

# روشی جدید برای تست غیرمخرب با استفاده از فراصوت: استفاده از روشهای شناسایی سیستم

احمدرضا شرافت<sup>۱\*</sup>، محمدحسین میران بیگی<sup>۲</sup>، سیدوهاب شجاع‌الدینی<sup>۳</sup>

۱- استاد مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانش‌آموخته دکترای مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

\*تهران: صندوق پستی ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵

sharafat@isc.iranet.net

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۶)

**چکیده** - یکی از چالشهای تست غیرمخرب با استفاده از فناوری پالس بازگشتی فراصوت، تشخیص ضایعاتی است که ابعاد آنها کوچکتر از یا برابر میزان تفکیک حاصل از پالس فراصوت است. در این مقاله روشی جدید برای تشخیص چنین ضایعاتی ارائه می‌شود. در روش پیشنهادی، لایه‌های مختلف جسم تحت آزمایش به صورت فیلترهای متوالی در نظر گرفته شده و هر یک از ضایعات احتمالی با استفاده از تابع تبدیل مربوط نشان داده می‌شود. در این روش، برای استخراج توابع تبدیل، از ترکیب روشهای تأخیر زمانی و شناسایی سیستم استفاده شده و برخلاف روشهای موجود از نمونه مرجع استفاده نمی‌شود. برای نشان دادن کارایی این روش بلوکهای مختلف فلزی که ضایعات مشخصی در آنها ایجاد شده، آزمایش می‌شوند. تابع تبدیل هر ضایعه به کمک روش پیشنهادی از سیگنال فراصوت بازگشتی از این بلوکها استخراج می‌شود. نتایج حاصل حاکی از آن است که دقت روش پیشنهادی برخلاف روشهای موجود، به عواملی نظیر محیط آزمایش، سیستم و مبدل فراصوت مورد استفاده یا نمونه مرجع بستگی ندارد. همچنین با استفاده از این روش، قابلیت تشخیص چند ضایعه که در عمقهای مختلف از نمونه ایجاد شده باشند، حاصل می‌شود.

**کلید واژگان:** تست غیرمخرب، فراصوت، ضایعه، دروازه‌بندی زمانی، شناسایی سیستم.

## ۱- مقدمه

تست غیرمخرب<sup>۱</sup> روشی برای تعیین خواص ماده است، بدون اینکه به آن صدمه‌ای وارد شود یا در خواص ماده مزبور تغییری حاصل شود. این روش در سالیان اخیر برای

بررسی موادی با ساختارهای چندلایه و ترکیبی، به‌طور گسترده‌ای به‌کار رفته است [۱]. یکی از متداولترین روشهای تست غیرمخرب استفاده از فناوری پالس بازگشتی فراصوت است [۲]. در این روش پالس فراصوت به ماده موردنظر تابانده شده و پس از برخورد با هر ضایعه، بخشی از آن باز می‌گردد. با

1. Non Destructive Testing

استفاده از این بازگشتها و با توجه به اندازه و زمان رخداد بیشترین مقادیر آن، می‌توان عمق ضایعات مختلف را در ماده مشخص کرد، لکن تشخیص نوع ضایعه ممکن نیست [۲، ۳].

تفکیک‌پذیری ناشی از پالس فراصوت در این روش با رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$R = \frac{v\tau}{2} \quad (1)$$

که  $R$  تفکیک‌پذیری ناشی از پالس فراصوت،  $v$  سرعت انتشار موج فراصوت در جسم تحت آزمایش و  $\tau$  عرض پالس فراصوت است.

روش مزبور محدودیتهای مهمی دارد. در حالت کلی شناسایی ضایعه، هنگامی که عرض آن از میزان تفکیک‌پذیری ناشی از پالس فراصوت کمتر یا در حدود آن باشد، امکان‌پذیر نیست [۴، ۵]. این مشکل در تشخیص ضایعاتی که دارای عرضی کمتر از طول موج فراصوت باشند، نیز وجود دارد [۴].

در برخی از روشها برای حل این مشکل از امواج فراصوت با فرکانس بالا استفاده می‌کنند. اما با افزایش فرکانس، تضعیف امواج فراصوت نیز افزایش یافته و عمق اندازه‌گیری به‌ویژه در موادی نظیر فلزها که تضعیف شدیدی بر امواج فراصوت اعمال می‌کنند، به‌شدت کاهش می‌یابد [۴].

استفاده از تأخیر پالس بازگشتی فراصوت در حالت کلی می‌تواند برای تعیین محل وقوع ضایعه به‌کار گرفته شود، در حالی که در کاربردهای امروزی، داشتن اطلاعاتی از شکل ضایعه نیز ضروری است [۵].

محدودیت دیگر آن است که سیگنال بازگشتی از هر ضایعه از تمامی لایه‌ها و ضایعات احتمالی قبلی نیز عبور کرده و اطلاعات آن توسط این لایه‌ها تغییر داده می‌شود. بنابراین سیگنال بازگشتی از هر ضایعه ممکن است شامل اطلاعات گمراه‌کننده‌ای باشد که در نتیجه، تعیین پارامترهای موردنظر از ضایعه را دشوار می‌سازد [۵].

برای حل این مشکلات، از مدل‌های مبتنی بر توابع تبدیل برای تست غیرمخرب به‌کمک فراصوت استفاده شده است [۵] تا [۸]. در این مدلها، اثر هر ضایعه در جسم مورد آزمایش به‌صورت یک فیلتر در نظر گرفته شده و مشخصات ضایعه با استفاده از تابع تبدیل این فیلتر نشان داده می‌شود. برای این منظور، ابتدا نمونه بدون ضایعه جسم موردنظر آزمایش شده و سیگنال بازگشتی از آن به‌عنوان سیگنال مرجع در نظر گرفته می‌شود. سیگنال بازگشتی از هر نمونه سالم دیگری نیز مشابه سیگنال مرجع فرض می‌شود. سیگنال بازگشتی از نمونه ضایعه‌دار، حاصل کانولوشن سیگنال مرجع با تابع تبدیل ضایعه است. بنابراین با داشتن این دو سیگنال، تابع تبدیل ضایعه را می‌توان با استفاده از روشهای شناسایی سیستم به‌دست آورد [۵] تا [۸].

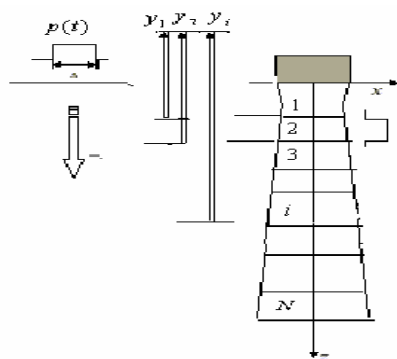
اما این روش نیز با محدودیتهای قابل توجهی مواجه است [۴، ۷]. اول آن که دقت این روش به‌شدت به انتخاب نمونه مرجع وابسته است. محدودیت دوم آن است که عملکرد روش مزبور به مبدل و سیستم فراصوت بستگی دارد، به‌نحوی که با تغییر مبدل یا سیستم فراصوت، صحت این روش مخدوش می‌شود. محدودیت دیگر آن است که اگر در عمقهای مختلف جسم مورد آزمایش، ضایعات مختلفی به‌دنبال هم وجود داشته باشند، برای همه آنها یک تابع تبدیل استخراج شده و لذا امکان شناسایی و تفکیک آنها وجود نخواهد داشت.

برای حل مشکلات یاد شده، در این مقاله روشی جدید بر مبنای روشهای شناسایی سیستم در محدوده‌های زمانی مشخص برای تشخیص ضایعات با ابعاد کوچکتر یا مساوی عرض پالس فراصوت ارائه می‌شود که در آن به استفاده از سیگنال مرجع نیاز نیست. با این روش می‌توان ضایعات چندگانه را در عمقهای مختلف یک یا چند نمونه از یکدیگر تفکیک

رابطه (۲) چگونگی تفکیک سیگنال بازگشتی به این قطعات را بیان می‌کند.

$$y_i(t) = y(t) \quad \frac{i(2d)}{v} \leq t < \frac{(i+1)(2d)}{v} \quad (2)$$

$$y_i(t) = 0 \quad \text{else}$$



شکل ۱ مدل پیشنهادی برای تشکیل تابع تبدیل لایه‌ها

چنانکه در شکل ۱ دیده می‌شود، سیگنال فراصوت تابشی قبل از برخورد به هر لایه، از تمامی لایه‌های قبلی آن نیز عبور کرده و پس از بازگشت از آن لایه نیز از تمام لایه‌های قبلی عبور می‌کند. بنابراین سیگنال بازگشتی از هر لایه، علاوه بر این‌که دارای اطلاعاتی از لایه موردنظر است، از لایه‌های قبلی نیز متأثر است. این موضوع در معادله‌های رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$y_1(t) = p(t) * h_0'(t) * h_1'(t) * h_0''(t) + n_1(t)$$

$$y_2(t) = p(t) * h_0'(t) * h_1'(t) * h_2'(t) * h_1''(t) * h_0''(t) + n_2(t) \quad (3)$$

$$\vdots$$

$$y_i(t) = p(t) * h_0'(t) * h_{i-1}'(t) * h_i'(t) * h_{i-1}''(t) * h_0''(t) + n_i(t)$$

که  $p(t)$  پالس ارسال شده توسط سیستم فراصوت،  $h_i'(t)$  و  $h_i''(t)$  توابع تبدیل لایه  $i$ ام روی سیگنالهای فراصوت تابشی و سیگنالهای بازگشتی از لایه‌های پایتتر و  $n_n(t)$  نویز موجود در سیگنال بازگشتی از لایه  $i$ ام و \* بیانگر کانولوشن است. همچنین  $h_0'(t)$  و  $h_0''(t)$  توابع تبدیل مبدل فراصوت روی سیگنالهای تابشی و دریافتی است.

کرد و دقت روش به نوع مبدل، سیستم فراصوت و شرایط محیط اندازه‌گیری بستگی ندارد.

در ادامه این مقاله، ابتدا اصول روش پیشنهادی را ارائه کرده و سپس با استفاده از یک سیستم فراصوت، مجموعه‌ای را برای انجام تست غیرمخرب پیاده‌سازی می‌کنیم. آنگاه با انجام آزمایش بر روی ضایعاتی که در اعماق بلوکهای مختلف فلزی ایجاد شده‌اند، عملکرد روش پیشنهادی را بررسی کرده و نشان می‌دهیم که روش ارائه شده در این تحقیق، قابلیت تشخیص ضایعات در نمونه‌های مختلف و در اعماق مختلف از این نمونه‌ها و همچنین ضایعات متوالی را دارد.

## ۲- تفکیک لایه‌ها با استفاده از تابع تبدیل در محدوده زمانی مشخص

اکنون روش جدید تست غیرمخرب را با استفاده از فراصوت ارائه می‌دهیم. در روش پیشنهادی، اثر هر یک از لایه‌های جسم مورد آزمایش بر سیگنال فراصوت تابشی به صورت یک فیلتر فرض می‌شود. لذا می‌توان مدل جدیدی را به جای مدل‌های قبلی برای توصیف این پدیده در نظر گرفت. در این مدل هر لایه از جسم چند لایه مورد آزمایش، با تابع تبدیل آن بر سیگنال فراصوت مدل می‌شود. شکل ۱، توصیفی از رفتار متقابل امواج فراصوت و لایه‌های جسم مورد آزمایش را نشان می‌دهد. اگر سیگنال بازگشتی از جسم مورد آزمایش را  $y(t)$  بنامیم، می‌توان به صورتی که در شکل ۱ نشان داده شده، این سیگنال را به قطعات  $[y_1(t), \dots, y_i(t), \dots, y_N(t)]$  تفکیک کرد که  $y_i(t)$  سیگنال بازگشتی از لایه  $i$ ام است. سیگنال بازگشتی از هر لایه نسبت به سیگنال بازگشتی از لایه قبلی به اندازه  $\frac{2d}{v}$  تأخیر دارد که  $d$  عرض لایه موردنظر و  $v$  سرعت موج فراصوت در جسم تحت آزمایش است.

$$\begin{aligned} y_1(k) &= x_1(k) * h_1'(k) + n_1(k) \\ y_2(k) &= x_2(k) * h_2'(k) + n_2(k) \\ &\vdots \\ y_i(k) &= x_i(k) * h_i'(k) + n_i(k) \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن  $y_i(k)$ ،  $x_i(k)$ ،  $h_i'(k)$  و  $n_i(k)$  به ترتیب شکل گسسته عبارت‌های  $y_i(t)$ ،  $x_i(t)$ ،  $h_i'(t)$  و  $n_i(t)$  است. رابطه (6) نشان می‌دهد که سیگنال بازگشتی از هر لایه را می‌توان در قالب یک معادله شناسایی سیستم بیان کرد. هر یک از معادلات در این رابطه را می‌توان به کمک دکانونولوشن حل کرده و  $h_i'(t)$  مربوط را به دست آورد.

دکانونولوشن کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مخابرات بیسیم، رادار، پردازش صوت و تصویر دارد و تاکنون روشهای مختلفی برای آن ارائه شده است. در این مقاله از آمارگان مرتبه بالا (مرتبه سوم) برای این کار استفاده می‌کنیم. استفاده از این روش نسبت به سایر روشهای متداول برای دکانونولوشن دارای مزایای زیر است. اولاً: باعث حذف نویز جمعی متقارن در سیگنال بازگشتی می‌شود. ثانیاً: برای حذف نویز نیازی به دریافت بازگشتیهای مختلف و متوسط‌گیری از آنها ندارد که این قابلیت، امکان دستیابی به سیستم بی‌درنگ را فراهم می‌سازد. ثالثاً: این روش، بر خلاف اغلب روشهای دیگر، نیازی به داشتن اطلاعات از توان نویز ندارد.

در روش آمارگان مرتبه بالا، کامیولنت مرتبه  $j$ ام برای سیگنال بازگشتی از هر یک از لایه‌های ( $i$ ام) توصیف شده در رابطه (4)، به صورت رابطه (7) حاصل می‌شود [9].

$$\begin{aligned} C_j^{y_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1}) &= \\ C_j^{x_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1}) H_i'(\Omega_1) H_i'(\Omega_2) & \\ \dots H_i'(\Omega_{j-1}) + C_j^{n_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1}) & \end{aligned} \quad (7)$$

با این فرض که هر لایه روی سیگنالهای رفت و برگشت تابع تبدیل یکسانی را اعمال می‌کند، در معادلات (3) برای هر لایه،  $h_i'(t)$  و  $h_i''(t)$  مساوی فرض شده و این معادلات به شکل زیر بازنویسی می‌شوند.

$$\begin{aligned} y_1(t) &= p(t) * h_0'(t) * h_1'(t) * h_0'(t) + n_1(t) \\ y_2(t) &= p(t) * h_0'(t) * h_1'(t) * h_2'(t) * h_1'(t) * h_0'(t) + n_2(t) \\ &\vdots \\ y_i(t) &= p(t) * h_0'(t) * \dots * h_{i-1}'(t) * h_i'(t) * h_{i-1}'(t) * \dots * h_0'(t) + n_i(t) \end{aligned} \quad (8)$$

در اولین معادله رابطه (8) با توجه به معلوم بودن  $y_1(t)$ ،  $p(t)$  و  $h_0'(t)$  می‌توان با روشهایی که در ادامه ذکر می‌شود،  $h_1'(t)$  را به دست آورد. با قرار دادن  $h_1'(t)$  در معادله  $y_2(t)$  می‌توان  $h_2'(t)$  را محاسبه کرد. به همین ترتیب می‌توان تابع تبدیل هر لایه را با استفاده از توابع تبدیل لایه‌های قبلی آن به دست آورد. هم‌چنان که ملاحظه می‌شود، اولین گام در روش پیشنهادی برای به دست آوردن توابع تبدیل لایه‌های جسم، حذف کردن اثر مبدل فراصوت ( $h_0'(t)$ ) از سیگنال بازگشتی است (معادله اول در رابطه (8)). لذا می‌توان اطمینان داشت که به طور نظری، عملکرد روش پیشنهادی این مقاله به خلاف روشهای موجود - که در آنها اثر مبدل فراصوت از سیگنال بازگشتی حذف نمی‌شود - به نوع مبدل بستگی ندارد.

برای حل کردن معادله مربوط به هر لایه،  $x_i(t)$  را در دسته معادلات (8) به صورت رابطه (9) تعریف می‌کنیم.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= p(t) * h_0'(t) * h_0'(t) \\ x_2(t) &= p(t) * h_0'(t) * h_1'(t) * h_1'(t) * h_0'(t) \\ &\vdots \\ x_i(t) &= p(t) * h_0'(t) * \dots * h_{i-1}'(t) * h_{i-1}'(t) * \dots * h_0'(t) \end{aligned} \quad (9)$$

با جایگذاری مقادیر  $x_i(t)$  رابطه (9) در معادلات (8) و بازنویسی معادلات حاصل به شکل گسسته، سیگنال بازگشتی از لایه‌ها را با معادلات (6) می‌توان بیان کرد.

شده است. موج فراصوت پس از برخورد به این ضایعات دچار تغییر شکل شده و باز می‌گردد. با نمونه‌برداری و پردازش سیگنال بازگشتی به روش پیشنهادی این مقاله، هر ضایعه با استفاده از تابع تبدیل آن تفکیک و شناسایی می‌شود.

طرحواره ساخت این بلوکهای فلزی در شکل ۲-ب، نشان داده شده است. برای این منظور ابتدا از صفحات تخت آلومینیومی و برنجی با ابعاد و ضخامت مشخص به‌عنوان بستر استفاده شده است. سپس، ضایعاتی با ابعاد و شکل مشخص روی بستر فلزی ایجاد شد. برای ایجاد ضایعاتی با شکل مشخص در ابعاد مورد نیاز در این آزمایشها، ضایعه موردنظر با استفاده از پودرهای متمیزه (پودر مس متمیزه یا پودر برنز متمیزه) بر روی هر دو نوع صفحه فلزی ایجاد شده است. مزیت این پودرها آن است که به‌خلاف پودرهای متداول دیگر (نظیر پودر آهن) دارای ذرات هم‌شکل هستند و لذا با استفاده از این پودرها می‌توان ضایعات کنترل شده و هم‌شکلی را در عمق موردنظر ایجاد کرد. پس از آن روی بستر و ضایعه، آبکاری انجام شد که باعث می‌شود ضایعه موردنظر در عمق دلخواه قرار گیرد. با چنین روشی، ضایعات پیشگفته در دو عمق ۰/۵۸ و ۱/۴۶ میلی‌متری از بلوکهای حاصل قرار گرفت. با توجه به محدودیت ابزار اندازه‌گیری (میکرومتر دیجیتال) عمق جانشرانی ضایعات تا ۱۵ میکرومتر تیرانس دارد که این در شکل ۲-ب نشان داده شده است.

در هر یک از عمقهای فوق با جانشرانی پودر مس متمیزه، تعداد ۵ ضایعه ایجاد شد. فاصله جانبی میان هر دو ضایعه مجاور حداقل ۳۰۰ میکرون اختیار شد تا شرط تفکیک‌پذیری جانبی دستگاه فراصوت مورد استفاده ارضا شود. بدین ترتیب اطمینان حاصل شد که فقط سیگنال بازگشتی از ضایعه موردنظر دریافت شده و سیگنالهای مربوط به ضایعات مجاور در سیگنال دریافتی ظاهر نمی‌شوند.

که در آن  $C_j^{y_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1})$  تبدیل فوریه کامیولنت  $j$ ام سیگنال  $y_i(k)$  است که چندطیفی نیز نامیده می‌شود، و  $C_j^{x_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1})$  و  $C_j^{h_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1})$  دوطیفی‌های مرتبه  $j$ ام  $x_i(k)$  و  $h_i(\Omega)$  طیف تابع تبدیل لایه  $i$ ام است. رابطه (۷) را با استفاده از خواص آمارگان مرتبه بالا به صورت (۸) بازنویسی می‌کنیم.

$$C_j^{y_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1}) = C_j^{x_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1})C_j^{h_i}(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1}) + C_j^n(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{j-1}) \quad (8)$$

آمارگان مرتبه  $2 < j$  برای نویز گوسی برابر صفر است [۹]. در نتیجه برای کامیولنت سوم که در این مقاله از آن استفاده می‌شود، خواهیم داشت

$$C_3^{y_i}(\Omega_1, \Omega_2) = C_3^{x_i}(\Omega_1, \Omega_2)C_3^{h_i}(\Omega_1, \Omega_2) \quad (9)$$

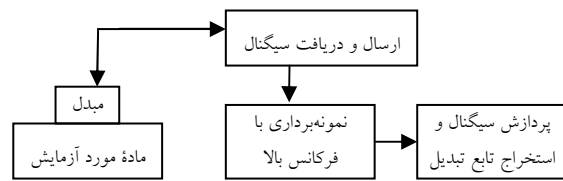
این معادله مقدار  $C_3^{h_i}(\Omega_1, \Omega_2)$  یعنی تبدیل فوریه کامیولنت سوم (دوطیفی) تابع تبدیل موردنظر را به‌دست می‌دهد. با داشتن  $C_3^{h_i}(\Omega_1, \Omega_2)$  نیز می‌توان مقدار  $h_i(k)$  یعنی تابع تبدیل لایه موردنظر را به‌دست آورد [۱۰].

### ۳- آزمایشها و نتایج

مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق شامل سیستم تصویربرداری فراصوت با فرکانس ۲۲ مگاهرتز از نوع دی یو بی ۶۱۰۰ (شرکت تی پی ام - آلمان - ۲۰۰۲) و کامپیوتری با پردازنده پنتیوم ۴ - ۲۷۰۰ برای کنترل سیستم و ذخیره‌سازی داده‌ها است. شکل ۲-الف بلوک دیاگرام مجموعه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

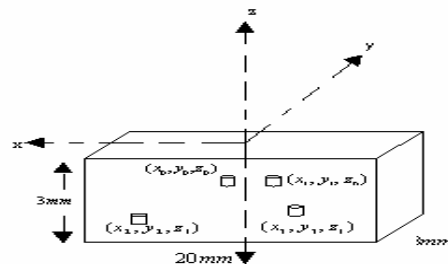
آزمایشهای این تحقیق، بر روی بلوکهای فلزی با ابعاد و شکل مشخص - که در اعماق مشخصی از آنها ضایعاتی با شکل و ابعاد مشخص وجود داشت، انجام

در آخرین آزمایش، نوع متفاوتی از ضایعات با استفاده از پودر برنز اتمیزه به روشی که ذکر شد، ایجاد و تابع تبدیل آن استخراج شد. با استفاده از نتایج این آزمایش می‌توان توانایی روش پیشنهادی را در شناسایی انواع مختلف ضایعات بررسی کرد.



شکل ۲- الف- بلوک دیاگرام مجموعه آزمایشگاهی استفاده

شده در این تحقیق



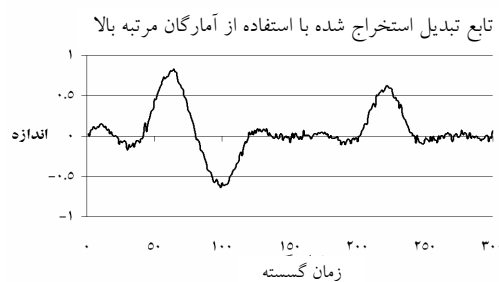
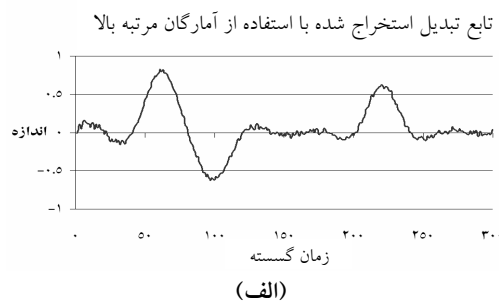
$$z_0 = 580\mu\text{m} \pm 15\mu\text{m}$$

$$z_1 = 1460\mu\text{m} \pm 15\mu\text{m}$$

$$\forall z \quad |x_1 - x_0|, |x_2 - x_1|, |x_3 - x_2|, \dots, |x_n - x_{n-1}| > 300\mu\text{m} \quad n = 5$$

شکل ۲- ب - طراحی بلوکهای فلزی و مکان و نوع ضایعات

ایجاد شده در عمق (برای وضوح بیشتر، ضایعات بزرگنمایی شده و تعداد آنها کاهش یافته است)



شکل ۳ توابع تبدیل یک ضایعه یکسان بر روی بستر برنجی در دو عمق (الف) ۰/۵۸ و (ب) ۱/۴۶ میلی متری

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، چند آزمایش در نظر گرفته شد. در اولین آزمایش، ضایعات در عمقهای مختلفی از بلوکهای فلزی با بستر یکسان، ایجاد شد. نتایج حاصل از این آزمایش بیانگر حساسیت روش پیشنهادی نسبت به عمق ایجاد ضایعات است. در آزمایش دوم، ضایعات روی بسترهایی با جنس مختلف ایجاد شد تا حساسیت روش پیشنهادی به جنس محیطی که ضایعه در آن پدید آمده بررسی شود. در آزمایش سوم ضایعات در دو عمق یک بلوک به صورت سری ایجاد شد، به گونه‌ای که سیگنال بازگشتی از ضایعه دومی از ضایعه اول نیز عبور کند. نتایج این آزمون کارایی روش پیشنهادی را در تشخیص ضایعات متوالی مشخص می‌کند. در سناریوی دیگری، از روش پیشنهادی برای استخراج تابع تبدیل ضایعات در شرایط مختلف سیگنال به نویز استفاده و بدین ترتیب حساسیت روش پیشنهادی به نویز آزموده شد.

## ۳-۲- آزمون شناسایی ضایعه، مستقل از جنس محیط

هدف از این آزمایش آن است که نشان دهیم عملکرد روش پیشنهادی در استخراج تابع تبدیل ضایعه، مستقل از محیطی است که ضایعه مزبور در آن ایجاد شده. برای این منظور دو نوع بلوک مورد آزمایش قرار گرفت که نوع اول بستر برنجی و نوع دیگر بستر آلومینیومی دارد. در هر دو نوع بلوک، ضایعات همشکلی با استفاده از پودر مس اتمیزه ایجاد شده است. نتایج حاصل از آزمایش بر روی بلوک با بستر برنجی در بخش قبل تشریح شده و در شکل ۳ ملاحظه می‌شود. در شکل ۴ تابع تبدیل استخراج شده برای همین نوع ضایعه، هنگامی که روی قطعه آلومینیومی و در عمق  $1/46$  میلی‌متری ایجاد شده، دیده می‌شود. با توجه به یکسانی نتایج شکل‌های ۳ و ۴ می‌بینیم که روش پیشنهادی می‌تواند تابع تبدیل ضایعه را - صرف‌نظر از جنس بلوک تحت آزمایش - استخراج کند.

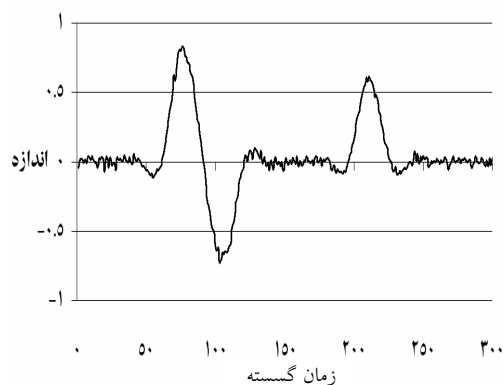
## ۳-۳- آزمون تشخیص نوع ضایعات متوالی

یکی از نتایجی که از کاربرد روش پیشنهادی متصور است، تفکیک و تشخیص نوع ضایعاتی است که در اعماق مختلفی از قطعه و به دنبال هم ایجاد شده باشند. در این حالت چون سیگنال بازگشتی از ضایعه در عمق بیشتر، قبل از دریافت توسط مبدل، از ضایعه اول نیز عبور می‌کند، شناسایی ضایعات از روی سیگنال خام بازگشتی بسیار دشوارتر از حالات قبلی می‌شود. در این حالت، معمولاً ماهیت ضایعه در عمق بیشتر، توسط ضایعه اول پوشانده می‌شود.

هدف از این آزمون، بررسی توانایی روش پیشنهادی در شناسایی ضایعاتی است که به دنبال هم ایجاد شده‌اند. در این آزمون دو ضایعه یکسان با پودر مس اتمیزه در اعماق  $0/58$  و  $1/46$  میلی‌متری از یک موقعیت مکانی در بلوک آلومینیومی به دنبال هم ایجاد شد. نتایج این آزمون در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

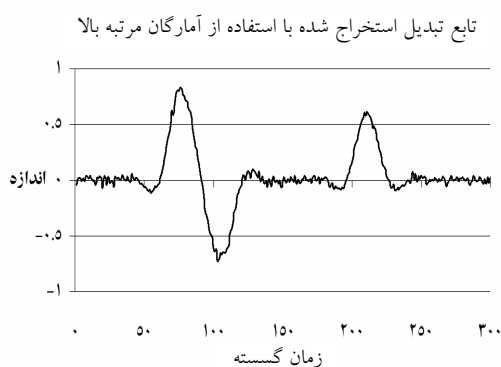
در شکل ۵- الف ملاحظه می‌شود که علی‌رغم یکسان بودن ضایعات متوالی، سیگنال بازگشتی از این ضایعات، متفاوت بوده و لذا، اگرچه می‌توان با استفاده از این سیگنال مکان ضایعات را معین کرد ولیکن شناسایی نوع این ضایعات تنها از روی سیگنال بازگشتی امکان‌پذیر نیست. در شکل‌های ۵- ب و ۵- ج توابع تبدیل استخراج شده از همین ضایعات با استفاده از روش پیشنهادی ملاحظه می‌شود. مشابه بودن این توابع تبدیل - با توجه به یکسان بودن ضایعات - حاکی از آن است که روش پیشنهادی قادر است نوع ضایعاتی را که در اعماق مختلف بلوکها به دنبال هم ایجاد شده باشند شناسایی کند.

تابع تبدیل استخراج شده با استفاده از آمارگان مرتبه بالا

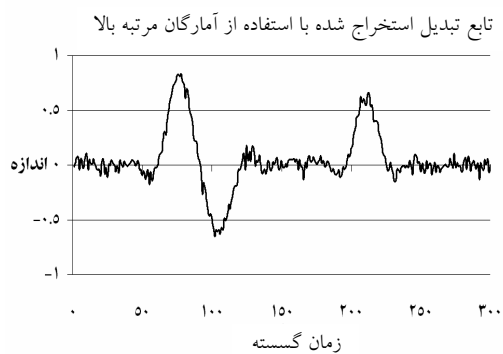


شکل ۴ تابع تبدیل استخراج شده از ضایعه روی بستر آلومینیومی در عمق  $1/46$  میلی‌متری

فراصوت به بلوک مورد آزمایش تابانده شده و پس از پردازش، تابع تبدیل ضایعه موردنظر استخراج شد. این تابع تبدیل در شکل ۶-الف نشان داده شده است. سپس نویز سفید گوسی با میانگین صفر و توان  $5 \text{ dBW}$  تولید و با سیگنال بازگشتی جمع شد. علت انتخاب نویز سفید گوسی آن است که در فرکانس مورد استفاده (۲۲ مگاهرتز)، فقط نویز فرستنده و گیرنده فراصوت وجود دارد که در بیشتر تحقیقات، سفید و گوسی در نظر گرفته می‌شود. تابع تبدیل استخراج شده از سیگنال نویزی شده با استفاده از این روش در شکل ۶-ب نشان داده شده است.



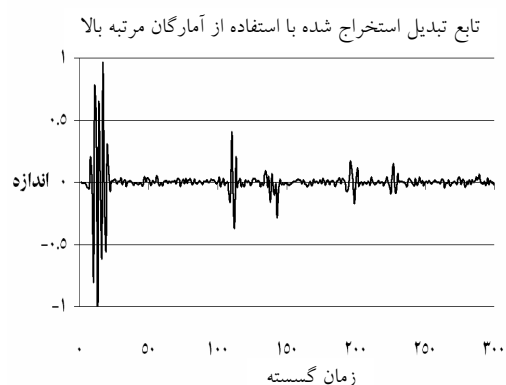
(الف)



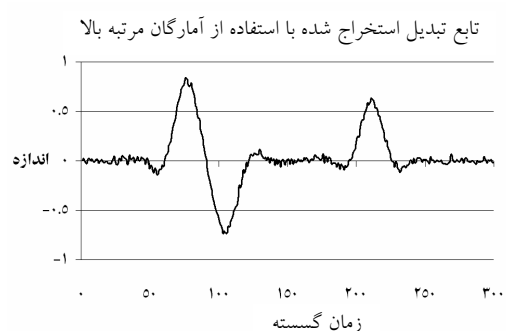
(ب)

شکل ۶ توابع تبدیل استخراج شده از ضایعه موجود بر روی بستر آلومینیمی در عمق  $1/46$  میلی‌متری (الف) بدون اضافه شدن نویز و (ب) با اضافه شدن  $5 \text{ dBW}$  نویز به سیگنال

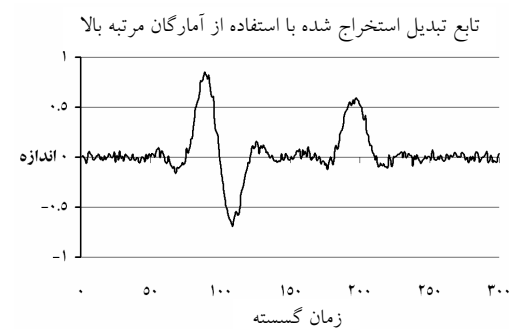
نتایج مزبور نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند تابع تبدیل را حتی در حضور نویزی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵ آزمایش تشخیص دو ضایعه متوالی بر روی بسترهای آلومینیمی: (الف) سیگنال بازگشتی، (ب) تابع تبدیل استخراجی از ضایعه ایجاد شده در عمق  $0/58$  میلی‌متری و (ج) ضایعه در عمق  $1/46$  میلی‌متری

### ۳-۴- آزمون پایداری در برابر نویز

هدف از این آزمایش بررسی پایداری روش پیشنهادی برای استخراج تابع تبدیل ضایعه در برابر نویز است. برای انجام این کار بلوک با بستر آلومینیمی آزمایش شد. ابتدا موج



دو نوع پودر مس اتمیزه و برنز اتمیزه به دست می‌دهد. بر این اساس می‌توان از تابع تبدیل حاصل برای تعیین نوع ضایعات استفاده کرد.

با توجه به آزمایشهای انجام شده و نتایج آنها می‌بینیم که استفاده از روش پیشنهادی، توابع تبدیل مشابهی را برای ضایعات هم‌نوع و توابع تبدیل متفاوتی را برای ضایعات غیرهم‌نوع نتیجه می‌دهد. به علاوه از این توابع می‌توان برای تشخیص ضایعه - هم در بلوکهای با جنس مختلف و هم در عمقهای مختلفی از این بلوکها - استفاده کرد. همچنین می‌توان ضایعاتی را که در اعماق مختلف نمونه‌ها و به دنبال هم ایجاد شده باشند، شناسایی کرد. استفاده از آمارگان مرتبه بالا برای شناسایی سیستم، به دلیل قابلیت حذف نویزهای گوسی و مقارن، در برابر افزایش نویز تا میزان ۵ dBW از خود پایداری نشان می‌دهد. همچنین در این روش برای حذف نویز نیازی به متوسط‌گیری نیست که این امکان دستیابی به سیستم بی‌درنگ را افزایش می‌دهد.

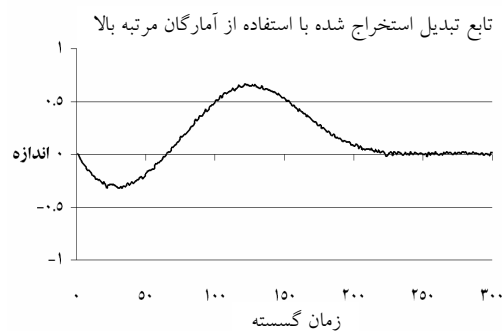
با توجه به نتایج حاصل از آزمایشهای تشریح شده، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی که مبتنی بر شناسایی ضایعات با استفاده از توابع تبدیل آنها است، توانایی شناسایی و تفکیک ضایعات مختلف را دارد؛ به گونه‌ای که ضایعات هم‌نوع، توابع تبدیلی با شکلهای مشابه نتیجه می‌دهند. برای ارزیابی کمی توانمندی این روش در تفکیک ضایعات، از طبقه‌بندی استفاده کرده‌ایم.

برای انجام این منظور لازم است ویژگیهای مناسبی استخراج شده و سپس در قالب بردارهایی به الگوریتم طبقه‌بندی اعمال شوند. با توجه به اینکه بارزترین تفاوت میان توابع تبدیل حاصل شده برای دو نوع ضایعه (برای مثال، نمونه‌های نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷) در شکل آنها متجلی می‌شود، برای استخراج ویژگی نیز از ویژگیهای شکلی استفاده شد. این ویژگیها عبارتند از: تأخیر رخداد بیشینه در تابع

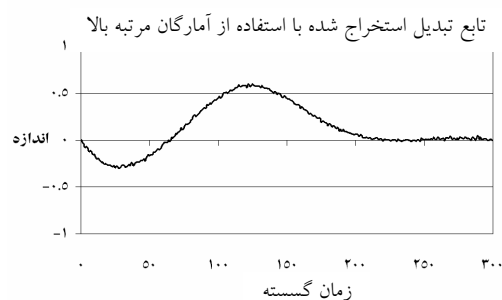
به میزان ۵dBW بیشتر از نویز موجود در شرایط معمول آزمایشها استخراج کند.

### ۳-۵- آزمون شناسایی نوع ضایعه با استفاده از تابع تبدیل استخراجی

هدف از این آزمایش بررسی کارایی روش پیشنهادی در تشخیص نوع ضایعه است. برای این کار، ضایعات موردنظر با استفاده از پودر برنز اتمیزه در عمق بلوکهای فلزی ایجاد شد. سپس به روش پیشگفته، تابع تبدیل ضایعه از سیگنال بازگشتی استخراج شد. شکل ۷، توابع تبدیل استخراج شده برای پودر برنز اتمیزه را در دو عمق مختلف از بلوکهای فلزی نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۷ توابع تبدیل استخراج شده از ضایعه ایجاد شده با پودر برنز اتمیزه بر روی بستر آلومینیمی (الف) در عمق ۰/۵۸ میلی‌متری و (ب) در عمق ۱/۴۶ میلی‌متری

مقایسه شکل ۷ با شکل‌های ۲ تا ۶ نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی، توابع تبدیل متفاوتی را برای

جدول ۱ ویژگیها، نوع طبقه‌بندی و نتایج آزمایش بلوکهای فلزی شامل دو نوع ضایعه

ویژگیهای مورد استفاده برای طبقه‌بندی				
ویژگی ۱	ویژگی ۲	ویژگی ۳	ویژگی ۴	
تأخیر بیشینه	تأخیر کمینه	نسبت بیشینه به کمینه	انرژی	
مشخصات طبقه‌بندی				
تعداد کلاس	نوع طبقه‌بند	معیار فاصله	تعداد الگوی آموزشی	تعداد الگوی تست
۲	کمینه فاصله	اقلیدستی	۲۰	۲۰
نتایج آزمون طبقه‌بندی				
درصد تشخیص کلاس ۱		درصد تشخیص کلاس ۲		
۱۰۰		۱۰۰		

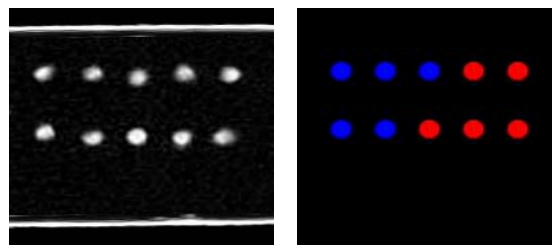
سپس، تصویر فراصوت متداول به‌دست آمده (بی-اسکن) برای همین بلوک را در شکل ۸-ب نشان داده‌ایم. مقایسه این تصویر و تصویر الگو شکل ۸-الف، نشان می‌دهد که در تصویر ۸-ب، ذرات غیرهمنوع تفاوت مشخصی را ایجاد نمی‌کنند و لذا این تصویر - اگرچه می‌تواند مکان قرارگیری ذرات را نشان دهد - اما نمی‌توان با استفاده از آن نوع ضایعه (مس یا برنز) را تفکیک و بازشناسی کرد. سرانجام ضایعات را با استفاده از روش پیشنهادی این مقاله بازشناسی کردیم. برای این منظور، تابع تبدیل هر یک از ذرات امتیزه از روی سیگنال بازگشتی از آن به‌دست آمد. سپس تابع مربوط مطابق جدول ۱ با استفاده از طبقه‌بندی، به یکی از انواع مس یا برنز امتیزه منسوب شد. چنانچه ضایعه تشخیص داده شده از نوع مس امتیزه باشد به رنگ خاکستری روشن و در غیر این صورت به رنگ خاکستری تیره در تصویر نشان داده می‌شود. تصویری که بدین ترتیب به‌دست آمده است در شکل ۸-ج نشان داده شده. مقایسه این شکل و الگوی اصلی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی چگونه می‌تواند علاوه بر تشخیص صحیح مکان قرارگیری ذرات، نوع آنها را نیز به‌درستی از هم تفکیک کند.

تبدیل استخراج شده، تأخیر رخداد کمینه در تابع تبدیل استخراج شده، نسبت مقدار بیشینه به کمینه در تابع تبدیل استخراج شده و انرژی. برای طبقه‌بندی از طبقه‌بندی‌کننده کمینه فاصله با معیار فاصله اقلیدسی استفاده شد. طبقه‌بندی با دو کلاس (کلاس ۱ مربوط به مس امتیزه و کلاس ۲ مربوط به برنز امتیزه) انجام شد. آزمایشها برای چهار بلوک فلزی که هر بلوک شامل دو عمق مختلف بوده و ۵ پودر امتیزه در هر عمق قرار دارد، انجام شد که در مجموع ۴۰ تابع تبدیل را نتیجه می‌دهد (۲۰ تابع تبدیل مربوط به پودر مس امتیزه و ۲۰ تابع تبدیل مربوط به پودر برنز امتیزه). برای اینکه تعداد الگوهای لازم برای تشکیل هر دو کلاس مساوی باشد، ۱۰ الگو (تابع تبدیل) از هر یک از داده‌های پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن برای تشکیل کلاسها و ۱۰ الگو از هر یک نیز برای آزمون در نظر گرفته شد. در جدول ۱ ویژگیهای طبقه‌بندی، نوع طبقه‌بندی و نتایج حاصل از آن دیده می‌شود. این جدول نشان می‌دهد که با استفاده از روش مبتنی بر شناسایی سیستم می‌توان ضایعات موردنظر در بلوکهای این تحقیق را با صحت کامل از یکدیگر تفکیک کرد.

نتایج حاصل از این آزمایشها را می‌توان با نتایج حاصل از روشهای کلاسیک تست غیرمخرب نیز مقایسه و برتری روش پیشنهادی را نشان داد. برای این منظور یکی از بلوکهای فلزی را که ذرات جاننشانی شده در آن برای تست طبقه‌بندی استفاده شده بود، در نظر گرفته و نحوه قرارگیری ذرات را در این بلوک نشان می‌دهیم. در این تصویر شکل ۸-الف، هم مکان قرارگیری ذرات و هم نوع آنها را نشان می‌دهیم تا بتوان نتایج به‌دست آمده را با آن مقایسه کرد. در شکل ۸-الف ذرات مس امتیزه با رنگ خاکستری روشن و ذرات برنز امتیزه با رنگ خاکستری تیره نشان داده شده و مکان قرارگیری هر یک نیز مشخص شده است.

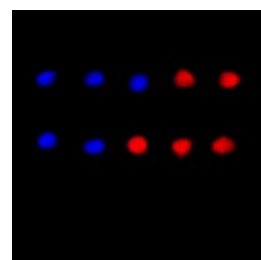
## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله روشی جدید برای تست غیرمخرب، براساس ترکیب روشهای شناسایی سیستم و استفاده از تأخیر زمانی برای تشخیص ضایعات با ابعادی در حدود تفکیک پذیری فراصوت ارائه شد که برخلاف روشهای قبلی، به استفاده از نمونه مرجع نیاز ندارد. به کمک روش پیشنهادی، بدون آنکه تشخیص ضایعه به نوع مبدل سیستم فراصوت مورد استفاده و شرایط محیط اندازه گیری بستگی داشته باشد، می توان ضایعات را در اعماق مختلف نمونه، از یکدیگر تفکیک کرد. در این روش رفتار هر لایه از نمونه آزمایشی در برابر امواج فراصوت به صورت یک فیلتر مدل شده و تابع تبدیل این فیلتر، با شناسایی سیستم استخراج می شود. برای شناسایی سیستم از روش آمارگان مرتبه بالا استفاده شد. برای آنکه انجام آزمایش و مقایسه نتایج میسر باشد، ضایعات میکرونی بر روی بسترهای برنج و آلومینیم به کمک آباری کروم و نیکل و جانشانی ذرات هم شکل و با ابعاد کنترل شده از پودرهای مس اتمیزه و برنز اتمیزه ایجاد شد.



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۸ (الف) الگوی شماتیک قرارگیری پودرها در بلوک (مس: خاکستری روشن، برنز: خاکستری تیره)، (ب) تصویر فراصوت حاصل از فانتوم (ج) تصویر حاصل از اعمال روش پیشنهادی این مقاله

نتایج حاصل حاکی از آن است که توابع تبدیل حاصل از روش پیشنهادی برای ضایعات هم نوع، یکسان و برای ضایعات غیرهم نوع، متفاوت به دست می آید و بر این اساس می توان از روش پیشنهادی برای شناسایی نوع ضایعات استفاده کرد. همچنین به خلاف روشهای موجود، روش پیشنهادی قابلیت تشخیص ضایعات ساده یا چندگانه را در فلزهایی با جنسهای مختلف و در اعماق مختلف نمونه ها داشته و دقت آن به عمق ایجاد ضایعه یا جنس محیط بستگی ندارد.

به علاوه دیدیم که استفاده از آمارگان مرتبه بالا برای شناسایی سیستم نیز به دلیل قابلیت حذف نویزهای گوسی و مقارن در برابر افزایش نویز آزمایشها تا ۵ dBW از خود پایداری نشان داده و در این روش برای حذف نویز، به متوسط گیری نیاز نیست که این امکان دستیابی به سیستم بی درنگ را فراهم می سازد. همچنین روش پیشنهادی نیازی به داشتن اطلاعاتی از توان نویز ندارد. لذا استفاده از آن برای تشخیص ضایعات میکرونی با استفاده از سیگنال فراصوت پراکنشی - که معمولاً دارای نسبت سیگنال به نویز کمی است - بسیار مفید است.

## ۵- منابع

- [1] N. J. Carino, "Nondestructive testing of concrete: History and challenges, concrete technology- past, present and future," Proc. Malhotra Symposium, pp. 623-678, 1994.
- [2] J. Krautkramer and H. Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, 4<sup>th</sup> ed. Springer-Verlag, pp. 160, 1990.
- [3] M. O'Donnell, "Quantitative broadband ultrasonic backscatter," J. Acoust. Soc. Amer., vol. 52, pp. 1056-1065, 1981.

- Proceedings of the International Conference on Electronic and Control Systems, pp. 60-63, 2003.
- [8] U. Qidwai, A. Yamani, and C. H. Chen, "H<sub>∞</sub> deconvolution for defect identification for ultrasonic NDE signals," Review of the Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 18, pp. 719-725, 1998.
- [9] J. M. Mendel, "Tutorial on higher order statistics (spectra) in signal processing and system theory: theoretical results and some applications," IEEE Proceedings, vol. 79, pp. 278-305, 1991.
- [10] R. Pan and C. L. Nikias, "The complex cepstrum of higher-order cumulants and non-minimum phase system identification," IEEE Transactions on ASSP, vol. 36, no. 2, pp. 185-205, 1988.
- [4] T. C. Hanshaw, M. J. Anderson, and C. S. Hsu, "An H<sub>∞</sub> deconvolution filter and its application to ultrasonic nondestructive evaluation of materials," Proc. American Control Conference, pp. 3878-3885, 1999.
- [5] S. Sin and C. H. Chen, "A comparison of deconvolution techniques for ultrasonic nondestructive evaluation of materials," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 1, pp. 3-10, 1992.
- [6] C. H. Chen, "A signal processing study of ultrasonic nondestructive evaluation of materials," Technical Report MTL TR 87-11, Material Technology Lab, 1987.
- [7] U. Qidwai and M. Bettayeb, "Deconvolution of ultrasonic NDT signals using N4SID algorithm for defect identification,"