد تکرار الگوریتم و تعداد قطرهای مهم ماتریس برای همگرایی الگوریتم وفقی و رسیدن به تقریب مناسب معکوس، مقدار ثابت و مشخصی ندارد و این مساله عملکرد موثر الگوریتم در تصویربرداری را محدود می‌کند.

5- روش پیشنهادی تمرکز کامل مبتنی بر برش داده (CTFM)

هدف CTFM پیشنهادی ساده‌سازی و تسریع وزن‌دهی است، به‌طوری که اشکالات روش‌های پیشین رفع شود. به عبارت دیگر دقت بالاتری نسبت به TFM دارد و در عین حال پیچیدگی محاسباتی آن پایین‌تر از WTFM و ATFM است و در نتیجه قابلیت استفاده در آزمون‌های برخط را دارد.

شکل‌دهی پرتو فراصوتی در روش پیشنهادی CTFM به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

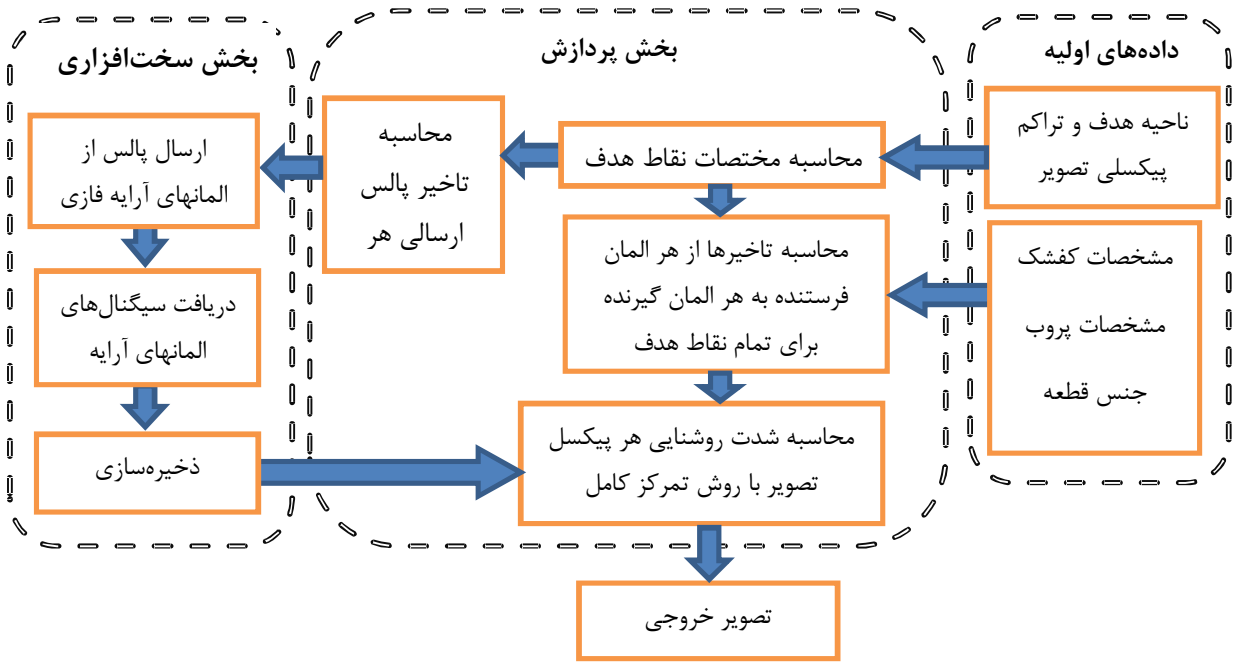
$$g(k) = \mathbf{w}^{\mathrm{T}}(k)\mathbf{h}(k) = \sum_{i=1}^{N} w_i(k)\, h_i(k) \qquad (3)$$

که در آن $\mathbf{w}(k)$ بردار وزن‌های اعمال شده به سیگنال خروجی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول 1- مقایسه میزان حجم محاسباتی روش‌های رویش بر حسب مجموع تعداد عملیات ضرب و جمع

روش رویش	تعداد عملیات جمع	تعداد عملیات ضرب
TFM	N^2-1	-
WTFM	$N^2+O\left(N^3\right)$	$N+O\left(N^3\right)$
ATFM	$1.5\beta^2N^3+3\beta N^2Q+N^2$	$1.5\beta^2N^3+3\beta N^2Q+N$
CTFM	$O\left(N^2\right)$	$O\left(N^2\right)$



شکل 3- بلوک دیاگرام کلی روش رویش فراصوتی تمرکز کامل

است. جهت محاسبه وزن‌ها در روش پیشنهادی شکل‌دهی وزن‌دار پرتو، عبارت $\mathbf{w}^{\mathrm{T}}(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{w}(k)$ که در آن $\mathbf{R}(k)=\mathbf{h}(k)\mathbf{h}^{\mathrm{T}}(k)$ ماتریس همبستگی نمونه‌های برش یافته خروجی المان‌ها است، با حفظ بهره واحد در نقطه کانونی به حداقل می‌رسد. مقدار نمونه‌های بردار $\mathbf{h}(k)=\left[h_1(k),h_2(k),\ldots,h_N(k)\right]^{\mathrm{T}}$ از برش سه‌سطحی نمونه‌های $\mathbf{h}(k)$ مطابق رابطه (4) حاصل می‌شود:

$$\hat{h}_i(k)=\begin{cases}1, & h_i(k)>d\,h_{\max}\\ 0, & -d\,h_{\max}\le h_i(k)\le d\,h_{\max}\\ -1, & h_i(k)<-d\,h_{\max}\end{cases}, \qquad (4)$$

که در آن $i=1,2,\ldots,N$ و پارامتر d عدد ثابت مثبت بین 0 و 1 است که آستانه برش سیگنال‌های $h_i(k)$ است.

هم‌چنین $h_{\max}$ حداکثر مقدار دامنه $h_i(k)$ برای $i=1,2,\ldots,N$ است، یعنی $h_{\max}=\max_i\left\{h_i(k)\right\}$.

بنابراین $\hat{\mathbf{h}}(k)$ برداری با مقادیر 0 و 1 و 1- است. جهت اجتناب از تکین یا نزدیک به تکین‌شدن ماتریس $\hat{\mathbf{R}}(k)$، جهت پایداری عددی محاسبه معکوس، از فرم اصلاح شده $\hat{\mathbf{R}}(k)=\hat{\mathbf{h}}(k)\hat{\mathbf{h}}^{\mathrm{T}}(k)+s\,\mathbf{I}_{N\times N}$ استفاده می‌شود. در فرم اصلاح‌شده، $\mathbf{I}_{N\times N}$ ماتریس همانی با ابعاد $N\times N$ است و s یک ثابت مثبت بسیار نزدیک به صفر است. در این حالت مقدار وزن‌ها با کمک نظریه ضرب‌کننده لاگرانژ [23] برابر است با:

$$\hat{\mathbf{w}}(k)=\frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1}(k)\mathbf{a}}{\mathbf{a}^{\mathrm{T}}\hat{\mathbf{R}}^{-1}(k)\mathbf{a}} \qquad (5)$$

در نهایت شدت روشنایی پیکسل متناظر با نقطه $(x_{\mathrm{ref}},z_{\mathrm{ref}})$

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

در WTFM از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$I\left(x_{\text{ref}}, z_{\text{ref}}\right)=\left|g\left(\frac{d_{i,j}}{c}\right)\right| \tag{6}$$

در حالت حدی $d=1$ تمام درایه‌های $\hat{\mathbf{h}}(k)$ برابر صفر هستند، بنابراین $\hat{\mathbf{R}}(k)=s\,\mathbf{I}$ و در نتیجه با توجه به رابطه (5)، $\mathbf{w}(k)=(1/N)\mathbf{a}$، بنابراین الگوریتم CTFM به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} I\left(x_{\text{ref}}, z_{\text{ref}}\right)&=\left|g\left(\frac{d_{i,j}}{c}\right)\right|=\left|\mathbf{w}^{\mathrm{T}}(k)\mathbf{h}(k)\right|_{k=\frac{d_{i,j}}{c}} \\ &=\frac{1}{N}\left|\mathbf{a}^{\mathrm{T}}\mathbf{h}\left(\frac{d_{i,j}}{c}\right)\right|=\frac{1}{N}\left|\sum_{j=1}^{N}h_j\left(\frac{d_{i,j}}{c}\right)\right| \\ &=\frac{1}{N}\left|\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}h_{i,j}\left(\frac{d_{i,j}}{c}\right)\right| \end{aligned} \tag{7}$$

بنابراین با مقایسه رابطه (7) با رابطه (1) می‌توان دریافت، الگوریتم CTFM در حالت نرمالیزه با ضریب $1/N$، تبدیل به الگوریتم TFM می‌شود. از طرفی در حالت حدی $d=0$ برش سه‌سطحی تبدیل به برش دوسطحی می‌شود، یعنی $\hat{\mathbf{h}}(k)=\text{sign}\{\mathbf{h}(k)\}$ می‌شود که در آن تابع sign، تابع علامت است. شکل (2) نمونه‌ای از سیگنال $\mathbf{h}(k)$و $\hat{\mathbf{h}}(k)$ به‌ازای آستانه $d=0.4$ را که به‌طور نظری به دست آمده است، نشان می‌دهد. در این آزمایش نظری، آرایه فازی با 16 المان به‌صورت افقی در مختصات عرضی (عرض از مبدا) صفر در نظر گرفته شده است و نقطه هدف در مختصات (2/2-، 4/6) میلی‌متر در قطعه مورد آزمون از جنس فولاد قرار دارد.

در این حالت ماتریس‌های $\mathbf{R}(k)$و $\hat{\mathbf{R}}(k)$دارای 256 درایه هستند که تمام درایه‌های ماتریس $\mathbf{R}(k)$ غیرصفر است، اما تنها 25 درایه ماتریس $\hat{\mathbf{R}}(k)$ غیر صفر هست و بقیه صفر هستند. بنابراین ماتریس $\hat{\mathbf{R}}(k)$ ماتریسی تنک خواهد شد. ویژگی ماتریس تنک این است که تعداد قابل توجهی از درایه‌های آن صفر هستند. علاوه بر این درایه‌های غیر صفر ماتریس $\hat{\mathbf{R}}(k)$ همگی برابر با ±1 می‌باشند.

در مثال فوق زمان مورد نیاز برای محاسبه معکوس ماتریس $\mathbf{R}(k)$ و $\hat{\mathbf{R}}(k)$ با میانگین‌گیری از ده بار تکرار با الگوریتم حذفی گوس- جردن بهبودیافته [24] به ترتیب برابر با 92 ms و 35 می‌باشد. برای اجرای الگوریتم‌ها از نرم‌افزار MATLAB 2015b استفاده شده است.

علاوه بر این به‌دلیل ویژگی تنک بودن $\hat{\mathbf{R}}(k)$، محاسبه ضرب ماتریسی عبارات $\hat{\mathbf{R}}^{-1}(k)\mathbf{a}$ و $\mathbf{a}^{\mathrm{T}}\hat{\mathbf{R}}^{-1}(k)\mathbf{a}$ در رابطه (5) در مقایسه با محاسبه ضرب عبارات $\mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{a}$ و $\mathbf{a}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}^{-1}(k)\mathbf{a}$ در WTFM در رابطه (2) حجم محاسبات کمتری خواهد داشت. بنابراین روش پیشنهادی تقریب ماتریس معکوس نسبت به روش‌های متعارف محاسبه معکوس ماتریس که دارای پیچیدگی از مرتبه $O(N^3)$ هستند، نظیر روش حذفی گوس- جردن بهبودیافته، حجم محاسباتی پایین‌تری دارد.

میزان پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها بر حسب مجموع تعداد عملیات ضرب و جمع برای محاسبه هر پیکسل تصویر، در جدول (1) نشان داده شده است. در این جدول پارامتر b نسبت تعداد قطرهای انتخاب شده از ماتریس $\mathbf{R}(k)$ به کل قطرها است و Q تعداد تکرارهای محاسبه تقریب معکوس ماتریس را در ATFM نشان می‌دهد. چنانچه از جدول (1) مشاهده می‌شود، حجم محاسباتی TFM از سایر روش‌ها کمتر است و برای هر نقطه هدف تنها نیاز به عملیات جمع دارد. از طرفی حجم محاسبات WTFM از نظر تعداد عملیات جمع و ضرب از سایر روش‌ها بیشتر است. پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی از مرتبه $O(N^2)$ و در مقایسه با WTFM و CTFM کمتر است که به دلیل حجم محاسبات کمتر در محاسبه معکوس ماتریس تنک $\hat{\mathbf{R}}(k)$ هست.

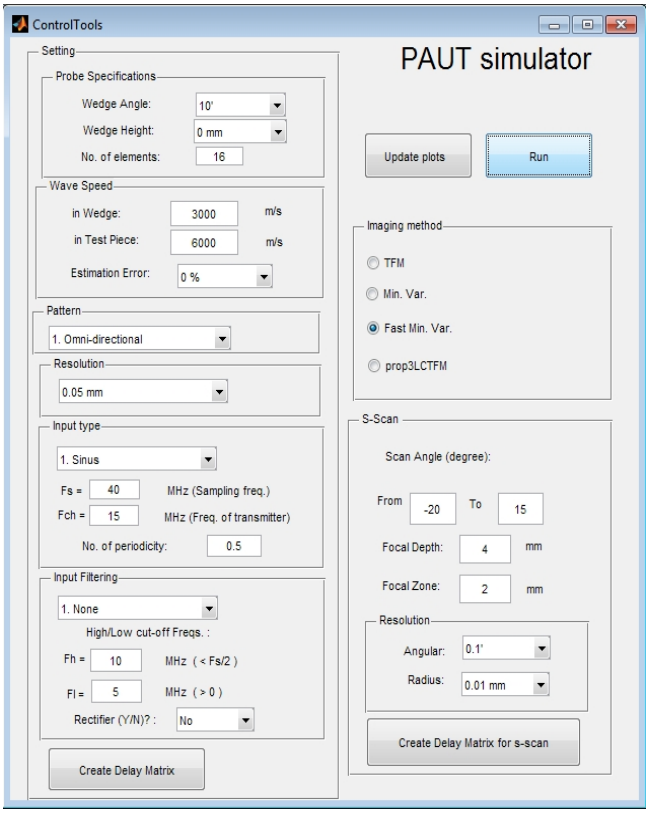
6- سیستم تصویربرداری فراصوتی

شکل (3) بلوک دیاگرام ساختار طراحی‌شده برای تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی را نشان می‌دهد. در ادامه بخش‌های مختلف این ساختار تشریح می‌شود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

6-1- داده‌های اولیه

در این بخش داده‌های اولیه شامل مشخصات پروب آرایه فازی که تعیین‌کننده تعداد و فاصله المان‌ها از هم (گام المان) است و مشخصات پروب که شامل زاویه پروب نسبت به سطح افقی و سرعت موج در کفشک است و همچنین جنس قطعه مورد آزمون که نشان‌دهنده سرعت موج در قطعه است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هم‌چنین ناحیه روبش (ناحیه هدف) و تراکم پیکسلی تصویر (فاصله نقاط هدف از یکدیگر) مشخص می‌شود.



شکل 4- رابط کاربری گرافیکی مورد استفاده برای روشهای مختلف TFM

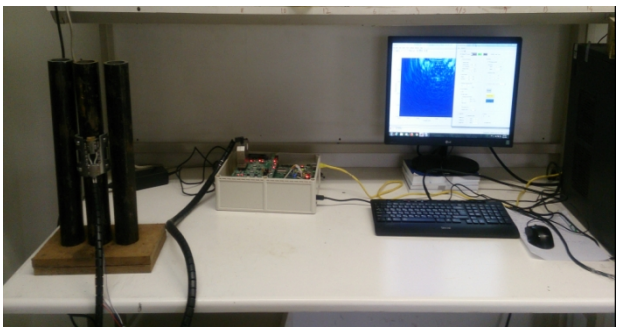
در آزمون عملی، پروب آرایه فازی خطی مدل Olympus دارای 16 المان با گام 0/5 میلی‌متر و فرکانس مرکزی MHz 7/5 انتخاب شد. حد فاصل بین آرایه فازی و قطعه آزمون، کفشک پروب قرار دارد که از جنس رکسولایت است و سرعت صوت در آن برابر با 2300 m/s هست. زاویه کفشک برابر با 15 درجه و ارتفاع آن تا نزدیک‌ترین المان به قطعه برابر با 5 میلی‌متر است. قطعه مورد بررسی نیز از جنس فولاد است و سرعت موج طولی در آن برابر با 5800 m/s می‌باشد.

6-2- بخش پردازش

در بخش پردازش از یک رابط کاربری استفاده می‌شود که با نرم‌افزار MATLAB ساخته شده است و جهت ورود داده‌های اولیه و محاسبات مربوط به TFM، WTFM، ATFM و CTFM و ایجاد تصویر فراصوتی خروجی به کار می‌رود (شکل (4)).

6-3- بخش سخت‌افزاری

بخش سخت‌افزاری جهت ارسال و دریافت پالس از طریق پروب آرایه فازی و ذخیره داده‌ها استفاده می‌شود. در صورتی که صرفاً شبیه‌سازی سیگنال‌های المان‌ها مد نظر باشد، نیاز به این بخش نیست. شکل (5) سیستم‌های مورد استفاده در آزمون عملی را نشان می‌دهد که در پژوهشگاه نیرو ساخته شده است [17 و 25]. برد مداری توسط یک کابل شبکه برای اجرا و ارسال و دریافت داده به کامپیوتر متصل می‌شود. برنامه‌های لازم برای ارسال و دریافت سیگنال توسط برد FPGA دریافت می‌شوند. سپس به رابط کاربری گرافیکی در رایانه منتقل می‌شوند و برای تشکیل تصویر فراصوتی بر اساس تنظیمات رابط مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل 5- سخت‌افزار مورد استفاده ساخت پژوهشگاه نیرو [25]

برای پیاده‌سازی سخت‌افزاری روش‌های روبش، در هر روبش، یک المان ارسال‌کننده بوده است و همزمان، همه المان‌ها دریافت‌کننده خواهند بود. با تکرار این فرآیند برای همه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

المان‌ها و پردازش اطلاعات دریافتی، تصویر تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر با ارسال پرتو توسط المان iام و دریافت آن توسط تمامی المان‌ها، سیگنال‌های $h_{i,j}$ برای $j=1,2,\ldots,N$ حاصل می‌شوند و این فرایند برای $i=1,2,\ldots,N$ تکرار می‌شود تا تمامی سیگنال‌های $h_{i,j}$ بدست آید و نهایتاً برای تشکیل تصویر فراصوتی مطابق رابطه (1) در روش TFM مورد استفاده قرار گیرد. در WTFM، سیگنال j امین المان آرایه فازی که درایه j ام $\mathbf{h}(k)$ را می‌سازد، از محاسبه مجموع $h_j(k)=\sum_{i=1}^{N} h_{i,j}(k)$ حاصل می‌شود.

سیگنال‌های ارسالی از نوع پالس‌های مربعی با دامنه 100 ولت و عرض پالس 30 ns و فرکانس پالس 10 kHz می‌باشد. سیگنال‌های دریافتی با نرخ 40 MHz نمونه‌برداری می‌شود.

برای اجرای الگوریتم‌ها از رایانه‌ای دارای پردازنده اینتل 64 بیت با فرکانس کلاک 4 GHz نوع Core (TM)i7 دارای RAM 16GB استفاده شده است. با توجه به تعداد المان‌های پروب، تعداد 16×16=256 سیگنال دریافتی خواهیم داشت که برای تشکیل تصویر استفاده می‌شود.

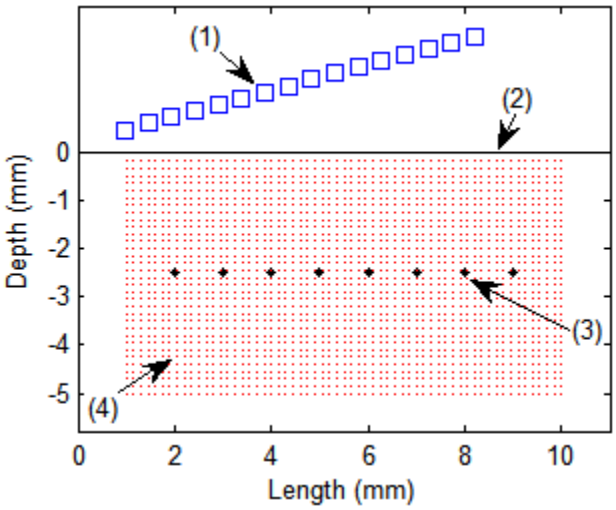
7- مقایسه روش‌های تصویربرداری

در این قسمت تصاویر فراصوتی بدست آمده از روش‌های مورد بررسی به صورت کیفی و کمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هم‌چنین زمان اجرای روش‌های روبش با یک‌دیگر مقایسه می‌شود. به منظور بررسی کمی، یک تابع وابسته به شدت روشنایی بر حسب دسی‌بل تعریف می‌کنیم. این تابع عبارت است از حداکثر شدت روشنایی نرمالیزه شده در بازه عمق تصویر که برای هر طول x_{ref} طبق رابطه (8) به‌دست می‌آید:

$$F(x_{\text{ref}})=10\log_{10}\left\{ f(x_{\text{ref}}) \Big/ \max_{x}\{f(x)\} \right\} \quad (8)$$

که در آن تابع $f(x)$ حداکثر میزان شدت روشنایی $I(x,z)$ را به ازای هر طول معین x می‌دهد، بنابراین $f(x)=\max_{z}\{I(x,z)\}$.

با توجه به تابع $F(x_{\text{ref}})$، تفکیک پذیری تصویر نقاط بازتابنده از یک‌دیگر، حداکثر میزان ضعیف‌شدگی تصویر نقاط بازتابنده و سطح متوسط نویز زمینه در تصویر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه ابتدا شبیه‌سازی در حالت ایده‌ال و سپس آزمون عملی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



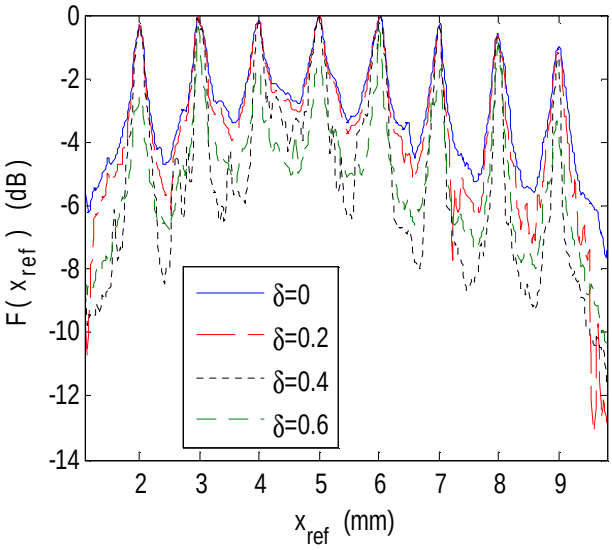
شکل 6- وضعیت آزمایشی مورد نظر برای شبیه‌سازی روش‌های روبش در حالت ایده‌ال. اجزاء شکل عبارتند از: (1) المانهای آرایه فازی، (2) سطح بالایی قطعه آزمون، (3) نقاط بازتاب‌کننده و (4) ناحیه روبش.

7-1- شبیه‌سازی حالت ایده‌آل

به منظور اجتناب از اثرات غیرایده‌ال عناصر پروب آرایه فازی نظیر نویز و تداخل الکتریکی و تضعیف پرتو در جهت‌های مختلف، پرتوهای ارسالی به صورت همه‌سویه درنظر گرفته می‌شوند و سیگنال‌های بازگشتی بدون درنظر گرفتن نویز و تضعیف موج، شبیه‌سازی می‌شوند. در این حالت امکان بررسی عملکرد روش‌های روبش از لحاظ میزان نویز زمینه تصویر خروجی و قدرت تفکیک بازتابنده‌ها، بدون اثرات مزاحم فراهم می‌شود. برای شبیه‌سازی، ناحیه روبش ناحیه مستطیلی به طول 9 میلی‌متر و عمق از 0/1 میلی‌متر تا 5 میلی‌متر با قدرت تفکیک پیکسلی 0/05 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین تعداد 8 نقطه بازتاب‌کننده در عمق 2/5 میلی‌متر با فاصله 1 میلی‌متر از یکدیگر درنظر گرفته شد. وضعیت آزمایشی مورد نظر به‌صورت شکل (6) است که مکان المان‌های آرایه، سطح بالایی قطعه مورد آزمون، ناحیه روبش و نقاط بازتابنده در آن مشخص

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

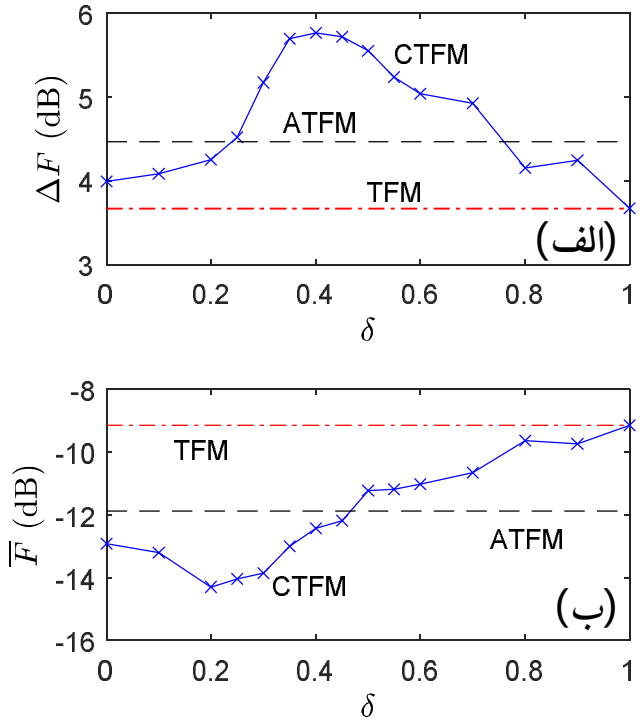
شده است.



شکل 7- نمودار تابع روشنایی $F(x_{ref})$ روش پیشنهادی برای مقادیر مختلف آستانه d.

در ابتدا اثر آستانه برش سه‌سطحی روی میزان تفکیک نقاط بررسی می‌شود. شکل (7) نمودار تابع روشنایی $F(x_{ref})$ را برای روش پیشنهادی برای مقادیر مختلف آستانه d بر حسب x_{ref} نشان می‌دهد. در شکل مزبور نمودار $F(x_{ref})$ به ازای مقادیر آستانه برابر با 0، 0/2، 0/4 و 0/6 ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که دامنه قله‌های محلی متناظر با طول نقاط بازتاب‌کننده در تمامی نمودارها یکسان است و مقدار همگی قله‌ها برای هر روش نزدیک به 0 dB است (حداکثر تضعیف قله‌ها برابر 1 dB است). اما مقادیر دره‌های بین هر دو قله در نمودارها – که معرف میزان روشنایی بین دو نقطه بازتابنده در تصویر است - برای حالت برش دوسطحی ($d=0$) کمترین مقدار و برای حالت برش سه‌سطحی با $d=0.4$ بیشترین مقدار را دارد.

بنابراین با مقدار آستانه مزبور بهترین تفکیک نقاط بازتابنده از یک‌دیگر در شرایط آزمایشی مزبور حاصل می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر، متوسط اختلاف قله و دره تابع $F(x_{ref})$ که بین دو نقطه بازتابنده رخ می‌دهد (که در این‌جا با نماد ΔF نشان می‌دهیم) و متوسط سطح نویز زمینه ($\bar{F}$) بر حسب مقدار d به ترتیب در شکل‌های (8-الف و 8-ب) نشان داده شده است.



شکل 8- نمودار تابع ΔF (شکل الف) و تابع $\bar{F}$ (شکل ب) بر حسب δ برای روش CTFM به‌همراه مقدار آن برای TFM و WTFM.

واضح است که هر چه مقدار ΔF بیشتر باشد، تفکیک‌پذیری تصویر نقاط بازتابنده از یکدیگر بهتر خواهد بود؛ همچنین هر چه $\bar{F}$ کمتر باشد، روشنایی زمینه تصویر کمتر است و دقت شناسایی نقاط بازتابنده بالاتر خواهد بود.

در شکل (8-الف) مشاهده می‌شود به ازای $d=0$ مقدار ΔF در روش پیشنهادی برابر با 4 dB است، درحالی‌که با افزایش مقدار d مقدار ΔF افزایش می‌یابد و به 5/8 dB می‌رسد. با افزایش بیشتر d مقدار ΔF کاهش می‌یابد و نهایتاً به ازای $d=1$ به 3/6 dB می‌رسد. در این شکل معیار ΔF برای TFM و ATFM نیز نشان داده شده است. در الگوریتم ATFM مقدار پارامترها به‌طور تجربی برابر با $h=0.01$، $M=8$ و $Q=4$ در نظر گرفته شده است که تقریب مناسبی از معکوس ماتریس به دست دهد. مقدار ΔF در TFM و ATFM مطابق نمودار، به ترتیب برابر با 3/6 dB و 4/4 dB است. بنابراین تفکیک‌پذیری TFM برابر با روش

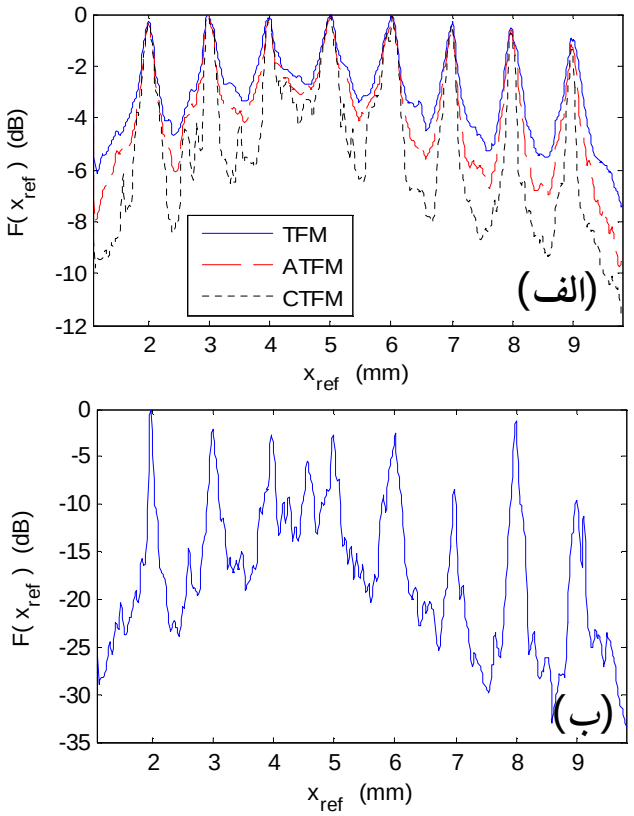
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

پیشنهادی با $d=1$ است و تفکیک‌پذیری ATFM بهتر از روش TFM بوده، اما کمتر از روش پیشنهادی CTFM با $0.25<d<0.75$ است. شکل (8-ب) مقدار $\bar{F}$ را برای الگوریتم‌های TFM و ATFM و روش پیشنهادی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سطح نویز $\bar{F}$ در CTFM با $d=0$ برابر با 13 dB- است و با افزایش مقدار d مقدار آن نیز کاهش می‌یابد تا نهایتاً به 14/2 dB- می‌رسد و سپس افزایش می‌یابد و در نهایت به ازای $d=1$ به مقدار 9 dB-، برابر با مقدار حاصل از TFM می‌رسد.

بر اساس نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود نویز زمینه روش پیشنهادی به ازای تمام مقادیر $d<1$ کمتر از TFM است و برای $d<0.5$ پایینتر از ATFM است. همچنین مشاهده می‌شود برش دوسطحی میزان نویز زمینه بیشتر و تفکیک‌پذیری کمتری در مقایسه با برش سه‌سطحی می‌تواند فراهم کند. بر اساس نتایج به دست آمده، بازه‌ای از مقادیر d منتهی به نتایج بهتر در مقایسه با TFM و ATFM می‌شوند و بر این اساس در ادامه برای آزمون‌های نظری و عملی، مقدار $d=0.4$ درنظر گرفته می‌شود. شکل (9) نمودار تابع $F(x_{ref})$ در TFM، WTFM، ATFM و CTFM را نشان می‌دهد. مطابق شکل (9-الف) مشاهده می‌شود قدرت تفکیک روش پیشنهادی CTFM بر مبنای معیار ΔF بهتر از TFM و ATFM است. هم چنین در مقایسه با WTFM در شکل (9-ب) تضعیف تابع در نقاط بازتابنده به مراتب کمتر و در نتیجه وضوح تصویر نقاط بازتابنده به مراتب بهتر است.

شکل (10) تصویر فراصوتی بازتاب‌ها را برای روش‌های فوق‌الذکر نشان می‌دهد و موید نتایج گرفته شده از معیارهای کمی است. با توجه به شکل (10-ب) مشاهده می‌شود اگر چه سطح نویز زمینه در WTFM پایینتر از سایر روش‌ها است، اما برخی نقاط بازتابنده در تصویر محو هستند و می‌توانند با نویز اشتباه گرفته شوند. هم‌چنین مابین نقاط بازتابنده سوم و چهارم از سمت چپ می‌توان اثر نویز را مشاهده کرد که به دلیل قله بزرگ نویز در این ناحیه، قابل مشاهده است و نشانه احتمال بالای تشخیص اشتباه حفره است.

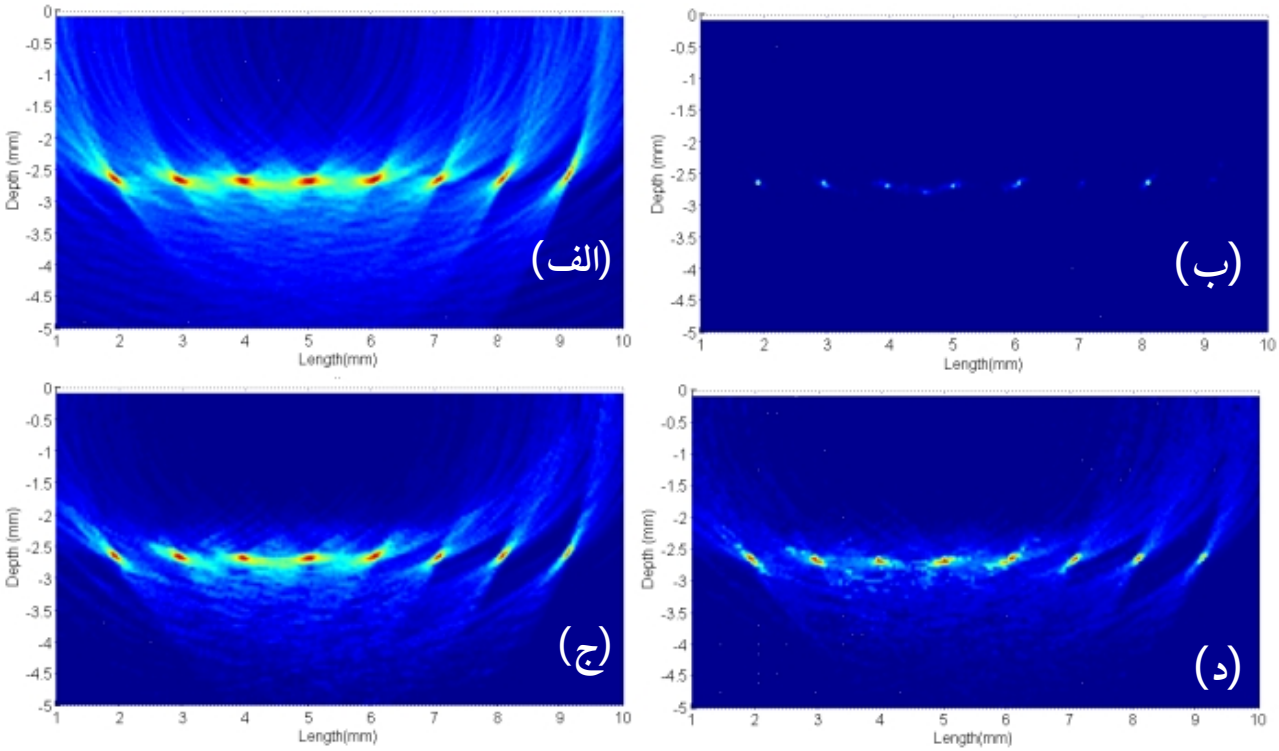
با مقایسه تصویر شکل (10-د) با تصاویر شکل (10-ج) می‌توان نتیجه گرفت، روش پیشنهادی CTFM نویز زمینه کمتری نسبت به TFM و ATFM دارد و نقاط بازتابنده بهتر تفکیک می‌شوند. از طرفی نویز در اطراف قله‌ها در TFM زیاد است و ممکن است برخی نقاط بازتابنده وضوح کافی برای تمایز از یکدیگر را در تصویر فراصوتی نداشته باشند.



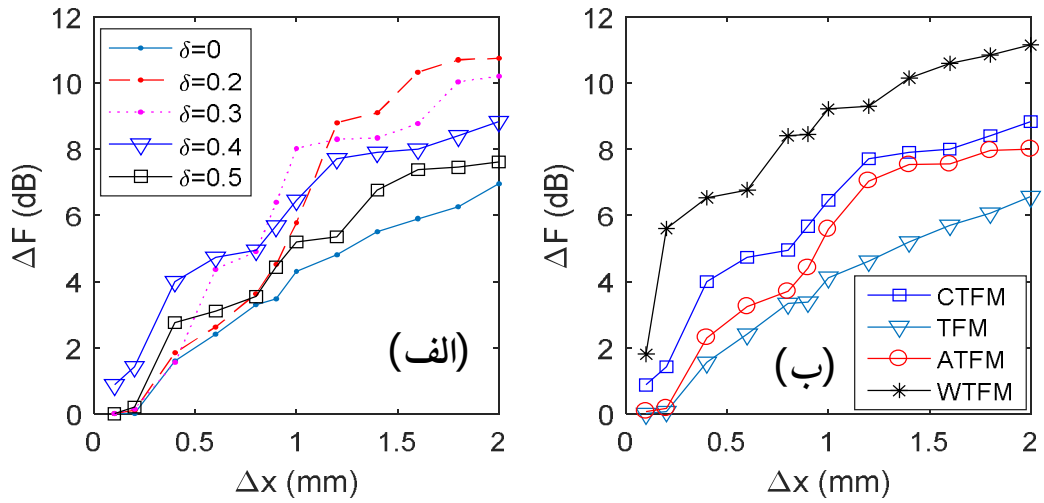
شکل 9- نمودار تابع $F(x_{ref})$ برای TFM، ATFM، CTFM (شکل الف) و WTFM (شکل ب)

شکل‌های (11-الف) و (11-ب) نمودار تابع ΔF را بر حسب فاصله بین دو نقطه بازتابنده مجاور (Δx) نشان می‌دهد. در این آزمایش دو نقطه بازتابنده در عمق 2/5 میلی‌متری قطعه در نظر گرفته شده است و طول نقاط بسته به مقدار Δx تغییر می‌کند. در شکل (11-الف) نمودار تابع ΔF در CTFM برای dهای مختلف رسم شده است. همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش Δx قدرت تفکیک نیز افزایش می‌یابد. از طرفی ملاحظه می‌شود کمترین مقدار قدرت تفکیک مربوط به آستانه $d=0$ است که معادل با برش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 10- تصاویر فراصوتی حاصل از الف) TFM، ب) WTFM، ج) ATFM و د) روش پیشنهادی با پرتوهای همه‌سویه تحت شرایط ایده‌ال



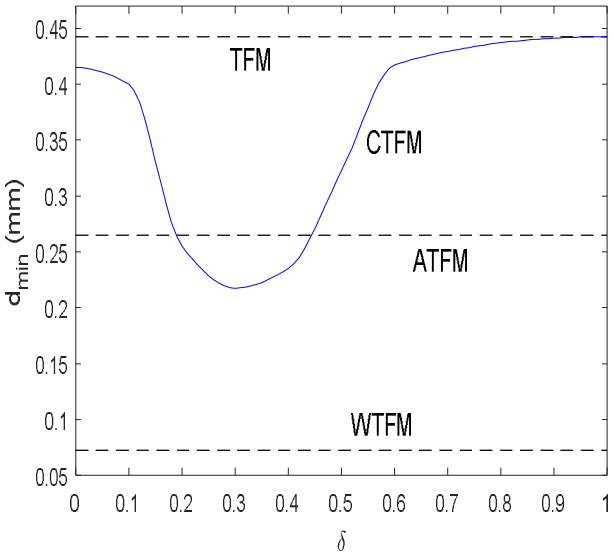
شکل 11- نمودار تابع ΔF بر حسب فاصله بین دو نقطه بازتابنده مجاور: الف) نمودار تابع ΔF در روش CTFM برای δهای مختلف و ب) مقایسه تابع ΔF برای CTFM با $\delta = 0.4$ و TFM، ATFM و WTFM

دوسطحی می‌باشد. با افزایش d از مقدار صفر، قدرت تفکیک بهبود می‌یابد، به طوری که در مقادیر کوچک Δx قدرت تفکیک به ازای $d = 0.4$ بیشترین مقدار را دارد، اما با افزایش Δx مقادیر آستانه d کوچکتر قدرت تفکیک بهتری به دست می‌دهد. به عنوان مثال، برای $\Delta x = 2$ mm به ازای $d = 0.2$ قدرت تفکیک بهتری برابر با $\Delta F = 10.4$ dB حاصل شده است.

شکل (11-ب) نمودار تابع ΔF را بر حسب Δx در CTFM با $d = 0.4$ و TFM، ATFM و WTFM با هم مقایسه می‌کند. ملاحظه می‌شود کمترین و بیشترین قدرت تفکیک به ترتیب مربوط به TFM و WTFM است. قدرت تفکیک روش پیشنهادی CTFM بهتر از TFM و ATFM و کمتر از روش WTFM است که این امر برتری روش پیشنهادی را نسبت به TFM و ATFM نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

در ادامه، روشهای مورد بررسی از لحاظ معیار تفکیک‌پذیری عرضی با هم مقایسه می‌شوند. تفکیک عرضی بیانگر این مفهوم است که در امتداد واگرایی پرتوهای ارسالی از المان‌ها نسبت به یک‌دیگر، تا چه اندازه امکان تفکیک برای تشخیص دو ناحیه کنار هم وجود دارد [26]. برای مقایسه تفکیک‌پذیری عرضی نقاط بازتابنده مجاور هم، از معیار $d_{\min} = \Phi_{-6\,\mathrm{dB}}/4$ استفاده می‌شود که در این رابطه $\Phi_{-6\,\mathrm{dB}}$ اندازه قدرت تفکیک ΔF برابر با 6 دسی‌بل در مختصات عمقی دو بازتابنده با عمق z یکسان و $d_{\min}$ حداقل فاصله قابل تفکیک بین نقاط بازتابنده است (شکل (12)) [26].



شکل 12- نمودار تفکیک عرضی دو نقطه بازتابنده مجاور در CTFM بر حسب مقادیر d و TFM، ATFM و WTFM.

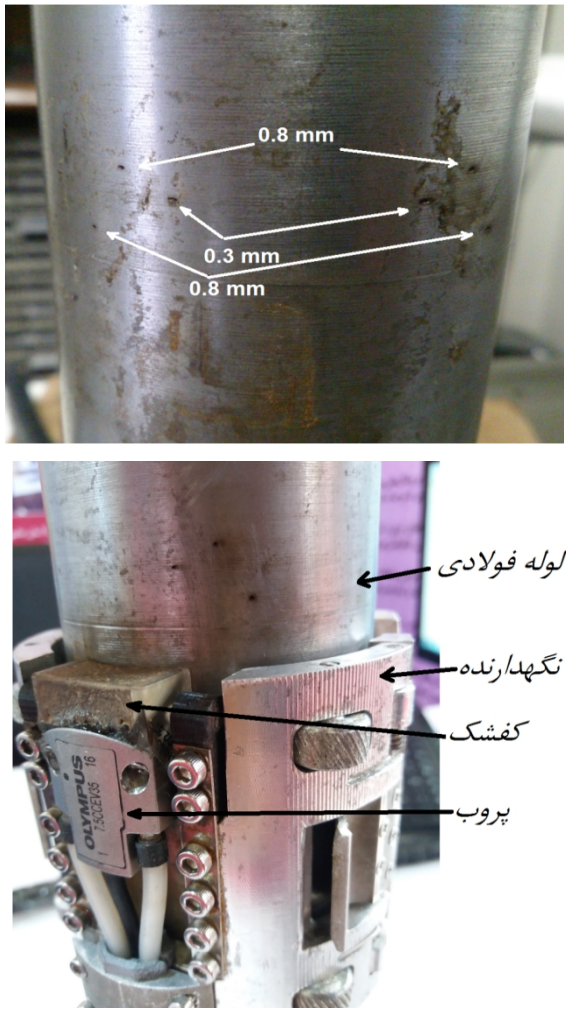
نمودار تفکیک عرضی دو نقطه بازتابنده مجاور در CTFM را بر حسب مقادیر d به همراه مقایسه با TFM، ATFM و WTFM در وضعیت آزمایشی فوق‌الذکر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود تفکیک‌پذیری TFM، ATFM و WTFM به ترتیب 0/44، 0/26 و 0/07 میلی‌متر است. در روش پیشنهادی CTFM تفکیک‌پذیری عرضی تا 0/21 میلی‌متر به ازای $d = 0.3$ در این وضعیت آزمایشی قابل دستیابی است که به طور قابل توجهی بهتر از TFM و ATFM است. روش پیشنهادی در مقایسه با WTFM اگر چه تفکیک‌پذیری عرضی کمتری دارد، اما از محوشدگی تصویر نقاط بازتابنده که در WTFM رخ می‌دهد، جلوگیری می‌کند.

7-2- بررسی نتایج عملی

برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف، لوله‌ای فولادی با شعاع 30 میلی‌متر با دیواره‌ای به ضخامت 14 میلی‌متر درنظر گرفته می‌شود و سه حفره عمود بر راستای لوله به‌صورت شکل (13) (شکل بالایی) با قطر 0/3، 0/8 و 0/8 میلی‌متر و فواصل به ترتیب 2، 5 و 8 میلی‌متر از سطح جانبی (که نشان‌دهنده عمق حفره‌ها از سطح است) سوراخکاری شده است. بنابراین مسیر حفره‌ها به‌طور کامل در دیواره قرار دارد. با توجه به فاصله حفره‌ها از سطح، آن‌ها را به ترتیب، حفره بالایی، حفره میانی و حفره پایینی می‌نامیم. شکل (13) پایینی لوله فولادی مورد آزمون را به همراه پروب و کفشک نشان می‌دهد. این وضعیت آزمون عملی که از سیستم ارائه شده در [25] استفاده می‌کند، برای کاربرد در بازرسی جوش مناسب است. ذکر این نکته لازم است که سیستم توصیف شده در [25] یک سیستم تصویربرداری بی‌درنگ برای کاربرد بازرسی جوش لوله‌های بویلر نیروگاه‌های حرارتی است که بر مبنای روش تمرکز کامل پیاده‌سازی شده است و در صورت ارتقا سخت‌افزار می‌تواند در آینده مجهز به تصویربرداری فراصوتی با روش پیشنهادی شکل‌دهی پرتو در این پژوهش شود.

شکل (14) تصاویر به‌دست آمده روش‌های TFM (شکل الف)، WTFM (شکل ب)، ATFM (شکل ج) و روش پیشنهادی CTFM (شکل د) را نشان می‌دهد. طول ناحیه روبش 20 میلی‌متر و عمق ناحیه روبش 14 میلی‌متر با قدرت تفکیک پیکسلی 0/05 میلی‌متر در نظر گرفته شد. پارامترهای الگوریتم ATFM برای تقریب ماتریس معکوس، مانند آزمایش بخش قبل نظر گرفته شده است. در این تصاویر، روشنایی موجود در قسمت سمت چپ بالای هر تصویر، مربوط به مکان پروب و کفشک روی قطعه است که در نتیجه بازتاب از سطح و کفشک اتفاق می‌افتد و سبب ایجاد یک "ناحیه مرده" (که در [26] تشریح شده است) می‌شود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

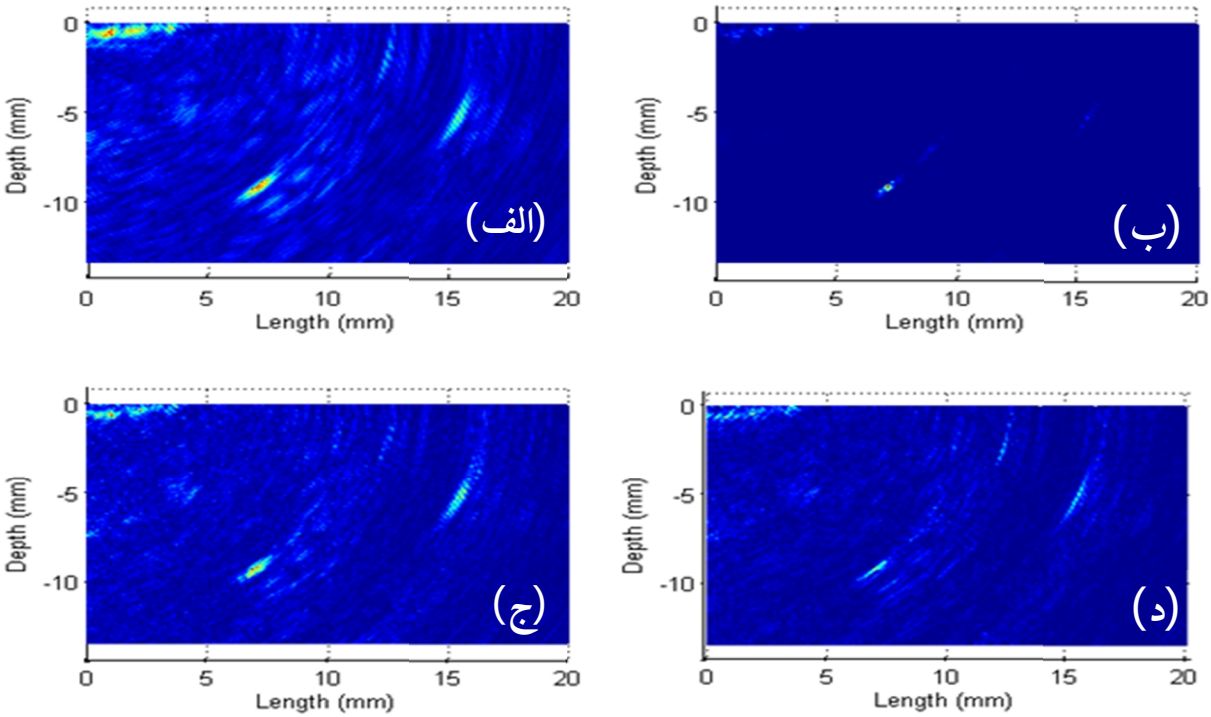


شکل 13- وضعیت آزمایشی برای آزمون عملی.

بنابراین این ناحیه در ارزیابی تصاویر مورد توجه نخواهد بود. در تمامی تصاویر، حفره پایینی واضحتر از حفره میانی و حفره بالایی دیده می‌شود که علت، نزدیکتر بودن آن حفره به پروب آرایه فازی در مقایسه با حفره میانی و بالایی است. از طرف دیگر حفره بالایی محوتر از سایر حفره‌ها دیده می‌شود که علت آن کمتر بودن قطر حفره و در نتیجه ضعیف‌تربودن سیگنال‌های بازتاب شده از آن حفره به المان‌های آرایه فازی است. چنان‌که از شکل الف مشاهده می‌شود، تصویر حاصل از روش TFM محل تمامی‌حفره‌ها را نشان می‌دهد، اما به دلیل نویز زمینه زیاد، روشنایی تصویر در نواحی فاقد حفره می‌تواند منجر به عدم آشکارسازی نقص‌های ریز قطعه مورد آزمون می‌شود و یا باعث شود برخی نقاط به اشتباه به عنوان حفره اضافی یا نقص اضافی تعبیر شود. از سوی دیگر، تصویر حاصل از WTFM در شکل ب، نویز زمینه را به‌خوبی کاهش می‌دهد، اما وضوح تصویر حفره‌ها کاهش یافته و حفره بالایی کاملا محو شده است و حفره میانی نیز کم‌رنگ دیده می‌شود. بنابراین در این روش قدرت تفکیک حفره ضعیف است و ممکن است حفره‌های ریز به اشتباه نادیده گرفته شوند. در تصویر حاصل از ATFM (شکل (14-ج)) محل حفره‌ها واضحتر از WTFM است، اما وضوح تصویر حفره بالایی کم است و نسبت به TFM کاهش یافته است. این روش در مقایسه با TFM دارای نویز زمینه کمتری می‌باشد. تصویر شکل (14-د) نشان می‌دهد نویز زمینه در روش پیشنهادی CTFM کمتر از TFM و ATFM است و همچنین مکان هر سه حفره (برخلاف WTFM) به‌خوبی واضح است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که سطح روشنایی زمینه مناطق دور از حفره‌ها در TFM و ATFM در برخی از نقاط زیاد است و دقت آشکارسازی نقص قطعه مورد آزمون را کاهش می‌دهد. این مساله در روش پیشنهادی CTFM تا حد زیادی کاهش یافته است. بنابراین روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری در تفکیک‌پذیری حفره‌ها و دقت تشخیص نقص دارد.

جهت مقایسه کمی روش‌ها، شکل (15) نمودار تابع $F\left(x_{ref}\right)$ را برای TFM، ATFM, WTFM و CTFM با هم مقایسه می‌کند. همان‌طور که انتظار می‌رود، در محل حفره‌ها در مختصات طولی x_{ref} قله‌های متمایزی تشکیل می‌شود و در سایر نواحی که بازتاب از حفره صورت نمی‌گیرد، سطحی با دامنه‌های کم تشکیل شده است که متناظر با دامنه‌های نویز تصویر می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از شکل الف نشان می‌دهد مقادیر تابع برای حفره پایینی در تمام روش‌ها 0 dB و برای حفره میانی حدود 2- dB است، اما برای حفره بالایی برابر 4- dB برای TFM و CTFM و برابر 5- dB برای ATFM است. از طرفی برای WTFM در شکل ب، دامنه قله مربوط به حفره بالایی که با (1) نشان داده شده است برابر 13/52- dB و نزدیک به سطح نویز زمینه است و بنابراین همچنان‌که تصویر شکل (14) نیز نشان می‌دهد این حفره قابل آشکارسازی نیست.

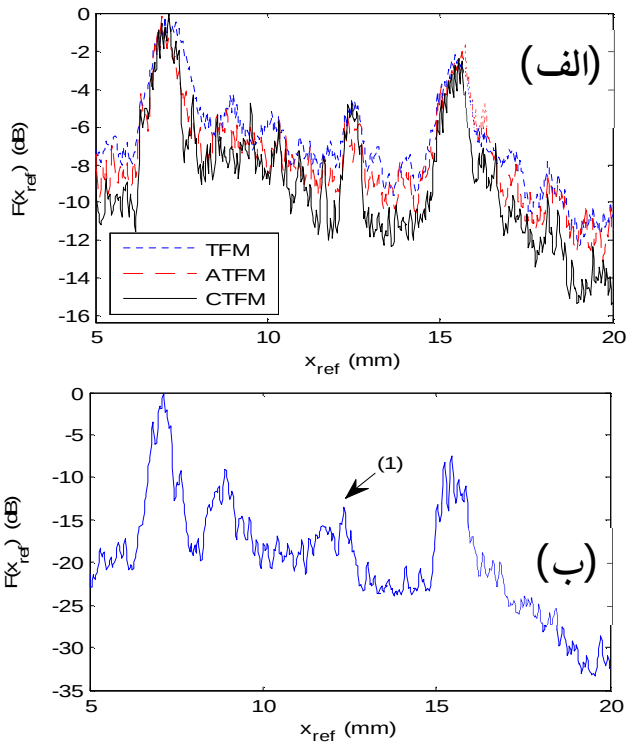
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 14- تصاویر فراصوتی حاصل از: الف) TFM، ب) WTFM، ج) ATFM و د) CTFM در آزمون عملی

جدول (2) روش‌های مختلف روبش را به لحاظ متوسط نویز زمینه ($\bar{F}$)، متوسط اختلاف قله و دره (ΔF) و هم‌چنین حداکثر تضعیف قله بر حسب دسی‌بل مقایسه می‌کند. با توجه به جدول، سطح نویز زمینه در WTFM پایینترین مقدار را دارد، اما به دلیل تضعیف زیاد قله، این روش در تشخیص نقاط بازتابنده کوچک، نظیر شناسایی ترک‌های ناشی از جوشکاری در کاربرد بازرسی جوش توصیه نمی‌شود.

هم‌چنین از جدول (2) می‌توان دید سطح نویز زمینه با توجه به مقدار $\bar{F}$ در روش پیشنهادی نسبت به TFM و ATFM کاهش و تفکیک‌پذیری تصویر حفره‌ها با توجه به مقدار ΔF افزایش یافته است. برای مثال کاهش میزان نویز زمینه در روش پیشنهادی نسبت به روش تمرکز کامل، 4/45 dB و بهبود در تفکیک‌پذیری تصویر حفره‌ها (میزان افزایش اختلاف سطح روشنایی حفره و ناحیه مجاور) برابر 3 dB است. بنابراین قدرت تشخیص و تفکیک حفره در روش پیشنهادی بالاتر از سایر روش‌ها است.



شکل 15-نمودار تابع $F(x_{ref})$ برای TFM، ATFM، CTFM (شکل الف) و روش WTFM (شکل ب) در آزمون عملی. در شکل ب، بازتاب حفره بالایی با (1) مشخص شده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول 2- ارزیابی تصاویر به‌دست آمده از روش‌های روبش.

	TFM	WTFM	ATFM	CTFM
$\bar{F}$	-12/65	-27/3	-14/36	-17/1
حداکثر تضعیف قله	-2	-13/52	-5/3	-4/73
ΔF	6/62	15/90	7/48	9/6

7-3- مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها

در کاربردهایی نظیر بازرسی جوش، تصویر ساخته شده باید با فاصله‌های زمانی کوتاه بروزرسانی شود تا در صورت جابجایی مکان پروب آرایه فازی، تصویر جدید قطعه به‌روز شود. بنابراین زمان اجرای الگوریتم‌ها اهمیت زیادی در آزمون عملی دارد. جدول (3) زمانبری اجرای الگوریتم‌ها در آزمون عملی بخش قبل را با توجه به قدرت تفکیک پیکسلی تصاویر (فاصله نقاط هدف از یک‌دیگر) با هم مقایسه می‌کند. در ردیف اول جدول (3)، قدرت تفکیک پیکسلی تصویر برابر با مقدار در نظر گرفته شده در آزمون عملی در بخش قبل است و در ردیف‌های دوم و سوم قدرت تفکیک به ترتیب نصف و یک‌چهارم می‌شود.

جدول 3- بررسی زمان اجرای الگوریتم‌ها.

قدرت تفکیک پیکسلی (میلی‌متر)	زمان اجرای الگوریتم (ثانیه)			
	CTFM	ATFM	WTFM	TFM
0/05	1/22	2/73	1/50	0/54
0/1	0/29	0/68	0/37	0/11
0/2	0/084	0/17	0/103	0/028

با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول (3) مشاهده می‌شود، روش TFM در هر حالت نسبت به روش‌های وزن‌دهی‌شده WTFM، ATFM و CTFM سریعتر عمل می‌کند که علت آن عدم نیاز به محاسبات وزن‌ها برای تشکیل تصویر است. روش پیشنهاد شده در مقایسه با WTFM و ATFM با در نظر گرفتن میزان تفکیک 0/05 میلی‌متر به ترتیب 0/28 و 1/5 ثانیه سریعتر است. نزدیک‌بودن زمان اجرای روش CTFM به WTFM به دلیل زمان اضافی لازم جهت عملیات آستانه‌گذاری است. با تفکیک پیکسلی برابر با 0/1 میلی‌متر، زمان اجرای روش پیشنهادی به 0/29 ثانیه کاهش می‌یابد که در قیاس با WTFM و ATFM به‌ترتیب در حدود 0/1 و 0/4 ثانیه سریعتر هست. هم‌چنین با تفکیک پیکسلی 0/2 میلی‌متر زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی کمتر از 0/1 ثانیه است که پایینتر از ATFM و WTFM می‌باشد. بنابراین روش پیشنهادی CTFM روش مناسبی برای به کارگیری در مقاصد آزمون‌های برخط است. در صورت استفاده از سخت‌افزار سریعتر می‌توان تراکم پیکسلی بالاتر را نیز به صورت برخط پیاده‌سازی کرد.

8- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش بهبود یافته تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی برای آزمون غیرمخرب ارائه شد. این روش بر مبنای وزن‌دهی سیگنال‌های دریافتی آرایه فازی است و از روشی با پیچیدگی محاسباتی پایین برای محاسبه وزن‌ها استفاده می‌کند. روش پیشنهاد شده با سایر روش‌های مبتنی بر تمرکز کامل با توجه به دقت تشخیص نقاط بازتاب‌کننده و سطح نویز زمینه در آزمون‌های نظری و عملی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج آزمون‌های نظری و عملی نشان داد روش پیشنهادی تمرکز کامل وزن‌دهی شده نسبت به روش‌های مشابه دقت بهتری در تشخیص عیوب قطعه مورد آزمون دارد. هم‌چنین نتایج نشان داده شد پیچیدگی محاسباتی و زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی کمتر از سایر روش‌های وزن‌دهی‌شده است و می‌توان این الگوریتم را برای مقاصد آزمون‌های برخط مورد استفاده قرار داد.

قدردانی

نویسنده این مقاله، وظیفه خود می‌داند از جناب آقای دکتر وحید حمیتی واقف عضو هیات علمی پژوهشگاه نیرو مراتب تشکر و قدردانی خود را ابراز نماید. همچنین مراتب ویژه سپاسگزاری خود را از آقایان دکتر بهروز عبدلی، دکتر مهدی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

رضایی، مهندس امیر نریمانی و همکاران بخش تعمیرات مکانیکی و تحقیقات نیروگاه شهید مفتح همدان ابراز می‌دارد.

منابع

[1] Schmerr-Jr L. W., Fundamentals of ultrasonic phased arrays, Springer Series in Solid Mechanics and Its Applications, Switzerland, 2015.

[2] Zhu Y., 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.

[3] Saniie J., Wang T., Bilgutay N. M., "Analysis of homomorphic processing for ultrasonic grain signal characterizations", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 36, pp. 365–375, 1989.

[4] Lu Y., Saniie J., "Adaptive filtering and Fractional Fourier transform for ultrasonic signal processing and flaw detection", IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 1932-1935, 2014.

[5] Oralkan O., Sanh E. A., et al., "Capacitive micormachined ultrasonic transducers: next generation array for acoustic imaging", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 49, No. 11, pp. 1596–1610, 2002.

[6] Jobst M., Connolly G., "Demonstration of the application of the total focusing method to the inspection of steel welds", European Conference on Non-Destructive Testing, pp.1-11, 2010.

[7] Lambert J., P´edron A., Gens G., Bimbard F., Lacassagne L., Lakovleva E., "Performance evaluation of total focusing method on GPP and GPU", Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP), pp. 1-8, 2012.

[8] Jeune L., Robert S., Dumas P., Membre A., Prada C., "Adaptive ultrasonic imaging with the total focusing method for inspection of complex components immersed in water", AIP Conference Proceedings, Vol. 1650, pp. 1037-1046, 2015.

[9] Kirkpatrick J. P., Wilcox P. D., Smith, R. A., "Row-column addressed arrays for non-destructive evaluation applications", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Early Access, 2019.

[10] 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.

[11] 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.

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

[13] Sakhaei S. M., "A decimated minimum variance beamformer applied to ultrasound Imaging", Ultrasonics, Vol. 59, pp. 119–127, 2015.

[14] Zhao J., Wang Y., Yu J., Guo W., Li T., Zheng Y. P., "Subarray coherence based postfilter for eigenspace based minimum variance beamformer in ultrasound plane-wave imaging", Ultrasonics, Vol. 65, pp. 23–33, 2016.

[15] Li M., Hayward G., "Ultrasound nondestructive evaluation (NDE) imaging with transducer arrays and adaptive processing", Sensors, Vol. 12, No. 1, pp. 42-54, 2012.

[16] بکرانی م.، حمیتی واقف و.، " ارائه روش بهبودیافته تصویربرداری فراصوتی در بازرسی جوش"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال 17، شماره 1، ص ص 45-59، بهار 1399.

[17] بکرانی م.، حمیتی واقف و.، "طراحی و پیاده‌سازی شبیه‌ساز انواع روشهای تصویربرداری فراصوتی آزمون‌های غیر مخرب"، نشریه علمی-ترویجی صوت و ارتعاش، سال 7، شماره 13، ص‌ص 82-103، 1397.

[18] Simões M. J., Santos F., Santos J. B., "FPGA-based control system of an ultrasonic phased array", Journal of Mechanical Engineering, Vol. 57, No. 2, pp. 135-141, 2011.

[19] Robert S., Casula O., Njiki M., Roy O., "Assessment of Real-Time Techniques for Ultrasonic Non-Destructive Testing", AIP Conference Proceedings, Vol. 1430, pp. 1960-1967, 2012.

[20] Jeune L. Le, Robert S., Villaverde E. L., Prada C., "Plane wave imaging for ultrasonic non-destructive testing: generalization to multimodal imaging", Ultrasonics, Vol. 64, pp. 128–138, 2016.

[21] 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.

[22] 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 1397.

[23] Arora J. S., Introduction to optimum design, McGraw-Hill, New York, 1989.

[24] Das-Gupta D., "In-place matrix inversion by modified Gauss-Jordan algorithm", Applied Mathematics, Vol. 4, pp. 1392-1396, 2013.

[25] حمیتی واقف و.، بکرانی م.،"پیاده‌سازی سیستم تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی"، نشریه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

فناوری آزمون‌های غیرمخرب، دوره 2، شماره 3 - شماره پیاپی 4، ص‌ص 23-31، پاییز و زمستان 1397.

[26] R/D Tech, "Introduction to phased array ultrasonic technology applications", 2004.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]