

تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی به روش تمرکز کامل بهبودیافته مبتنی بر شکل دهی 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 شکل دهی 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 شکل دهی پرتو استفاده می‌شود. نتایج آزمون عملی به منظور آشکارسازی حفره‌های سوراخکاری شده 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 غیرمخرب، بازرسی جوش، روش تمرکز کامل، شکل دهی 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

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

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

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 می‌توان 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.

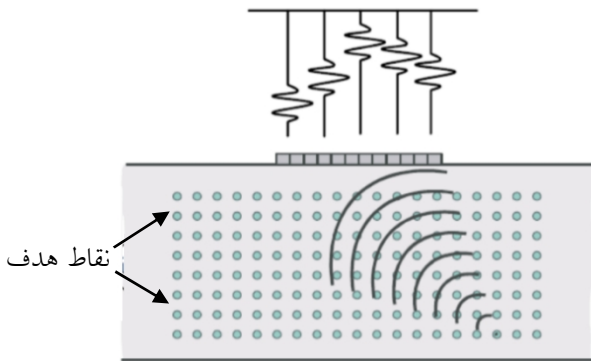
در تصویربرداری فراصوتی، علاوه بر بازتاب‌های اصلی ناشی از بازتاب پالس‌های ارسالی از سطح حفره یا نقص در قطعه آزمون که تصویر حفره یا نقص را می‌سازد، بازتاب‌های فرعی ناشی از امواج خزشی که در پیرامون حفره یا نقص شکل می‌گیرند و امواجی که داخل حفره با ضریب شکست متفاوت وارد و خارج می‌شوند و هم‌چنین بازتاب‌های چندمسیره ناشی از

1- Total focusing method

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 و 7 و 18-21]. به این منظور برای تمرکز پرتو از اعمال تاخیرهای متناسب در سیگنال هر یک از المان‌های آرایه فازی استفاده می‌شود، به‌صورتی که تمام پرتوها در یک زمان به نقطه هدف برسند.



شکل 1- 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

بالاتری فراهم می‌آورد، اما هنوز نوین زمینه قابل توجهی در تصویر به دلیل 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. اخیراً 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 به ترتیب زیر ارائه شده‌است:

ابتدا در بخش 2 روش تمرکز کامل در تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی تشریح می‌شود و سپس در بخش 3، TFM به همراه

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]:

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

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

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 این است 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 بروزسانی شوند، این حجم از محاسبات، سخت‌افزار بسیار پرهزینه‌ای را می‌طلبد.

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].

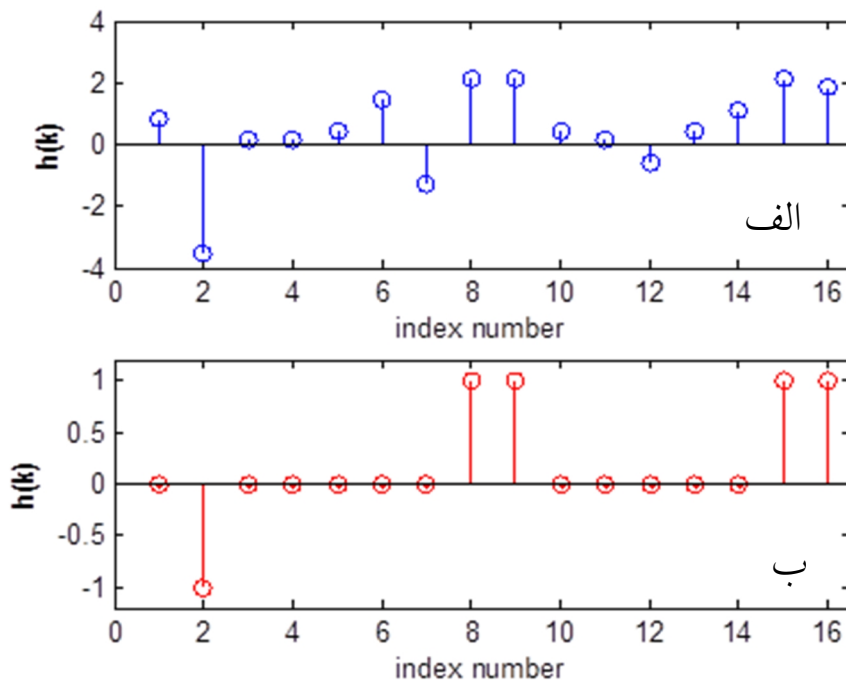
روش معادل دیگر این است که زمان‌های محاسبه شده روی سیگنال‌های دریافت شده اعمال شود. در این حالت با فرض این‌که نقطه هدف در مختصات $(x_{\text{ref}}, z_{\text{ref}})$ باشد، شدت روشنایی تصویر در نقطه هدف در TFM از رابطه زیر محاسبه می‌شود [10]:

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

در این رابطه $d_{i,j}$ فاصله انتشار از المان ارسال‌کننده i ام تا نقطه هدف در مختصات $(x_{\text{ref}}, z_{\text{ref}})$ و سپس تا المان گیرنده j ام است و $h_{i,j}(\cdot)$ سیگنال دریافت شده توسط المان j ام پس از ارسال توسط المان i ام 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.



شکل 2- نمونه ای از سیگنال $h(k)$ (شکل الف) و سیگنال برش یافته $\tilde{h}(k)$ با آستانه برش $\delta = 0.4$ (شکل ب)

با افزایش تعداد قطره‌های مجاور برای رسیدن به نتیجه مطلوب، حجم محاسباتی این روش نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر آن طول گام و تعداد تکرار الگوریتم و تعداد قطره‌های 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.

علاوه بر این، مشاهدات نشان می‌دهد این روش در تشخیص بازتاب‌های ضعیف و نقص‌های کوچک در قطعه مورد آزمون به خوبی 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

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

هدف CTFM پیشنهادی ساده‌سازی و تسریع وزندهی است، به طوری 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 به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

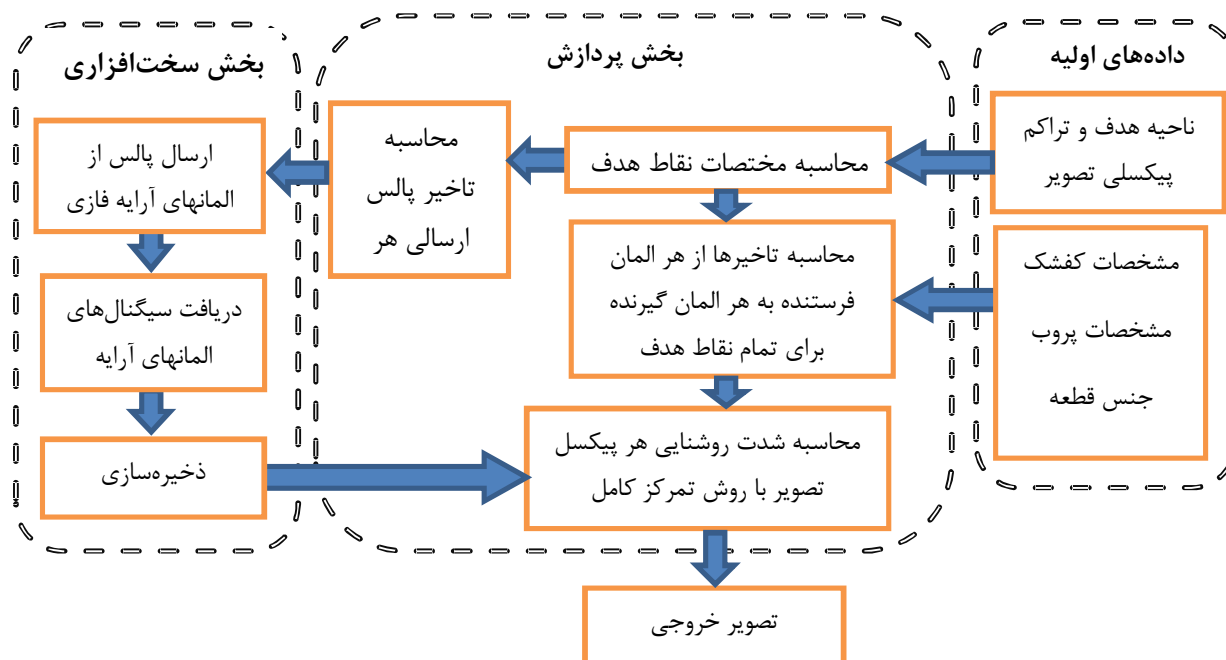
$$g(k) = \mathcal{W}^T(k) \mathbf{h}(k) = \sum_{i=1}^N \mathcal{W}_i(k) h_i(k) \quad (3)$$

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

در مقاله [16] نشان داده‌ایم که برای افزایش سرعت اجرای WTFM، در محاسبه وزن‌ها می‌توان به جای 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 به این 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.

جدول 1- مقایسه میزان حجم محاسباتی روش های روبش بر حسب مجموع تعداد عملیات ضرب و جمع

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



شکل 3- بلوک دیاگرام کلی روش روبش فراصوتی تمرکز کامل

هم چنین h_{\max} حداکثر مقدار دامنه $h_i(k)$ برای

$$h_{\max} = \max_i \{h_i(k)\} \text{ یعنی } i=1, 2, \dots, N$$

بنابراین $\mathbb{R}(k)$ برداری با مقادیر 0 و 1 و -1 است. جهت

اجتناب از تکین یا نزدیک به تکین شدن ماتریس $\mathbb{R}(k)$ ،

جهت پایداری عددی محاسبه معکوس، از فرم اصلاح شده

$$\mathbb{R}(k) = \mathbb{R}(k) \mathbb{R}^T(k) + s \mathbf{I}_{N \times N} \text{ استفاده می شود.}$$

در فرم اصلاح شده، ماتریس $\mathbf{I}_{N \times N}$ همانی با ابعاد $N \times N$

است و s یک ثابت مثبت بسیار نزدیک به صفر است. در این

حالت مقدار وزن ها با کمک نظریه ضرب کننده لاگرانژ [23]

برابر است با:

$$\mathbb{W}(k) = \frac{\mathbb{R}^{-1}(k) \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbb{R}^{-1}(k) \mathbf{a}} \quad (5)$$

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

است. جهت محاسبه وزن ها در روش پیشنهادی شکل دهی

وزن دار پرتو، عبارت $\mathbb{W}^T(k) \mathbb{R}(k) \mathbb{W}(k)$ که در آن

$$\mathbb{R}(k) = \mathbb{R}(k) \mathbb{R}^T(k)$$

ماتریس همبستگی نمونه های برش

یافته خروجی المان ها است، با حفظ بهره واحد در نقطه

کانونی به حداقل می رسد. مقدار نمونه های بردار

$$\mathbb{R}(k) = [\mathbb{R}_1(k), \mathbb{R}_2(k), \dots, \mathbb{R}_N(k)]^T$$

سه سطحی نمونه های $\mathbf{h}(k)$ مطابق رابطه (4) حاصل می شود:

$$\mathbb{R}_i(k) = \begin{cases} 1, & h_i(k) > dh_{\max} \\ 0, & -dh_{\max} \leq h_i(k) \leq dh_{\max} \\ -1, & h_i(k) < -dh_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

که در آن $i=1, 2, \dots, N$ و پارامتر d عدد ثابت مثبت بین

0 و 1 است که آستانه برش سیگنال های $h_i(k)$ است.

در مثال فوق زمان مورد نیاز برای محاسبه معکوس ماتریس $\mathbf{R}(k)$ و $\mathbf{R}^{\#}(k)$ با میانگین گیری از ده بار تکرار با الگوریتم حذفی گوس - جردن بهبود یافته [24] به ترتیب برابر با 92 ms و 35 ms می باشد. برای اجرای الگوریتم ها از نرم افزار MATLAB 2015b استفاده شده است.

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

میزان پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش ها 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 می دهد. چنانچه از جدول (1) مشاهده می شود، حجم محاسباتی TFM از سایر روش ها 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 روش ها 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 $\mathbf{R}^{\#}(k)$ هست.

6- سیستم تصویربرداری فراصوتی

شکل (3) بلوک دیاگرام ساختار طراحی شده برای تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی را نشان می دهد. در ادامه بخش های مختلف این ساختار تشریح می شود.

در WTFM از رابطه زیر حاصل می شود:

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

در حالت حدی $d=1$ تمام درایه های $\mathbf{R}^{\#}(k)$ برابر صفر هستند، بنابراین $\mathbf{R}^{\#}(k) = \mathbf{S}\mathbf{I}$ و در نتیجه با توجه به رابطه (5)، $\mathbf{R}^{\#}(k) = (1/N)\mathbf{a}$ ، بنابراین الگوریتم CTFM به فرم زیر تبدیل می شود:

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

بنابراین با مقایسه رابطه (7) با رابطه (1) می توان دریافت، الگوریتم CTFM در حالت نرمالیزه با ضریب $1/N$ ، تبدیل به الگوریتم TFM می شود. از طرفی در حالت حدی $d=0$ برش سه سطحی تبدیل به برش دوسطحی می شود، یعنی $\mathbf{R}^{\#}(k) = \text{sign}\{\mathbf{h}(k)\}$ می شود که در آن تابع sign، تابع علامت است. شکل (2) نمونه ای از سیگنال $\mathbf{h}(k)$ و $\mathbf{R}^{\#}(k)$ به ازای آستانه $d=0.4$ را که به طور نظری به دست آمده است، نشان می دهد. در این آزمایش نظری، آرایه فازی با 16 المان به صورت افقی در مختصات عرضی (عرض از مبدا) صفر در نظر گرفته شده است و نقطه هدف در مختصات $(2/2, -4/6)$ میلی متر در قطعه مورد آزمون از جنس فولاد قرار دارد.

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

6-1- داده‌های اولیه

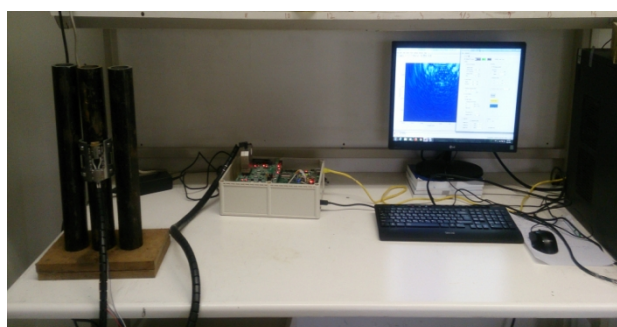
برابر با 5 میلی‌متر است. قطعه مورد بررسی نیز از جنس فولاد است و سرعت موج طولی در آن برابر با 5800 m/s می‌باشد.

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

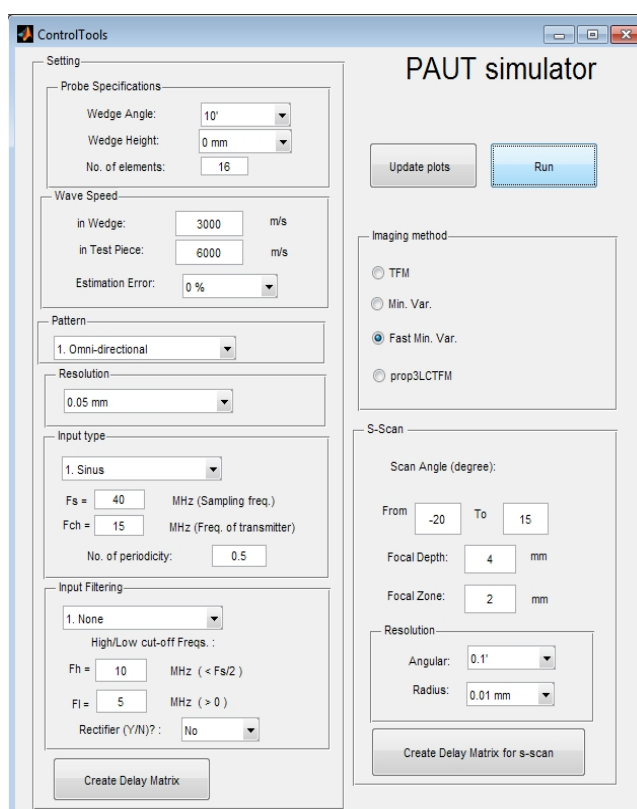
بخش سخت‌افزاری جهت ارسال و دریافت پالس از طریق پروب آرایه فازی و ذخیره داده‌ها استفاده می‌شود. در صورتی که صرفاً شبیه‌سازی سیگنال‌های المان‌ها مد نظر باشد، نیاز به این بخش نیست. شکل (5) سیستم‌های مورد استفاده در آزمون عملی را نشان می‌دهد که در پژوهشگاه نیرو ساخته شده است [17 و 25]. برد مداری توسط یک 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

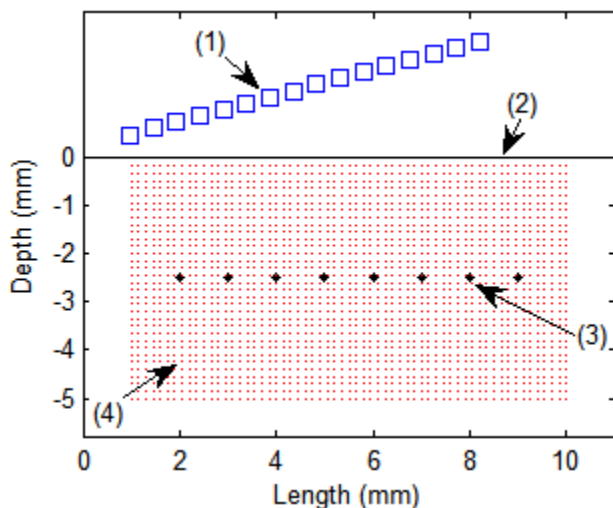
در این بخش داده‌های اولیه شامل مشخصات پروب آرایه فازی که تعیین‌کننده تعداد و فاصله المان‌ها از هم (گام المان) است و مشخصات پروب که شامل زاویه پروب نسبت به سطح افقی و سرعت موج در کفشک است و همچنین جنس قطعه مورد آزمون که نشان‌دهنده سرعت موج در قطعه است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین ناحیه روبش (ناحیه 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 7/5 MHz 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

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 ایده‌آل و سپس آزمون عملی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل 6- وضعیت آزمایشی مورد نظر برای شبیه‌سازی روش‌های روبش در حالت ایده‌آل. 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 غیرایده‌آل عناصر پروب آرایه فازی نظیر نویز و تداخل الکتریکی و تضعیف پرتو در جهت‌های مختلف، پرتوهای ارسالی به صورت همه‌سویه در نظر گرفته می‌شوند و سیگنال‌های بازگشتی بدون در نظر 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 در نظر گرفته شد. وضعیت آزمایشی مورد نظر به صورت شکل (6) است که مکان المان‌های آرایه، سطح بالایی قطعه مورد آزمون، ناحیه روبش و نقاط بازتابنده در آن مشخص

المان‌ها و پردازش اطلاعات دریافتی، تصویر تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر با ارسال پرتو توسط المان i ام و دریافت آن توسط تمامی المان‌ها، سیگنال‌های $h_{i,j}$ برای $j=1,2,\dots,N$ حاصل می‌شوند و این فرایند برای $i=1,2,\dots,N$ 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 z امین المان آرایه فازی که درایه z ام $\mathbf{h}(k)$ را می‌سازد، از محاسبه مجموع

$$h_j(k) = \sum_{i=1}^N h_{i,j}(k)$$

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 $256=16 \times 16$ 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) به دست می‌آید:

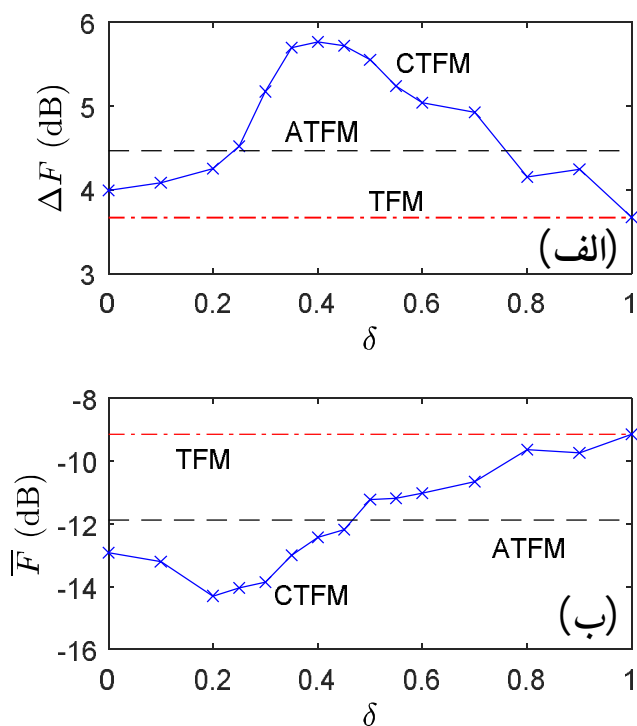
$$F(x_{ref}) = 10 \log_{10} \left\{ \frac{f(x_{ref})}{\max_x \{f(x)\}} \right\} \quad (8)$$

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 $F(x_{ref})$ ، تفکیک پذیری تصویر نقاط بازتابنده

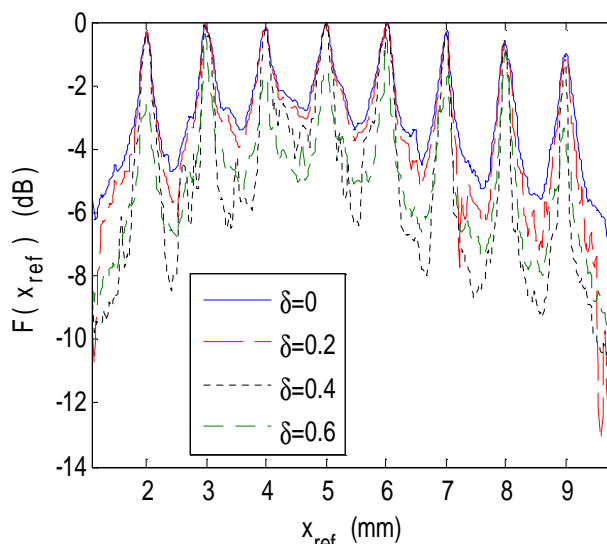
مقدار d به ترتیب در شکل‌های (8-الف و 8-ب) نشان داده شده است.



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

واضح است که هر چه مقدار ΔF بیشتر باشد، تفکیک پذیری 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 که برای $d=0$ مقدار ΔF در روش پیشنهادی برابر با 4 dB است، در حالی که 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 تفکیک پذیری TFM برابر با روش

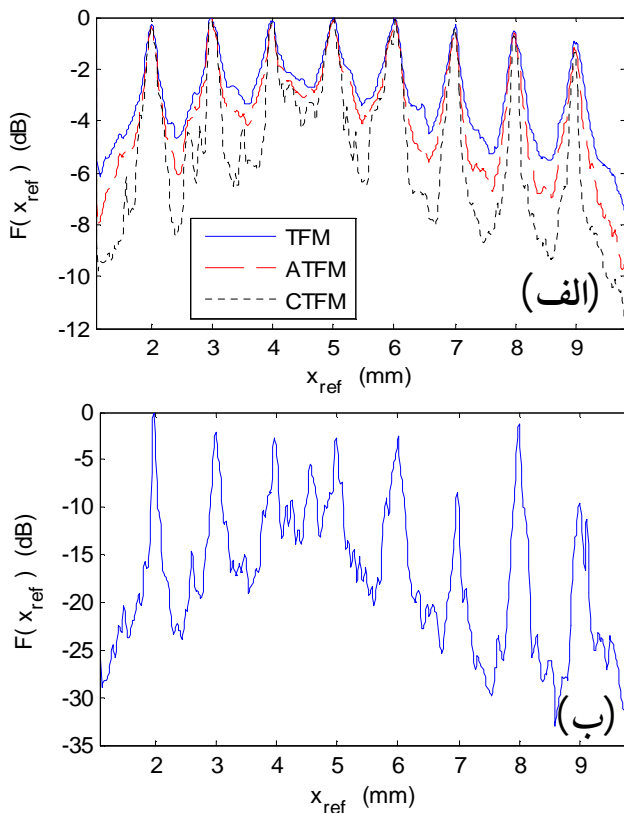


شکل 7- نمودار تابع روشنایی $F(x_{ref})$ روش پیشنهادی برای مقادیر مختلف آستانه d .

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 این جا با نماد ΔF نشان می‌دهیم) و متوسط سطح نویز زمینه (\bar{F}) بر حسب

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.



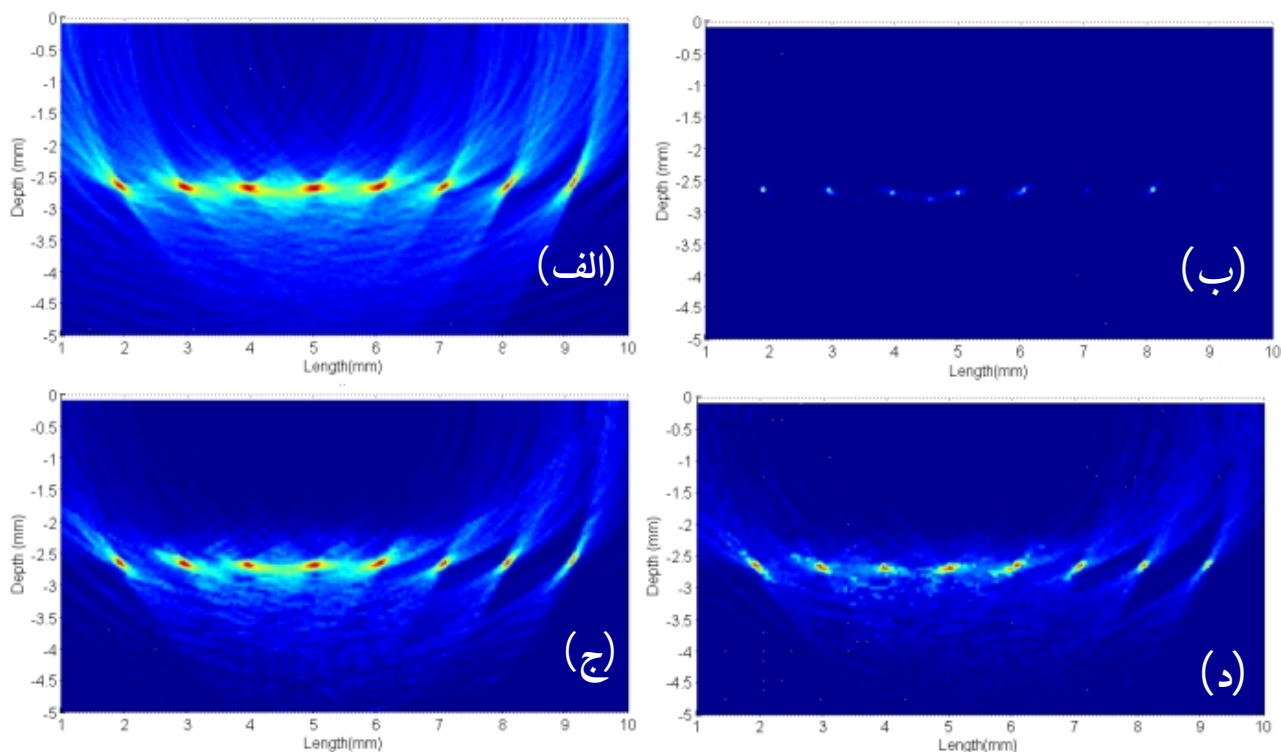
شکل 9- نمودار تابع $F(x_{ref})$ برای TFM، ATFM، CTFM (شکل الف) و WTFM (شکل ب)

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 d های 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

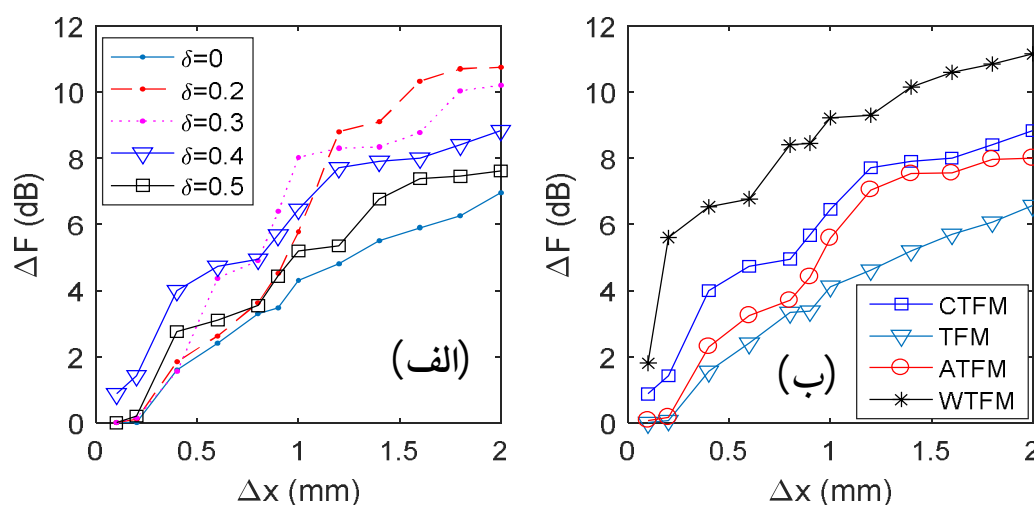
پیشنهادی با $d = 1$ است و تفکیک‌پذیری ATFM بهتر از روش TFM بوده، اما کمتر از روش پیشنهادی CTFM با $0.25 < d < 0.75$ است. شکل (8-ب) مقدار \bar{F} را برای الگوریتم‌های TFM و ATFM و روش پیشنهادی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سطح نویز \bar{F} در CTFM با $d = 0$ برابر با -13 dB است و با افزایش مقدار d مقدار 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 $d = 0.4$ در نظر 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. هم‌چنین 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.



شکل 10- تصاویر فراصوتی حاصل از الف) TFM، ب) ATF، ج) WTFM، د) ATF روش پیشنهادی با پرتوهای هم‌سویه تحت شرایط ایده‌آل



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

شکل (11-ب) نمودار تابع ΔF را بر حسب Δx در CTFM با $d = 0.4$ و TFM، ATF، 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 ATF و کمتر از روش WTFM است که این امر برتری روش پیشنهادی را نسبت به TFM و ATF نشان می‌دهد.

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 $\Delta x = 2 \text{ mm}$ به ازای $d = 0.2$ قدرت تفکیک بهتری برابر با $\Delta F = 10.4 \text{ dB}$ حاصل شده است.

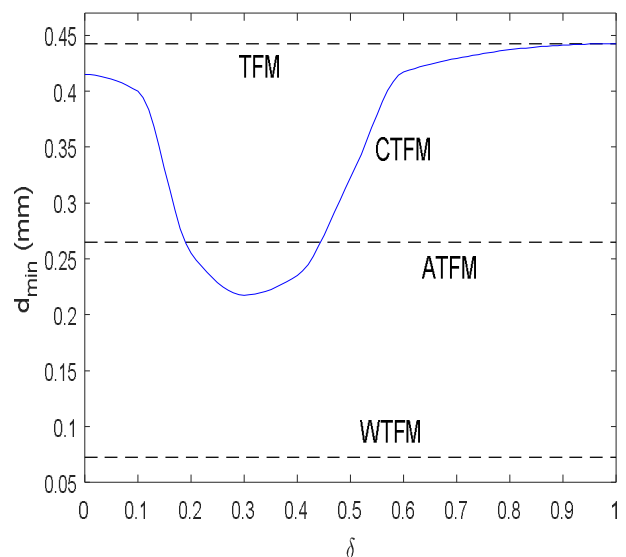
تفکیک پذیری عرضی کمتری دارد، اما از محوشدگی تصویر نقاط بازتابنده که در WTFM رخ می دهد، جلوگیری می کند.

7-2- بررسی نتایج عملی

برای مقایسه عملکرد الگوریتم های مختلف، لوله ای فولادی با شعاع 30 میلی متر با دیواره ای به ضخامت 14 میلی متر در نظر گرفته می شود و سه حفره عمود بر راستای لوله به صورت شکل (13) (شکل بالایی) با قطر 0/3، 0/8 و 0/8 میلی متر و فواصل به ترتیب 2، 5 و 8 میلی متر از سطح جانبی (که نشان دهنده عمق حفره ها از سطح است) سوراخکاری شده است. بنابراین مسیر حفره ها به طور کامل در دیواره قرار دارد. با توجه به فاصله حفره ها از سطح، آن ها را به ترتیب، حفره بالایی، حفره میانی و حفره پایینی می نامیم. شکل (13) پایینی لوله فولادی مورد آزمون را به همراه پروب و کفشک نشان می دهد. این وضعیت آزمون عملی که از سیستم ارائه شده در [25] استفاده می کند، برای کاربرد در بازرسی جوش مناسب است. ذکر این نکته لازم است که سیستم توصیف شده در [25] یک سیستم تصویربرداری بی درنگ برای کاربرد بازرسی جوش لوله های بویلر نیروگاه های حرارتی است که بر مبنای روش تمرکز کامل پیاده سازی شده است و در صورت ارتقا سخت افزار می تواند در آینده مجهز به تصویربرداری فراصوتی با روش پیشنهادی شکل دهی پرتو در این پژوهش شود.

شکل (14) تصاویر به دست آمده روش های TFM (شکل الف)، WTFM (شکل ب)، ATFM (شکل ج) و روش پیشنهادی CTFM (شکل د) را نشان می دهد. طول ناحیه رویش 20 میلی متر و عمق ناحیه رویش 14 میلی متر با قدرت تفکیک پیکسلی 0/05 میلی متر 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 می افتد و سبب ایجاد یک "ناحیه مرده" (که در [26] تشریح شده است) می شود.

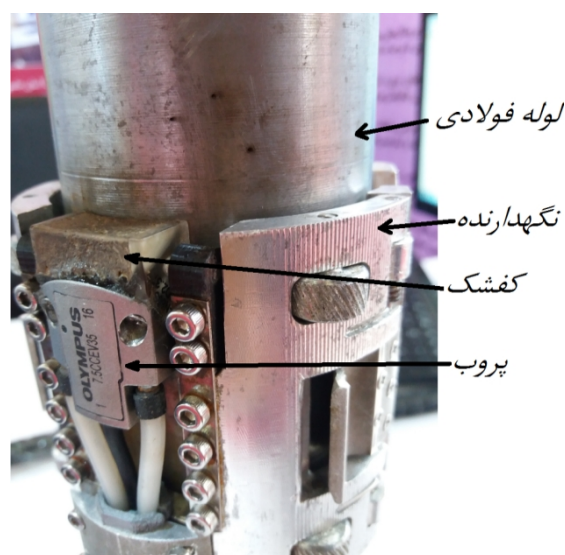
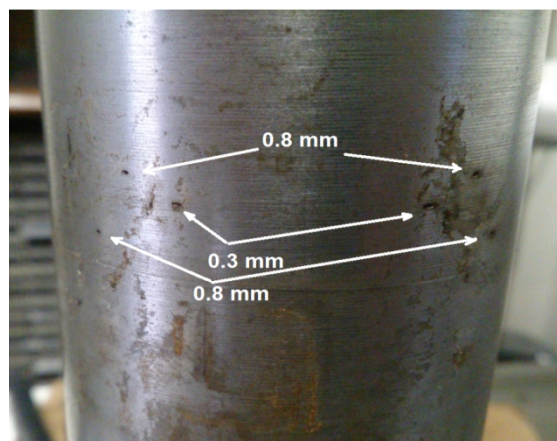
در ادامه، روش های مورد بررسی از لحاظ معیار تفکیک پذیری عرضی با هم مقایسه می شوند. تفکیک عرضی بیانگر این مفهوم است که در امتداد واگرایی پرتوهای ارسالی از المان ها نسبت به یکدیگر، تا چه اندازه امکان تفکیک برای تشخیص دو ناحیه کنار هم وجود دارد [26]. برای مقایسه تفکیک پذیری عرضی نقاط بازتابنده مجاور هم، از معیار $d_{\min} = \Phi_{-6\text{dB}}/4$ استفاده می شود که در این رابطه $\Phi_{-6\text{dB}}$ اندازه قدرت تفکیک ΔF برابر با 6 دسی بل 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.

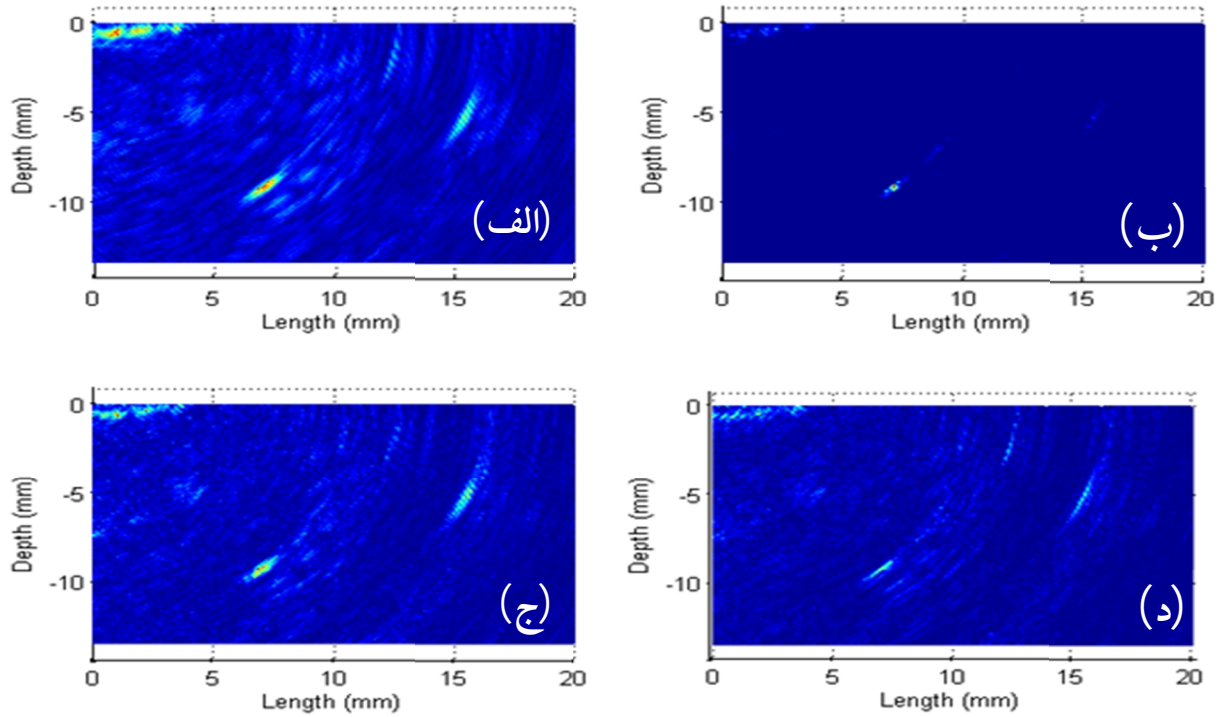
نمودار تفکیک عرضی دو نقطه بازتابنده مجاور در CTFM را بر حسب مقادیر d به همراه مقایسه با TFM، ATFM و WTFM در وضعیت آزمایشی فوق الذکر نشان می دهد. با توجه به شکل ملاحظه می شود تفکیک پذیری TFM، ATFM و WTFM به ترتیب 0/44، 0/26 و 0/07 میلی متر است. در روش پیشنهادی CTFM تفکیک پذیری عرضی تا 0/21 میلی متر به 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

حاصل از WTFM در شکل ب، نویز زمینه را به خوبی کاهش می‌دهد، اما وضوح تصویر حفره‌ها کاهش یافته و حفره بالایی کاملاً 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) به خوبی 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 $F(x_{ref})$ را برای TFM، WTFM، ATFM 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.

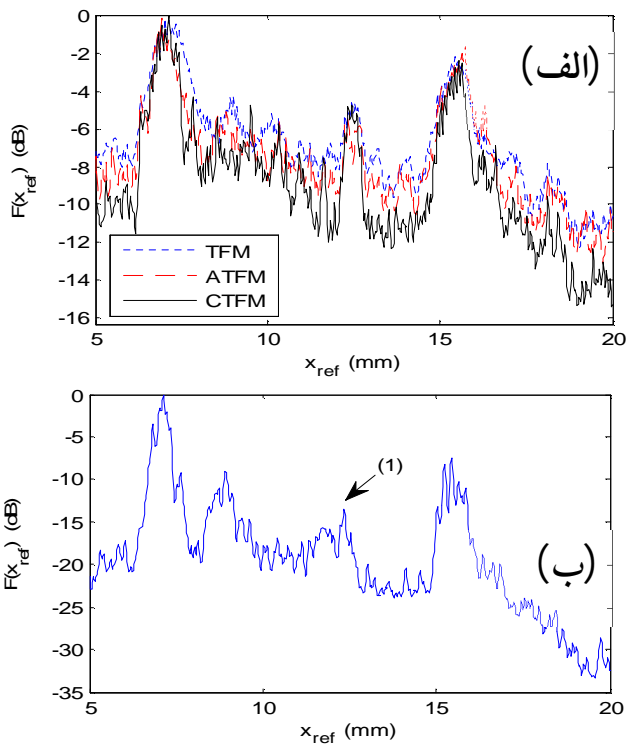


شکل 13- وضعیت آزمایشی برای آزمون عملی.

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 پروپ 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 ضعیف‌تر بودن سیگنال‌های بازتاب شده از آن حفره به المان‌های آرایه فازی است. چنان‌که از شکل الف مشاهده می‌شود، تصویر حاصل از روش TFM محل تمامی حفره‌ها 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



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



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.

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 پایتترین 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.

است. نزدیک بودن زمان اجرای روش CTFM به WTFM به دلیل زمان اضافی لازم جهت عملیات آستانه گذاری است. با تفکیک پیکسلی برابر با 0/1 میلی متر، زمان اجرای روش پیشنهادی به 0/29 ثانیه کاهش می یابد که در قیاس با WTFM و ATFM به ترتیب در حدود 0/1 و 0/4 ثانیه سریعتر هست. هم چنین با تفکیک پیکسلی 0/2 میلی متر زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی کمتر از 0/1 ثانیه است که پایتتر از ATFM و WTFM می باشد. بنابراین روش پیشنهادی CTFM روش مناسبی برای به کارگیری در مقاصد آزمون های برخط است. در صورت استفاده از سخت افزار سریعتر می توان تراکم پیکسلی بالاتر را نیز به صورت برخط پیاده سازی کرد.

8- نتیجه گیری

در این مقاله روش بهبود یافته تصویربرداری فراصوتی آرایه فازی برای آزمون غیرمخرب ارائه شد. این روش بر مبنای وزن دهی سیگنال های دریافتی آرایه فازی است و از روشی با پیچیدگی محاسباتی پایین برای محاسبه وزن ها استفاده می کند. روش پیشنهاد شده با سایر روش های مبتنی بر تمرکز کامل با توجه به دقت تشخیص نقاط بازتاب کننده و سطح نویز زمینه در آزمون های نظری و عملی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج آزمون های نظری و عملی نشان داد روش پیشنهادی تمرکز کامل وزن دهی شده نسبت به روش های مشابه دقت بهتری در تشخیص عیوب قطعه مورد آزمون دارد. هم چنین نتایج نشان داده شد پیچیدگی محاسباتی و زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی کمتر از سایر روش های وزن دهی شده است و می توان این الگوریتم را برای مقاصد آزمون های برخط مورد استفاده قرار داد.

قدردانی

نویسنده این مقاله، وظیفه خود می داند 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

جدول 2- ارزیابی تصاویر به دست آمده از روش های روش.

	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

3-7- مقایسه زمان اجرای الگوریتم ها

در کاربردهایی نظیر بازرسی جوش، تصویر ساخته شده باید با فاصله های زمانی کوتاه بروزرسانی شود تا در صورت جابجایی مکان پروب آرایه فازی، تصویر جدید قطعه به روز شود. بنابراین زمان اجرای الگوریتم ها اهمیت زیادی در آزمون عملی دارد. جدول (3) زمانبری اجرای الگوریتم ها در آزمون عملی بخش قبل را با توجه به قدرت تفکیک پیکسلی تصاویر (فاصله نقاط هدف از یکدیگر) با هم مقایسه می کند. 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 ردیف های دوم و سوم قدرت تفکیک به ترتیب نصف و یک چهارم می شود.

جدول 3- بررسی زمان اجرای الگوریتم ها.

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

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول (3) مشاهده می شود، روش TFM در هر حالت نسبت به روش های وزن دهی شده WTFM، ATFM و CTFM سریعتر عمل می کند که علت آن عدم نیاز به محاسبات وزن ها برای تشکیل تصویر است. روش پیشنهاد شده در مقایسه با WTFM و ATFM با در نظر گرفتن میزان تفکیک 0/05 میلی متر به ترتیب 0/28 و 1/5 ثانیه سریعتر

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، صص 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

رضایی، مهندس امیر نریمانی و همکاران بخش تعمیرات مکانیکی و تحقیقات نیروگاه شهید مفتاح 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 micromachined 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

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

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