

بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای به منظور بهبود الگوریتم فراصوت لیزری

سامان فرید سلطانی
کارشناس ارشد مهندسی پزشکی
دانشگاه تربیت مدرس
s_soltani_f@yahoo.com

علیرضا ناطقی
استادیار مهندسی برق
دانشگاه شهید ستاری
ar_nateghi@ssau.ac.ir

عبداله رستمی*
کارشناس ارشد مهندسی پزشکی
دانشگاه تربیت مدرس
abdollah.rostami@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲

چکیده

در روش فراصوت لیزری (تولید امواج فراصوت توسط لیزر) از حسگرهای نوری برای ثبت امواج فراصوت تولید شده بهره گرفته می‌شود. با توجه به اینکه حساسیت این حسگرها در مقایسه با آرایه‌های پیزوالکتریکی که در تصویربرداری فراصوت تماسی به منظور ثبت امواج فراصوت مورد استفاده واقع می‌شود، کم است، در نتیجه تصویر خروجی حاصل از این روش از کنتراست پایینی برخوردار می‌باشد. در این پژوهش به منظور بهبود کیفیت و کنتراست تصویر خروجی حاصل از روش فراصوت لیزری، از تکنیک‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای (فیلتر تطبیقی) استفاده شده است. به منظور ارزیابی کمی میزان بهبود فیلتر تطبیقی، از دو معیار فاکتور تمایز و مشتق تغییرات جانبی در وسط عیب استفاده شد. بررسی معیار فاکتور تمایز اثبات کننده این حقیقت است که روش پیشنهادی توانسته حدود ۵۰٪ سیگنال به نویز را نسبت به حالت عدم بهره‌گیری از فیلتر تطبیقی بهبود دهد. از مقایسه معیار مشتق تغییرات جانبی در وسط عیب، قابل نتیجه‌گیری است که روش پیشنهادی توانسته لبه‌های عیب را به طور میانگین ۵۴/۲٪ بهتر از حالت عدم استفاده از تکنیک‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای بازیابی کند.

واژگان کلیدی: تکنولوژی فراصوت لیزری، فیلتر تطبیقی، لیزر، کنتراست، سیگنال به نویز

۱. مقدمه

محدوده امواج فراصوت می‌باشد. از آن زمان به بعد لیزر برای تولید امواج فراصوت در مواد جامد، مایع و گاز مورد استفاده قرار گرفت. آی هارا و همکاران دریافتند که امواج

پدیده فراصوت لیزری^۱ اولین بار توسط وایت (۱۹۶۳) نشان داده شد [۱]. او اثبات کرد که تابش نور لیزر به سطح اجسام می‌تواند باعث تولید موج فشاری شود که فرکانس آن در

فراصوت تولیدی ناشی از برهم‌کنش تابش لیزر با سطح تحت مطالعه دارای اطلاعات مفیدی از جسم تحت مطالعه می‌باشد [۲]. این اطلاعات می‌تواند شامل دما، ضخامت جسم تحت مطالعه و خواص فیزیکی آن باشد. آنها یک روش کاملاً غیرتماسی براساس تکنولوژی فراصوت لیزری برای اندازه‌گیری دمای سطح جسم پیشنهاد کردند. آنها اثبات کردند که دمای جسم تحت مطالعه با سرعت صوت منتشر شده در آن رابطه دارد. بر همین اساس موفق به اندازه‌گیری دمای سطح جسم تحت مطالعه با استفاده از سرعت صوت در آن جسم شدند. این پژوهش از آنجا حائز اهمیت بود که یک روش کاملاً غیرتماسی برای بررسی خواص اجسام معرفی شد که باعث حل مشکلات ثبت‌های تماسی‌ای که دانشمندان با آن روبه‌رو بودند، شد. این مشکلات به‌صورت زیر خلاصه می‌شوند:

۱. مقدار زیادی از انرژی موج تحریک در هنگام ورود به جسم تحت مطالعه، به دلیل عدم تطابق دو محیط داخل و خارج جسم، از دیواره جسم بازتاب خواهد شد [۳].
۲. نصب و راه‌اندازی مبدل‌ها و کابل‌کشی آنها می‌تواند پرهزینه باشد به‌خصوص زمانی که تعداد مبدل‌ها افزایش پیدا کند باعث شلوغی مجموعه خواهد شد.
۳. در ثبت‌های تماسی باید جسم تحت مطالعه در دسترس باشد که در صنعت همیشه این امکان وجود ندارد.
۴. همه مبدل‌ها قابلیت استفاده در محیط‌های سخت یا با دمای بالا را ندارند.

در مرجع [۴] ضخامت لایه‌ی پوشش قرار گرفته شده روی سطح جسم تحت مطالعه با استفاده از تکنولوژی فراصوت لیزری اندازه‌گیری شد. در این پژوهش با اعمال اختلاف فاز به پالس‌های تحریک و تحلیل طیف فرکانسی امواج فراصوت تولیدی در سطح جسم تحت مطالعه، ضخامت پوشش جسم تحت مطالعه اندازه‌گیری شده است. در مرجع [۵] یک روش برای اندازه‌گیری ضخامت فلز آلومینیوم

پیشنهاد شده است. این روش براساس استخراج سرعت طولی موج فراصوت منتشر شده در سطح فلز عمل می‌کند. در این پژوهش فرکانس متناسب با پیک‌های موجود در طیف فرکانسی امواج فراصوت تولید شده ثبت شده‌اند و اثبات شده است که از روی این فرکانس‌ها می‌توان به سرعت طولی موج فراصوت دست یافت.

یک کاربرد دیگر تکنولوژی فراصوت لیزری، استفاده از آن برای تصویرگری و تشخیص‌های بصری می‌باشد تا به کاربران غیرحرفه‌ای کمک کند که با دید بصری به‌وجود مشکلات در جسم تحت مطالعه پی‌برند. در [۶] یوو و همکاران روش فراصوت لیزری را برای تشخیص ضایعه در جسم تحت مطالعه، با پردازش سیگنال‌های فراصوت تولید شده و تشکیل تصویر خروجی مورد استفاده قرار دادند. مشکل عمده روش آنها این بود که فقط قادر به تشخیص محل وجود ضایعه بود و استخراج اطلاعات در مورد اندازه ضایعه دشوار بود. علت دشوار بودن تشخیص اندازه ضایعه این است که تصویر تشکیل داده شده در خروجی، از کیفیت لازم برای این کار برخوردار نبود. با توجه به اینکه در روش فراصوت لیزری از دیتکتورهای نوری برای اندازه‌گیری امواج فراصوت تولید شده حاصل از برخورد پالس لیزر به سطح فلز استفاده می‌شود و حساسیت این حسگرها در مقایسه با آرایه‌های پیزوالکتریکی که برای ثبت امواج فراصوت، در تصویربرداری فراصوت مورد استفاده واقع می‌شوند خیلی کمتر است در نتیجه تصویر خروجی دارای کنتراست مناسب نیست [۷]. در پردازش تصویر فراصوت کارایی فیلتر تطبیقی در حذف لوب‌های فرعی و بهبود کنتراست تصویر خروجی اثبات شده است [۸]. مقصود از انجام این پژوهش دنبال کردن اهداف زیر می‌باشد:

۱. پیاده‌سازی تجربی پدیده فراصوت لیزری و اثبات کارایی آن برای تشخیص ضایعات در فلزات به‌صورت کاملاً غیر تماسی.

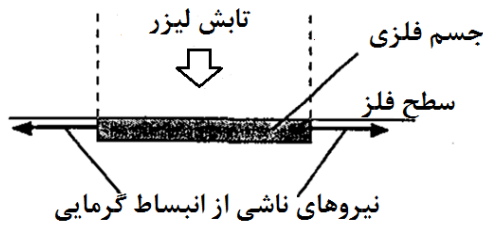
۲. اثبات کاربرد روش‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای (فیلتر تطبیقی) در بهبود کیفیت و کنتراست روش تصویربرداری فراصوت لیزری.

ساختار این پژوهش در ادامه به صورت زیر می‌باشد: در بخش ۲، تئوری الگوریتم فراصوت لیزری بررسی خواهد شد. در بخش ۳، روش پیشنهادی توضیح داده خواهد شد. بخش ۴، شامل نتایج و بحث می‌باشد و نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه شده است.

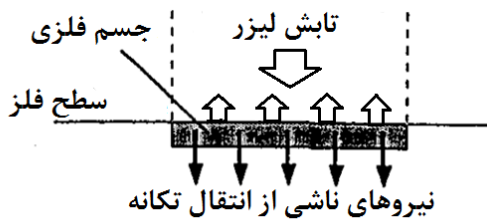
۲. تئوری الگوریتم فراصوت لیزری

پدیده فراصوت لیزری (تولید امواج فراصوت توسط لیزر) در دو حالت ترموالاستیک^۲ و فرسایشی^۳ انجام می‌شود. تولید امواج فراصوت در هر یک از این حالت‌ها به انرژی موج تابشی لیزر بستگی دارد. اگر انرژی تابش لیزر به اندازه کافی پایین باشد که برخورد آن به سطح جسم تحت مطالعه باعث ذوب و تبخیر ذرات سطح آن موضع از ماده نشود، در نتیجه‌ی برخورد تابش لیزر به سطح تحت مطالعه، مقداری از انرژی تابش لیزر جذب سطح می‌شود و این توان تابشی به گرما تبدیل می‌شود. افزایش سریع دمای آن موضع از جسم تحت مطالعه، باعث انبساط گرمایی سطح می‌شود که به نوبه‌ی خود باعث به وجود آمدن یک میدان تنش الاستیک گذرا در جسم تحت مطالعه خواهد شد. انتقال این میدان در ماده به صورت موج فراصوت قابل ثبت است.

این حقیقت در شکل ۱-الف) نشان داده شده است. اگر توان لیزر به حدی زیاد باشد که باعث تبخیر ذرات سطح آن موضع از جسم تحت مطالعه شود، در نتیجه در این حالت یک لایه پلازما در بالای محل تعامل لیزر با جسم تحت مطالعه تشکیل خواهد شد و در اثر انتقال تکانه^۴ حاصل از برخورد ذرات تبخیر شده، موج فشاری در جسم تحت مطالعه منتشر خواهد شد که فرکانس آن در گروه امواج فراصوت می‌باشد. شکل ۱-ب) بیانگر نحوه تولید امواج فراصوت در حالت فرسایشی است.



شکل ۱. الف): تولید امواج فراصوت در سطح جامدات در حالت ترموالاستیک



شکل ۱. ب): تولید امواج فراصوت در سطح جامدات در حالت فرسایشی

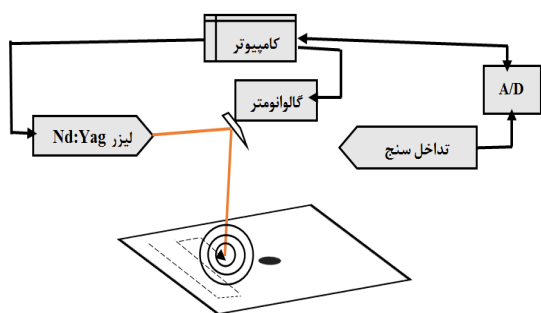
یکی از مزیت‌های مهمی که روش فراصوت لیزری دارد این است که ارتعاش به وجود آمده در سطح ماده، بدون اینکه موج صوتی تحت تأثیر قرار گیرد از راه دور قابل ثبت می‌باشد. همین خصوصیت باعث شده است که اسکن و ثبت در روش فراصوت لیزری به صورت غیرتماسی انجام شود. روش فراصوت لیزری به دلیل غیرتماسی بودن اسکن و ثبت امواج فراصوت، یک روش بسیار مفید برای تست‌های غیر مخرب^۵ و آزمایش‌هایی که تماس مبدل به سطح جسم تحت مطالعه ممکن است باعث تغییر خواص آن شود، می‌باشد. در این وضعیت، بیشتر حالت ترموالاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا حالت فرسایشی ممکن است باعث آسیب به جسم تحت مطالعه در اثر انتقال توان تابشی زیاد و تشکیل لایه پلازما روی سطح آن شود.

۳. روش پیشنهادی

در این پژوهش به منظور بررسی میزان بهبود روش فیلتر تطبیقی در سرکوب نویز و بهبود سیگنال به نویز الگوریتم فراصوت لیزری، از یک سیستم عملی استفاده شد. شکل ۲، شماتیک سیستم عملی مورد استفاده واقع شده را نشان می‌دهد. این سیستم از یک لیزر پالسی Nd:Yag با قطر ۰/۵ میلی‌متر، طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و توان اسمی ۲۰ وات، گالوانومتر برای عوض کردن محل اسکن روی فلز، فلز فولاد با اندازه ۱۲×۲۰۰×۴۰۰ میلی‌متر همراه با یک عیب ایجاد شده به شعاع ۱ میلی‌متر، لیزر تداخل سنج^۶ برای دریافت و ثبت امواج فراصوت، مبدل آنالوگ به دیجیتال و کامپیوتر شخصی برای ارسال دستور به گالوانومتر به منظور چرخش آن و ارسال دستور به لیزر ارسال برای تحریک آن تشکیل شده است. لیزر ارسال دارای پالس‌های کوتاه با انرژی زیاد می‌باشد. برای این کاربرد می‌توان از لیزرهای کیوسوییچ^۷ یا Nd:Yag استفاده کرد. موج این لیزرها در محدوده مادون قرمز نزدیک، با طول موج حدود ۱۰۶۴ نانومتر، طول هر پالس ۵-۱۰ نانو ثانیه و انرژی در حد چند صد میلی‌ژول است. در این پژوهش، بناست به‌وسیله لیزر سطح فلز مورد مطالعه اسکن شود. امواج فراصوت تولید شده حاصل از تعامل نور لیزر با سطح فلز ثبت و ذخیره شوند. برای این منظور از یک لیزر پالسی Nd:Yag با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و توان اسمی ۲۰ وات به‌عنوان لیزر تحریک استفاده شد. با توجه به اینکه لیزر مورد استفاده واقع شده دارای توان پایین بود، در نتیجه اسکن و تولید امواج فراصوت در حالت ترموالاستیک انجام شد. بعد از انتشار امواج فراصوت در سطح فلز، نیاز به ثبت آنها می‌باشد.

در این پژوهش به منظور ثبت امواج فراصوت تولید شده از لیزر تداخل سنج استفاده شد. لیزر تداخل سنج برای اندازه‌گیری دقیق جابه‌جایی، زاویه و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع لیزر از یک طول موج کوچک، دقیق و

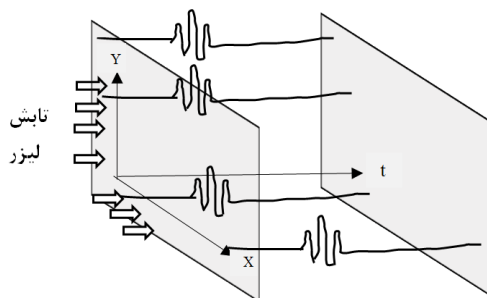
پایدار به‌عنوان واحد اندازه‌گیری استفاده می‌شود. طرز کار تداخل سنج به این صورت است که با یک فرکانس مشخص به سمت تداخلات به‌وجود آمده (در اینجا امواج فراصوت تولید شده) تاییده خواهد شد. برخورد این فرکانس به امواج فراصوت در حال حرکت، باعث شیفت فرکانسی موج بازگشتی خواهد شد. این شیفت فرکانسی طبق رابطه داپلر متناسب با سرعت حرکت موج فراصوت می‌باشد. در نتیجه این سرعت می‌تواند به جابه‌جایی تبدیل شود. در مرحله بعد امواج فراصوت ثبت شده، به منظور تشکیل تصویر خروجی مورد پردازش قرار می‌گیرند. این پردازش شامل اعمال فیلتر تطبیقی و اعمال تأخیر مناسب به منظور بازیابی شدت روشنایی مربوط به هر پیکسل از محیط تصویر می‌باشد.



شکل ۲. شماتیک سیستم آزمایش

شکل ۳، مدار عملی مورد استفاده واقع شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در سیستم عملی، تداخل سنج در فاصله ۳۰ میلی‌متر از ناحیه اسکن قرار گرفت که وظیفه آن ثبت پالس‌های فراصوت تولید شده در سطح فلز توسط لیزر می‌باشد. به منظور اسکن فلز فولاد، نقاط کانونی به فاصله ۰/۲ میلی‌متر از هم قرار گرفتند در نتیجه تداخل سنج از اسکن کل محیط مورد مطالعه، ۱۵۰×۷۵ شکل موج جمع‌آوری کرد که در سیستم عملی پیشنهاد شده، این اسکن حدود ۱۰ دقیقه طول کشید.

نمونه متناسب با آن تأخیر را نتیجه خواهد داد. از شکل موج قرار گرفته شده در نقطه کانونی، نمونه مورد نظر برداشته شد و مقدار این نمونه به عنوان شدت مربوط به نقطه کانونی در نظر گرفته شد. اگر این کار برای تمامی پیکسل‌های محیط اسکن انجام شود تصویر نهایی تشکیل خواهد شد.



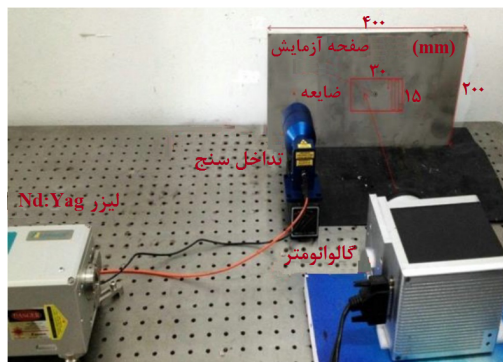
شکل ۵. نمایش سه بعدی شکل موج‌های ثبت شده توسط تداخل سنج

۳.۱/۰ فیلتر تطبیقی

فیلتر تطبیقی در پردازش سیگنال آرایه‌ای، به منظور ماکزیمم کردن سیگنال به نویز (SNR) خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر فرض شود که سیگنال دریافتی با تداخل سنج نمایش داده شود آنگاه فیلتر تطبیقی به صورت کانولوشن $x(t)$ با گانجوگیت زمان معکوس آن $x^*(-t)$ تعریف می‌شود. خروجی فیلتر تطبیقی در حوزه فرکانس به صورت زیر قابل بازنویسی است [۹].

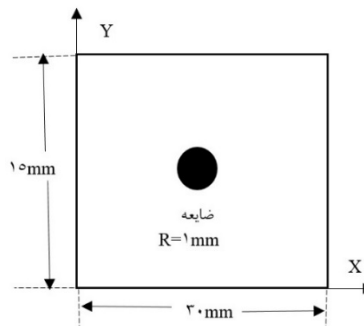
$$m.f = \text{ifft}(X(f).X^*(f)) \quad (1)$$

که در آن، $X(f)$ تبدیل فوریه سیگنال $x(t)$ ، 0 نماد ضرب، $X^*(f)$ بیانگر مزدوج تبدیل فوریه سیگنال $x(t)$ و ifft بیانگر عکس تبدیل فوریه سریع می‌باشند. در این پژوهش از فیلتر تطبیقی به منظور بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های ثبت شده توسط تداخل سنج استفاده شد. شکل ۶، خروجی اعمال فیلتر تطبیقی به سیگنال زمانی فراصوت تجربی را نشان می‌دهد. از شکل واضح است که اعمال فیلتر تطبیقی باعث شده که سیگنال به نویز سیگنال فراصوت ۱۰



شکل ۳. مدار عملی مورد استفاده واقع شده در این پژوهش

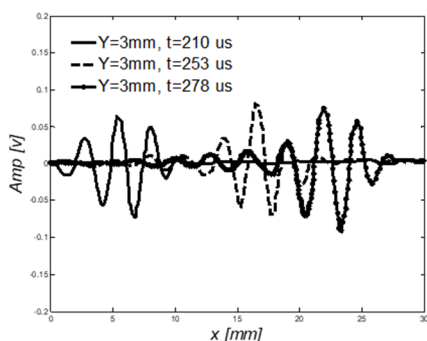
عیب ایجاد شده و نحوه اسکن فلز فولاد در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل واضح است که یک عیب به شعاع ۱ میلی‌متر در وسط صفحه فلزی فولادی قرار داده شده است. همچنین حول این عیب، مساحت 30×15 میلی‌متر مربع با استفاده از لیزر تداخل سنج اسکن شد. تداخل سنج در مجموع از امواج فراصوت دریافتی ۱۰۱۲ نمونه و به فاصله هر $0.5 \mu\text{s}$ یک نمونه، نمونه‌برداری کرده است.



شکل ۴. شماتیک صفحه فلزی فولاد مورد مطالعه با عیب موجود در آن

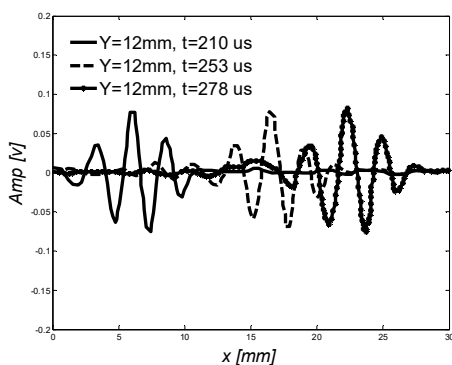
به منظور سادگی و اعمال تأخیر دقیق، شکل موج‌های ثبت شده توسط تداخل سنج، در یک مکعب براساس سه بعد طول، عرض و زمان همانند شکل ۵ ذخیره شده‌اند. برای تأخیر مجموعه داده ثبت شده به منظور تشکیل تصویر، اگر زمانی که موج لازم دارد تا از لیزر Nd:Yag ارسال به گالوانومتر و از آنجا به پیکسل واقع شده در نقطه کانونی و از آنجا جذب تداخل سنج شود به عنوان کل زمان حرکت موج در نظر گرفته شود. ضرب این زمان در فرکانس نمونه‌برداری تداخل سنج،

خود برمی‌گردد که نشان‌دهنده دور شدن از عیب می‌باشد. نکته مهمی که از شکل ۷-ب) قابل نتیجه‌گیری می‌باشد این است که در مرز شروع تعامل لیزر با عیب تا اتمام این تعامل، پهنای شکل موج دقیقاً ۲ میلی‌متر می‌باشد و این متناسب با قطر عیب است.



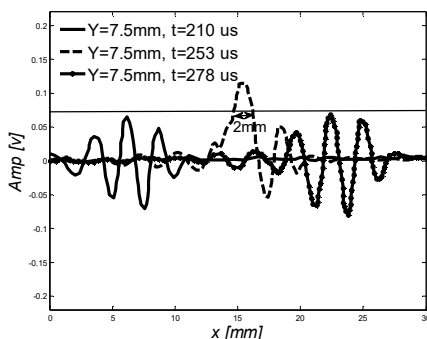
شکل ۷. الف): تغییرات موج فراصوت در $Y=3$ میلی‌متر و

زمان‌های مختلف



شکل ۷. ب): تغییرات موج فراصوت در $Y=12$ میلی‌متر و

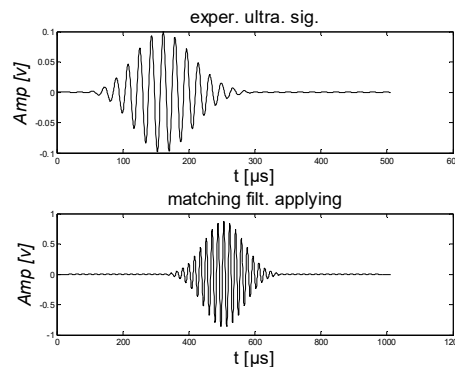
زمان‌های مختلف



شکل ۷. پ): تغییرات موج فراصوت در $Y=7/5$ میلی‌متر و

زمان‌های مختلف (عدم استفاده از فیلتر تطبیقی)

برابر شود. بهبود سیگنال به نویز در حوزه فراصوت باعث بهبود کنتراست می‌شود. بهبود کنتراست به معنی افزایش فاصله بین سیاهی و سفیدی تصویر فراصوت می‌باشد در نتیجه لبه‌های عیب موجود در فلز مشخص‌تر خواهند شد.



شکل ۶. اعمال فیلتر تطبیقی به سیگنال فراصوت تجربی

۴. نتایج و بحث

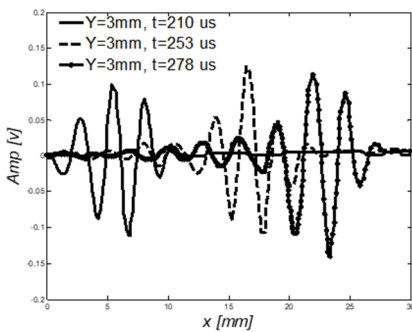
شکل ۷، شکل موج‌های فراصوت ثبت شده توسط تداخل‌سنج در زمان‌ها و Y های مختلف برای حالت عدم استفاده از فیلتر تطبیقی به منظور بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های ثبت شده توسط تداخل‌سنج را نشان می‌دهد. از شکل واضح است که برای حالت‌هایی (شکل‌های ۷-الف) و ۷-ب)) که لیزر تعامل خود با عیب را شروع نکرده است تغییرات خاصی در شکل موج‌ها به ازای زمان‌های مختلف دیده نمی‌شود و تغییرات آنها عادی می‌باشد. در تمامی حالات دامنه ماکزیمم 0.065 ولت حفظ شده است. شکل ۷-پ) تغییرات موج فراصوت را در $Y=7/5$ میلی‌متر برای زمان‌های $210 \mu s$ ، $253 \mu s$ و $278 \mu s$ نشان می‌دهد. از شکل واضح است که در زمان $t=210 \mu s$ که لیزر از لحاظ زمانی، تعامل با عیب را شروع نکرده است در شکل موج فراصوت ثبت شده تغییر خاصی اتفاق نیافتاده است. در زمان $t=253 \mu s$ ، تغییرات ناگهانی اما نه چندان شدیدی در شکل موج ثبت شده اتفاق افتاده است که احتمالاً بیانگر شروع تعامل لیزر با عیب موجود در فلز می‌باشد. با گذشت زمان در $t=278 \mu s$ شکل موج خروجی به حالت قبلی

این نتایج مربوط به حالتی است که از فیلتر تطبیقی به منظور بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های ثبت شده تداخل سنج استفاده نشده است.

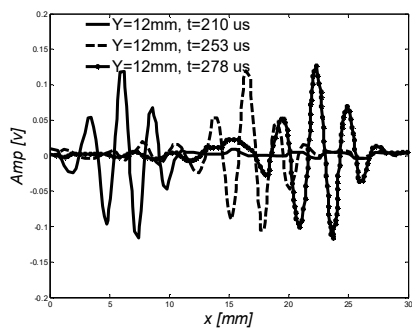
شکل ۸ شکل موج‌های فراصوت ثبت شده توسط تداخل سنج را در زمان‌ها و Y های مختلف برای حالت استفاده از فیلتر تطبیقی به منظور بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های ثبت شده توسط تداخل سنج را نشان می‌دهد. از شکل واضح است که برای حالت‌هایی (شکل‌های ۸-الف) و ۸-ب)) که لیزر تعامل خود با عیب را شروع نکرده است تغییرات خاصی در شکل موج‌ها به ازای زمان‌های مختلف دیده نمی‌شود و تغییرات آنها عادی می‌باشد. در تمامی حالات دامنه ماکزیمم $V/10$ حفظ شده است.

شکل ۸-پ)) تغییرات موج فراصوت را در $Y=7/5$ میلی‌متر، برای زمان‌های $210 \mu s$ ، $253 \mu s$ ، $278 \mu s$ و $278 \mu s$ نشان می‌دهد. از شکل واضح است که در زمان $t=210 \mu s$ که لیزر از لحاظ زمانی، تعامل با عیب را شروع نکرده است در شکل موج فراصوت ثبت شده تغییر خاصی اتفاق نیافتاده است. در زمان $t=253 \mu s$ ، تغییر محسوسی در شکل موج ثبت شده اتفاق افتاده است که بیانگر تعامل لیزر با عیب موجود در فلز می‌باشد. با گذشت زمان در $t=278 \mu s$ شکل موج خروجی به حالت قبلی خود بر می‌گردد که نشان‌دهنده دور شدن از عیب می‌باشد. نکته مهمی که از شکل ۸-پ) قابل نتیجه‌گیری می‌باشد این است که در مرز شروع تعامل لیزر با عیب تا اتمام این تعامل، پهنای شکل موج دقیقاً ۲ میلی‌متر می‌باشد و این متناسب با قطر عیب است. این نتایج مربوط به حالتی است که از فیلتر تطبیقی به منظور بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های ثبت شده تداخل سنج استفاده شده است. درحالتی که پیش پردازش‌های لازم به منظور بهبود سیگنال به نویز روی سیگنال‌های دریافتی تداخل سنج انجام نشده است در مرز شروع تعامل لیزر با عیب چه از نظر زمانی و چه از نظر مکانی تغییر محسوسی در مقایسه با حالتی که هنوز

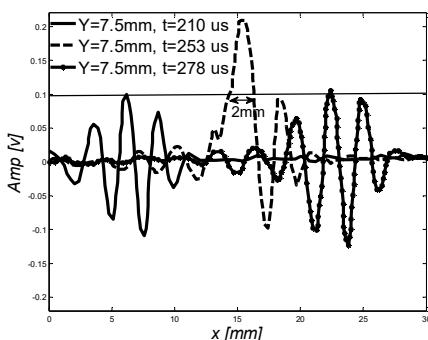
لیزر تعامل خود با عیب را شروع نکرده است اتفاق نیافتاده است و تشخیص محل شروع تعامل لیزر با عیب مشکل می‌باشد. از مقایسه شکل‌های ۷-پ) و ۸-پ) قابل نتیجه است که روش پیشنهادی به خوبی توانسته مرز شروع تعامل لیزر با عیب را مشخص سازد و تفاوت معنادار دامنه بین شروع و عدم شروع تعامل لیزر با عیب وجود دارد.



شکل ۸ (الف): تغییرات موج فراصوت در $Y=3$ میلی‌متر و زمان‌های مختلف

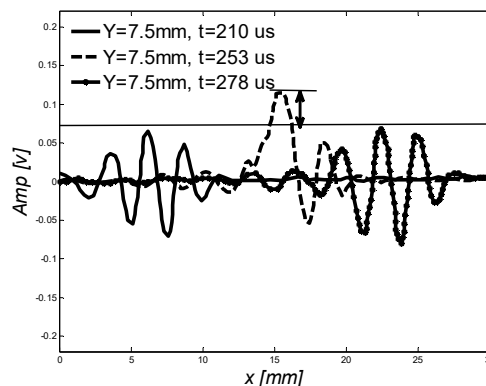


شکل ۸ (ب): تغییرات موج فراصوت در $Y=12$ میلی‌متر و زمان‌های مختلف

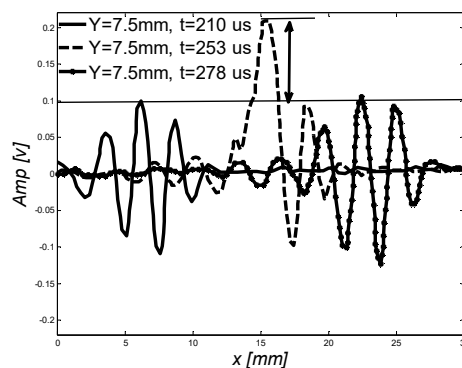


شکل ۸ (پ): تغییرات موج فراصوت در $Y=7/5$ میلی‌متر و زمان‌های مختلف (عدم استفاده از فیلتر تطبیقی)

به منظور ارزیابی کمی میزان بهبود فیلتر تطبیقی در سرکوب نویز و بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های ثبت شده توسط تداخل‌سنج از معیار فاکتور تمایز^۱ (DF) استفاده شده است. معیار فاکتور تمایز به صورت اختلاف بین پیک سیگنال در حالتی که لیزر تعامل خود با عیب را شروع کرده است نسبت به پیک سیگنال در حالتی که لیزر تعامل خود با عیب را شروع نکرده است تعریف می‌شود. پیک سیگنال در حالتی که لیزر تعامل خود با عیب را شروع نکرده است به نوعی بیانگر مرز غالب شدن دامنه سیگنال برای حالت شروع تعامل با عیب نسبت به حالت عدم شروع تعامل با آن می‌باشد [۱۰]. معیار DF برای دو حالت استفاده از فیلتر تطبیقی و عدم استفاده از آن در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. الف): تغییرات موج فراصوت در $Y=7/5$ میلی‌متر و زمان‌های مختلف برای حالت عدم استفاده از فیلتر تطبیقی



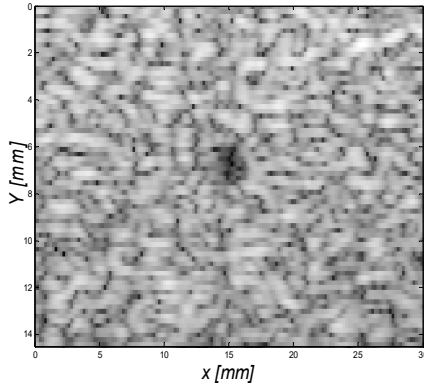
شکل ۹. ب): تغییرات موج فراصوت در $Y=7/5$ میلی‌متر و زمان‌های مختلف برای حالت استفاده از فیلتر تطبیقی.

مقایسه معیار DF برای دو حالت استفاده از فیلتر تطبیقی و عدم استفاده از آن در خروجی تداخل‌سنج، در جدول ۱ گزارش شده است. از جدول مشخص است که روش پیشنهادی توانسته حدود ۵۰٪ سیگنال به نویز را نسبت به حالت عدم بهره‌گیری از فیلتر تطبیقی بهبود دهد. بهبود سیگنال به نویز به معنی بهبود کنتراست می‌باشد. بهبود کنتراست به معنی افزایش فاصله بین سیاهی و سفیدی شدت روشنایی در تصویر است و این معیار باعث بهبود روش در بازیابی لبه‌های عیب خواهد شد.

جدول ۱. مقایسه معیار DF برای دو حالت استفاده از فیلتر تطبیقی و عدم استفاده از آن

حالت استفاده از فیلتر تطبیقی	پیک سیگنال در حالت شروع تعامل لیزر با عیب	پیک سیگنال در حالت عدم شروع تعامل لیزر با عیب	حالت استفاده از فیلتر تطبیقی
۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۶۰	حالت عدم استفاده از فیلتر تطبیقی
۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۱۰	حالت استفاده از فیلتر تطبیقی

شکل ۱۰، تصویر خروجی تشکیل داده شده بعد از اعمال تأخیر مناسب برای دو حالت بهره‌گیری از فیلتر تطبیقی و عدم استفاده از آن برای بهبود سیگنال به نویز خروجی را نشان می‌دهد. از شکل واضح است که تصویر خروجی یک عیب به شعاع ۱ میلی‌متر و مرکز (۱۵، ۷/۵) میلی‌متر بازیابی کرده است که متناسب با عیب اصلی قرار داده شده در صفحه فلز است. به وضوح مشخص است که اولاً سیاهی عیب در روش پیشنهادی بهتر از روش عدم بهره‌گیری از فیلتر تطبیقی به منظور بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های دریافت شده تداخل‌سنج است. دوماً روش پیشنهادی مرز عیب با اسپیکل زمینه را بسیار واضح‌تر و دقیق‌تر از روش عدم بهره‌گیری از فیلتر تطبیقی به منظور بهبود سیگنال به نویز،



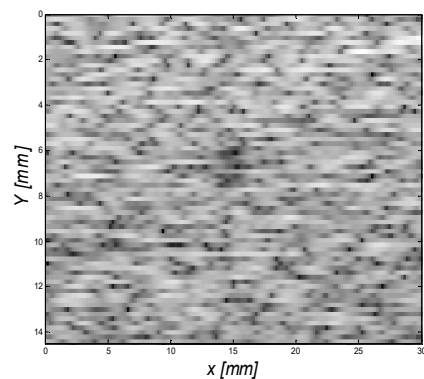
شکل ۱۰. (ب) تصویر نهایی تشکیل شده حاصل از اسکن صفحه فلز در حالت استفاده از فیلتر تطبیقی در خروجی تداخل سنج

برای تنظیم این حوزه دینامیکی به مقدار شدت هر کدام از پیکسل‌ها 0.1 اضافه شد و از آنها $20 \log A$ گرفته شد. مقایسه تغییرات جانبی^{۱۰} شکل ۱۰ برای دو حالت استفاده از فیلتر تطبیقی و عدم استفاده از آن برای بهبود سیگنال به نویز، در وسط عیب و برای فاصله $13/5$ میلی‌متر تا $16/5$ میلی‌متر در شکل ۱۱ رسم شده است. در شکل، نمودارهای پایین مربوط به تغییرات جانبی برای دو حالت استفاده از فیلتر تطبیقی و عدم استفاده از آن می‌باشند و نمودارهای بالا مشتق آنها می‌باشند. به منظور مشخص تر شدن میزان بهبود روش پیشنهادی در بازیابی مرز عیب نسبت به حالت عدم بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای برای بهتر شدن سیگنال به نویز در خروجی تداخل سنج، از مشتق تغییرات جانبی در وسط عیب استفاده شد.

از شکل واضح است که روش پیشنهادی در محل عیب (فاصله $14-16$ میلی‌متر) دارای یک فرورفتگی به طول 2 میلی‌متر است که متناسب با قطر عیب است. این فرورفتگی درحالتی که از فیلتر تطبیقی در خروجی تداخل سنج استفاده نشده است خیلی کم‌رنگ‌تر و ناواضح‌تر است. مقایسه مشتقات تغییرات جانبی در وسط عیب در شکل ۱۱ با قلم پر رنگ و در بالای شکل نشان داده شده است. از شکل واضح است درحالتی که از فیلتر تطبیقی برای بهبود سیگنال به نویز

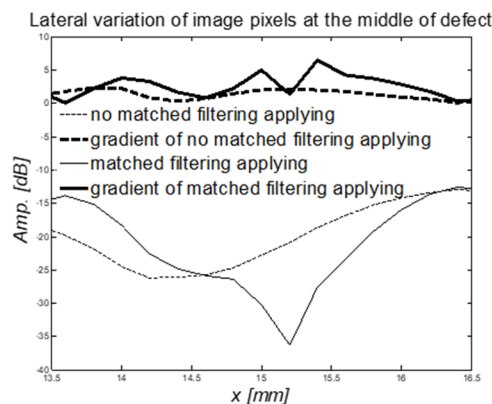
بازیابی کرده است. هر دو نتیجه ذکر شده بالا ناشی از این حقیقت هستند که روش پیشنهادی کنتراست تصویر خروجی را بهبود داده است. کنتراست در پردازش تصویر فراصوت به معنی اختلاف میانگین شدت روشنایی در داخل کیست سیاه نسبت به خارج آن تعریف می‌شود [۱۱]. اگر این تعریف برای داخل و خارج عیب توسعه داده شود می‌توان ادعا کرد که چون روش پیشنهادی ناحیه داخل عیب را سیاه‌تر کرده است و شدت روشنایی ناحیه خارج آن را تقریباً ثابت نگه داشته است در نتیجه کنتراست بهتری نتیجه داده است. این نتیجه ناشی از این حقیقت است که اعمال فیلتر تطبیقی به تصویر خروجی باعث بهبود سیگنال به نویز تصویر خواهد شد. سرکوب نویز اسپکل زمینه باعث اثر بیشتر سیگنال اصلی در تشکیل تصویر خواهد شد در نتیجه انتظار می‌رود که تصویر خروجی بهبود یابد.

به منظور مقایسه کمی شکل‌های ۱۰-الف) و ۱۰-ب) و کمی‌سازی میزان بهبود روش پیشنهادی، تغییرات جانبی در وسط عیب در شکل ۱۱ رسم شده است. در این پژوهش به منظور تمایز بیشتر شدت‌های روی هر پیکسل از تصویر، حوزه دینامیکی^۹ تغییرات شدت روشنایی 40 dB تنظیم شد. منظور از حوزه دینامیکی یعنی حوزه تغییرات شدت روشنایی پیکسل‌های تصویر به بازه بین 0 تا -40 dB نگاشت شد.



شکل ۱۰. الف) تصویر نهایی تشکیل شده حاصل از اسکن صفحه فلز در حالت عدم استفاده از فیلتر تطبیقی در خروجی تداخل سنج

سیگنال‌های تداخل‌سنج استفاده شده است مشتق در مرز عیب با نویز اسپکول زمینه، بالاتر از حالت عدم استفاده از فیلتر تطبیقی قرار گرفته است که به معنی اختلاف بیشتر شدت‌های داخل و خارج مرز عیب در روش پیشنهادی است و به نوعی اثبات‌کننده کنتراست بهتر روش پیشنهادی می‌باشد.



شکل ۱۱. مقایسه تغییرات جانبی در وسط عیب برای شکل ۱۰

جدول ۲ مقایسه بین مقادیر مشتق در مرزهای راست و چپ عیب برای روش پیشنهادی و حالت عدم استفاده از فیلتر تطبیقی در خروجی تداخل‌سنج را نشان می‌دهد. از جدول قابل نتیجه‌گیری است که روش پیشنهادی توانسته لبه‌های چپ و راست عیب را به ترتیب ۴۱/۹٪ و ۶۶/۴٪ بهتر از حالت عدم استفاده از روش‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای در خروجی تداخل‌سنج بازبایی کند.

جدول ۲. مقایسه مشتقات تغییرات جانبی در وسط عیب برای دو حالت استفاده و عدم استفاده از فیلتر تطبیقی در خروجی

تداخل‌سنج

حالت	مقدار مشتق در لبه چپ عیب	مقدار مشتق در لبه راست عیب
حالت عدم استفاده از فیلتر تطبیقی	۲/۱۷	۰/۹۲
حالت استفاده از فیلتر تطبیقی	۳/۷۴	۲/۷۷

در مقایسه با سایر مراجع قبلی، روش پیشنهادی در این پژوهش قادر است که علاوه بر مکان وجود ضایعه، اندازه ضایعه را هم به‌طور دقیق بازبایی کند. این در حالی است که در مراجع قبلی ([۶] و [۱۲]) به دلیل کیفیت پایین تصاویر حاصل از روش فراصوت لیزری، که علت اصلی آن عدم بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای برای جبران حساسیت پایین حسگرهای نوری برای ثبت امواج فراصوت تولید شده در سطح جسم تحت مطالعه بود، امکان استخراج اطلاعات در مورد اندازه ضایعه غیرممکن بود. نتایج بیانگر این حقیقت هستند که بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای می‌تواند حساسیت حسگرهای نوری در روش تصویرگری فراصوت لیزری، برای تشخیص لبه‌های ضایعه را حدود ۵۴/۲٪ بهبود بخشند.

برخلاف روش غوطه‌وری فراصوت^[۱۳]، روش پیشنهادی در این پژوهش برای ثبت اکوهای بازگشتی نیازی به ظرف آب و همچنین در دسترس بودن هر دو طرف جسم تحت مطالعه ندارد. در نتیجه می‌تواند برای تشخیص عیب اجسام با هر اندازه و قطری مورد استفاده قرار گیرد. روش غوطه‌وری فراصوت یک روش غیرتماسی برای تشخیص عیب‌های موجود در فلزات است که در آن به‌منظور تطابق امپدانسی بین هوا و سطح فلزات، مبدل ارسال، دریافت و جسم تحت مطالعه داخل یک ظرف آب قرار می‌گیرند. اساس روش غوطه‌وری فراصوت، ناهمگنی امپدانسی است زیرا هنگامی که موج فراصوت در یک محیط همگن منتشر می‌شود اکویی منعکس نخواهد شد. برخورد موج فراصوت به فصل مشترک شروع عیب و جسم تحت مطالعه، باعث بازگشت بخشی از انرژی موج فراصوت خواهد شد که از روی بررسی اکوهای بازگشتی می‌توان به عمق و سائز عیب موجود در فلزات پی‌برده شود.

۵. نتیجه‌گیری

فیلتر تطبیقی قرار گرفته است که به معنی اختلاف بیشتر شدت‌های داخل و خارج مرز عیب در روش پیشنهادی است. اگرچه روش پیشنهادی بهبود قابل قبولی نسبت به حالت عدم استفاده از روش‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای در خروجی تداخل‌سنج داشت اما تحقیقات آینده می‌تواند روی ارائه راهکارهایی برای تقویت بیشتر این بهبود و سرکوب بیشتر نویز متمرکز شوند. این راهکارها می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- ۱- بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال دیگر مانند روش تبدیل سینوسی/کسینوسی گسسته به جای فیلتر تطبیقی.
- ۲- کم کردن فاصله نقاط کانونی از هم در هنگام اسکن.
- ۳- جابه‌جایی محل قرار گرفتن تداخل‌سنج برای به دست آوردن بهترین تصویر خروجی.

در این پژوهش از لیزر به‌منظور تولید امواج فراصوت و از امواج فراصوت تولید شده و روش‌های پردازش سیگنال آرایه‌ای به‌منظور بهبود تصویر خروجی حاصل از روش فراصوت لیزری استفاده شد. نتایج بیانگر این حقیقت هستند که اولاً سیاهی عیب در روش پیشنهادی بهتر از روش عدم بهره‌گیری از فیلتر تطبیقی به‌منظور بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های ثبت شده تداخل‌سنج است. دوماً روش پیشنهادی مرز عیب با اسپکل زمینه را بسیار واضح‌تر و مشخص‌تر از روش عدم بهره‌گیری از فیلتر تطبیقی به‌منظور بهبود سیگنال به نویز، بازیابی کرده است. هر دو نتیجه ذکر شده بالا ناشی از این حقیقت هستند که روش پیشنهادی کنتراست تصویر خروجی را بهبود داده است. از مقایسه مشتقات تغییرات جانبی در وسط عیب قابل درک است که درحالتی که از فیلتر تطبیقی برای بهبود سیگنال به نویز سیگنال‌های تداخل‌سنج استفاده شده است سطح مشتق در مرز عیب با نویز اسپکل زمینه، بالاتر از حالت عدم استفاده از

۶. مأخذ

- [1] White, R. M. "Generation of elastic waves by transient surface heating." *J. Appl. Phys.*, vol.24, 1963, pp.3559–3567.
- [2] Ikuo, I., M. Takahashi, K. Katoh. "Laser-ultrasonic sensing of surface temperature distribution of a material being heated." *3rd International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 2008, pp.1-4.
- [3] Francesco, L. d. S., S. Sternini, T. Nguyen. "Ultrasonic Imaging in Solids Using Wave Mode Beamforming." *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol.PP, Issue.99, 2016, pp.1–10.
- [4] Grünsteidl, C., et al. "Characterization of thin layers using a frequency domain laser-ultrasonic system." *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2012, pp.1734-1737.
- [5] Yongqiang, L., Sh. Yang, Ch. Gan. "A Novel Laser Ultrasonic Thickness Measurement Method for Metal Plate Based on Spectral Analysis." *The 12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2015)*, 2015, pp.324–329.
- [6] Yun-Kyu, A., P. Byeongjin, S. Hoon. "Complete Non-contact Laser Ultrasonic Imaging for Automated Crack Visualization in a plate." *Smart Mater. Struct.* vol.22, 2013, pp.22-25.
- [7] Royer, D., M.-H. Noroy, M. Fink. "Optical generation and detection of elastic waves in solids." *Journal of Physic*, vol.4, 1994, pp.C7-673-C7-684.
- [8] Minghui, L., G. Hayward. "A rapid approach to speckle noise reduction in ultrasonic non-destructive evaluation using matched filters." *IEEE International on Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2014.

- [9] Rostami, A., B. Mohammadzedehasl. "Increasing Frame Rate of Synthetic Aperture Imaging by Using Independent Component Analysis", *21st Iranian Conference on Biomedical Engineering, Tehran, Iran. (ICBME2014)*, 2014, pp.1-6,
- [10] Wu, W.-t., X.-L. Han, P. Li, J. Lin. "Ultrasonic virtual source imaging base on adaptive bidirectional point-wise focusing" 2014, pp.419-422.
- [11] O'Donnell, M., S. W. Flax. "Phase-aberration correction using signals from point reflectors and diffuse scatterers: Measurements." *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol.35, no.6, 1988, pp.768–774.
- [12] M. Kesharaju, et al, "Ultrasonic Sensor Based Defect Detection and Characterisation of Ceramics", vol.54, Issue.1, January 2014, pp.312–317.
- [13] T. Olofsson, M. H. Skjeltvareid, "A. Barkefors, Ultrasonic Imaging of Immersed Objects using Migration Techniques", *eighth European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 2011, pp.1-4.

پی نوشت:

-
1. Laser Ultrasonic
 2. Thermoelastic
 3. Ablation
 4. Momentum transfer
 5. Non Destructive
 6. Interferometer
 7. Q switched
 8. Distinguished Factor
 9. Dynamic Range
 10. Lateral Variation
 11. Ultrasonic Immersion