

اندازه‌گیری فراصوتی ضخامت لایه‌ی عایق داخلی سطوح فلزی با استفاده از پردازش سیگنال

پویا صالحی فیروزآبادی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

فرهنگ هنرور*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

امروزه قطعات صنعتی دولایه بسیاری وجود دارند که لایه‌ی رویی آن‌ها از جنس فلز با امپدانس صوتی بالا و لایه‌ی زیرین آن‌ها از مواد غیرفلزی با امپدانس صوتی پایین است. در بسیاری از این قطعات دسترسی به لایه‌ی غیرفلزی زیرین برای انجام بازرسی امکان‌پذیر نیست. اصلی‌ترین مشکلی که در ضخامت‌سنجی لایه‌ی عایق این نوع قطعات به روش فراصوتی وجود دارد آن است که اکوهای بازتاب شده از سطح پشتی لایه‌ی عایق در بین اکوهای لایه‌ی فلزی محو شده و ضخامت‌سنجی را ناممکن می‌سازد. در این مقاله از روش‌های تبدیل موجک و الگوریتم EMD به منظور پردازش سیگنال‌های فراصوتی و ردیابی اکوی لایه‌ی عایق استفاده شده است. برای نمایش تکرارپذیری نتایج، سه نمونه‌ی دولایه ساخته شد که امکان ردیابی اکوی لایه‌ی عایق در هیچ‌کدام وجود نداشت. نتیجه اعمال این دو روش در نمونه‌ها نشان می‌دهد که از هر دو روش می‌توان برای ردیابی اکوی محوشده استفاده کرد اما با توجه به حساسیت روش تبدیل موجک به فرکانس، این روش در شناسایی اکوی برگشتی از سطح پشتی عایق قدرتمندتر از روش الگوریتم EMD است. **واژه‌های کلیدی:** ضخامت‌سنجی فراصوتی، الگوریتم EMD، تبدیل موجک، تأخیر زمانی.

Ultrasonic thickness measurement of the internal insulation layer of metal surfaces by using signal processing schemes

P. Salehi-Firoozabadie

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

F. Honarvar

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

There are many two-layered components where the outer layer is a metal of high acoustic impedance and the inner (insulating) layer is a non-metal with low acoustic impedance. In most cases, it is impossible to directly access the inner layer for inspection or thickness gaging. The key problem in thickness gaging of the inner layer from the outer surface is that the backwall echo from the insulation cannot be identified in the very many backwall echoes coming back from the metal layer. In this paper, we use the signal processing techniques of wavelet transform and EMD algorithm to overcome this problem. To demonstrate the repeatability of these methods, three two-layered samples called A, B and C are prepared. The backwall echo of the insulation layer cannot be identified in any of these samples without further processing. The results indicate that both methods can facilitate the measurement of the insulation thickness, however, due to higher sensitivity of the wavelet method, it is more suitable than the EMD algorithm.

Keywords: Ultrasonic thickness gaging, EMD algorithm, wavelet transform, time delay.

اکوی دریافت شده از سطح پشتی لایه‌ی عایق بسیار ضعیف است. علاوه بر این در فاصله‌ی زمانی که موج به لایه‌ی عایق برخورد می‌کند و توسط پروب دریافت می‌شود اکوهای متعددی با انرژی بالا از سطح مشترک فلز و عایق بازتاب شده و توسط پروب دریافت می‌شوند. این امر باعث می‌شود که اکوی دریافت شده از سطح پشتی لایه‌ی عایق در بین اکوهای ناحیه‌ی فلزی محو شود.

در سال ۲۰۰۶، جکویکیسو همکاران [۱] برای اجتناب از تداخل امواج سعی کردند تا موج را به صورت زاویه‌ای به داخل قطعه ارسال کنند. از مزایای این روش آن بود که اولاً دیگر اکوهای برگشتی از سطح پشتی عایق و سطح مشترک فلز و عایق با هم تداخل نداشتند و در نقاط متفاوتی ردیابی می‌شدند و ثانیاً این امکان وجود داشت که با توجه به قانون اسنل و با ارسال امواج زاویه‌ای در زاویه‌های مختلف به صورت هم‌زمان ضخامت لایه‌ها و سرعت صوت در لایه‌ها محاسبه شود. در این روش به دلیل تبدیل مد^۱ در اثر برخورد زاویه‌ای و ایجاد امواج طولی و عرضی تفسیر سیگنال به سختی انجام می‌شود ضمن اینکه در

۱- مقدمه

روش فراصوتی یکی از مهمترین روش‌های غیرمخرب است که برای بازرسی قطعات و همین‌طور ضخامت‌سنجی از آن استفاده می‌شود. ضخامت‌سنجی قطعات چندلایه با ردیابی اکوهای برگشتی از مرز لایه‌های مختلف قطعه و تعیین مدت تأخیر آن‌ها انجام می‌شود. با اندازه‌گیری دقیق تأخیر زمانی مدت زمان حرکت موج در قطعه در یک رفت و برگشت مشخص می‌شود که مسافت طی شده توسط موج دو برابر ضخامت قطعه است. با دانستن سرعت صوت می‌توان ضخامت دقیق قطعه را اندازه‌گیری کرد. در بعضی از قطعات دولایه، لایه‌ی رویی از جنس فلز است و لایه‌ی زیرین نوعی عایق است و نسبت به لایه‌ی رو دارای تضعیف صوتی بیشتری است. ضخامت‌سنجی لایه‌ی عایق این قطعات از طرف فلز با مشکلاتی روبرو است. در اثر برخورد موج فراصوتی به مرز لایه‌ی فلز و عایق بخش اعظمی از انرژی موج به دلیل تفاوت امپدانس صوتی وارد ماده‌ی عایق نخواهد شد و آن مقدار که وارد می‌شود به دلیل تضعیف صوتی بیشتر لایه‌ی عایق نسبت به لایه‌ی فلز به سرعت مستهلک می‌شود. بنابراین

¹ Mode conversion

مشکل از الگوریتم CEEMD⁷ استفاده می‌شود [۹]. یکی دیگر از روش‌های مهم پردازش سیگنال روش تبدیل موجک^۸ است. هررا و همکاران در دو تحقیق پیاپی در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ با کمک تبدیل موجک توانستند اکوهای در هم فرورفته را جدا کنند [۱۰]. [۱۱]. در سال ۲۰۱۱ لوزولت و لاسایگوس [۱۲] با استفاده از روش عبوری^۹ و با کمک تبدیل موجک به طور هم‌زمان سرعت صوت در ماده و ضخامت آن را برای موادی از جنس استخوان انجام دادند. روش تبدیل موجک از روش‌هایی است که می‌تواند اطلاعات مربوط به فرکانس و زمان سیگنال را به طور هم‌زمان نمایش دهد. با توجه به تغییر پاسخ فرکانسی سیگنال فراصوتی بر اثر حرکت در داخل قطعه تبدیل موجک می‌تواند کارایی زیادی در پردازش سیگنال‌های فراصوتی داشته باشد. تغییر پاسخ فرکانسی موج طولی و شکل موج بر اثر حرکت در ماده در سال ۱۹۸۴ توسط کلین در تحقیقی بررسی شد [۱۳]. او توانست با کمک تحلیل فوریه و شکل سیگنال ارتباطی بین میرایی صوتی و پراکندگی با این پدیده بیابد. در سال ۱۹۹۵ هان و گراد [۱۴] این پدیده را برای امواج طولی در میله‌های هاپکینسون مشاهده کردند. میله‌ی فشار هاپکینسون به این صورت کار می‌کند که قطعه کار بین دو میله قرار می‌گیرد. یک میله موج طولی را به قطعه کار منتقل می‌کند و میله‌ی دیگر موج عبور کرده از قطعه کار را دریافت می‌کند و با کمک سنسورهای موج خروجی به صورت یک سیگنال الکتریکی به نمایش در می‌آید. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که برای فرکانس‌های مختلف سرعت فاز موج طولی متفاوت است. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که شکل سیگنال با تغییر فرکانس اعمالی تغییر می‌کند.

غیر از ردیابی اکو تعیین تأخیر زمانی اکو در ضخامت‌سنجی از اهمیت زیادی برخوردار است و باعث بالا رفتن دقت اندازه‌گیری می‌شود. در سال ۱۹۸۵ هال و همکاران [۱۵] با کمک دو روش شیب فاز^{۱۱} و همبستگی متقابل^{۱۱} تأخیر زمانی اکوها را اندازه‌گیری کردند که روش همبستگی متقابل نتایج دقیق‌تری را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۰۴ هنرور و همکاران [۱۶] در تحقیقی مفید بودن استفاده از فیلتر وینر و درون‌یابی را برای بالابردن دقت ضخامت‌سنجی به همراه روش همبستگی متقابل را نشان دادند.

با توجه به زیاد بودن میرایی در مواد عایق در بسیاری از موارد از روش عبوری استفاده می‌شود. در سال ۲۰۰۶ سینکلر و همکاران آزمایش‌های خود را روی قطعه‌ای صنعتی برای بررسی اتصال یک فلز و پوشش لاستیکی آن انجام دادند [۱۷]. مواد مورد آزمایش دارای خاصیت دیسپرسیو و تضعیف صوتی بالا بودند بنابراین آن‌ها از پروب‌هایی با فرکانس ۵۰۰ کیلوهرتز استفاده کردند. آزمایش به روش غوطه‌وری و به صورت عبوری انجام شد و با توجه به پاسخ فرکانسی سیگنال دریافتی وضعیت اتصال بررسی شد. جیان^{۱۲} و همکاران با کمک فیلتر تطبیقی و ساخت نمونه‌هایی از وضعیت اتصال مختلف سعی کردند وضعیت اتصال یک قطعه‌ی سه لایه با لایه‌ی رویی فلزی را

این روش میزان تضعیف صوتی بیشتر است و به دلیل نبود اکوهای وابسته به هم امکان استفاده از روش‌های تخمین تأخیر زمانی^۱ مثل همبستگی متقابل^۲ وجود ندارد. در سال ۲۰۱۲ کیم و همکاران [۲] با کمک ایجاد موج لمب از طریق ارسال زاویه‌ای موج و خاصیت تشدید موج فراصوت مرز یک قطعه‌ی سه لایه با لایه‌ی رویی فلزی و دولایه‌ی عایق را تشخیص دادند. به دلیل اتصال لایه‌های لاستیکی و نزدیک بودن امپدانس صوتی آن‌ها روش بازتابی در اینجا قادر نبود مرز را به‌خوبی تشخیص دهد.

استفاده از پردازش سیگنال برای حذف نویز و ردیابی دقیق محل اکو امری مرسوم برای ضخامت‌سنجی است. چن و همکاران [۳] نویزها را به دو دسته‌ی صوتی و غیر صوتی تقسیم‌بندی کردند. نویز صوتی حاصل از ساختار ماده، منطقه‌ی نزدیک پروب، اکوهای برگشتی از دیواره‌ها، مرزها و لایه‌ی واسط است و نویز غیر صوتی ناشی از مدارها، دریافت و نمایش سیگنال است. نویزهای غیر صوتی معمولاً با دامنه‌ی کم و فرکانس بالا در سیگنال ظاهر می‌شود و نویزهای صوتی بیشتر در مواد دانه‌درشت و قطعاتی که پراکندگی صوتی زیادی دارند دیده می‌شود و معمولاً فرکانس کمتری دارند. برای حذف نویزها و نشانه‌های نامطلوب در سیگنال روش‌های پردازشی مختلفی وجود دارد. در سال ۲۰۰۴ هنرور و شیخ‌زاده [۴] با استفاده از فیلتر میان‌گذر در حوزه‌ی فرکانسی سیگنال، برای عبور فرکانس‌های نزدیک به فرکانس مرکزی پروب توانستند پهنای اکوها را باریک‌تر کنند و این امر به جداسازی اکوهای در هم فرورفته و شناسایی اکوی مطلوب کمک کرد. در سال ۲۰۰۸ کازیس و همکاران [۵] با استفاده از روش غرقابی و با کمک تبدیل هیلبرت-هوانگ^۳ توانستند اکوهای برگشتی از عیوب در قطعات عایق پلاستیکی که در بین اکوهای برگشتی از پشت قطعه محو شده بودند را شناسایی کنند. تبدیل هیلبرت-هوانگ در حقیقت ترکیب الگوریتم EMD^۴ و تبدیل هیلبرت^۵ است که مفهوم فرکانس لحظه‌ای را ایجاد می‌کند [۶]. الگوریتم EMD سیگنال را به مولفه‌های فرکانسی‌اش تجزیه می‌کند. پرکان و همکاران در سال ۱۳۹۴ از این الگوریتم برای کاهش نویز در داده‌های لرزه‌ای استفاده کردند [۷]. مهم‌ترین نقطه‌ی ضعف این الگوریتم آن است که اگر دو مد دارای دامنه‌ی برابر بوده و اختلاف فرکانس آن دو مد کمتر از نصف مقدار فرکانس مد کم فرکانس‌تر باشد پدیده‌ی اختلاط مد رخ می‌دهد و تفکیک دو مد با استفاده از این الگوریتم قابل انجام نیست. با اضافه کردن نویز سفید سعی می‌شود که این مسئله اصلاح شود. این روش EEMD^۶ نام دارد [۸]. در این روش بارها نویز سفید به سیگنال اضافه شده و الگوریتم EMD روی سیگنال اجرا می‌شود. سپس میانگین مدها به ازای نویزهای سفید متفاوت به عنوان مد اصلی شناسایی می‌شود. این روش دارای این اشکال است که اضافه کردن نویز سفید می‌تواند نقاط اکسترمم جدیدی به سیگنال اضافه کند و به‌طور کلی مدهای تجزیه‌شده در فرکانس بالا را دچار اغتشاش کند. برای حل این

⁷ Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition

⁸ Wavelet transform

⁹ Trough transmission

¹⁰ Phase slope

¹¹ cross-correlation

¹² Jian

¹ TDE (time delay estimation)

² Cross correlation

³ Hilbert-Huang transform

⁴ Empirical mode decomposition

⁵ Hilbert transform

⁶ Ensemble Empirical Mode Decomposition

در این حالت باید از تمام لایه‌ها اکوی تفکیک شده به دست آید. پس از اطمینان از رسیدن اکوی لایه‌ی عایق به پروب می‌توان آزمایش را روی قطعه‌ی اصلی انجام داد و با کمک روش‌های پردازش سیگنال اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق را ردیابی کرد و سپس با توجه به سرعت صوت در لایه‌ی عایق ضخامت آن را به طور دقیق اندازه‌گیری کرد. در ساخت نمونه‌ها از ورق‌های آلومینیومی و فولادی به عنوان فلز و از قطعه‌های پلکسی گلاس به عنوان عایق استفاده شده است. برای اتصال لایه‌ی عایق به فلز از یک لایه‌ی نازک ژل سونوگرافی استفاده شده است که می‌تواند تمام خلل و فرج بین لایه‌ها را پر کند و مانع از ایجاد واسطه‌ی هوایی بین دولا به و در نتیجه تضعیف امواج فراصوتی شود. ضمن اینکه ضخامت اتصال بیند ولایه قابل صرفنظر کرد است و شکل سیگنال فراصوتی بین دولا به را مخدوش نمی‌کند. در جدول ۱ مشخصات کامل نمونه‌های مورد آزمایش آورده شده است. در تمام این نمونه‌ها هنگام آزمایش از طرف فلز امکان شناسایی اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق در سیگنال وجود ندارد ولی این اطمینان وجود دارد که اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق توسط پروب دریافت شده است.

ارزیابی کنند [۱۸].

در این تحقیق با توجه به عدم دسترسی به لایه‌ی عایق نمی‌توان از روش عبوری استفاده کرد روش ارسال زاویه‌ای موج نیز دقت مناسب را به وجود نمی‌آورد بنابراین از روش بازتابی استفاده شده است. در نمونه‌های مورد آزمایش ضخامت لایه‌ی عایق و فلز به اندازه‌ای هستند که اکوهای لایه‌ی عایق به طور کامل در بین اکوهای لایه‌ی فلزی محو می‌شوند و امکان ردیابی آن‌ها وجود ندارد. در این مقاله اکوهای برگشتی از لایه‌ی عایق انرژی کمی دارند و با توجه به محو شدن آن‌ها در بین اکوهای ناحیه‌ی فلزی ردیابی اکوی برگشتی از پشت لایه‌ی عایق تنها با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال امکان‌پذیر است بنابراین از تبدیل موجک و الگوریتم EMD برای ردیابی اکوی برگشتی از پشت لایه‌ی عایق استفاده شده است. بعد از ردیابی اکوی تأخیر زمانی با روش هم‌بستگی متقابل و اعمال درون‌یابی برای افزایش دقت انجام شده است.

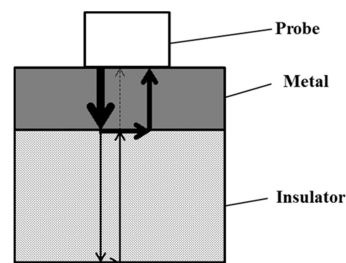
۲- روش تحقیق

۲-۱- آزمایش

هدف اصلی این تحقیق اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ی داخلی عایق قطعاتی با لایه‌ی رویی فلزی با استفاده از روش فراصوتی است که در سیگنال آن‌ها اکوی تفکیک شده‌ای از لایه‌ی عایق وجود ندارد. در صورتی این امر ممکن است که امواج فراصوتی بازتاب شده از انتهای لایه‌ی عایق، علیرغم تضعیف زیاد موج، بتوانند توسط پروب دریافت شوند. در بسیاری از قطعات عایق صنعتی به دلیل تضعیف زیاد موج، در عمل اکویی از انتهای عایق توسط پروب دریافت نمی‌شود و امکان اندازه‌گیری ضخامت آن‌ها با روش فراصوتی مقدور نیست. شکل ۱ شماتیکی از آزمایش را نشان می‌دهد و مشخص است که اکوی لایه‌ی عایق هنگامی که به سطح قطعه می‌رسد بسیار ضعیف است ولی اکوهای ناحیه‌ی فلزی به مراتب قوی‌تر هستند.

نمونه	جنس فلز	ضخامت (mm)	جنس عایق	ضخامت (mm)
A	آلومینیوم	۴/۵۱	پلکسی گلاس	۲۹/۵۳
B	فولاد	۴/۰۰	پلکسی گلاس	۲۹/۵۳
C	فولاد	۲/۰۳	پلکسی گلاس	۱۴/۶۶

در اینجا از دستگاه فرستنده-گیرنده^۱ ساخت شرکت پانامتریکس^۲ آمریکا مدل ۵۰۷۲PR، کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال و پروب پیزوالکتریک نرمال ۱۰ مگاهرتزی با قطر ۰/۲۵ مدل ۵۳۷۷ ساخت شرکت الیمپوس^۳ استفاده شده است. شکل ۲ پالس زمانی این پروب و شکل ۳ طیف فرکانسی همان پالس را نشان می‌دهد که در آن فرکانس مرکزی در محدوده‌ی ۱۰ مگاهرتز است.



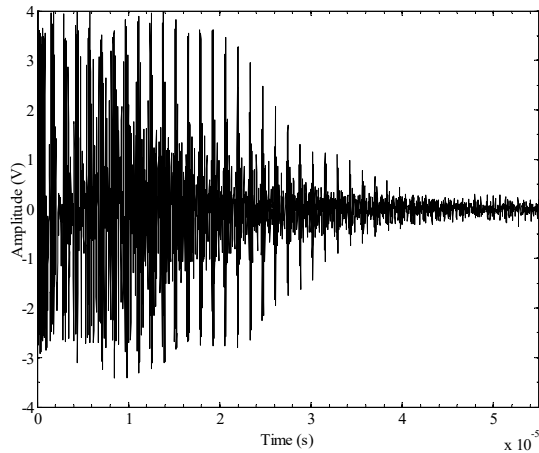
شکل ۱- تصویری از آزمون (نمونه‌ی A)

عایق‌ها در مقایسه با فلز دارای خصوصیات صوتی مشترکی هستند. تمام عایق‌ها دارای میرایی صوتی بیشتر نسبت به فلز هستند و سرعت صوت در آن‌ها کمتر است. با توجه به این نکات در این تحقیق سعی شد از قطعه‌ای به عنوان عایق استفاده شود که دارای این خصوصیات باشد و نیز اکوی برگشتی از پشت عایق توسط پروب ردیابی شود. جهت اطمینان از اینکه اکوی لایه‌ی عایق حتماً به سطح قطعه می‌رسد می‌توان با توجه به جنس و ضخامت تقریبی قطعه یک نمونه‌ی آزمایشی ساخت و پروب را یک بار از طرف لایه‌ی عایق آزمایش کرد.

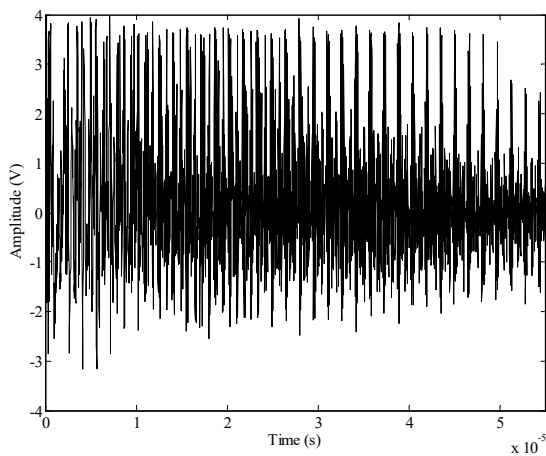
¹Pulser receiver

²Panametrics

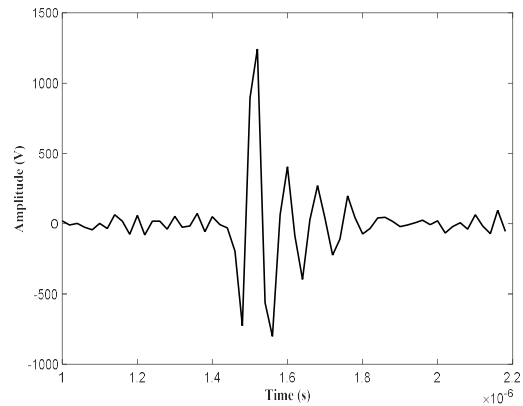
³Olympus



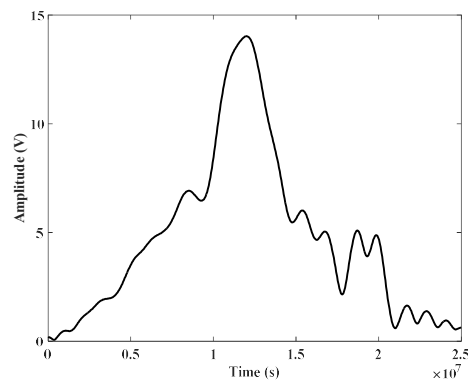
شکل ۵- سیگنال به دست آمده از نمونه‌ی B



شکل ۶- سیگنال به دست آمده از نمونه‌ی C



شکل ۲- پالس به دست آمده از پروب



شکل ۳- طیف فرکانسی پالس به دست آمده از پروب در شکل ۲

در شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ سیگنال‌های به دست آمده از نمونه‌های A، B و C به نمایش گذاشته شده است. این سیگنال‌ها به دلیل ادغام شدن امواج در هم بسیار مغشوش و غیرقابل تفسیر هستند. برای پرهیز از تکرار مفاهیم در اینجا تنها نتایج مربوط به نمونه‌ی A آورده شده است و برای سایر نمونه‌ها تنها نتایج نهایی ارائه گردیده و با هم مقایسه شده‌اند.

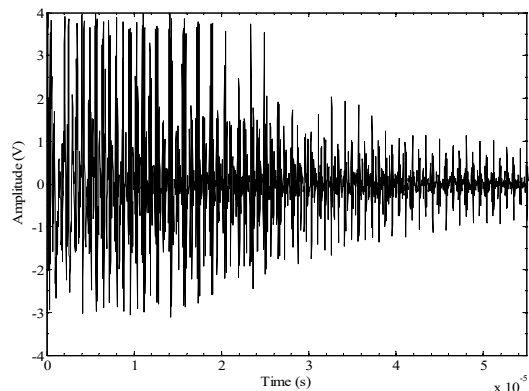
۲-۲- تحلیل اکوها

ادغام شدن اکوها باعث می‌شود که اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق قابل‌ردیابی نباشد. برای حل این مسئله باید عامل اغتشاش را در سیگنال شناسایی کرد. این اغتشاش می‌تواند دلایلی از جمله:

۱- در سیستم پالسی مورد استفاده برای نفوذ بیشتر باید پهنای پالس افزایش یابد و این امر باعث می‌شود که پهنای اکو بیشتر شده و اکوها با یکدیگر ادغام شوند.

۲- با افزایش دامنه و انرژی سیگنال نویز به همراه سیگنال تقویت شده و با اضافه شدن آن به اکو باعث افزایش عرض اکو می‌شود.

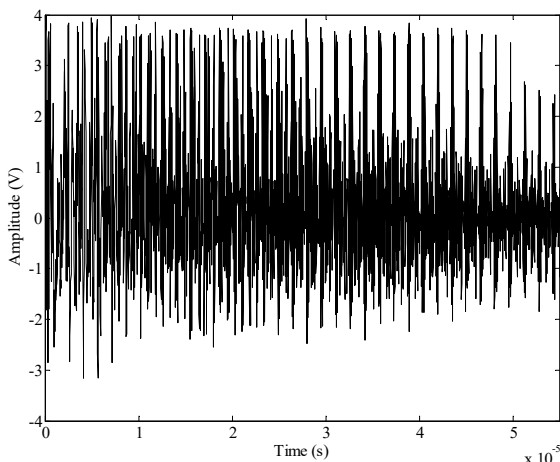
۳- کل منطقه‌ی نزدیک پروب در ضخامت لایه‌ی فلزی قرار دارد. در منطقه‌ی نزدیک پروب جبهه‌های موج هنوز همگرا نیستند و ممکن است در نقاطی بر هم تأثیر بگذارند و سیگنال را مغشوش کنند. اگر دامنه‌ی موج ورودی کم باشد بیشترین دامنه مربوط به جبهه‌های پراورزی‌تر است اما وقتی دامنه‌ی اکو افزایش می‌یابد دامنه‌های جبهه‌های کم انرژی‌تر نیز افزایش می‌یابند و سیگنال را دچار اغتشاش می‌کنند [۱۹]. برای اصلاح این امر می‌توان از یک خط تأخیری^۱



شکل ۴- سیگنال به دست آمده از نمونه‌ی A

¹ Delay line

۲- به دلیل بالا بودن انرژی و دامنه‌ی سیگنال، اثر نویز محسوس‌تر است. غیر از نویز، تداخل سیگنال‌ها و قرار گرفتن پالس اولیه^۲ در وضعیت اشباع از عوامل دیگر ایجاد پراکندگی در پاسخ فرکانسی سیگنال هستند. وضعیت اشباع هنگامی پیش می‌آید که بخشی از اطلاعات سیگنال به دلیل انرژی زیاد سیگنال توسط سیستم دریافت قابل دسترسی نباشد.



شکل ۷- سیگنال به دست آمده از فلز نمونه‌ی A

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب سیگنال زمانی و طیف فرکانسی اولین اکوی بازگشتی از سطح پشتی عایق را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود فرکانس غالب در محدوده‌ی ۵ مگاهرتز واقع شده است که تفاوت عمده‌ای با پاسخ فرکانسی اکوهای ناحیه‌ی فلزی دارد.

شکل ۱۱ و ۱۲ اکوی دوم دریافتی از سطح پشتی عایق و طیف فرکانسی آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکو بر اثر حرکت موج دچار تغییر شده و فرکانس غالب تغییر کرده است. اگر به شکل‌های ۹ و ۱۱ دقت شود، اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای بین اکوی اول و اکوی دوم وجود دارد. این اختلاف فاز ناشی از بازتاب دوباره‌ی موج است. بررسی این مسئله به‌خصوص در فرکانس‌های پایین و طول‌موج بالا و برای موادی با میرایی صوتی بالا به افزایش دقت در تعیین سرعت صوت منجر می‌شود [۲۰]. در اینجا به دلیل انتخاب فرکانس بالا و طول‌موج کم از روش تعیین اختلاف‌زمانی برای تعیین سرعت صوت و ضخامت‌سنجی استفاده شده است به این صورت که برای ضخامت ثابت، اختلاف‌زمانی بین دو اکو، که برابر مدت‌زمان حرکت موج در دو برابر ضخامت قطعه است، تعیین شده و از آنجا سرعت صوت در قطعه به دست آمده و سپس ضخامت‌سنجی انجام شده است.

استفاده کرد. اما با توجه به میرایی موج در داخل خط تأخیری و کاهش فراوان دامنه در هنگام انتقال موج از خط تأخیری به فلز، این امر باعث می‌شود که نتوان از خط تأخیری در این نمونه‌ها استفاده کرد. نحوه‌ی تحریک پروب در این مقاله با کمک تابع نیزه‌ای^۱ است. این نوع تحریک باعث می‌شود که غیر از فرکانس مرکزی پروب فرکانس‌های دیگری نیز در پاسخ فرکانسی سیگنال موج حاصل از پروب مشاهده شوند. در این حالت نمی‌توان از فیلترهای فرکانسی استفاده کرد زیرا استفاده از آن‌ها باعث می‌شود همراه نویز بخش زیادی از اطلاعات مفید سیگنال نیز از بین برود.

اکوی برگشتی از پشت عایق هنگام رسیدن به پروب ممکن است به دو صورت سیگنال را تحت تأثیر قرار دهد. ۱- با اضافه شدن اکوی برگشتی از پشت لایه‌ی عایق به سیگنال نقاط بیشینه و کمینه‌ی سیگنال تغییر کند. ۲- پاسخ فرکانسی اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق با پاسخ فرکانسی سیگنال زمینه متفاوت باشد و بتواند پاسخ فرکانسی سیگنال را تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به این موارد لازم است شکل اکوی برگشتی از پشت عایق به تنهایی بررسی شود.

در نمونه‌های مورد آزمایش که به عنوان نمونه تنها نتایج مربوط به نمونه‌ی A آورده شده است، باید میزان تغییر شکل موج چه در حوزه‌ی زمان و چه در حوزه‌ی فرکانس بررسی شود. چنانچه تغییر در حوزه‌ی فرکانس محسوس باشد با توجه به اینکه رفتار فرکانسی سیگنال در اثر برخورد اکوی بازگشتی از سطح پشتی عایق تغییر می‌کند، ممکن است که پردازش سیگنال در حوزه‌ی زمان- فرکانس مانند تبدیل موجک بتواند به ردیابی اکوی برگشتی از سطح پشتی عایق کمک کند.

تحریک نیزه‌ای باند فرکانسی عریضی دارد و بلور پیزوالکتریک پروب را در همه‌ی فرکانس‌ها تحریک می‌کند. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها از پروب ۱۰ مگاهرتزی استفاده شده است، در پاسخ فرکانسی سیگنال فرکانس‌های غالب در محدوده‌ی ۱۰ مگاهرتز و همسایگی آن هستند.

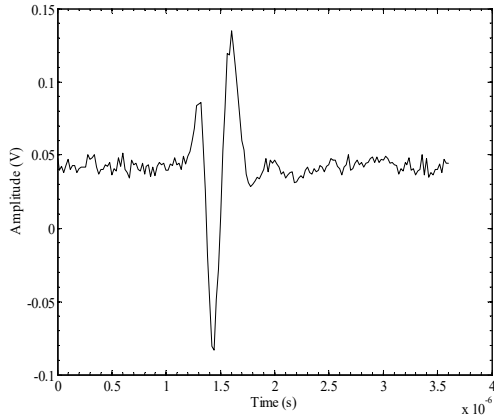
شکل ۱۳ اکوهای برگشتی از ناحیه‌ی فلزی را نشان می‌دهد. از مقایسه‌ی این شکل با شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که قسمت عمده سیگنال از اکوهای ناحیه‌ی فلزی تشکیل شده است. شکل ۸ پاسخ فرکانسی سیگنال مربوط به اکوهای برگشتی از لایه‌ی فلزی است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، فرکانس‌های غالب اکوی فرکانس ۱۰ مگاهرتز هستند اما به دلایل زیر فرکانس‌های غالب در گستره قابل توجهی پراکنده هستند:

۱- به دلیل ضخامت کم لایه‌ی فلزی اکوهای زیادی از ناحیه‌ی فلزی در سیگنال وجود دارند و بر اثر بازتابش زیاد موج، پاسخ فرکانسی و شکل سیگنال دچار تغییر می‌شود. اگر ضخامت بیشتر می‌بود، پاسخ فرکانسی اکوی اول بازگشتی از سطح پشتی فلز تغییر چندانی نمی‌کرد. دلیل این امر کم بودن خاصیت دیسپرز، میرایی کم و ساختار همگن فلزات است [۱۳].

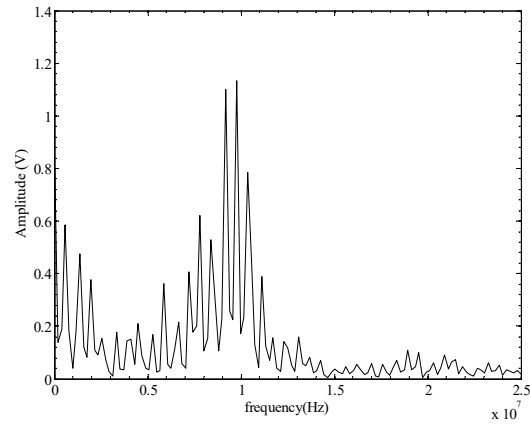
² Initial pulse

¹ Spike

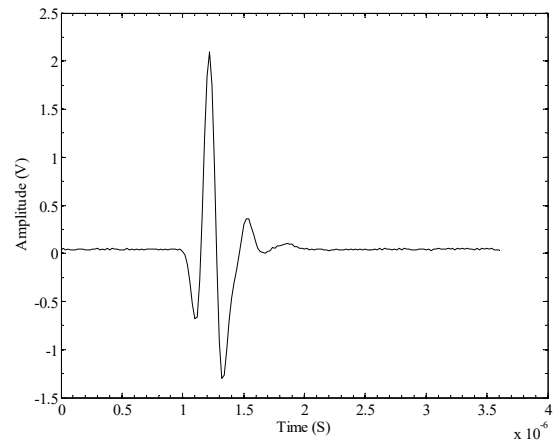
اگرچه با کم شدن ضخامت لایه‌ی عایق احتمال ردیابی اکو با کمک پردازش سیگنال در حوزه‌ی زمان-فرکانس کاهش می‌یابد اما اگر ضخامت کم باشد دیگر نیازی به افزایش انرژی و دامنه‌ی سیگنال نیست و ممکن است از لایه‌های مختلف اکوهای تفکیک‌شده به دست آورده شود.



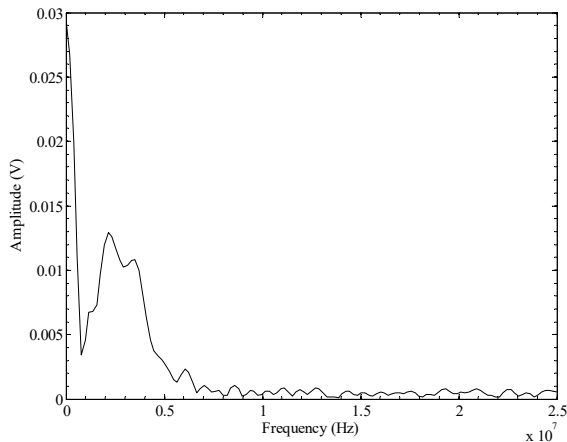
شکل ۱۰- پاسخ فرکانسی سیگنال شکل ۷



شکل ۱۱- اکوی دوم لایه‌ی عایق در نمونه‌ی A



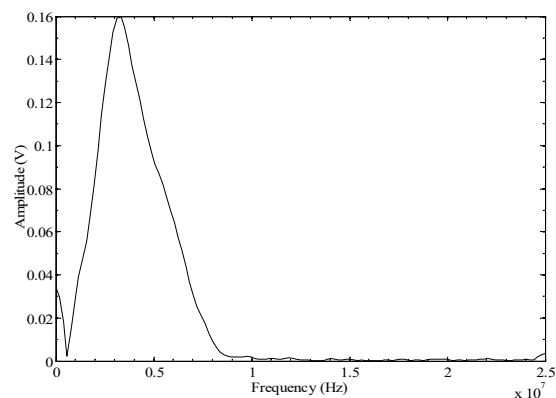
شکل ۱۲- پاسخ فرکانسی سیگنال شکل ۱۱



شکل ۱۳- تبدیل موجک

۲-۳- تبدیل موجک

تبدیل موجک یکی از روش‌های پردازش سیگنال در حوزه‌ی زمان-فرکانس است. این تبدیل با کمک یک تابع به نام موجک مادر صورت می‌گیرد و با قسمت‌بندی سیگنال میزان همبستگی^۱ سیگنال و موجک مادر محاسبه می‌شود. هر چه تعداد قسمت‌بندی‌ها بیشتر باشد حساسیت به زمان بیشتر است که اصطلاحاً شفافیت زمانی گفته می‌شود و هر چه تعداد تقسیم‌بندی‌ها کمتر باشد حساسیت نسبت به فرکانس بیشتر است که اصطلاحاً شفافیت فرکانسی گفته می‌شود. قسمت‌بندی انجام شده در تبدیل موجک عدم قطعیتی را در نمایش سیگنال‌ها ایجاد می‌کند. در مورد سیگنال‌های فرکانس بالا لازم است که



شکل ۱۴- اکوی اول لایه‌ی عایق در نمونه‌ی A

در شکل‌های ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ مشاهده می‌شود که دامنه فرکانس غالب برای اکوی فیزی حدود ۰/۶، برای اکوی اول لایه‌ی عایق حدود ۰/۱۶ و برای اکوی دوم لایه‌ی عایق حدود ۰/۱۵ ولت است. با توجه به کم بودن دامنه‌ی اکوی دوم برگشتی از پشت عایق، بعید است که با پردازش سیگنال در حوزه‌ی زمان- فرکانس بتوان اکوی دوم را تشخیص داد اما با توجه به زیاد بودن ضخامت لایه‌ی عایق و تضعیف موج در فضا، احتمال تشخیص اکوی اول با اعمال پردازش سیگنال وجود دارد.

¹ Correlation

[۷]. اگر D_k بیشتر از این مقدار باشد به شمارنده m یک واحد اضافه شده و سیگنال h_m به جای سیگنال اصلی قرار می‌گیرد و مراحل از اول دوباره روی سیگنال انجام می‌شود اما اگر D_k کمتر از مقدار توقف باشد عمل غربال کردن سیگنال پایان یافته و h_m به عنوان یکی از مدهای سیگنال معرفی می‌شود.

$$D_k = \frac{\sum_{t=1}^T |h_m^{k-1}(t) - h_m^k(t)|^2}{\sum_{t=1}^T |h_m^{k-1}(t)|^2} \quad (1)$$

۴- پس از تشخیص مد اصلی باید مد شناخته شده از سیگنال اصلی کم شود و باقیمانده دوباره به عنوان سیگنال اصلی وارد الگوریتم شده و مراحل ۱ تا ۳ روی آن انجام شود تا مدهای دیگر شناسایی شوند. در هر مرحله بعد از شناسایی مد باید شرط برابری تقریبی نقاط بیشینه و کمینه روی باقیمانده بررسی شود. اگر تعداد نقاط بیشینه و کمینه با هم برابر نبود، الگوریتم پایان می‌یابد و مدهای شناسایی شده به عنوان مولفه‌های فرکانسی سیگنال معرفی می‌شوند. با توجه به اینکه ممکن است اکوهای برگشتی از لایه‌ی عایق بر روی نقاط اکستریم سیگنال تأثیر بگذارد ممکن است اثر اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق در یکی از مدهای استخراج شده به وسیله‌ی الگوریتم EMD مشاهده شود.

۳- بحث و نتایج

در بیان نتایج ضخامت‌سنجی بدست آوردن سرعت دقیق صوت در ماده در دقت ضخامت‌سنجی بسیار مهم است. برای این منظور باید تا حد امکان روی قطعاتی با ضخامت بالا و دقیقاً با همان جنس سرعت صوت اندازه‌گیری شود. اکوی برگشتی در قطعه‌ی مورد استفاده برای اندازه‌گیری سرعت صوت باید دارای شکل مشخص و منظمی باشد تا تعیین تأخیر زمانی دقیق صورت گیرد. استفاده از ضخامت بالا برای این قطعه، باعث کاهش عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت صوت می‌شود. این امر به این دلیل است که عدم قطعیت در تعیین اختلاف‌زمانی مقدار ثابتی است و هر چه مسافت طی شده توسط موج بیشتر باشد اختلاف‌زمانی بیشتر خواهد بود و در نتیجه درصد عدم قطعیت در کل زمان طی شده توسط موج کاهش می‌یابد.

سرعت صوت در پلکسی گلاس در نمونه‌ی اول و دوم برابر 2719 ± 20 متر برثانیه و سرعت صوت در پلکسی گلاس نمونه‌ی سوم برابر 2803 ± 20 متر برثانیه اندازه‌گیری شد. برای تعیین اختلاف زمانی بین دو اکوی روش همبستگی متقابل با کمک میان‌یابی استفاده شده است. در این مقاله برای بررسی قدرت پردازش سیگنال نتایج مربوط به محاسبه تأخیر زمانی اکوها بیان شده است زیرا در بیان نتایج به صورت ضخامت عدم قطعیت پردازش سیگنال با عدم قطعیت ناشی از اندازه‌گیری سرعت صوت با هم جمع می‌شوند.

با توجه به اینکه پاسخ فرکانس اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق تفاوت زیادی با اکوهای فلز دارد از تبدیل موجک گسسته به عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌های پردازش سیگنال در حوزه‌ی زمان-فرکانس استفاده شد. در تحلیل موجک، انتخاب موجک مادر یکی از مهم‌ترین موارد در افزایش دقت اندازه‌گیری است. عامل مهم دیگر انتخاب تعداد سطوح تجزیه است که هر دوی این عوامل با کمک تجربه تعیین می‌شود. برای انتخاب موجک مادر باید شکل موجک مادر به

شفافیت فرکانسی بالا باشد و در مورد سیگنال‌های فرکانس پایین لازم است که شفافیت زمانی بیشتر باشد [۲۱].

تبدیل موجک خود به دو دسته‌ی پیوسته و گسسته تقسیم می‌شود. در تبدیل موجک پیوسته اگر چه اطلاعاتی در مورد فرکانس در زمان‌های متفاوت ارائه می‌شود اما به دلیل شلوغی سیگنال، در عمل امکان تحلیل و ردیابی سیگنال وجود ندارد. تبدیل موجک گسسته با کمک تحلیل چند ریزه‌سازی سیگنال را از لحاظ فرکانس به سطوح تجزیه‌ی مختلفی تقسیم می‌کند و باعث می‌شود نشانه‌های سیگنال در هر دسته‌بندی مشخص شود و تفسیر سیگنال ساده‌تر انجام شود. در تحلیل چند ریزه‌سازی فرض می‌شود که سیگنال عضو از یک حوزه‌ی برداری باشد. در مرحله بعد حوزه‌ی برداری به دو زیرفضای حاوی فرکانس‌های بالا و پایین تقسیم‌بندی می‌شود. در زیرفضای فرکانس پایین تقریباً سیگنال و در زیرفضای فرکانس بالا جزئیات^۱ سیگنال قرار می‌گیرد [۲۲].

در ادامه برای مشاهده‌ی اثر اکوی برگشتی از انتهای لایه‌ی عایق در سطوح مختلف تجزیه‌ی سیگنال از تبدیل موجک گسسته استفاده شده که موجک مادر آن، موجک کویف^۲ در سه سطح است.

۲-۴- الگوریتم EMD

روش EMD روشی است که در آن سیگنال بر مبنای نقاط اکستریم به مولفه‌های فرکانسی‌اش تقسیم می‌شود. ترکیب این روش با تبدیل هیلبرت می‌تواند فرکانس لحظه‌ای سیگنال را استخراج کند [۶]. در ابتدا باید گفت مد ذاتی به حالتی از سیگنال می‌گویند که دارای دو ویژگی باشد:

- ۱- تعداد نقاط بیشینه برابر با نقاط کمینه باشد و یا حداکثر یکی اختلاف داشته باشد.
 - ۲- در هر نقطه میانگین پوش بالایی (منحنی گذرنده از نقاط بیشینه) و پوش پایینی (منحنی گذرنده از نقاط کمینه) برابر صفر باشند.
- با توجه به این تعریف الگوریتم EMD مراحل زیر را روی سیگنال پیاده می‌کند:

۱- نقاط بیشینه و کمینه‌ی سیگنال را تعیین کرده و یک منحنی پوش درجه‌ی ۳ از نقاط بیشینه و یک منحنی پوش درجه‌ی ۳ از نقاط کمینه رسم می‌کند. این منحنی ساده‌ترین پوشی است که هم مانع از دست دادن داده‌های اصلی سیگنال می‌شود و هم تقریب مناسبی برای داده‌های دیجیتالی سیگنال است.

۲- میانگین پوش بالا و پایین را محاسبه و سیگنال اصلی را از میانگین به دست آمده کسر می‌کند و پارامتر h_m را برابر این مقدار قرار می‌دهد. اندیس m شمارنده‌ی مد انتخابی است.

۳- معیار توقف D_k که در رابطه‌ی ۱ نشان داده شده است، بررسی می‌شود که انحراف معیار موجود بین دو غربال کردن متوالی با شمارنده‌ی k است. در غربال اول $k = 0$ سیگنال اصلی را نشان می‌دهد. برای توقف روند اجرای الگوریتم عددی بین $0/2$ و $0/3$ در نظر گرفته می‌شود

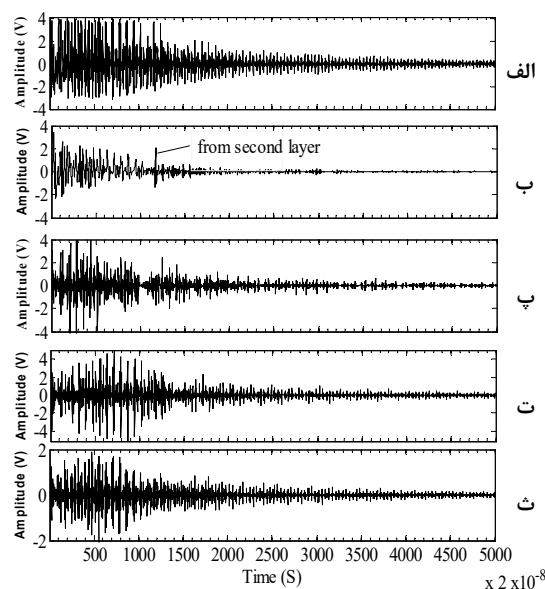
¹ Approximate

² Details

³ Coif

۴- پنجره‌گذاری در تبدیل موجک خود عامل دیگری در کاهش دقت است. میزان تأثیر این منابع خطا به نحوه‌ی تنظیم دستگاه، ضخامت لایه‌ها و جنس قطعات، ماده‌ی واسط و سایر متغیرهای آزمون و پردازش سیگنال اعمالی بستگی دارد اما با توجه به متغیر بودن شکل سیگنال و زیاد بودن عوامل تأثیرگذار امکان مدل‌سازی دقیق این عوامل وجود ندارد. شکل ۱۳ نتیجه‌ی استفاده از تبدیل موجک را برای سیگنال نمونه‌ی A نشان می‌دهد.

اکوی برگشتی از پشت عایق همچنین ممکن است قله‌های سیگنال را تحت تأثیر قرار دهد. این تأثیر اگر چه ممکن است در سیگنال‌های نمونه قابل مشاهده نباشد اما تأثیر خود را ممکن است در مدهای الگوریتم EMD نشان دهد. شکل ۱۴ نتیجه‌ی استفاده از الگوریتم EMD را برای سیگنال نمونه‌ی A نشان می‌دهد. این الگوریتم در این نمونه توانسته است اکوی برگشتی از سطح پشتی عایق را شناسایی کند. در سیگنال‌های مورد آزمایش، اکوهای بازگشتی از ناحیه‌ی فلزی در اولین مد فرکانس بالا دیده می‌شود. در مدهای بعدی اثر این اکوها تقریباً زده می‌شود و اکوهای برگشتی از لایه‌ی دوم قابل‌ردیابی می‌شود. اگر تعداد مدها باز هم افزایش یابد، مدهای بعدی عملاً قابل تفسیر نیستند. در شکل ۱۴ بخش بالایی سیگنال حقیقی نمونه‌ی A را نشان می‌دهد بخش میانی مد پر فرکانس سیگنال نشان می‌دهد که اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق در این مد شناسایی شده است. بخش سوم نیز مد کم فرکانس است که کاملاً غیرقابل تفسیر است.



شکل ۱۳- تحلیل موجک انجام شده با کمک موجک مادر **coif** در سه سطح تجزیه برای نمونه‌ی A در نرم‌افزار **Matlab**. (الف) سیگنال نمونه‌ی A، (ب) تقریب سیگنال در سطح ۳، (پ) جزئیات سیگنال در سطح ۳، (ت) جزئیات سیگنال در سطح ۲، (ث) جزئیات سیگنال در سطح ۱ که بالاترین فرکانس را دارد

در سیگنال‌های مورد آزمایش نویز تصادفی یا سفید تأثیر زیادی ندارد زیرا نویز سفید دامنه‌ی کمی دارد از طرفی اکوی برگشتی از پشت

شکل سیگنال‌های دریافت شده شباهت نسبی داشته باشد [۲۱]. توصیه می‌شود که از موجک نیمه مربعی هار^۱ به دلیل تیز بودن اکوهای مورد مطالعه استفاده نشود. در تحلیل صورت گرفته از موجک **coif** استفاده شده است اما نتایج نهایی استفاده از سایر موجک‌های مادر به غیر از موجک هار و موجک‌هایی که الگوی کاملاً متفاوتی با شکل سیگنال دارند تفاوت چندانی ندارد.

انتخاب تعداد سطوح تجزیه از اهمیت خاصی برخوردار است. اگر تعداد سطوح تجزیه زیاد باشد تقریب تنها یک حالت کلی سیگنال را بیان کرده و نمی‌توان تحلیلی روی آن انجام داد و اگر تعداد تقریب‌ها کم باشد عملاً نمی‌توان اکوی لایه‌ی دوم را تشخیص داد. اکوی برگشتی از لایه‌ی فلز در سطوح پرفرکانس واضح‌تر هستند و انتظار می‌رود که اکوی برگشتی از لایه‌ی دوم در سطوح کم فرکانس‌تر مشاهده شود. در سیگنال اولیه اکوهای برگشتی از لایه‌ی فلزی مشخص هستند در سطوح تجزیه‌ی بعدی اکوهای برگشتی از لایه‌ی فلز، با یک تقریب که از مقایسه‌ی موجک مادر با سیگنال اصلی ایجاد می‌شود، محو می‌شوند اما اکویی که سیگنال برگشتی از لایه‌ی عایق در آن قرار گرفته به شرط آنکه سیگنال را تحت تأثیر قرار داده باشد می‌تواند به طور واضح‌تری نشان داده شود. در بسیاری از موارد این سیگنال شناسایی شده در کنار سیگنال‌های تخمین زده شده از لایه‌ی فلزی قرار می‌گیرد. برای اطمینان از صحت اکوی تشخیص داده شده باید این اکو به ازای سطوح تجزیه‌ی متفاوت نیز مشاهده شود. اگر اکوی دریافت شده تقریبی از اکوی ناحیه‌ی فلزی باشد، به دلیل قرار گرفتن در مدهای فرکانس بالاتر با افزایش تعداد سطوح تجزیه اثر آن محوتر خواهد شد اما اگر از لایه‌ی دوم باشد به دلیل آنکه مربوط به فرکانس پایین‌تر است در تقریب‌های بیشتری حضور خواهد داشت. اگر تعداد سطوح تجزیه از یک حد بهینه بیشتر شود مشاهده خواهد شد که اکوی دریافت شده از لایه‌ی دوم از بخش تقریب به سطوح پایانی جزئیات که با فرکانس پایین‌تری هستند منتقل خواهد شد.

برای تعیین فاصله زمانی بعد از ردیابی اکوی لایه‌ی عایق تنظیم دستگاه را عوض کرده تا اکوی ناحیه‌ی فلزی با شکلی مناسب‌تر با پهنای کمتر به دست آید و از آن اکو اختلاف زمانی محاسبه شود این امر باعث افزایش دقت روش‌های تعیین اختلاف زمانی می‌شود.

عوامل ایجاد خطا در این روش شامل موارد زیر است:

- ۱- اکوهای مقایسه شده مربوط به دو تنظیم متفاوت هستند و این موضوع روی دقت تأثیر خواهد داشت.
- ۲- برای ردیابی اکو از لایه‌ی دوم ناچار هستیم که انرژی و دامنه را بالاتر ببریم که این خود باعث می‌شود که شکل پالس تغییر کند و پالس پهن‌تر شود که دقت را کاهش می‌دهد.
- ۳- وجود اتصال فلز به پلکسی و انتقال انرژی به پلکسی در هر بار برخورد به انتهای فلز باعث می‌شود که اکوهای فلز دقیقاً عین هم نباشند بنابراین تغییر پاسخ فرکانسی اکو در بین سیگنال‌های فلزی نیز وجود دارد. با وجودی که تغییر پاسخ فرکانسی در بین اکوهای فلزی کمتر است این موضوع هم دقت پردازش سیگنال را کاهش می‌دهد و هم باعث کاهش دقت ناشی از تعیین تأخیر زمانی می‌شود.

^۱Harr

می‌کند بنابراین اگر چه به دلیل دامنه‌ی کم اکوی برگشتی از پشت عایق نسبت به اکوهای فلزی، دقت تبدیل موجک پایین آمده اما با توجه به تأثیر اکوی برگشتی از پشت عایق روی پاسخ فرکانسی سیگنال تبدیل موجک توانسته‌است در نمونه‌ی C اکوی برگشتی از پشت عایق را ردیابی کند. با توجه به این مسئله می‌توان نتیجه‌گیری کرد که قدرت تبدیل موجک برای این کاربرد بیشتر از الگوریتم EMD است زیرا علاوه بر اهمیت انرژی سیگنال تفاوت پاسخ فرکانسی سیگنال در زمان‌های مختلف نیز در بیان نتیجه تأثیرگذار است.

جدول ۲- اندازه‌گیری انجام‌شده با کمک تبدیل موجک

نمونه	اختلاف‌زمانی واقعی لایه‌ی دوم (میکروثانیه)	اختلاف‌زمانی اندازه‌گیری شده با کمک تبدیل موجک (میکروثانیه)	درصد خطا
A	۲۱/۷۲	۲۱/۶۶	۰/۲۷
B	۲۱/۷۲	۲۱/۷۰	۰/۰۹
C	۱۰/۴۶	۱۰/۳۶	۰/۹۶

جدول ۳- اندازه‌گیری انجام شده با کمک EMD

نمونه	اختلاف‌زمانی واقعی لایه‌ی دوم (میکروثانیه)	اختلاف‌زمانی اندازه‌گیری شده با کمک تبدیل موجک (میکروثانیه)	درصد خطا
A	۲۱/۷۲	۲۱/۷۱	۰/۰۵
B	۲۱/۷۲	۲۱/۷۸	۰/۱۸
C	۱۰/۴۶	غیرقابل ردیابی	-

۴- نتیجه‌گیری

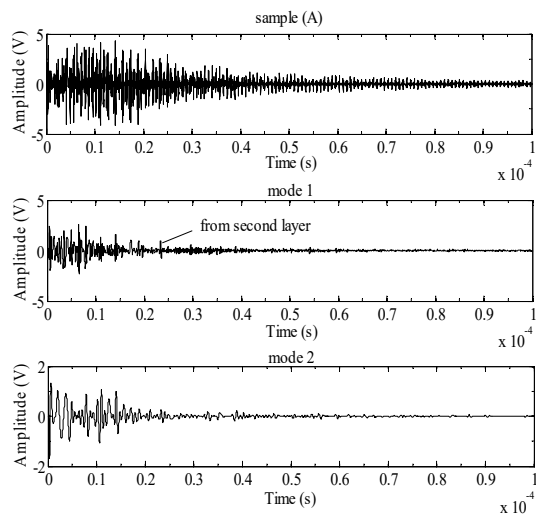
به‌طور کلی برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ی عایق قطعات با لایه‌ی رویی فلز با کمک روش بازتابی روند زیر توصیه می‌شود:

- در صورتی که به دلیل تضعیف صوتی بالای لایه‌ی عایق و یا زیاد بودن ضخامت آن نتوان اکوهای تفکیک شده‌ای از سطح پشتی عایق به دست آورد می‌توان از الگوریتم‌های تبدیل موجک و یا EMD استفاده کرد.
- الگوریتم EMD زمانی از دقت مناسبی برخوردار است که اکوی برگشتی از سطح پشتی عایق بتواند تغییری را در نقاط بیشینه و کمینه‌ی سیگنال ایجاد کند که در مد شناسایی شده توسط الگوریتم EMD تأثیر بگذارد. در غیر این صورت تبدیل موجک از دقت بیشتری برخوردار است، زیرا در تبدیل موجک اختلاف پاسخ فرکانسی اکوی برگشتی از پشت عایق نیز علاوه بر دامنه در ردیابی اکوی برگشتی از پشت عایق موثر است.

۵- مراجع

- [1] Jakevičius L., Butkus J. and Auskas A.V., Measurement of thickness of layer and sound velocity in multi-layered structure by the use of angular ultrasonic transducers, *Ultragarasas*, vol. 1, No. 58, pp. 20-24, 2006.
- [2] Kim D.-R. and Kim J.-H., Disbond Detection Technique for Liner/Propellant Interface Using Ultrasonic Resonance and

عایق در فواصل زمانی زیادی ظاهر می‌شود بنابراین استفاده از الگوریتم‌های اصلاح شده‌ی EMD از جمله EEMD و CEEMD تأثیر چندانی در نتیجه‌ی آزمایش ندارد.



شکل ۱۴- استفاده از الگوریتم EMD برای نمونه‌ی A

جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب نتایج اعمال تبدیل موجک و الگوریتم EMD را بر نمونه‌های A، B و C نشان می‌دهند. منظور از اختلاف زمانی مدت زمانی است که موج در لایه‌ی عایق به اندازه‌ی دو برابر ضخامت حرکت می‌کند. مشاهده می‌شود خطای الگوریتم EMD در نمونه‌ی A کمتر از تبدیل موجک است اما در نمونه‌ی B چنین نیست. در نمونه‌ی C الگوریتم EMD نتوانسته اکوی برگشتی از پشت عایق را شناسایی کند ولی خطای اندازه‌گیری در تبدیل موجک نیز افزایش یافته است. مبنای عملکرد الگوریتم EMD نقاط کمینه و بیشینه‌ی سیگنال است. اگر شکل سیگنال به گونه‌ای باشد که اکوی برگشتی از پشت عایق بتواند نقاط بیشینه و کمینه‌ای در سیگنال ایجاد کند روش الگوریتم EMD دقیق‌تر از تبدیل موجک خواهد بود زیرا در سیگنال‌هایی که نسبت نویز به سیگنال بالا است قله‌ی اکوی معیار مناسبی برای تشخیص اکوی است اما در اینگونه سیگنال‌ها روش تبدیل موجک به دلیل پنجره‌گذاری روی سیگنال بخش زیادی از داده‌های مربوط به اکوهای فلزی را نیز در نتیجه اعمال می‌کند. در نمونه‌های A و B ضخامت لایه‌ی عایق بالا است به همین دلیل اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق زمانی دریافت شده که اکوهای مربوط به لایه‌ی فلزی میرا شده‌اند به همین دلیل اکوی برگشتی از لایه‌ی عایق با اضافه شدن به سیگنال نقاط کمینه و بیشینه‌ای ایجاد کرده که توسط الگوریتم EMD ردیابی شده است اما با توجه به کاهش ضخامت لایه‌ی فلزی در نمونه‌ی B اکوهای مربوط به فلز کمتر میرا شده‌اند و دقت الگوریتم EMD کاهش یافته است. در نمونه‌ی C به دلیل کاهش ضخامت لایه‌ی عایق برگشتی از پشت عایق زمانی دریافت شده که اکوهای مربوط به لایه‌ی فلزی هنوز میرا نشده‌اند بنابراین اکوی برگشتی از پشت عایق تأثیر محسوس روی نقاط کمینه و بیشینه نگذاشته است و الگوریتم EMD نتوانسته اکوی برگشتی از پشت عایق را ردیابی کند. در تبدیل موجک داده‌های فرکانسی اکوی نیز اهمیت پیدا

- Lamb Waves, *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, Vol. 6, pp. 49-54, 2012.
- [3] ChenJ., ShiY. and ShiS., Noise analysis of digital ultrasonic nondestructive evaluation system, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 76, No. 9, pp. 619-630, 1999.
- [4] HonarvarF., SheikhzadehH., MolesM., and SinclairA. N., Improving the time-resolution and signal-to-noise ratio of ultrasonic NDE signals, *Ultrasonics*, vol. 41, No. 9, pp. 755-763, 2004.
- [5] KažysR., TumšysO. and PagodinasD., Ultrasonic detection of defects in strongly attenuating structures using the Hilbert–Huang transform, *NDT & E International*, vol. 41, No. 6, pp. 457-466, 2008.
- [6] HuangN. E., ShenZ., LongS. R., WuM. C., ShihH. H. and ZhengQ., The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 454, No. 1971, pp. 903-995, 1998.
- [۷] پرکان م.، سیاه کوهی ح و غلامی ع.، "کاربرد تجزیه مدتجربی و طیف فرکانس لحظه ای برای تضعیف نوفه و تشخیص سایه فرکانس پایین در داده های لرزه ای"، فیزیک زمین و فضا، ۴۱، ش. ۲، ص ۲۰۵-۱۷، تابستان ۱۳۹۴.
- [8] Wu Z. and HuangN. E., Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-41, 2009.
- [9] ZhengJ., ChengJ. and YangY., Partly ensemble empirical mode decomposition: An improved noise-assisted method for eliminating mode mixing, *Signal Processing*, vol. 96, pp. 362-374, 2014.
- [10] HerreraR. H., MorenoE., CalasH. and OrozcoR., Blind deconvolution of ultrasonic signals using high-order spectral analysis and wavelets, in *Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications*, ed: Springer, Vol. 3773, pp. 663-670, 2005.
- [11] HerreraR. H., OrozcoR. and RodriguezM., Wavelet-based deconvolution of ultrasonic signals in nondestructive evaluation, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, vol. 7, No. 10, pp. 1748-1756, 2006.
- [12] LoosveltM. and LasayguesP., A wavelet-based processing method for simultaneously determining ultrasonic velocity and material thickness, *Ultrasonics*, vol. 51, No. 3, pp. 325-339, 2011.
- [13] KlineR. A., Measurement of attenuation and dispersion using an ultrasonic spectroscopy technique, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 76, No. 2, pp. 498-504, 1984.
- [14] ZhaoH. and GaryG., A three dimensional analytical solution of the longitudinal wave propagation in an infinite linear viscoelastic cylindrical bar - Application to experimental techniques, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 43, No. 8, pp. 1335-1348, 1995.
- [15] HullD., KautzH. and VaryA., Measurement of ultrasonic velocity using phase-slope and cross-correlation methods, *Materials Evaluation*, vol. 43, No. 11, pp. 1455-1460, 1985.
- [16] HonarvarF., Iran-NejadM., GholamiA. and SinclairA. N., Estimation of Uncertainty in Ultrasonic Thickness Gauging and Improvement of Measurements by Signal Processing, *Annual CINDE Conference*, Toronto, Canada, 2014.
- [17] SinclairA., JastrzebskiM. and V. Safavi-Ardebili, Ultrasonic evaluation of weak liner/propellant bonding in a rocket motor, in *16th World Conference on NDT*, Montreal, Canada, 2004.
- [18] JianX., GuoN., LiM., and ZhangH., Ultrasonic Evaluation of Bond Using Segment Adaptive Filtering, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 21, no. 2, pp. 55-65, 2002.
- [۱۹] هنرورف، بازرسی غیرمخرب - روش فراصوتی، انتشارات نوپردازان، ۱۳۸۸.
- [20] Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials, ASTM E494-95, in *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.03, 1997.
- [۲۱] کیامهر، و غلام نیام، پردازش رقمی سیگنال با کمک تئوری موجک و نرم افزار MATLAB، زنجان انتشارات دانشگاه زنجان، ۱۳۹۴.