

# ارائه روش بهبود یافته تصویربرداری فراصوتی در بازرسی جوش

مهدی بکرانی<sup>۱</sup> و وحید حمیتی واقف<sup>۲</sup>

۱- عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی قم- قم- ایران

[bekrani@qut.ac.ir](mailto:bekrani@qut.ac.ir)

۲- عضو هیات علمی، پژوهشگاه نیرو- تهران- ایران

[vvaghef@nri.ac.ir](mailto:vvaghef@nri.ac.ir)

**چکیده:** روش‌های نوین تصویربرداری در بازرسی جوش مبتنی بر استفاده از آرایه‌های فازی فراصوتی می‌باشند. روش تمرکز کامل از روش‌های نوین تصویربرداری می‌باشد که از حداکثر اطلاعات موجود در عناصر آرایه استفاده می‌کند و سبب بهبود کیفیت آشکارسازی عیوب قطعه مورد آزمون در آزمون غیرمخرب نسبت به روش‌های متعارف می‌شود. این روش علی‌رغم قدرت بهبود بالا، به دلیل ایجاد نویز زمینه، قدرت تفکیک محدودی داشته و در آشکارسازی عیوب جزئی ضعیف عمل می‌کند. در این مقاله روش بهبود یافته تمرکز کامل برای افزایش کیفیت تصویر ارائه می‌شود که سیگنال‌های دریافتی را با استفاده از نظریه حداقل واریانس، وزن‌دهی می‌کند و به این ترتیب سبب کاهش تاثیر نویز می‌شود. به منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت آشکارسازی عیوب قطعه، برای محاسبه وزن‌ها از روشی تکراری استفاده شده است، به طوری که در هر تکرار، معکوس ماتریس همبستگی بین سیگنال‌های دریافتی عناصر آرایه با رابطه‌ای بازگشتی تقریب زده می‌شود و در محاسبه وزن‌ها به روش حداقل واریانس مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس نتایج شبیه‌سازی و در مقایسه با روش تمرکز کامل، روش بهبود یافته تمرکز کامل، میزان متوسط نویز زمینه را حدود ۱۶ دسی‌بل کاهش داده است. همچنین روش پیشنهادی در مقایسه با روش تمرکز کامل وزن‌دار با همان سطح متوسط نویز، سطح تابع شدت روشنایی تصویر حفره‌های موجود در قطعه تحت آزمون را به میزان ۸ دسی‌بل بهبود داده است که به معنای دقت آشکارسازی بهتر می‌باشد. همچنین آزمایش‌های عملی برتری روش پیشنهادی را در بهبود کیفیت تصویر، به صورت کمی و کیفی تایید می‌کنند. زمان اجرای لازم برای محاسبه وزن‌ها در روش پیشنهادی نوعاً ۱۰٪ زمان اجرای لازم در روش تمرکز کامل وزن‌دار مبتنی بر تکنیک حذفی گوس-جردن می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آرایه فازی فراصوتی، آزمون غیرمخرب، بازرسی جوش، روش تمرکز کامل، نظریه حداقل واریانس

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۷/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۵/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۶/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی بکرانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران-قم-بلوار خداکرم- دانشگاه صنعتی قم- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

روش‌های مذکور به دلیل پردازش حوزه تبدیل، پیچیدگی اضافه داشته و به علاوه بخشی از پژواک واقعی را نیز نادیده می‌گیرند. به منظور بهره‌گیری از خواص آماری سیگنال‌ها در حوزه زمان، روش‌هایی نیز بر مبنای شکل‌دهی پرتو مبتنی بر تاخیر، وزن‌دهی و جمع برای کاهش تداخل و نویز ناشی از پراکنده‌سازهای با توزیع تصادفی در آزمون غیرمخرب اجسام پیشنهاد شده است [۱۰][۲۰]. در این روش‌ها از وزن‌دهی سیگنال‌ها بر اساس نظریه حداقل واریانس و بدون نیاز به پردازش حوزه تبدیل استفاده می‌شود. این روش‌ها با توجه به موثر بودن آن در حذف تداخل و نویز، در پژوهش‌های حوزه فراصوتی پزشکی نیز توسعه یافته است [۱۱-۱۲][۲۱]. چنانکه در [۲۱] اشاره شده است، با داشتن سیگنال‌های دریافتی از آرایه‌های فازی، صرف‌نظر از روشی که برای روبش فراصوتی و تشکیل تصویر استفاده می‌شود، می‌توان از روش حداقل واریانس برای وزن‌دهی به سیگنال‌های دریافتی و در نتیجه شکل‌دهی پرتو استفاده کرد.

در این مقاله بهبود روش تمرکز کامل وزن‌دار مبتنی بر نظریه حداقل واریانس (MV-TFM) مد نظر است، به صورتی که تشخیص عیب در قطعه بهبود یافته و پیچیدگی محاسباتی الگوریتم نیز کاهش یابد. در بخش ۲ روش‌های روبش در تصویربرداری فراصوتی تشریح می‌شوند. در بخش ۳ روش پیشنهادی ارائه شده و در بخش‌های ۴ و ۵ به کمک شبیه‌سازی و آزمایش عملی مورد ارزیابی و مقایسه با سایر روش‌های هم‌تا قرار می‌گیرد. نهایتاً در بخش ۶ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه می‌شود.

## ۲- بررسی روش‌های روبش فراصوتی

در سیستم‌های آرایه فازی به منظور داشتن پرتو متمرکز، با اعمال تاخیرهای زمانی بر روی مراحل ارسال و دریافت عناصر، پرتو متمرکز ایجاد می‌شود که به تمرکز الکترونیکی مشهور است. نتیجه اعمال تمرکز الکترونیکی، ایجاد ناحیه کانونی با شدت بالا می‌باشد. برای هر یک از سیگنال‌های بازتاب‌شده و دریافتی توسط عناصر نیز مجدداً تاخیری در نظر گرفته شده و روی آن اعمال می‌شود که اغلب با تاخیر اعمالی در فرستنده برابر است. سپس همه سیگنال‌های تاخیر یافته با هم جمع می‌شوند. چنانچه میزان تاخیر اعمال شده 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 روش روبش مسطح و متمرکز [۵-۶][۲۲-۲۴] در هر روبش فقط تعداد مشخصی از عناصر به عنوان فرستنده و گیرنده فعال هستند که اصطلاحاً پنجره<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. پنجره در طول آرایه فازی جابجا می‌شود و سبب می‌شود قدرت تفکیک عرضی مقداری ثابت و برابر با گام عنصر<sup>۲</sup> باشد. دامنه هر نقطه مقابل پنجره با جمع کردن سهم هر زوج عنصر فرستنده-گیرنده محاسبه می‌شود. این روش خود به دو تکنیک پرتو متمرکز و نامتمرکز دسته‌بندی می‌شود [۵-۶]. برای ایجاد ناحیه کانونی از روش تمرکز عمقی پویا (DDF)<sup>۱'</sup> در عناصر گیرنده

تصویربرداری فراصوت کاربردهای متعددی در پزشکی برای شناخت ساختار آناتومی و عملکرد فیزیولوژیکی بدن [۱] و همچنین در صنعت برای بازرسی جوش، خوردگی، تعیین ابعاد و غیره [۲] دارد. تصاویر به دست آمده از ابزارهای دریافت تصویر، عموماً دارای مشکل نویز و تفکیک‌پذیری محدود هستند و موجب شده است تا روشهای پردازشی مختلفی برای بهبود تصویر ارائه شود [۳-۴]. یکی از حوزه‌های تصویربرداری فراصوتی که دارای این چالشها است، تصویربرداری مبتنی بر آزمونهای غیرمخرب صنعتی به منظور تشخیص عیوب جوش قطعه تحت آزمون می‌باشد.

امروزه در آزمون غیرمخرب صنعتی، آرایه‌های فازی فراصوتی توسعه قابل توجهی به منظور تشخیص عیوب قطعه تحت آزمون یافته‌اند که اغلب به دلیل قابلیت‌های برتر آنها در مقایسه با روش‌های سنتی استفاده از یک عنصر ارسال/دریافت‌کننده می‌باشد. همچنین توانایی آنها در ایجاد تصویر یکپارچه از قطعه مورد آزمون به صورت زمان-حقیقی، ویژگی برجسته آنها محسوب می‌شود. روش‌های رایج آزمون با استفاده از آرایه فازی عبارتند از روش‌های روبش مسطح<sup>۱</sup>، قطاعی و متمرکز<sup>۲</sup> [۵-۶]. علاوه بر روش‌های مذکور، روش‌های نوینی برای روبش ابداع گردیده است؛ نظیر روش تمرکز کامل (TFM)<sup>۲</sup> [۷-۹] و روش حداقل واریانس (MV)<sup>۴</sup> [۱۰-۱۲].

از چالش‌های مهم در تصویربرداری فراصوتی در آزمون غیرمخرب، تشخیص صحیح بازتاب‌های واقعی ناشی از عیوب قطعه، از بازتاب‌های کاذب ناشی از ساختار قطعه و پراکنده‌سازهای<sup>۵</sup> موجود در آن می‌باشد. وجود بازتاب‌های کاذب سبب ایجاد نویز زمینه در تصویر فراصوتی شده و تشخیص عیوب را دشوار و یا حتی غیرممکن می‌سازد. علاوه بر این، واگرایی پرتو فراصوتی که ناشی از الگوی تشعشع عناصر آرایه است، سبب ایجاد زمینه نویزی در تصویر فراصوتی ساخته شده، می‌شود. اثرات غیرایده‌آل تجهیزات ارسال و دریافت و نویزهای ذاتی، خود سبب افزایش بیش از پیش نویز در تصویر می‌شوند که می‌بایست کنترل شوند و یا با روش‌های پردازش تصویر، تأثیر آنها کاهش یابد.

با توجه به ویژگی‌های بازتاب کاذب ناشی از پراکنده‌سازها و توزیع فرکانسی آن، روش‌هایی برای بهبود دقت آشکارسازی ارائه شده است که بر اساس پردازش مجزا بر روی سیگنال‌های دریافتی عناصر آرایه عمل می‌کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش پردازش ساختارشناسانه<sup>۶</sup> [۱۳]، استفاده از فیلتر وقتی [۱۴-۱۵]، استفاده از تبدیل موجک گسسته [۱۶]، استفاده از بازشناسی الگو از روی ویژگی‌های طیفی سیگنال‌های دریافتی برای جداسازی سیگنال‌های پژواک واقعی از بازتاب کاذب [۱۷]، استفاده از شبکه‌های عصبی در حوزه زیرباند [۱۸] و پردازش به کمک آمارگان مرتبه، با استفاده از ویژگی‌های فرکانسی پژواک [۱۹] اشاره کرد.

استفاده می‌شود [۵]. مزیت این روش حجم محاسباتی بسیار پایین آن در مقایسه با روش TFM (که در فصل بعد تشریح می‌شود) و ضعف آن در قدرت تفکیک عرضی کم آن است.

روش روبش قطاعی (S-scan) [۶] [۲۵-۲۹] از تمامی عناصر برای چرخش پرتو در طول روبش زاویه‌ای استفاده می‌کند. برای محاسبه هر خط روبش (متناظر با یک زاویه روبش) در تصویر، سیگنال‌ها با تاخیرهای زمانی مناسب جمع می‌شوند تا جهت پرتو آرایه را در زاویه مطلوب مشخص کنند.

در روش تمرکز روزنه مصنوعی (SAFT) [۱۱] که از قدیمی‌ترین روش‌های روبش تک‌عنصری است، در صورت پیاده‌سازی با آرایه فازی، هر عنصر آرایه به‌طور مستقل یک ارسال و دریافت کننده است [۳۰]. یکی از مزایای منحصر به فرد این روش این است که با توجه به امکان جابجایی فیزیکی عناصر، عرض پنجره ساخته‌شده بسیار بیشتر از عرض حقیقی آرایه می‌تواند باشد، بنابراین این روش به‌طور قابل توجهی تفکیک عرضی [۱۲] و نسبت سیگنال به نویز روبش B مسطح را بهبود می‌دهد [۳۱-۳۲].

روش‌های بررسی شده همگی این ضعف را دارند که از اطلاعات دریافتی از عناصر به‌طور کامل استفاده نمی‌کنند. این اشکال در روش تمرکز کامل رفع شده است. در ادامه روش تمرکز کامل و روش وزن‌دار تمرکز کامل به تفصیل بررسی خواهد شد.

## ۱-۲- روش تمرکز کامل (TFM)

در روش TFM [۵] [۸] [۲۵-۲۸]، در هر بار تکرار، یک عنصر ارسال-کننده و همه عناصر دریافت‌کننده خواهند بود. با تکرار این فرآیند برای همه عناصر و پردازش اطلاعات دریافتی، تصویر تشکیل می‌شود. در این روش پرتو در هر نقطه از ناحیه هدف متمرکز می‌شود. برای تمرکز پرتو از اعمال تاخیرهای متناسب در سیگنال هر یک از عناصر آرایه فازی استفاده می‌شود، به‌صورتی که تمام پرتوها در یک زمان به نقطه هدف برسند. سپس شدت روشنایی تصویر در هر نقطه هدف با مختصات  $(x_{ref}, z_{ref})$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I(x_{ref}, z_{ref}) = \left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h_{i,j} \left( \frac{\sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + (z_i - z_{ref})^2}}{c} + \frac{\sqrt{(x_j - x_{ref})^2 + (z_j - z_{ref})^2}}{c} \right) \right|^2 \quad (1)$$

در این رابطه  $c$  سرعت موج فراصوتی در قطعه تحت آزمون بوده و  $N$  تعداد عناصر آرایه می‌باشد.  $h_{i,j}(k)$  سیگنال ارسال شده توسط عنصر  $i$ ام و دریافت شده توسط عنصر  $j$ ام پس از بازتاب از قطعه مورد آزمون در زمان  $k$  می‌باشد و مختصات عنصر فرستنده و عنصر گیرنده به ترتیب  $(x_i, z_i)$  و  $(x_j, z_j)$  می‌باشد. علامت جمع در رابطه (۱)

روی تمام زوجهای فرستنده-گیرنده که تعداد آنها برابر است با  $N \times N$  انجام می‌شود. بنابراین در این روش از حداکثر اطلاعات دریافتی برای هر نقطه هدف استفاده می‌شود [۵].

## ۲-۲- روش تمرکز کامل وزن‌دار مبتنی بر نظریه حداقل واریانس (MV-TFM)

در این روش به‌منظور بهبود دقت آشکارسازی عیوب قطعه، از وزن‌دهی به سیگنال‌های دریافتی عناصر آرایه برای شکل‌دهی وزن‌دار پرتو فراصوتی استفاده می‌شود. این روش معادل با فیلترگذاری مکانی [۱۰] تصویر فراصوتی است [۱۰]. مقادیر وزن‌ها با استفاده از تحلیل آماری نمونه‌های داده بر مبنای نظریه حداقل واریانس حاصل می‌شوند. این عمل سبب کاهش قابل توجه نویز در مقایسه با روش TFM گردیده و در نتیجه تفکیک‌پذیری تصویر بهبود می‌یابد. البته این مزیت به‌هزینه حجم محاسباتی بیشتری به‌دست می‌آید [۱۰].

برای توصیف نظریه حداقل واریانس، فرض می‌شود بردار خروجی تاخیر یافته زمانی به‌صورت (۲) باشد:

$$\mathbf{h}(k) = [h_1(k), h_2(k), \dots, h_N(k)]^T \quad (2)$$

که در آن  $h_i(k)$  عبارتست از نمونه  $k$ ام سیگنال تاخیر یافته خروجی عنصر  $i$ ام. به‌عبارت دیگر بردار  $\mathbf{h}(k)$  بردار تشکیل شده از سیگنال دریافتی از عناصر ۱ تا  $N$  در زمان  $k$  است، که در آن

$$h_i(k) = \sum_{j=1}^N h_{j,i}(k) \quad (3)$$

درایه  $i$ ام بردار  $\mathbf{h}(k)$  می‌باشد که متناظر با سیگنال عنصر  $i$ ام است. تاخیر در خروجی به‌گونه‌ای لحاظ می‌شود که تمام پرتوها در نقطه مطلوب روبش متمرکز شوند. در این صورت حاصل جمع درایه‌های  $\mathbf{h}(k)$  منتهی به شکل‌دهی پرتو فراصوتی مورد استفاده در روش TFM می‌شود. جمع وزن‌دار این درایه‌ها منتهی به شکل‌دهی وزن‌دار پرتو به‌صورت

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

می‌شود، که در آن

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

بردار وزن می‌باشد. روش MV-TFM شکل‌دهی وزن‌دار پرتو مبتنی بر نظریه حداقل واریانس است که در آن با حفظ بهره واحد در نقطه کانونی، توان خروجی شکل‌دهنده  $\{g^2(k)\}$  را حداقل می‌کند.

عبارت  $\{g^2(k)\}$  را می‌توان به‌صورت (۶) بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} E\{g^2(k)\} &= E\{\mathbf{w}^T(k) \mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k) \mathbf{w}(k)\} \quad (6) \\ &= \mathbf{w}^T(k) E\{\mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k)\} \mathbf{w}(k) \\ &= \mathbf{w}^T(k) \mathbf{R}(k) \mathbf{w}(k) \end{aligned}$$

که در آن  $\mathbf{R}(k)$  تابع خودهمبستگی نمونه‌های خروجی عناصر آرایه فازی به صورت (۷) می‌باشد:

$$\mathbf{R}(k) = E \{ \mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k) \} \quad (7)$$

بنابراین هدف یافتن  $\mathbf{w}(k)$  به صورتی است که عبارت  $\mathbf{w}^T(k) \mathbf{R}(k) \mathbf{w}(k)$  حداقل شود و در عین حال با توجه به اینکه داده‌ها قبلاً به اندازه لازم تأخیر داده شده‌اند تا در نقطه مطلوب متمرکز شوند، مقدار بهره  $\sum_i w_i(k)$  برابر با واحد باشد [۶]. این مساله بهینه‌سازی مقید رامی‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$\mathbf{w}^T(k) \mathbf{a} = 1 \quad \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^T(k) \mathbf{R}(k) \mathbf{w}(k) \quad (8)$$

که در آن  $\mathbf{a}$  بردار ستونی  $1 \times N$  شامل مقادیر واحد است، یعنی:

$$\mathbf{a} = [1, 1, \dots, 1]^T_N \quad (9)$$

در این حالت مساله بهینه‌سازی (۸) با کمک نظریه ضرب‌کننده لاگرانژ [۳۳] منتهی به رابطه (۱۰) برای وزن‌های بهینه  $\mathbf{w}_{opt}(k)$  می‌شود:

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

بنابراین خروجی نهایی از جمع وزن‌دار نمونه‌های خروجی عناصر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$g(k) = \mathbf{w}_{opt}^T(k) \mathbf{h}(k) \quad (11)$$

در پیاده‌سازی برخط به منظور تسریع اجرای الگوریتم، به جای عمل میانگین‌گیری برای محاسبه تابع خودهمبستگی، از مقادیر لحظه‌ای بردارها استفاده می‌شود و بنابراین تابع خودهمبستگی لحظه‌ای به صورت

$$\mathbf{R}(k) \approx \mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k) \quad (12)$$

مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش MV-TFM از وزن‌دهی سیگنال‌های ارسال و دریافت شده توسط هر عنصر به کمک رابطه (۱۰) استفاده می‌کند. در نهایت شدت روشنایی پیکسل متناظر با نقطه  $(x_{ref}, z_{ref})$  از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$I(x_{ref}, z_{ref}) = \left| g \left( \frac{\sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + (z_i - z_{ref})^2}}{c} + \frac{\sqrt{(x_j - x_{ref})^2 + (z_j - z_{ref})^2}}{c} \right) \right| \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) و در عبارت داخل پرانتز، مقدار  $k$  برابر با مجموع زمانهای رفت و برگشت سیگنال از عنصر فرستنده  $i$ ام به عنصر گیرنده  $j$ ام است.

### ۳- روش پیشنهادی تمرکز کامل

هدف روش پیشنهادی ساده‌سازی و تسریع وزن‌دهی است، به طوری که دقت بالاتری نسبت به روش TFM داشته و در عین حال پیچیدگی محاسباتی آن پایینتر از روش MV-TFM باشد و در نتیجه قابلیت استفاده در آزمونهای برخط را داشته باشد.

در روش MV-TFM محاسبه معکوس ماتریس در صورتی که تعداد عناصر آرایه زیاد باشد، حجم محاسباتی قابل توجهی خواهد داشت. علت این امر این است که پیچیدگی محاسباتی عملیات محاسبه ماتریس معکوس با روش متعارف از مرتبه  $O(N^3)$  می‌باشد. به علاوه این حجم از محاسبه برای هر پیکسل تصویر نیز تکرار شود که پیچیدگی محاسباتی را به مرتبه  $O(N^4)$  می‌رساند و بار محاسباتی بالایی را به سخت‌افزار تحمیل می‌کند. در مقاله [۳۴] نشان داده‌ایم که برای افزایش سرعت اجرای روش MV-TFM، در محاسبه وزن‌ها می‌توان به جای ماتریس خودهمبستگی  $\mathbf{R}(k)$ ، فقط عناصر قطری آن را در نظر گرفته و 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. در این

حالت عناصر بردار

$$\mathbf{w}_{opt}(k) = [w_{opt,1}(k), w_{opt,2}(k), \dots, w_{opt,N}(k)]^T \quad \text{تبدیل به} \quad (14)$$

$$w_{opt,i}(k) = \frac{1}{h_i^2(k) \sum_{j=1}^N 1/h_j^2(k)}$$

می‌شود. بنابراین حجم محاسبات لازم برای محاسبه وزن‌های بهینه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

این روش علی‌رغم سادگی، نمی‌تواند از اطلاعات موجود در سیگنال‌های دریافتی به منظور حذف نویز و آشکارسازی عیوب قطعه به طور مطلوب بهره برد. بنابراین در این مقاله الگوریتم فوق با دو اصلاح توسعه داده می‌شود: نخست آنکه علاوه بر در نظر گرفتن عناصر قطری  $\mathbf{R}(k)$  که در [۳۴] پیشنهاد شد، از عناصر قطرهای مجاور قطر اصلی نیز برای محاسبه وزن‌ها استفاده می‌شود و در نتیجه اطلاعات بیشتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. دوم آنکه محاسبه ماتریس معکوس به صورت بازگشتی<sup>۱۵</sup> انجام می‌شود و در نتیجه حجم محاسباتی کاهش یافته و الگوریتم تسریع می‌شود. در ادامه این دو اصلاح شرح داده می‌شوند.

### ۳-۱- روش پیشنهادی بازگشتی برای تقریب معکوس

#### ماتریس $\mathbf{R}(k)$

در [۳۵] روشی وفقی برای ناهمبسته‌سازی سیگنال‌های ورودی به فیلتر وفقی برای یادگیری ضرایب فیلتر ارائه شده است. ناهمبسته‌سازی سیگنال‌ها با روابط زیر انجام می‌شود [۳۵]:

بنابراین تقریب معکوس ماتریس در تکرار  $n$  ام به صورت زیر است:

$$\mathbf{R}_n^{-1}(k) \approx \mathbf{W}_n^T(k) \mathbf{W}_n(k) \quad (24)$$

ذکر این نکته لازم است که هر چه طول گام  $\eta$  به صفر نزدیکتر باشد، با توجه به رابطه (17) تغییرات وزن‌ها (درایه‌های  $\mathbf{W}_{n+1}(k)$ ) برای به روزرسانی کمتر شده و بنابراین سرعت همگرایی درایه‌های  $\mathbf{W}_{n+1}(k)$  به مقادیر نهایی کمتر می‌شود. پس نیاز به تعداد تکرارهای بیشتری برای تقریب بهتر ماتریس معکوس خواهد بود.

در ادامه روش بازگشتی شرح داده شده به گونه‌ای اصلاح می‌شود که برای محاسبه ماتریس معکوس، تنها عناصر با نقش قابل توجه  $\mathbf{R}_n^{-1}(k)$  در نظر گرفته شوند و از عناصر نزدیک به صفر صرف نظر می‌شود.

### ۳-۲- الگوریتم سریع تقریب ماتریس معکوس

در اینجا الگوریتم پیشنهادی فوق به گونه‌ای توسعه می‌یابد تا الگوریتمی سریع و موثر حاصل شود. برای کاهش پیچیدگی محاسباتی، معکوس ماتریس به گونه‌ای تقریب زده می‌شود که تنها درایه‌هایی با نقش قابل توجه در محاسبه ماتریس معکوس در نظر گرفته شوند. یک ویژگی سیگنال‌های دریافتی توسط عناصر آرایه فازی این است که سیگنال دریافتی عنصر  $i$  ام همبستگی زیادی با سیگنال دریافتی عناصر  $i \pm 1$  ام دارد و هر چه فاصله عناصر به هم کمتر باشد، این همبستگی بیشتر است. بنابراین همبستگی ناشی از عناصر  $i \pm 2$  نیز کمتر از عناصر  $i \pm 1$  ام، ولی بیشتر از بقیه است. با توجه به این ویژگی، درایه‌های قطر اصلی و قطرهای مجاور اصلی ماتریس همبستگی اهمیت بیشتری نسبت به سایر درایه‌ها دارند. با استفاده از این ویژگی برای ساخت ماتریس معکوس، میزان مشارکت درایه‌ها در ساخت ماتریس معکوس متناسب با فاصله آنها از قطر اصلی در نظر گرفته می‌شود.

بنابراین و با توجه به اینکه از نظر امید ریاضی باید دامنه‌های بزرگ  $\mathbf{R}(k)$  در مجاورت قطر اصلی باشند، زیرا نمونه‌های مجاور در بردار  $\mathbf{h}(k)$  همبستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های دور از هم دارند، رابطه (17) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\tilde{\mathbf{W}}_{n+1}(k) = \tilde{\mathbf{W}}_n(k) + \eta [\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{R}}_n(k)] \quad (25)$$

که در آن

$$\tilde{\mathbf{R}}_n(k) = \tilde{\mathbf{W}}_n(k) \mathbf{R}'(k) \tilde{\mathbf{W}}_n^T(k) \quad (26)$$

در این رابطه  $\mathbf{R}'(k)$  تنها بخشی از  $\mathbf{R}(k)$  است که شامل قطر اصلی و  $M$  قطر فرعی می‌باشد. به عبارت دیگر درایه  $ij$  ام ماتریس  $\mathbf{R}'(k)$  به صورت (27) به دست می‌آید:

$$r_{ij}(k) = \begin{cases} E\{h_i(k)h_j(k)\} \approx h_i(k)h_j(k), & j = i \pm m, \\ 0, & j \neq i \pm m \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{n+1} = \mathbf{W}_n + \eta [\mathbf{I} - \hat{\mathbf{o}}(n) \hat{\mathbf{o}}^T(n)] \\ \hat{\mathbf{o}}(n) = \mathbf{W}_n \mathbf{o}(n) \end{cases} \quad (15)$$

$$(16)$$

در روابط (15) و (16)،  $n$  شماره تکرار بوده و  $\mathbf{o}(n)$  بردار سیگنال ورودی به فیلتر و  $\hat{\mathbf{o}}(n)$  بردار سیگنال ورودی ناهمبسته شده می‌باشد. همچنین  $\eta$  ثابت همگرایی و  $\mathbf{W}_n$  وزن‌های فیلتر ناهمبسته ساز در تکرار  $n$  ام می‌باشد. در [35] نشان داده شده است که با اعمال محدودیت کرانه برای  $\eta$  می‌توان همگرایی رابطه (15) را تضمین کرد. در واقع با استفاده از روش فوقی فوق‌الذکر، دنباله‌ای از ماتریس‌ها در یک رابطه بازگشتی به مقادیر نهایی میل می‌کنند.

روش پیشنهادی در این مقاله برای تقریب معکوس ماتریس، با توجه به روش ناهمبسته ساز فوق توسعه یافته است. روش فوقی توصیف شده با (15) و (16) به صورتی توسعه می‌یابد که برای محاسبه بازگشتی معکوس ماتریس مورد استفاده قرار گیرد. به این منظور رابطه (15) برای کاربرد در سیگنال‌های دریافتی آرایه فازی به صورت (17) بازنویسی می‌شود:

$$\mathbf{W}_{n+1}(k) = \mathbf{W}_n(k) + \eta [\mathbf{I} - \hat{\mathbf{R}}_n(k)] \quad (17)$$

که در آن  $\mathbf{W}_n(k)$  ماتریس  $N \times N$  در تکرار  $n$  ام است و

$$\hat{\mathbf{R}}_n(k) = \hat{\mathbf{g}}_n(k) \hat{\mathbf{g}}_n^T(k) \quad (18)$$

همچنین

$$\hat{\mathbf{g}}_n(k) = \mathbf{W}_n(k) \mathbf{h}(k) \quad (19)$$

که در آن  $\hat{\mathbf{g}}_n(k)$  بردار  $N \times 1$  بوده و پس از محاسبه با رابطه (19)، در رابطه بازگشتی (17) برای محاسبه ماتریس  $\mathbf{W}_{n+1}(k)$  استفاده می‌شود. همچنین  $\eta$  طول گام برای کنترل عملکرد همگرایی بوده و  $\mathbf{I}$  ماتریس همانی  $N \times N$  می‌باشد. بنابراین با جایگذاری (19) در (18) داریم:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_n(k) &= \mathbf{W}_n(k) \mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k) \mathbf{W}_n^T(k) \\ &= \mathbf{W}_n(k) \mathbf{R}(k) \mathbf{W}_n^T(k) \end{aligned} \quad (20)$$

به طور ایده‌آل در حالت دائم که همگرایی رابطه (17) کامل شده است، مطلوب است مقدار ماتریس  $\hat{\mathbf{R}}_n(k)$  به ماتریس همانی میل کند، یعنی:

$$\hat{\mathbf{R}}(k) = \mathbf{W}(k) \mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k) \mathbf{W}^T(k) = \mathbf{I} \quad (21)$$

که در آن  $\mathbf{W}(k)$  و  $\hat{\mathbf{R}}(k)$  به ترتیب مقادیر حالت دائم  $\mathbf{W}_n(k)$  و  $\hat{\mathbf{R}}_n(k)$  هستند. با ضرب سمت راست (21) در  $\mathbf{W}^{-1}(k)$  و سمت چپ آن در  $(\mathbf{W}^T(k))^{-1}$ ، داریم:

$$\mathbf{h}(k) \mathbf{h}^T(k) = \mathbf{W}^{-1}(k) (\mathbf{W}^T(k))^{-1} = (\mathbf{W}^T(k) \mathbf{W}(k))^{-1} \quad (22)$$

رابطه (22) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\mathbf{R}^{-1}(k) = \mathbf{W}^T(k) \mathbf{W}(k) \quad (23)$$



که در آن  $\mathbf{a}$  از رابطه (۹) به دست می آید. بنابراین مقدار نهایی خروجی از جمع وزن دار نمونه های دریافتی عناصر به صورت زیر حاصل می شود:

$$g(k) = \mathbf{w}_{\text{opt}}^T(k) \mathbf{h}(k) \quad (36)$$

میزان پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی تقریب ماتریس معکوس بر حسب تعداد عملیات ضرب، شامل عملیات موجود در روابط (۲۶) و (۲۹) برای هر یک از عملیات بازگشتی در جدول ۱ نشان داده شده است:

جدول (۱): میزان حجم محاسباتی تخمین معکوس ماتریس در روش پیشنهادی در هر تکرار

رابطه (۲۶)	$N_{28} = N(3M+2) - \frac{3}{2}M(M+1)$
رابطه (۲۹)	$N_{31} = N(M+1)\left(\frac{3}{2}M+1\right) - \frac{1}{3}M(M+1)(5M+1)$
حجم کل در تکرار $p$ ام	$N_{31} + pN_{28}$

لازم به ذکر است که در جدول ۱ تعداد ضرب های مقادیر ثابت در تعداد عملیات لحاظ نشده است. علت اینست که در پیاده سازی ممیز-ثابت، این مقادیر را به صورت توان منفی از دو می توان در نظر گرفت و بنابراین عمل ضرب برای ثابتها تبدیل به شیفتمی می شود [۳۶].

چنانچه از جدول ۱ مشاهده می شود حجم محاسباتی بر حسب تعداد ضرب، با فرض اینکه  $M$  تابعی از  $N$  باشد، از مرتبه  $O(N^2)$  است. محاسبه رابطه (۲۹) یکبار و فقط در آخرین تکرار صورت می پذیرد. اما محاسبه رابطه (۲۶) در هر تکرار انجام می شود. بنابراین بر اساس جدول ۱، تعداد کل محاسبات در تکرار  $p$  ام برابر  $N_{31} + pN_{28}$  می باشد.

جدول ۲ میزان پیچیدگی محاسباتی تقریب ماتریس معکوس را به ازای مقادیر مختلف  $M$  و  $p$  با هم مقایسه می کند. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۲ مشاهده می شود روش پیشنهادی تقریب ماتریس معکوس برای مقادیر کم  $p$  (در مقایسه با  $N$ )، پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به روش متعارف محاسبه معکوس ماتریس - با پیچیدگی از مرتبه  $O(N^3)$  - دارد.

جدول (۲): میزان حجم محاسباتی تخمین معکوس ماتریس در روش پیشنهادی

	$M=0$	$M=1$	$M=2$
$p=0$	$N$	$5N-4$	$12N-22$
$p=1$	$3N$	$10N-7$	$20N-31$
$p=2$	$5N$	$15N-10$	$28N-40$

شکل ۱ میزان محاسبات تقریب ماتریس معکوس را به ازای مقادیر مختلف  $M$  بر حسب تعداد تکرار  $p$  نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش  $p$  حجم محاسبات به طور خطی افزایش می یابد. به ازای

که در آن  $m=0,1,\dots,M$ . همچنین در محاسبه  $\tilde{\mathbf{R}}_n(k)$  تنها بخش شامل قطر اصلی و  $M$  قطر فرعی را در نظر می گیریم و سایر درایه ها را صفر در نظر می گیریم. در حالت دائم:

$$\tilde{\mathbf{R}}_n(k) = \mathbf{I} \quad (28)$$

بنابراین مشابه روابط (۲۱)-(۲۴) معکوس ماتریس در تکرار  $n$  ام به صورت زیر حاصل می شود:

$$\mathbf{R}_n^{-1}(k) \approx \tilde{\mathbf{W}}_n^T(k) \tilde{\mathbf{W}}_n(k) \quad (29)$$

در انتخاب مقدار  $M$  می توان مصالحه ای بین میزان پیچیدگی محاسباتی و میزان دقت مورد نظر در آشکارسازی عیوب قطعه آزمون در تصویر در نظر گرفت. حداقل مقدار  $M$  برابر صفر است. در این حالت می توان (۲۵) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{W}}_{n+1}(k) &= \tilde{\mathbf{W}}_n(k) + \eta [\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{W}}_n(k) \mathbf{R}'(k) \tilde{\mathbf{W}}_n^T(k)] \\ &= \tilde{\mathbf{W}}_n(k) + \eta [\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{W}}_n(k) \text{diag}\{\mathbf{R}(k)\} \tilde{\mathbf{W}}_n^T(k)] \\ &= \tilde{\mathbf{W}}_n(k) + \eta [\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{W}}_n(k) \sigma_h^2 \tilde{\mathbf{W}}_n^T(k)] \end{aligned} \quad (30)$$

که در آن  $\sigma_h^2$  واریانس تغییرات  $\mathbf{h}(k)$  است و عملگر  $\text{diag}\{0\}$  به معنای ماتریس قطری شامل عناصر قطر  $\mathbf{R}(k)$  می باشد. بنابراین پس از همگرایی داریم:

$$\mathbf{I} = \tilde{\mathbf{W}}(k) \sigma_h^2 \tilde{\mathbf{W}}^T(k) \quad (31)$$

در نتیجه

$$\tilde{\mathbf{W}}^T(k) \tilde{\mathbf{W}}(k) = \frac{1}{\sigma_h^2} \mathbf{I} \quad (32)$$

به عبارت دیگر، ماتریس معکوس تخمینی در این حالت همان معکوس عناصر قطر اصلی ماتریس همبستگی ورودی است. در نتیجه روش پیشنهادی، توسعه روش پیشنهاد شده در [۳۴] نیز است.

اگر ماتریس  $\mathbf{R}(k)$  قطری و  $M=0$  فرض شود و با مقدار اولیه وزن ها برابر  $\tilde{\mathbf{W}}_0(k) = \sigma_h^{-1} \mathbf{I}$ ، از (۳۰) خواهیم داشت:

$$\tilde{\mathbf{W}}_1(k) = \sigma_h^{-1} \mathbf{I} + \eta [\mathbf{I} - \sigma_h^{-2} \sigma_h^2 \mathbf{I}] = \sigma_h^{-1} \mathbf{I} \quad (33)$$

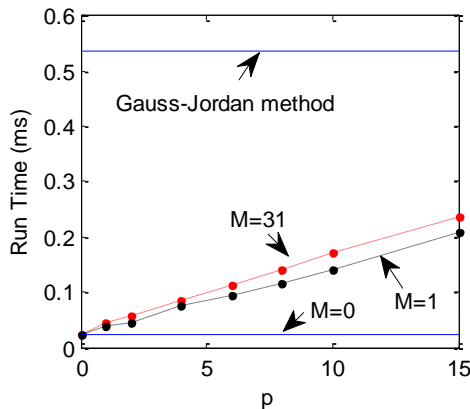
که به معنای دستیابی به مقدار مطلوب وزن ها در همان گام نخست الگوریتم است و نیز داریم:

$$\tilde{\mathbf{W}}_{n+1}(k) = \tilde{\mathbf{W}}_n(k) = \sigma_h^{-1} \mathbf{I} \quad (34)$$

برای رسیدن به دقت های بیشتر در آشکارسازی، لازم است فرض قطری بودن  $\mathbf{R}(k)$  حذف شده و در نتیجه مقدار  $M$  بزرگتری در نظر گرفته شود که منجر به افزایش تعداد تکرارها برای دستیابی به تقریب مناسب از ماتریس معکوس خواهد بود. با در نظر گرفتن  $p$  تکرار در رابطه (۲۵)، مقدار وزن ها برابر است با:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}}(k) \approx \frac{\mathbf{R}_p^{-1}(k) \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{R}_p^{-1}(k) \mathbf{a}} \quad (35)$$

اثرات ناخواسته با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ضمن اینکه برخی نتایج عملی نیز در بخش بعد در راستای تایید شبیه‌سازی‌های فوق‌الذکر، ارائه شده‌اند.



شکل (۲): نمودار زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی بر حسب تعداد تکرار به‌ازای  $M$  های مختلف و مقایسه با روش گوس-جردن بهبودیافته

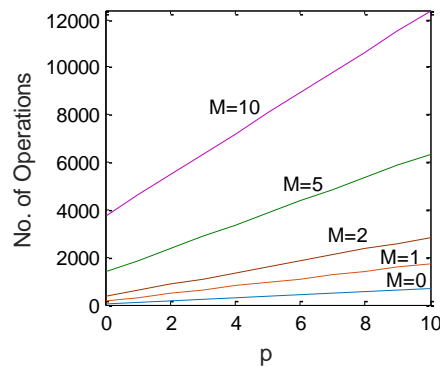
برای شبیه‌سازی و بررسی الگوریتم پیشنهادی و مقایسه با سایر الگوریتم‌ها از یک شبیه‌ساز گرافیکی GUI در محیط MATLAB استفاده شده است. شکل ۳ نمای این GUI را نشان می‌دهد. در این شبیه‌ساز قابلیت‌های مختلفی در نظر گرفته شده است، نظیر انتخاب وضعیت آزمایشی آرایه فازی و قطعه آزمون، نوع سیگنال ارسالی، افزودن نویز به‌عنوان اثرات غیرآیده‌آل و ناهمگن قطعه به سیگنال‌های دریافتی، امکان فیلتر کردن سیگنال‌ها برای کاهش اثرات نویز و همچنین امکان انتخاب روش روبش.

در بازرسی جوش و به‌جهت واسنجی (کالیبراسیون) دستگاه مورد استفاده برای تصویربرداری، از قطعه‌ای فلزی (فولادی یا آلومینیومی) و دارای حفره‌های جانبی<sup>۱۷</sup> یا حفره‌هایی در کف آن و یا شیارهایی بر سطح و کف آن مطابق با استاندارد ASME [۳۸] استفاده می‌شود. دستگاه باید حفره‌ها را به‌طور دقیق در محل آنها نمایش دهد. در این مقاله و به‌جهت شبیه‌سازی، قطعه‌ای فولادی همراه با بازتابنده‌هایی در داخل آن فرض می‌شود. علت انتخاب چنین مواردی در عمل و در شبیه‌سازی از آن جهت است که به‌طور کلی نقایص جوش معیوب باعث می‌شود موج فراصوتی در برخورد با آنها بازتاب‌هایی داشته باشد که در تصویر فراصوتی آن مشخص می‌شوند و به‌عنوان عیب جوش تفسیر می‌شوند.

برای رسم تصویر، مقادیر به‌دست آمده از هر آزمایش را به‌فرم رابطه (۳۷) نرمالیزه می‌کنیم:

$$\hat{I}(x_{ref}, z_{ref}) = \frac{I(x_{ref}, z_{ref})}{\max\{I(x, z)\}}, \quad \forall (x, z) \in (X_{ref}, Z_{ref}) \quad (37)$$

مقادیر کوچک  $M$  افزایش حجم محاسبات با افزایش  $p$ ، روند کندتری در مقایسه با مقادیر بزرگتر  $M$  دارد. بنابراین پارامتر  $M$  نقش قابل توجهی در میزان پیچیدگی محاسباتی دارد.



شکل (۱): حجم محاسبات تقریب ماتریس معکوس بر حسب تعداد تکرار به‌ازای  $M$  های مختلف

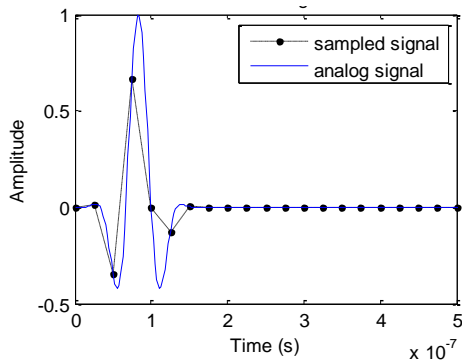
در شکل ۲ زمان مورد نیاز برای اجرای الگوریتم پیشنهادی تخمین معکوس ماتریس به‌ازای مقادیر مختلف  $M$  بر حسب تعداد تکرار  $p$  با الگوریتم حذفی گوس-جردن<sup>۱۶</sup> بهبودیافته [۳۷] مقایسه شده است. برای اجرای الگوریتم‌ها از نرم‌افزار MATLAB 2015b با رایانه‌ای دارای پردازنده اینتل ۶۴ بیت با کلاک 2.5GHz نوع Core (TM)i7 دارای حافظه RAM 8GB استفاده شده است.

با توجه به شکل ۲، زمان مورد نیاز برای روش پیشنهادی با افزایش  $p$  به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که زمان لازم برای یک تکرار به‌ازای  $M$  های مختلف حدود ۰.۰۲ ms بوده، در حالیکه برای ۱۵ تکرار به ۰.۲۱ ms برای  $M = 1$  و ۰.۲۴ ms برای  $M = 31$  می‌رسد. این مقادیر در مقایسه با زمان لازم برای اجرای الگوریتم گوس-جردن که حدود ۰.۵۴ ms است، به‌طور قابل توجهی کمتر می‌باشد.

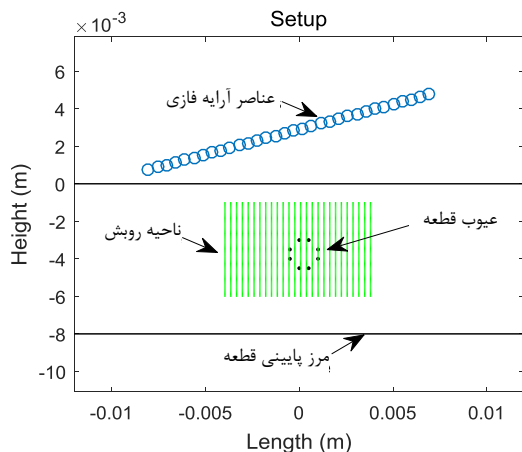
بنابراین روش پیشنهادی تمرکز کامل وزن‌دار بهبودیافته نسبت به روش MV-TFM، علاوه بر دقت بهتر در تشخیص عیوب قطعه، پیچیدگی محاسباتی کمتری می‌تواند داشته باشد. در صورت استفاده از سخت‌افزار سریع می‌توان این الگوریتم را برای مقاصد آزمون‌های برخط پیاده‌سازی کرد.

#### ۴- شبیه‌سازی و مقایسه

شبیه‌سازی شرایط ایده‌آلی را فراهم می‌کند تا کلیه مشخصات عملکردی از قبیل الگوی تشعشع عناصر آرایه فازی، مشخصات فیزیکی قطعه و رفتار بازتابنده‌های موجود در قطعه مورد بررسی قرار گیرند. در مدل‌سازی ارائه شده در این مقاله، مشابه [۵] و [۱۰]، از اثرات تزویج، ناهمگنی، تلفات انرژی موج و همچنین ایجاد امواج ثانویه (نظیر امواج سطحی و عرضی و پراش موج) صرف‌نظر شده است. بنابراین در این شبیه‌سازی، روشهای تصویربرداری از لحاظ میزان نویز زمینه و قدرت تشخیص و تفکیک بازتابنده‌ها به‌شکل ایده‌آل و بدون تاثیر عوامل و



شکل (۴): شکل موج یک بازتاب به صورت سیگنال سینوسی مدوله شده آنالوگ و سیگنال نمونه برداری شده.

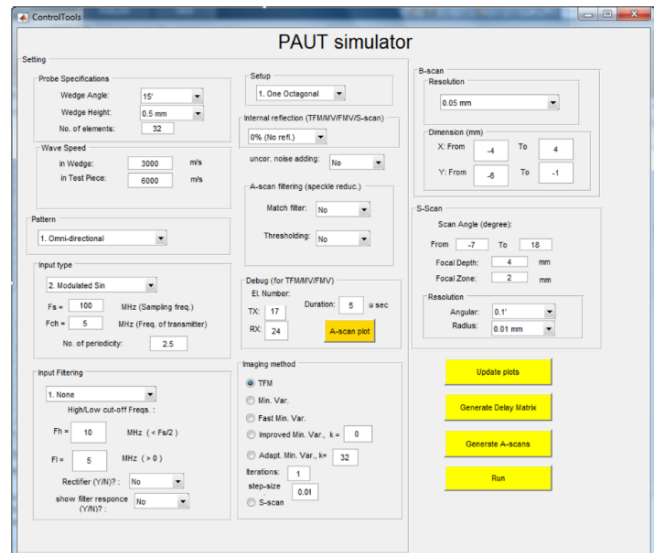


شکل (۵): وضعیت آزمایشی مورد استفاده در شبیه سازی.

برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف، نواحی بازتابنده در قطعه به صورت حفره‌هایی با حداقل فاصله  $0.5\text{ mm}$  در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵) که اندکی بیشتر از طول موج است و بنابراین اجازه تفکیک آنها را در تصویر می‌دهد. زاویه کفشک برابر با  $15^\circ$  درجه و دواپر موجود در سطح فوقانی شکل مزبور نشانگر محل عناصر آرایه فازی روی کفشک بوده و نقاطی که گوشه‌های هشت ضلعی هستند، نشانگر حفره‌های موجود در قطعه هستند. همچنین خطوط افقی موجود در شکل ۵، مرز بالایی و پایینی قطعه را نشان می‌دهد و بخش هاشورخورده در داخل قطعه، ناحیه روبش شونده را نشان می‌دهد. ابعاد نشان داده شده در این شکل بر حسب متر است.

برای شبیه سازی شرایط واقعی، به سیگنال‌های دریافتی، نویز سفید گوسی ایستان با واریانس  $10\%$  واریانس موج بازگشتی افزوده می‌شود. شکل ۶ سیگنال دریافت شده از عنصر شماره ۱۰ را پس از ارسال پالس از عنصر شماره ۳ نشان می‌دهد. شکل (الف) بدون اعمال نویز و شکل (ب) پس از اعمال نویز می‌باشد. این نویز افزوده شده، مدلی از نویز تجهیزات ارسال و دریافت سیگنال و همچنین بازتابهای ناشی از پراکنده سازهای موجود در قطعه می‌باشد.

که در آن  $(X_{\text{ref}}, Z_{\text{ref}})$  مجموعه مختصات نقاط روبش می‌باشد. بنابراین هر چه مقدار  $\hat{I}(X_{\text{ref}}, Z_{\text{ref}})$  به واحد نزدیکتر باشد، به معنای شدت روشنایی بیشتر پیکسل متناظر و هر چه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، به معنای شدت روشنایی کمتر پیکسل خواهد بود.



شکل (۳): واسطه گرافیکی مورد استفاده برای آزمون روش‌های مختلف روبش.

در شبیه سازی‌ها فرض می‌شود قطعه مورد بررسی از جنس فولاد با ارتفاع ۸ میلی‌متر است. آرایه فازی مورد استفاده دارای ۳۲ عنصر چندسویه<sup>۱۸</sup> با طول ۱۶ میلی‌متر می‌باشد. سیگنال دریافت شده از قطعه، یک سیگنال سینوسی مدوله شده دارای ۲.۵ سیکل با فرکانس مرکزی ۱۵ MHz می‌باشد که با نرخ ۴۰ MHz نمونه برداری می‌شود. شکل ۴ شکل موج آنالوگ برگشتی از یک نقطه بازتابنده را بدون در نظر گرفتن تاخیر و تضعیف به همراه سیگنال نمونه برداری شده نشان می‌دهد.

سرعت صوت در فولاد برابر  $6000\text{ m/s}$  با فرض انتشار موج طولی در نظر گرفته شده است و وضعیت آزمایشی به صورت نشان داده شده در شکل ۵ است. حد فاصل بین آرایه فازی و کفشک پروب از جنس رگسولایت<sup>۱۹</sup> و سرعت صوت در آن برابر با  $2300\text{ m/s}$  فرض شده است. بنابراین با توجه به سرعت موج و فرکانس مرکزی سیگنال اعمالی، طول موج سیگنال در قطعه فولادی برابر  $\lambda = v/f = 0.4\text{ mm}$  می‌شود. بنابراین حداکثر قدرت تفکیک بین دو نقطه بازتاب کننده برابر با  $0.4\text{ mm}$  خواهد شد.

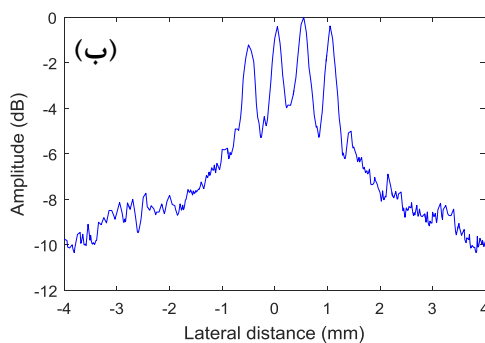
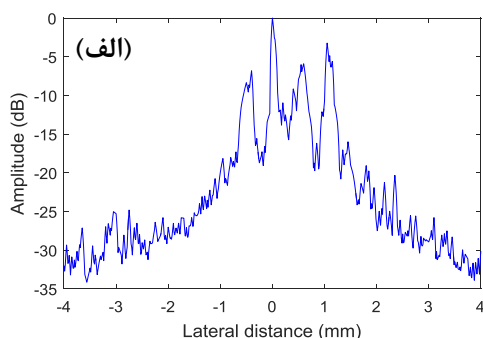


تعبیر شود. با توجه به شکل مشاهده می‌شود در تصویر حاصل از روش MV-TFM مشکلات فوق‌الذکر روش TFM به خوبی مرتفع شده است، اما میزان وضوح تصویر در نقاطی که حفره وجود دارد، برای برخی حفره‌ها پایین است و ممکن است یک یا چند حفره نادیده گرفته شوند.

به منظور بررسی کمی، تابعی از شدت روشنایی تعریف می‌کنیم که عبارت است از حداکثر مقدار شدت روشنایی در بازه عمق تصویر که برای هر طول  $x_{ref}$  به طور مستقل طبق رابطه (۳۸) به دست آمده است:

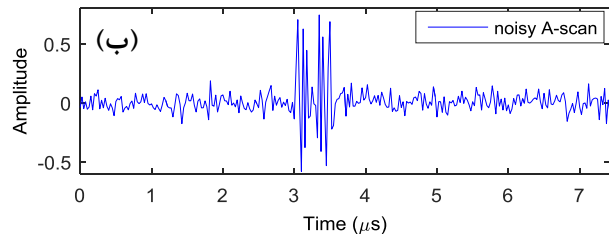
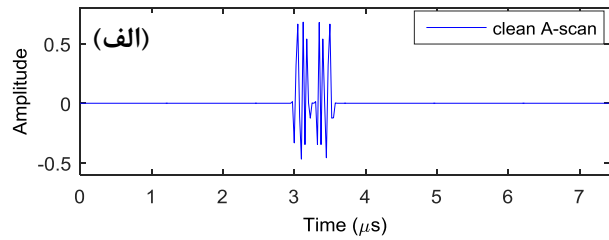
$$F(x_{ref}) = \max \{ \hat{I}(x_{ref}, z), \forall z \in \mathcal{Z} \} \quad (38)$$

که در آن  $\mathcal{Z}$  شامل مجموعه عمق‌های ناحیه روبش می‌باشد. شکل ۸ مقدار تابع شدت روشنایی بر حسب دسی‌بل را نشان می‌دهد.



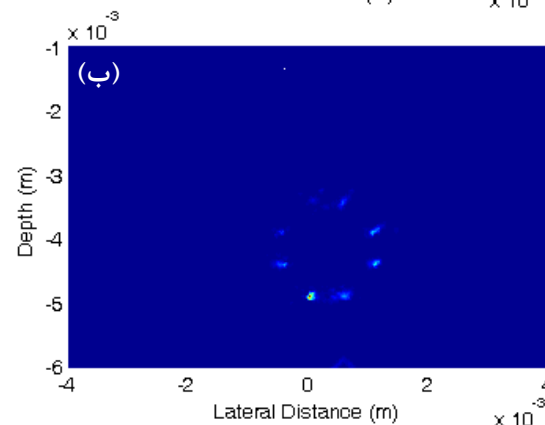
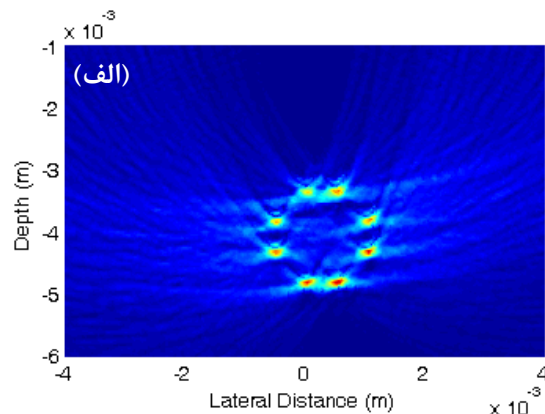
شکل (۸): تابع شدت روشنایی  $F(x_{ref})$  بر حسب دسی‌بل در روش TFM (شکل الف)) و روش MV-TFM (شکل ب))

همان‌طور که انتظار می‌رود، در محل حفره‌ها (با مختصات  $(x_{ref})$  پیک‌های بزرگی تشکیل می‌شود و در سایر نواحی که بازتاب از قطعه مورد آزمون صورت نمی‌گیرد سطحی با دامنه‌های کم تشکیل شده است که متناظر با دامنه‌های نویز تصویر می‌باشد. ملاحظه می‌شود که دامنه پیک‌ها در روش TFM به صفر دسی‌بل نزدیک می‌باشد و بنابراین تمام پیک‌ها قابل آشکارسازی هستند، اما قدرت تفکیک پیک‌ها کم بوده و سطح روشنایی مناطق بدون بازتاب، به خصوص در مجاورت حفره‌ها (پیک‌های تصویر) زیاد بوده و می‌تواند سبب آشکارسازی اشتباه شود. از طرف دیگر بررسی نمودار روش MV-TFM نشان می‌دهد سطح بازتاب در نواحی غیربازتابنده در این روش



شکل (۶): شکل (الف): سیگنال دریافتی عنصر دهم که از عنصر سوم ارسال شده است. شکل (ب): همان سیگنال، آغشته به نویز ایستگاه گوسی سفید

شکل ۷ تصاویر به دست آمده از اعمال روش‌های TFM و MV-TFM را نشان می‌دهد. قدرت تفکیک مورد استفاده در تشکیل تصویر برابر با ۰,۰۵ mm می‌باشد. چنانکه مشاهده می‌شود، تصویر حاصل از روش TFM محل تمامی حفره‌ها را نشان می‌دهد، اما قدرت تفکیک پایینی داشته و علاوه بر آن در نواحی که حفره وجود ندارد، تصویر دارای نویز واضحی است که می‌تواند باعث شود حفره یا عیوب اضافی



شکل (۷): (الف): تصویر به دست آمده از روش TFM، (ب): تصویر به دست آمده از روش MV-TFM.

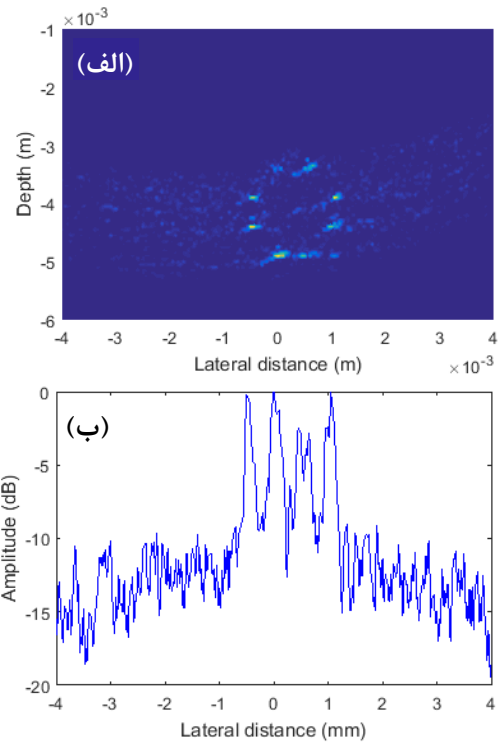
کم بوده و میزان تضعیف نواحی غیربازتابنده تا حدود ۳۵ dB است که بسیار پایینتر از روش TFM می‌باشد. در نتیجه نویز زمینه را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و سبب کاهش قابل توجه خطا در بررسیهای بصری می‌شود. همچنین دامنه پیکها یکنواخت نبوده و برخی پیکها طبق شکل ۸- (ب) تا ۹ dB- تضعیف شده‌اند که دقت تشخیص حفره‌ها را کاهش می‌دهد.

شکل‌های ۹ تا ۱۱ عملکرد روش پیشنهادی را به‌ازای سه مقدار  $M = 0, 10, 31$  نشان می‌دهند. مطابق رابطه (۳۳)، با در نظر گرفتن  $M = 0$  تنها با یک تکرار، یعنی  $n = p = 1$ ، می‌توان به ماتریس معکوس دست یافت و با افزایش مقدار  $M$  و تعداد تکرار بیشتر تقریب بهتری از ماتریس معکوس حاصل می‌شود. برای کاهش حجم محاسبات، تعداد تکرار  $p$  برای  $M > 0$  برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود که برای مقادیر کم  $M$  تقریب مناسبی از معکوس ماتریس خواهد داد. در شبیه‌سازی‌ها مقدار  $\eta = 0.01$  در نظر گرفته شده است. در تصویر شکل ۹- (الف) که  $M = 0$  است، پیکها متمایز هستند، اما نویز تصویر در اطراف پیکها نسبتاً زیاد بوده و روی آشکارسازی دقیق محل حفره‌ها تأثیر نامطلوبی گذاشته است. همانطور که از شکل ۹- (ب) مشاهده می‌شود نویز زمینه به‌خوبی کاهش یافته است و در مقایسه با روش MV-TFM پیکها تضعیف کمتری دارند و بهتر قابل شناسایی هستند. در تصویر شکل ۱۰- (الف) با  $M = 10$  به نتیجه بهتری رسیده‌ایم، زیرا نویز زمینه تا حد بسیار خوبی کاهش یافته است و از طرفی پیکها همگی قابل تشخیص می‌باشند. مطابق شکل ۱۰- (ب) میزان تضعیف پیک فقط ۱ دسی‌بل است و بنابراین آشکارسازی حفره‌ها بسیار بهتر از روش‌های قبل صورت می‌گیرد. در تصویر شکل ۱۱ با  $M = 31$  مشاهده می‌شود که با وجود آنکه پیکها به‌خوبی محل حفره‌ها را نشان می‌دهند، اما نویز زمینه بسیار زیاد می‌باشد. علت این امر افزایش تعداد تکرارها برای تقریب ماتریس معکوس با افزایش مقدار  $M$  است و مقدار در نظر گرفته شده  $p = 2$  نیز در این حالت تقریب خوبی نمی‌دهد.

بنابراین در انتخاب مقدار  $M$  باید مصالحه‌ای بین تشخیص بهتر حفره‌ها و حذف نویز زمینه صورت گیرد. با انتخاب مناسب مقدار  $M$  در شکل ۱۰ می‌توان دید که روش پیشنهادی مشکل هر دو روش TFM و MV-TFM را مرتفع کرده است.

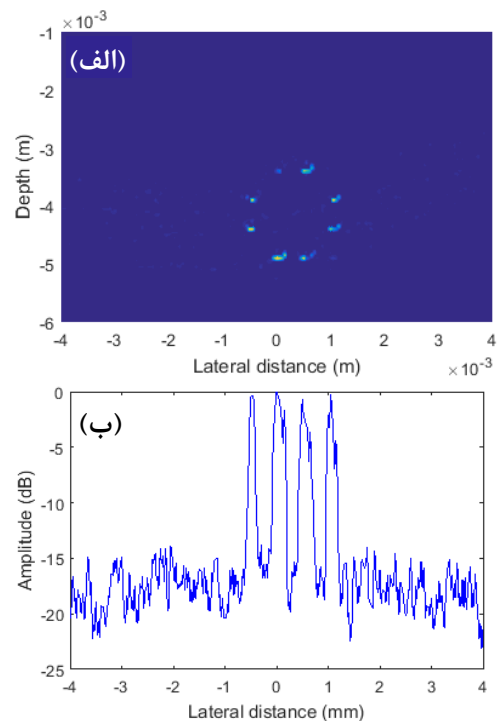
به‌منظور کمی‌سازی نتایج به‌دست آمده در میزان حذف نویز زمینه، از معیار میانگین شدت روشنایی نرمالیزه شده نقاط غیربازتابنده در ناحیه روبش شده، طبق رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\rho = \frac{1}{L} \sum_{x_{ref}} \sum_{z_{ref}} \hat{I}(x_{ref}, z_{ref}), \quad \forall (x_{ref}, z_{ref}) \notin (X, Z) \quad (39)$$



شکل (۹): تصویر حاصل از روش پیشنهادی به‌ازای

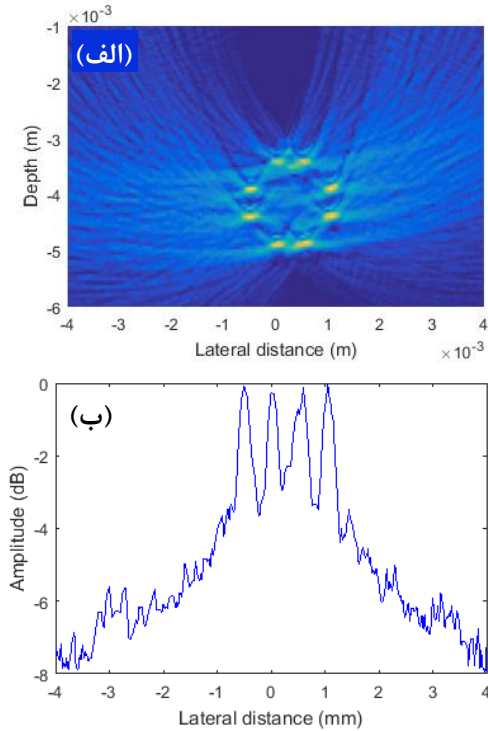
$M = 0$  (شکل (الف)) و تابع شدت روشنایی  $F(x_{ref})$  آن (شکل (ب)).



شکل (۱۰): تصویر حاصل از روش پیشنهادی به‌ازای  $M = 10$

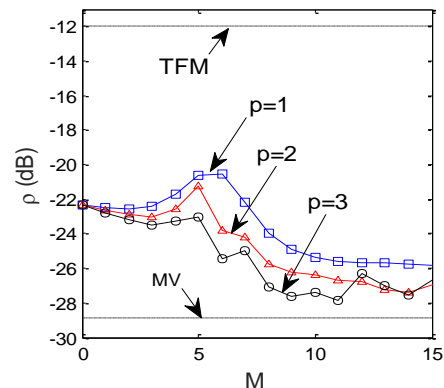
(شکل (الف)) و تابع شدت روشنایی  $F(x_{ref})$  آن (شکل (ب)).

که در آن  $(X, Z)$  مجموعه مختصات حفره‌ها بوده و  $L$  تعداد کل نقاط روبش، منهای تعداد اعضای  $(X, Z)$  می‌باشد. واضح است که



شکل (۱۱): تصویر حاصل از روش پیشنهادی به‌ازای  $M = 31$  (شکل الف)) و تابع شدت روشنایی  $F(x_{ref})$  آن (شکل ب)).

$0 \leq \rho \leq 1$  بوده و هر چه مقدار  $\rho$  به صفر نزدیکتر باشد، به معنای نویز زمینه کمتری به‌طور میانگین می‌باشد. بنابراین  $\rho$  کمیته برای سنجش میزان تضعیف کلی نویز زمینه می‌باشد. به‌منظور ارزیابی بهتر تغییرات  $\rho$ ، در بررسی‌ها این معیار به‌صورت دسی‌بل بیان می‌شود. شکل ۱۲ مقایسه‌ای میان روش‌های TFM و MV-TFM و روش پیشنهادی را بر حسب این معیار ارائه می‌دهد. برای روش پیشنهادی مقدار  $M$  از ۱ تا ۱۵ در نظر گرفته شده است و برای سه مقدار  $p = 1, 2, 3$  تغییرات این معیار نشان داده شده است.



شکل (۱۲): مقایسه مقدار میانگین تضعیف نویز در ناحیه روبش شده برای روش‌های TFM و MV-TFM با روش پیشنهادی بر حسب مقدار  $M$  به‌ازای سه مقدار  $p$ .

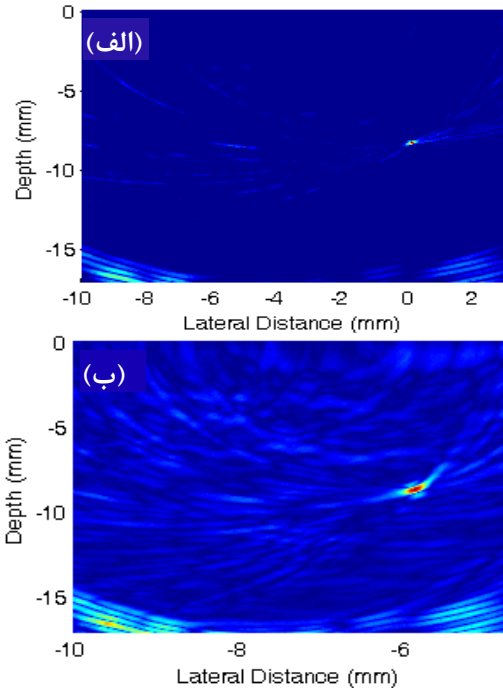
در نقطه  $M = 0$  ملاحظه می‌شود که مقدار  $\rho$  برای تمام مقادیر  $p$  یکسان و برابر با  $22.4$  dB است. علت این امر ثابت بودن مقدار  $\tilde{W}_{n+1}(k) = \tilde{W}_n(k) = \sigma_h^{-1} \mathbf{I}$  و در نتیجه ثابت بودن مقدار  $\mathbf{R}_n^{-1}(k) = 1/\sigma_h^2$  می‌باشد. حالت خاص  $M = 0$  معادل با الگوریتم MV ساده شده [۳۴] است. با افزایش مقدار  $M$  مقدار  $\rho$  تغییر می‌کند، به‌طوری‌که به‌ازای  $10 \leq M \leq 15$  تضعیف نویز میزان حداکثر خود را دارد. با افزایش بیشتر مقدار  $M$  مقدار  $\rho$  کمتر می‌شود و برای  $M = 31$  به حداکثر خود خواهد رسید که علت آن تعداد کم تکرارها می‌باشد که سبب تقریب نادقیق‌تر ماتریس معکوس به‌ازای  $M$  های بزرگتر است. عدم حذف مناسب نویز زمینه در حالت  $M = 31$  در تصویر شکل ۱۱ موید این موضوع می‌باشد. از طرف دیگر از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار  $p$  مقدار تضعیف به‌طور کلی بیشتر می‌شود و در نتیجه نویز زمینه کاهش بیشتری خواهد داشت. دلیل این امر تقریب بهتر  $\hat{\mathbf{R}}_p^{-1}(k)$  به‌ازای  $p$  های بزرگتر است. از طرفی افزایش بیشتر مقدار  $p$  نیز می‌تواند در مواردی تاثیر منفی در تقریب داشته باشد که به‌دلیل گرادیان نویزی در تخمین مقدار ماتریس معکوس است. علاوه بر آن مقدار پیچیدگی محاسباتی نیز افزایش خواهد یافت.

در مقایسه با روش TFM می‌توان مشاهده کرد که میزان تضعیف نویز زمینه برحسب مقدار  $\rho$  در بخش روبش شده برابر  $12$  dB است؛ در حالیکه در روش پیشنهادی با  $M = 0$  به  $22$  dB می‌رسد که به‌مفهوم  $10$  dB تضعیف بهتر نویز زمینه است. مقدار  $\rho$  در روش پیشنهادی با  $M = 10$  به حدود  $28$  dB می‌رسد که به‌میزان تضعیف روش MV-TFM با مقدار  $29$  dB بسیار نزدیک بوده، اما چنانچه اشاره شد، قدرت تشخیص حفره‌ها در روش پیشنهادی بسیار بهتر می‌باشد.

## ۵- بررسی نتایج عملی

به‌منظور بررسی عملی نتایج، دو آزمایش انجام می‌دهیم. در آزمایش اول از یک پروب آرایه فازی مدل Olympus دارای  $64$  عنصر خطی در فرکانس  $5$  MHz استفاده می‌کنیم. فاصله بین عناصر  $0.6$  mm است. قطعه آزمون یک قطعه مکعب مستطیلی از جنس آلومینیوم با ابعاد  $150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  است و یک حفره در عمق  $8$  mm در یک طرف آن طبق شکل ۱۳ تعبیه شده است. سیگنال پالس ارسالی توسط یک سیگنال ژنراتور تولید شده و خروجی پروب توسط اسکوپ دیجیتال (با فرکانس  $150$  MHz) مطابق شکل ۱۳ دریافت و ذخیره می‌شود. در آزمایش‌ها  $5$  عنصر پروب را در نظر گرفته‌ایم و محل پروب در سراسر آزمایش ثابت است. بنابراین کلا  $4 \times 5 = 20$  سیگنال دریافتی خواهیم داشت، زیرا در سخت‌افزار مورد استفاده هر عنصر نمی‌تواند هم‌زمان ارسال کننده و دریافت کننده باشد.

TFM برابر با ۸ dB- بوده، اما در روش پیشنهادی برابر با ۱۷ dB- می‌باشد که به معنی ۹ dB تضعیف بیشتر در نویز زمینه می‌باشد. لازم به ذکر است که در این آزمایش چون فقط یک حفره وجود دارد نمی‌توان تضعیف پیک را محاسبه کرد، زیرا پیک منفرد موجود در تصاویر، نرمالیزه می‌شود. بنابراین در آزمایش دوم که در ادامه شرح داده می‌شود، دو حفره در قطعه مورد آزمون در نظر می‌گیریم.

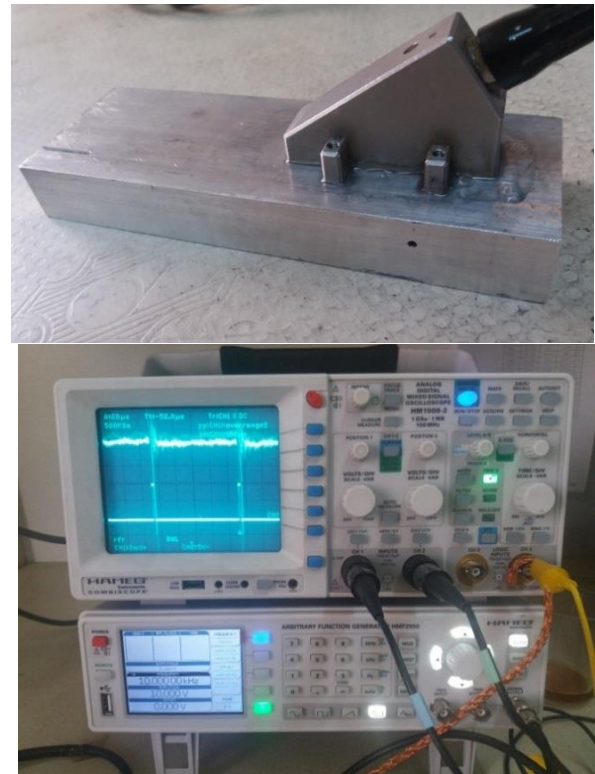


شکل (۱۵): مقایسه روش پیشنهادی (شکل (الف)) با روش TFM (شکل (ب)) در آزمون عملی با قطعه آلومینیومی مسطح

در آزمایش دوم از یک پروب آرایه فازی مدل Olympus دارای ۱۶ عنصر خطی در فرکانس ۷,۵ MHz که روی کفشکی از جنس رگسولایت با زاویه ۳۸,۵ درجه قرار گرفته است، استفاده می‌کنیم. فاصله بین عناصر ۰,۵ mm است. قطعه آزمون یک قطعه استوانه توخالی از جنس فولاد با قطر داخلی ۳۲ mm و قطر خارجی ۶۰ mm است و دو حفره سراسری عمود بر محور استوانه در عمق ۷ mm و ۱۰ mm با قطر به ترتیب ۱ mm و ۰,۶ mm تعبیه شده است. شکل ۱۶ سخت‌افزار لازم برای ارسال و دریافت سیگنالها و شکل ۱۷ وضعیت آزمایشی را نشان می‌دهد.

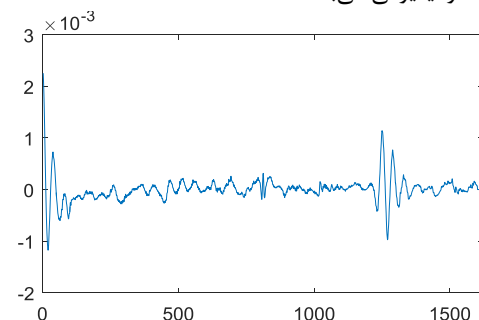


شکل (۱۶): برد سخت افزار طراحی شده برای آزمون فراصوتی



شکل (۱۳): وضعیت آزمایشی و تجهیزات مورد استفاده برای آزمون عملی

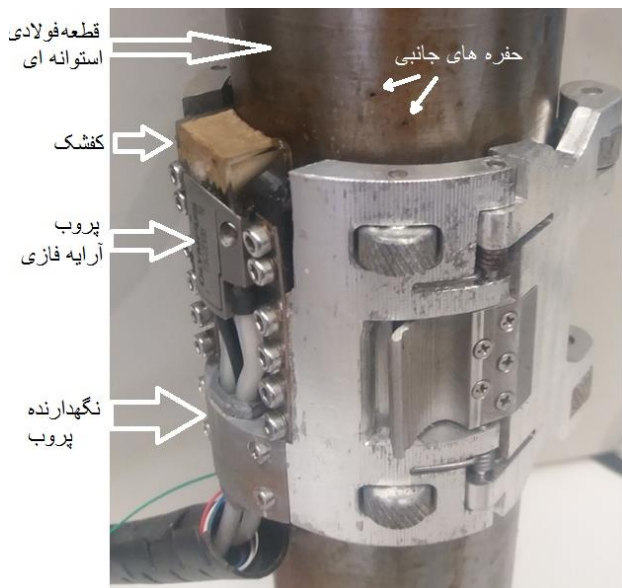
فاصله افقی عناصر فعال تا حفره بر حسب میلی‌متر به ترتیب برابر ۰, ۵, ۴, ۹, ۶- می‌باشد. شکل ۱۴ سیگنال دریافتی مربوط به عنصر چهارم را که توسط عنصر دوم تحریک شده است، نشان می‌دهد. در این شکل، علاوه بر پیکهای سیگنال که ناشی از بازتاب از حفره و دیواره‌ها است، نوسانات کم دامنه و نامنظمی در سیگنال دیده می‌شود که ناشی از نویز مولد سیگنال ارسالی و نویز اسپلوسکوپ و سیمها و اتصالات رابط و همچنین نویز بازتاب‌شده ناشی از ساختار خود قطعه آلومینیومی می‌باشد.



شکل (۱۴): سیگنال به دست آمده از عنصر ۴ که توسط عنصر ۲ تحریک شده است

شکل ۱۵ تصاویر فراصوتی حاصل از روش TFM و روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. برای روش پیشنهادی  $M = 3, p = 2$  در نظر گرفته شده است. ملاحظه می‌شود که روش TFM نویز زمینه زیادی دارد، اما روش پیشنهادی به خوبی نویز زمینه را حذف کرده است. بررسی کمی این آزمایش نشان می‌دهد مقدار  $\rho$  در روش





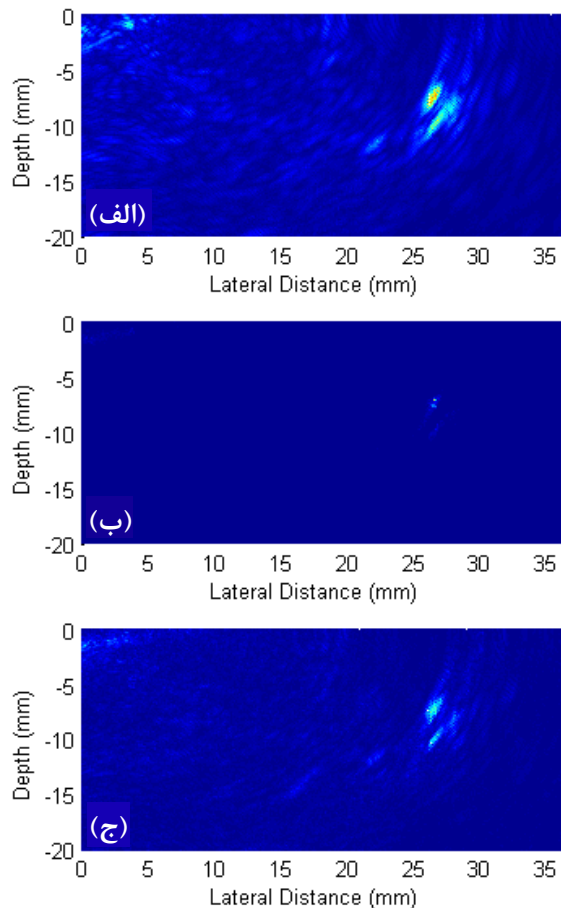
شکل (۱۷): وضعیت آزمایشی مورد استفاده برای آزمون قطعه فولادی استوانه ای

شکل ۱۸ تصاویر به دست آمده از روشهای TFM، MV-TFM و روش پیشنهادی با  $M=3, p=2$  را نشان می دهد. مشاهده می شود که در روش TFM (شکل ۱۸-الف)) کشیدگی تصویر حفره ها باعث کاهش قدرت تفکیک تصویر شده است و همچنین نویز زمینه قابل توجهی در تصویر دیده می شود. روش MV-TFM (شکل ۱۸-ب)) نویز زمینه و تفکیک تصویر را به طور قابل توجهی بهبود داده است؛ اما حفره ها در این حالت محو هستند و حفره موجود در عمق بیشتر که قطر کمتری دارد، به سختی قابل شناسایی می باشد. شکل ۱۸-ج)) تصویر حاصل از روش پیشنهادی را نشان می دهد. مشاهده می شود که در این شکل حفره ها به خوبی متمایز هستند و قدرت تفکیک بالاتر و میزان نویز زمینه کمتری نسبت به روش TFM حاصل شده است. از طرفی در مقایسه با روش MV-TFM قدرت تشخیص حفره ها به طور قابل توجهی بهتر است. بنابراین روش پیشنهادی قابلیت تشخیص حفره ها و نقایص ریز جوش را با دقت بهتری دارا می باشد.

به منظور مقایسه کمی نتایج عملی، در این آزمایش، میزان تضعیف تابع شدت روشنایی  $F(x_{ref})$  را در مورد حفره ریزتر بررسی می کنیم. نتایج نشان می دهد میزان تضعیف تابع در روشهای TFM، MV-TFM و روش پیشنهادی به ترتیب برابر با  $-4\text{dB}$ ،  $-20.4\text{dB}$  و  $-2.3\text{dB}$  می باشد. بنابراین شدت روشنایی حفره ریز در روش پیشنهادی به اندازه  $18.1\text{dB}$  بیشتر از روش MV-TFM و به اندازه  $1.7\text{dB}$  بیشتر از روش TFM است. در نتیجه قدرت تفکیک تصویر در روش پیشنهادی بهتر از دو روش دیگر است. به لحاظ میزان نویز زمینه، مقدار  $\rho$  در روشهای TFM، MV-TFM و پیشنهادی به ترتیب برابر  $-13\text{dB}$ ،  $-29\text{dB}$  و  $-16\text{dB}$  می باشد. بنابراین نویز زمینه در روش پیشنهادی کمتر از روش TFM است. در این حالت اگر چه نویز زمینه در روش MV-TFM کمترین حد را دارد، اما پیکهای تصویر نیز به شدت تضعیف شده هستند که روش پیشنهادی این مشکل را ندارد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله روش های نوین تمرکز کامل پرتو (TFM) و تمرکز کامل وزن دار مبتنی بر نظریه حداقل واریانس (MV-TFM) در تصویربرداری فراصوتی برای آزمون غیرمخرب مورد بررسی قرار گرفت و روش جدیدی پیشنهاد گردید که عملکرد بهتری در حذف نویز زمینه در مقایسه با روش TFM داشته و با روش MV-TFM قابل مقایسه است؛ اما قدرت تشخیص عیوب قطعه آزمون در آن نسبت به روش MV-TFM بهتر است. همچنین پیچیدگی محاسباتی آن نسبت به روش مذکور کمتر می باشد.



شکل (۱۸): مقایسه روشهای TFM (شکل الف)) و MV-TFM (شکل ب)) با روش پیشنهادی (شکل ج)) در آزمون عملی با قطعه فولادی استوانه ای

- [17] Gongzhang, R., Li, M., Lardner, T. Gachagan, A., "Robust Defect Detection in Ultrasonic Nondestructive Evaluation (NDE) of Difficult Materials," IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 467-470, 2012.
- [18] Yoon, S., Oruklu, E., Saniie, J., "Performance Evaluation of Neural Network Based Ultrasonic Flaw Detection," IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 1579-1582, 2007.
- [19] Oruklu, E., Aslan, S., Saniie, J., "Applications of Time-Frequency Distributions for Ultrasonic Flaw Detection," IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 2000-2003, 2009.
- [20] Li, M., Hayward, G., He, B., "Adaptive Array Processing for Ultrasonic Non-Destructive Evaluation," IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 2029-2032, 2011.
- [21] Ziksari, M. S., Mohammadzadeh-Asl, B., "Combined phase screen aberration correction and minimum variance beamforming in medical ultrasound," Ultrasonics, Vol. 75, 2017.
- [22] Chahbaz, A., Sicard, R., "Comparative evaluation between ultrasonic phased array and synthetic aperture focusing techniques," AIP Conference Proceedings, Vol. 657, No. 1, pp. 769-776, 2003.
- [23] R/D Tech, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, 2004.
- [24] Lin, Y., Volker, H., "Self-Monitoring Ultrasonic Gas Flow Meter Based on Vortex and Correlation Method", IEEE Trans. On Instrumentation and measurement, Vol. 56, No. 6, 2007.
- [25] 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, 2011.
- [26] Robert, S., Casula, O., Njiki, M., Roy O., "Assessment of Real-Time Techniques for Ultrasonic Non-Destructive Testing"; AIP Conf. Proc. 1430, pp. 1960-1967, 2012.
- [27] Jeune L. L., Robert, S., Villaverde, E. L., Prada, C., "Plane Wave Imaging for Ultrasonic Non-Destructive Testing: Generalization to Multimodal Imaging", Ultrasonics, Vol. 64, 2016.
- [28] 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, 2012.
- [29] Ditchburn, R. J., Ibrahim, M. E., Ultrasonic Phased Arrays for the Inspection of Thick-Section Welds, Published by Maritime Platforms Division, Defence Science and Technology Organisation, Sep. 2009.
- [30] Stepinski, T., Synthetic Aperture Focusing Technique in Ultrasonic Inspection of Coarse Grained Materials, SKI Report, Dec. 2007.
- [31] Engle, B., Quantitative flaw characterization with ultrasonic phased arrays, Graduate Theses and Dissertations, IOWA state Uni. 2013.
- [32] Stepinski, T., Lingvall, F., "Synthetic aperture focusing techniques for ultrasonic imaging of solid objects", 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, pp. 438-441, June 2010.
- [33] Arora, J. S., Introduction to Optimum Design, New York: McGraw-Hill, Inc., 1989.
- [34] Bekrani, M., Vaghef, V. H., "A new method of ultrasonic imaging and defect detection using phased arrays," Iranian Conference on Mathematical Physics, pp. 1-6, Nov. 2016.
- [35] Bekrani, M., Khong, A. W. H., Lotfzad, M., "A Linear Neural Network based Approach to Stereophonic Acoustic Echo Cancellation," IEEE Trans. on Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 19, No. 6, 2011.
- [1] سارانی‌راد، و.، صنعتی، ش.، شیخ‌الاسلامی، ز.، سعادت‌مند طرزجان، م.، "روش جدید برای تطبیق تصاویر پزشکی هم نوع بر پایه مدل های دگرذیس پذیر و کاربرد آن برای تصاویر CT قفسه سینه"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم، شماره دوم، صص ۶۹-۸۰، تابستان ۹۷.
- [2] Schmerr-Jr., L. W., Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation\_ A Modeling Approach, Springer Series in Measurement Science and Technology, 2016.
- [3] Mahdavi-pour, Z., "Image De-Noiseing and Micro Crack Detection of Solar Cells" Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 14, No. 4, Winter 2017.
- [4] کلانتری، ص.، عبدالمهی‌فرد، م. ج.، احمدی، ص.، "افزایش تفکیک پذیری تصویر با استفاده از مدل لبه تحلیلی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم، شماره دوم، صص ۴۵-۵۴، تابستان ۹۷.
- [5] 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, 2005.
- [6] Drinkwater, B. W., Wilcox, P. D., "Ultrasonic Arrays for Non-Destructive Evaluation: A Review," NDT&E International, Vol. 39, No. 7, 2006.
- [7] 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.
- [8] Lambert, J., P'edron, A., Gens G., Bimbarde, 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, pp. 1-8, 2012.
- [9] 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 Conf. Proc. 1650, pp. 1037-1046, 2015.
- [10] Li, M., Hayward, G., "Ultrasound Nondestructive Evaluation (NDE) Imaging with Transducer Arrays and Adaptive Processing", Sensors, Vol. 12, No. 1, 2012.
- [11] Sakhaei, S. M., "A decimated minimum variance beamformer applied to ultrasound imaging," Ultrasonics, Vol. 59, 2015.
- [12] 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, 2016.
- [13] Saniie, J., Wang, T., Bilgutay, N. M., "Analysis of homomorphic processing for ultrasonic grain signal characterizations," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, Vol. 36, No. 3, 1989.
- [14] Zhu, Y., Weight, J. P., "Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Highly Scattering Materials Using Adaptive Filtering and Detection," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, Vol. 41, No. 1, 1994.
- [15] 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.
- [16] Oruklu, E., Saniie, J., "Ultrasonic Flaw Detection Using Discrete Wavelet Transform for NDE Applications", IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 1054-1057, 2004.



- [36] Padgett, W. T., Anderson, D. V, Fixed-point signal processing, Morgan & Claypoll Publishers, 2009.
- [37] DasGupta, D., "In-Place Matrix Inversion by Modified Gauss-Jordan Algorithm", Applied Mathematics, Vol. 4, pp. 1392-1396, 2013.
- [38] American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)-Section V-Nondestructive Examination, ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Nondestructive Examination, NY, USA, 2015.

## زیر نویس ها

---

- <sup>1</sup>Plane B-scan
- <sup>2</sup>Focused B-scan
- <sup>3</sup>Total Focusing Method
- <sup>4</sup>Minimum Variance
- <sup>5</sup>Scatterer
- <sup>6</sup>Homomorphic
- <sup>7</sup>Minimum Variance based TFM
- <sup>8</sup>Aperture
- <sup>9</sup>Pitch
- <sup>10</sup>Dynamic Depth Focusing
- <sup>11</sup>Sector scan
- <sup>12</sup>Synthetic Aperture Focusing Technique
- <sup>13</sup>Lateral resolution
- <sup>14</sup>Spatial filtering
- <sup>15</sup>Recursive
- <sup>16</sup>Gauss-Jordan elimination method
- <sup>17</sup>Side Drilled Hole
- <sup>18</sup>Omnidirectional
- <sup>19</sup>Rexolite