

# بررسی تجربی الگوی انتشار امواج هدایت‌شده فراصوتی در امتداد نمونه ایرفویل آلومینیومی برای انجام تست غیرمخرب

محمد ریاحی

دانشیار مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، Riahi@iust.ac.ir

پویا غلامی

کارشناس ارشد، دانشگاه علم و صنعت، Pooyagholami@mecheng.iust.ac.ir

حمیدرضا رضایی بهنیا

کارشناس ارشد، دانشگاه علم و صنعت، Hamidrezabehnia@ymail.com

علی ولی‌پور چهارده چریک

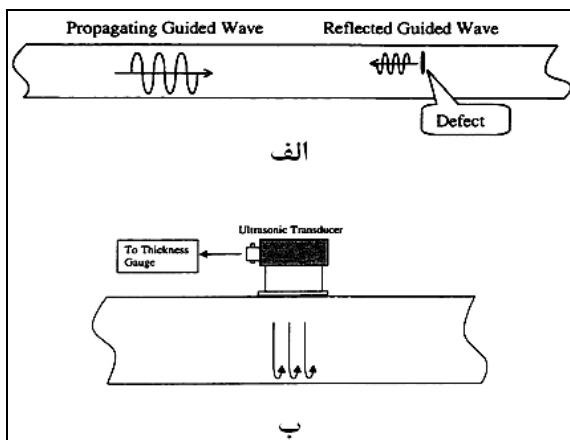
دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت، Avalipour@iust.ac.ir

## چکیده

امروزه آزمون‌های غیرمخرب و پایش سلامت در صنایع هوا فضایی، دریایی، عمرانی و ... به دلیل کاهش هزینه‌های ناشی از تعمیر و نگهداری و پیشگیری از خرابی‌های ناگهانی از اهمیت بسیاری برخوردارند. یکی از شیوه‌های نوین به کار رفته در سیستم‌های پایش سلامت، به کارگیری امواج هدایت‌شده فراصوتی است. الگوی انتشار امواج هدایت‌شده در محیط‌های مادی به شدت متأثر از پارامترهایی چون فرکانس تحریک، ضخامت قطعه، نوع ماده و مسافت طی شده توسط موج است که تحلیل این امواج را پیچیده می‌کند. در این مقاله سعی شده است تا نحوه تأثیر مسافت طی شده در انتشار امواج روی مشخصات امواج دریافتی بررسی شود. برای این منظور آزمون امواج هدایت‌شده روی نمونه ایرفویلی از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵، که در صنایع هوانوردی کاربردهای بسیاری دارد، انجام شده و نتایج به دست آمده بررسی شده‌اند. این نتایج، پس از پردازش سیگنال، مطابقت مناسبی را با نتایج تحلیلی موج نشان می‌دهند و حاکی از توانایی این امواج در شناسایی عیوب موجود در عمق قطعه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: امواج هدایت‌شده فراصوتی، امواج لمب، آلومینیوم ۷۰۷۵، پردازش سیگنال، تحلیل موجک





شکل (۱) - مقایسه بازرسی توسط روش‌های موج هدایت‌شده و اولتراسونیک.

(الف) بازرسی توسط موج هدایت‌شده

(ب) بازرسی با روش اولتراسونیک [۲]

پروفسور رز، استاد دانشگاه پنسیلوانیا، عیوب متفاوتی را که امواج لمب قابلیت تشخیص آنها دارند بیان نموده است. [۳] افزایش کاربرد این تکنیک در تشخیص عیوب به دلیل خواص ویژه آن است. این خواص عبارتند از:

الف: بستگی توزیع تنش و کرنش به فرکانس که به آن خاصیت چند مودی می‌دهد و لذا می‌توان بهترین مود را متناسب با نوع عیب مورد نظر انتخاب کرد.  
ب: انتشار در یک محدوده طولانی، که منجر به کاهش زمان انجام تست می‌شود.

ج: توانایی آن برای حرکت در طول سازه‌های پیچیده (منحنی، گوشه‌ها و ...). این قابلیت هنگامی که امکان دسترسی به قسمت‌های سازه مشکل باشد، بسیار مفید است. [۴]

رسم تغییرات سرعت موج به عنوان تابعی از فرکانس، نمودارهای پراکندگی<sup>۳</sup> را تشکیل می‌دهد. تغییرات تنش و جابه‌جایی در طول ضخامت ورق نیز شکل مود نامیده می‌شود. جهت تحلیل صحیح و تشخیص

در سال‌های اخیر، در حوزه تست‌های غیرمخرب فراصوتی بخش جدیدی با عنوان امواج هدایت‌شده فراصوتی توسعه یافته است که در مقایسه با سایر روش‌های بازرسی مزایای بسیاری دارد. این روش با وجود ویژگی‌ها و توانایی‌های منحصر به فرد، به دلیل پیچیدگی‌های مربوط به نحوه انتشار و همچنین تفسیر نتایج، همچنان در حال مطالعه است. بنابر تعریف، امواج هدایت‌شده به امواجی گفته می‌شود که به صورت دسته‌ای از امواج<sup>۱</sup> منتشر می‌شوند و شامل مدهای مختلفی می‌باشند. انواع گوناگونی از این امواج در عمل قابل دستیابی‌اند. این امواج در قطعاتی منتشر می‌شوند که ضخامت آن کوچک‌تر از طول موج مود منتشر شده باشد. وجه تسمیه این امواج نیز این است که در امتداد مرز یک سازه انتشار می‌یابند و مرز سازه حرکت این امواج را هدایت می‌کند. امواجی که داخل یک صفحه، که دارای دو مرز موازی و بدون تنش باشد، انتشار می‌یابند به عنوان امواج لمب<sup>۲</sup> نیز شناخته می‌شوند که به نام مخترع آن نامیده می‌شوند. [۱] سرعت این امواج به حاصل ضرب فرکانس تحریک در ضخامت ورق وابسته است. این امواج می‌توانند فواصل بسیار طولانی را طی کنند. از این امواج برای تشخیص عیوب در سازه‌های ورق‌مانند به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. شکل (۱) اساس بازرسی با استفاده از این امواج و تفاوت آنها با روش اولتراسونیک قدیمی را نشان می‌دهد.

مودهای مختلف موج لمب می‌توانند در تمام ضخامت لایه‌ها حرکت کرده، بنابراین امکان تشخیص عیوب داخلی به خوبی عیوب سطحی می‌باشند.

درست وقوع عیب لازم است این نمودارها با دقت کامل رسم شده، و مودهای تحریک شده در هر فرکانس معین گردند. تئوری نحوه انتشار این امواج، در سال ۱۹۵۰ م، توسط میندلین همزمان با تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط شوچ، در سال ۱۹۵۲ م، و فردریک، در سال ۱۹۶۲ م، منتشر شدند. معادلات حرکت موج در یک ورق ایزوتروپ الاستیک در ادامه به اختصار آمده است. در یک ورق الاستیک ایزوتروپ با ضخامت  $2h$  نمودارهای مربوط به پراکندگی سرعت فازی، با حل معادلات مربوط به پراکندگی قابل دستیابی است.

$$\frac{\tanh(\eta h)}{\tanh(\beta h)} = \frac{(2k^2 - k_s^2)^2}{4k^2 \eta \beta}$$

$$\frac{\tanh(\eta h)}{\tanh(\beta h)} = \frac{4k^2 \eta \beta}{(2k^2 - k_s^2)^2}$$

معادلات اخیر نمودارهای پراکندگی مربوط به سرعت فازی را به ترتیب برای مودهای متقارن و نامتقارن به دست می دهد. به طوری که در آن داریم:

$$k = \frac{\omega}{c_L}$$

$$\eta = \sqrt{k^2 - k_p^2}, \quad \beta = \sqrt{k^2 - k_s^2}$$

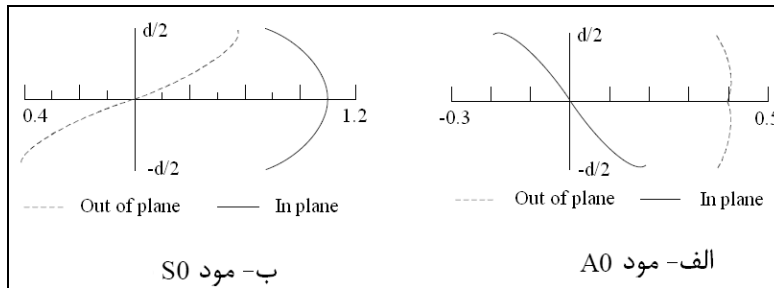
$$k_p = \frac{\omega}{c_p}, \quad k_s = \frac{\omega}{c_s}$$

همچنین  $C_1$  سرعت موج لمب (سرعت فازی)،  $C_p$  سرعت موج اولیه (موج P) و  $C_s$  سرعت موج دومی (موج S) است.  $\omega$  نیز فرکانس دایره ای بر حسب رادیان بر ثانیه موج منتشر شده است [۵]. در واقع، در یک ورق با ضخامت  $d$  و فرکانس آکوستیکی  $f$  تعداد معدودی از مودهای انتشار موجود است که با سرعت های فازی مشخص تعیین می شوند و می توان توصیف کاملی از آن را در

نمودارهای پراکندگی مشاهده کرد. هر منحنی بیانگر یک مود است که با علائم  $A_n$  و  $S_n$ ، که به ترتیب مودهای متقارن و نامتقارن می باشند، نامگذاری می شوند [۶].

یکی از دلایل اهمیت مطالعه الگوی انتشار امواج هدایت شده، داشتن دامنه قابل توجه ارتعاش در عمق ورق می باشد. حضور این ارتعاش، که نحوه توزیع آن در ضخامت قطعه در مودهای مختلف متفاوت است، توانایی شناسایی عیوبی که در وسط ضخامت قطعه می باشند را نیز فراهم می کند. میزان این دامنه، که به عنوان ساختار موج شناخته می شود، برای دو مود  $A_0$  و  $S_0$  ورق آلومینیومی در شکل ۲ نمایش داده شده است. [۷] همان طور که در شکل مشاهده می شود، ساختار امواج هدایت شده از دو مؤلفه تشکیل شده است: مؤلفه خارج از صفحه<sup>۵</sup> بیانگر ارتعاشات عمود بر صفحه ورق، و مؤلفه داخل صفحه<sup>۶</sup> بیانگر ارتعاشات در صفحه ورق می باشند. طبق شکل (۲)، مود  $A_0$  دارای مؤلفه خارج از صفحه قوی تری از مود  $S_0$  می باشد. در مطالعات تجربی که از پراب نرمال اولتراسونیک استفاده می شود، همین مؤلفه خارج از صفحه اندازه گیری می شود. به همین دلیل در آزمایشات انجام شده توسط پراب نرمال، مود  $A_0$  بسیار قوی تر از مود  $S_0$  دریافت می شود.

مزایای امواج هدایت شده که شامل حساسیت و تطبیق پذیری بالا می باشند، پتانسیل فوق العاده ای را برای شناسایی عیوب متفاوت ارائه می دهند؛ اما برای توصیف دقیق مشخصات عیوب، دشواری ها و پیچیدگی های بسیاری در تفسیر داده های موج دریافت شده وجود دارد. [۸]



شکل (۲) - ساختار موج برای نقاط مختلف روی مود  $S_0$  و  $A_0$  یک ورق آلومینیومی [۷]

مودهای مختلف به ارسال یک پالس سینوسی به درون پراب نیاز است. برای این منظور از یک فانکشن ژنراتور<sup>۸</sup> استفاده شده است که این سیگنال سینوسی را با تعداد پالس دلخواه ایجاد می‌کند. در این تحقیق از چهار پالس سینوسی استفاده شده است. دامنه سیگنال خروجی از فانکشن ژنراتور ۱۲ ولت می‌باشد. برای تبدیل این سیگنال ولتاژ به سیگنال مکانیکی و ارسال موج الاستیک به درون قطعه عموداً از پراب اولتراسونیک و یا مبدل پیزوالکتریک استفاده می‌شود. در این تحقیق برای ارسال امواج به درون قطعه از یک پراب اولتراسونیک استفاده شده است. این پراب با استفاده از کوپلنت<sup>۹</sup> (برای پرکردن فاصله هوایی بین پراب و قطعه) روی ورق متصل شده است. در شکل (۴) پراب مورد استفاده و نحوه قرارگیری آن روی ایرفویل نمایش داده شده است. پس از انتشار موج هدایت شده در طول قطعه، امواج در نقاط دلخواه دریافت و ذخیره می‌شوند. برای این منظور از یک پراب اولتراسونیک دیگر جهت دریافت امواج موجود در قطعه و یک اسپوسکوپ دیجیتال برای ذخیره اطلاعات دریافتی استفاده شده است. در این مطالعه فرکانس نمونه برداری توسط دیجیتال اسپوسکوپ برابر با ۲/۵ MS/s می‌باشد.

همچنین جهت مدل سازی ایرفویل، از یک ورق آلومینیوم ۷۰۷۵، که به صورت ایرفویل فرم داده شده، استفاده شد.

در این مقاله انتشار امواج هدایت شده فراصوتی در یک نمونه ایرفویل مدل شده از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵، که در صنایع هواپیمایی و کشتی سازی به وفور استفاده شود، بررسی شده، سپس با مقایسه امواج دریافت شده توسط پراب اولتراسونیک، که در نقاط مختلف و با فواصل متفاوت از تحریک گر موج قرار دارد، تأثیر پارامتر فاصله پراب گیرنده تا فرستنده بررسی شده است. در قسمت بعد نحوه چیدمان اجزای به کار رفته در آزمون و نتایج به دست آمده به تفصیل بیان شده است. سپس نتایج از طریق مقایسه با سرعت های به دست آمده از حل تئوری صحنه گذاری شده اند. در پایان سیگنال های دریافتی بررسی شده و با استفاده از روش های پیشرفته پردازش سیگنال فیلتر شده و با استفاده از تحلیل موجک<sup>۷</sup> در دو حوزه فرکانسی و زمانی مقایسه شده اند.

### مطالعه تجربی

برای انجام تحقیقات آزمایشگاهی در حوزه امواج هدایت شده، به چیدمان آزمایشگاهی<sup>۲</sup> ویژه ای نیاز است که نمونه ای از آن در این مرکز طراحی و راه اندازی شده است. شکل (۳) سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مرکز برای ایجاد امواج هدایت شده فراصوتی را نمایش می دهد. برای ایجاد امواج هدایت شده و تحریک

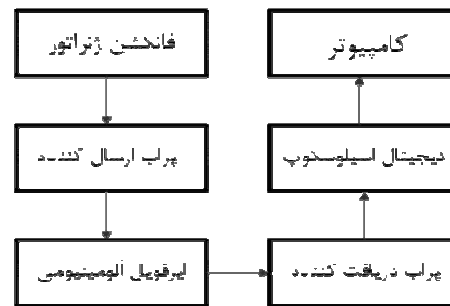
## مطالعه تئوری و صحه‌گذاری

برای بررسی صحت داده‌های به‌دست آمده در بخش تجربی، به محاسبه سرعت حرکت امواج و مقایسه آن با سرعت تئوری به‌دست آمده از منحنی پراکندگی پرداخته می‌شود. این منحنی‌ها با استفاده از نرم‌افزار تجاری AGU-Vallen Wavelet که توسط The Acoustic Emission Company توسعه داده شده است، استفاده شده است. [۹] در شکل (۵) منحنی پراکندگی مربوط به ورق آلومینیومی به ضخامت ۱/۴ میلی‌متر نشان داده شده است. این منحنی با استفاده از روابط تئوری ارائه شده در بخش ۱ به‌دست آمده است. پس از استخراج منحنی پراکندگی سرعت گروهی، با در نظرگیری فرکانس تحریک ۹۰ کیلوهرتز، زمان دریافت موج از سیگنال خروجی استخراج شده و سرعت موج محاسبه می‌شود. به این منظور در چهار نقطه سرعت موج اندازه‌گیری شده و نتایج بررسی می‌شوند. در این نقاط مود  $S_0$  به دلیل قدرت بسیار پایین عملاً دریافت نمی‌شود و لذا داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به مود  $A_0$  می‌باشند.

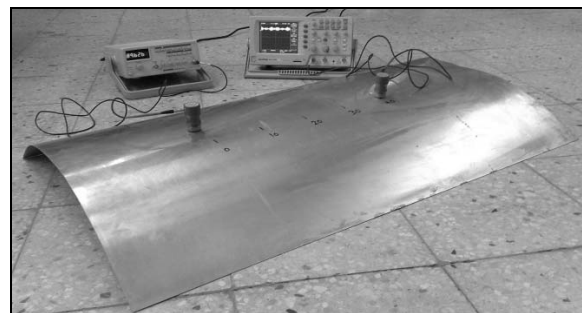
لازم به ذکر است که به دلیل یکسان نبودن پایه زمانی سیگنال‌های ارسالی و دریافتی، موج دریافتی با اندکی تأخیر زمانی دریافت می‌شود، لذا برای حذف این خطا پس از انجام کالیبراسیون، مدت زمانی برابر  $30 \mu s$  از زمان دریافت مود کسر شد تا سرعت با دقت بیشتری محاسبه شود. نتایج این محاسبات در شکل (۶) نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت مود  $A_0$  به‌دست آمده از داده‌های تجربی همپوشانی مناسبی با نتایج تئوری دارد. تنها در نقطه ۴ (۴۰ سانتی‌متر) سرعت تجربی به‌دست آمده تفاوت زیادی با مقدار تئوری دارد

این سری از آلومینیوم به دلیل نسبت بالای استحکام به چگالی، اغلب در صنایع دریایی، خودروسازی و هوایی استفاده می‌شود. این مقاومت و وزن کم در عرصه‌های دیگر نیز مناسب است. تجهیزات صخره‌نوردی، اجزاء دوچرخه و چارچوب گلايدر معمولاً از آلومینیوم ۷۰۷۵ ساخته می‌شوند. عناصر به‌کار رفته در این آلیاژ و میزان درصد هریک در جدول (۱) ذکر شده است.



شکل (۳) - چیدمان آزمایشگاهی



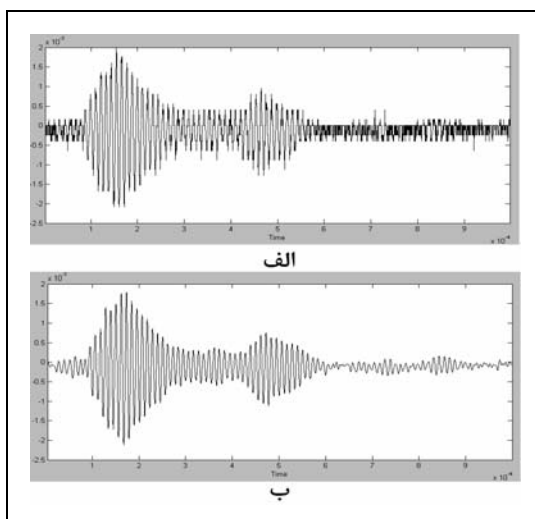
شکل (۴) - نمونه ایرفویل آلومینیومی و پراب‌های اولتراسونیک

جدول (۱) - عناصر موجود در آلومینیوم ۷۰۷۵

نام عنصر آلیاژی	درصد %
روی	۵/۱-۶/۱
منیزیم	۲/۱-۲/۹
روی	۱/۲-۲/۰
سیلیسیم، آهن، منگنز، تیتانیم، کروم و دیگر فلزات	کمتر از ۰/۵

## نتایج فیلتراسیون

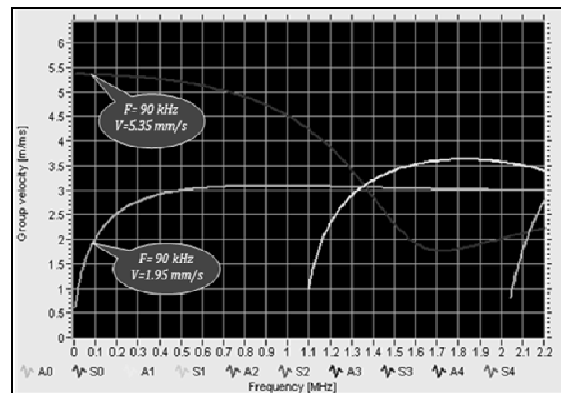
پس از دریافت و ذخیره سیگنال‌ها، برای وضوح بیشتر سیگنال، از پردازش سیگنال و خصوصاً فیلتراسیون<sup>۱۱</sup> استفاده شده است تا نویزهای موجود در سیگنال دریافتی را حذف کند. برای این منظور، یک فیلتر پایین‌گذر از نوع باتروث<sup>۱۱</sup> با مرتبه ۱۰ روی سیگنال‌ها اعمال شده تا فرکانس‌های بالای ۱۴۰ کیلوهرتز (با توجه به فرکانس کاری این مطالعه) را حذف نماید و سیگنال شفاف‌تری نمایش داده شود. در شکل (۷) یک نمونه از سیگنال دریافتی در فاصله ۱۰ سانتی‌متر با فرکانس ۸۵ کیلوهرتز قبل و بعد از اعمال فیلتر مشاهده می‌شود.



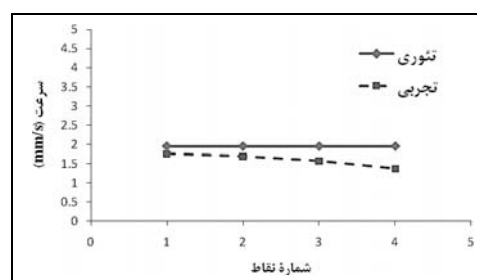
شکل (۷) - سیگنال دریافتی در فاصله ۱۰ سانتی‌متر و فرکانس ۸۵ کیلوهرتز الف) قبل از پردازش سیگنال، ب) بعد از پردازش سیگنال

### مقایسه دامنه

با حرکت پراب دریافت‌کننده در امتداد ایرفویل، سیگنال‌های دریافتی در چهار نقطه با فواصل ۱۰ سانتی‌متر ذخیره شده و حداکثر دامنه دریافتی در این نقاط در نمودار شکل (۸) با یکدیگر مقایسه شدند. این

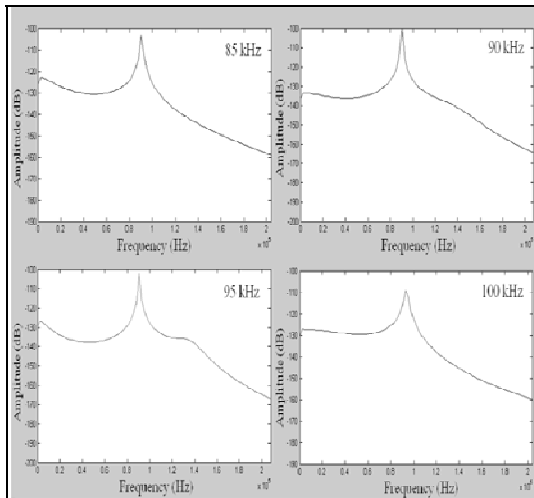


شکل (۵) - منحنی پراکندگی سرعت گروهی مربوط به ورق آلومینیوم به ضخامت ۱/۴ میلی‌متر



شکل (۶) - مقایسه سرعت مود A0 به دست آمده از تئوری و نتایج تجربی

که آن هم به چند دلیل می‌باشد: نخست همان‌طور که در روند نمودار مشخص است با دور شدن از نقطه ارسال، سرعت موج کاهش می‌یابد و در نقطه ۴ به حداقل می‌رسد که این کاهش سرعت به دلیل ویژگی پراکنده‌شوندگی امواج هدایت‌شده می‌باشد. بدان معنا که با طی کردن مسیر، سرعت موج کاهش یافته، اما شکل سیگنال موج طولانی‌تر می‌شود. دیگر اینکه، در نقطه ۴ به دلیل دور بودن نقطه دریافت از نقطه ارسال، مود S<sub>0</sub> که در ابتدای سیگنال به سختی قابل تشخیص است، پس از برخورد به دیواره‌ها بازتاب شده و با سایر مودها ترکیب می‌شود و امکان تشخیص ابتدای مود A<sub>0</sub> را دشوار می‌کند که همین مسئله باعث اعمال خطا در اندازه‌گیری می‌شود.

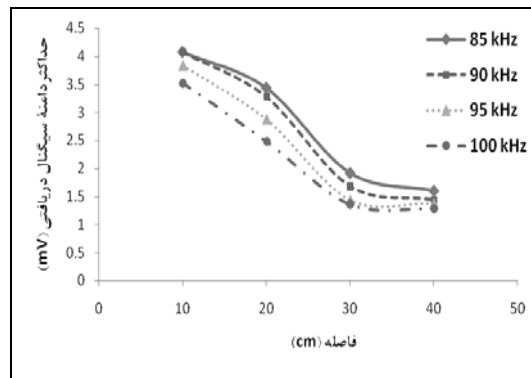


شکل (۹) - تبدیل Yule AR از فرکانس‌های دریافتی در فاصله ۱۰ سانتی‌متر با چهار فرکانس تحریک

### تحلیل موجک

تحلیل موج دسته‌ای از توابع ریاضی می‌باشند که امکان بررسی سیگنال در دو حوزه زمان و فرکانس را به صورت همزمان فراهم می‌کنند. [۱۰] در این بخش سیگنال‌های دریافتی در چهار نقطه آزمایش و با فرکانس تحریک ۹۰ کیلوهرتز، پس از پردازش اولیه و فیلتراسیون، تحت تحلیل موجک قرار گرفته شده‌اند. نتیجه این تحلیل در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل مربوط به فاصله ۱۰ سانتی‌متر شامل یک دسته موج قوی با فرکانس مرکزی ۹۰ کیلوهرتز می‌باشد که با توجه به منحنی پراکندگی و توضیحات داده شده در بخش ۳، مود  $A_0$  ورق می‌باشد. در ادامه دسته‌موج تضعیف‌شده دیگری نیز با همان فرکانس مرکزی مشاهده می‌شود که اثرات بازگشت از دیواره<sup>۱۲</sup> می‌باشند و به دلیل طی مسافت بیشتر دچار اضمحلال شده‌اند. با توجه به نمودار کاملاً مشهود است که هر دو موج دریافت شده دارای محتوای فرکانسی یکسان بوده، از یک الگو پیروی می‌کنند. در سیگنال دریافتی از فاصله ۲۰

سیگنال‌ها در چهار فرکانس تحریک ۸۵ کیلوهرتز، ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ بررسی شده‌اند. این چهار فرکانس در نزدیکی فرکانس مرکزی پراب قرار دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با دور شدن از نقطه ارسال، دامنه سیگنال دریافتی روند نزولی داشته و بعد از فاصله ۲۰ سانتی‌متری به شدت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فرکانس تحریک دامنه سیگنال دریافتی کاهش پیدا کرده است.



شکل (۸) - منحنی تغییرات حداکثر دامنه سیگنال دریافتی با تغییرات فاصله

### محتوای فرکانسی

جهت انتخاب بهترین فرکانس تحریک، نخست محتوای فرکانسی سیگنال‌های دریافتی بررسی می‌شود. لذا محتوای فرکانسی سیگنال‌های دریافتی در فاصله ۱۰ سانتی‌متر و با چهار فرکانس تحریک ۸۵، ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ کیلوهرتز تحت بررسی قرار گرفته‌اند. برای این منظور از تبدیل Yule AR با مرتبه ۱۰ در بخش پردازش سیگنال نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، محتوای فرکانسی کلیه سیگنال‌ها یکسان بوده و دارای فرکانس مرکزی ۹۰ کیلوهرتز می‌باشند. بنابراین در ادامه مطالعه از این فرکانس، که فرکانس مرکزی پراب می‌باشد، استفاده می‌شود.

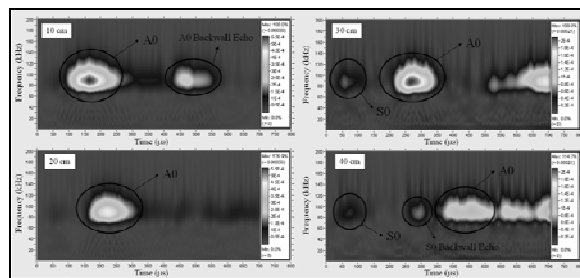


## نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوی انتشار امواج هدایت شده در ایرفویل آلومینیومی ۷۰۷۵ با ضخامت ۱/۴ میلی‌متر بررسی شد. تعداد ۴ پالس سینوسی با فرکانس ۸۵ و ۹۰ و ۹۵ و ۱۰۰ کیلوهرتز توسط پالس ژنراتور ایجاد شده و از طریق پراب اولتراسونیک به درون قطعه هدایت شده و در طرف دیگر توسط پراب دریافت کننده در چهار نقطه با فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری دریافت شد. سیگنال‌های دریافتی تحت پردازش سیگنال، فیلتراسیون و تحلیل موجک قرار گرفتند. سیگنال‌های دریافتی و پردازش شده از لحاظ مود تحریک شده، سرعت مود منتشر شده در طی مسیر، میزان اضمحلال دامنه در طی مسافت انتشار و محتوای فرکانسی با یکدیگر مقایسه شدند. لازم به ذکر است که به دلیل ضعیف بودن مود  $S_0$  در مقایسه با مود  $A_0$ ، کلیه محاسبات مربوط به بررسی سرعت موج و الگوی کاهش دامنه در راستای طول، براساس سرعت و ویژگی‌های مود  $A_0$  انجام شده است.

همان‌طور که مشاهده شد، سرعت به دست آمده از آزمایش با سرعت محاسبه شده از تئوری مطابقت دارد. اما سرعت مود  $A_0$  در طی مسافت به دلیل خاصیت پراکنده‌شوندگی امواج هدایت شده کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل ترکیب اثر دیواره‌ها، که ناشی از مود  $S_0$  می‌باشند، با مود اولیه، تشخیص لحظه شروع سیگنال (به خصوص در فاصله ۴۰ سانتی‌متری) دشوار بوده و محاسبه سرعت را با خطا همراه می‌سازد. شکل (۸) الگوی کاهش دامنه مود  $A_0$  در راستای محور ایرفویل و با چهار فرکانس تحریک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دامنه با حرکت موج کاهش یافته و بین نقطه

سانتی‌متر نیز فقط مود  $A_0$  مشاهده می‌شود که اندکی دیرتر دریافت شده است. در این نقطه اثرات بازگشت از دیواره به دلیل تغییر موقعیت پراب روی ایرفویل حذف گردیده است. در نقاط ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری باز هم مود  $A_0$ ، که با اندکی تأخیر دریافت شده‌اند، مشاهده می‌شود. به علاوه در این دو نقطه مود  $S_0$ ، که دارای سرعت بالا و دامنه کمی (به دلیل ضعیف بودن دامنه مؤلفه خارج از صفحه در ساختار مود) می‌باشد، مشاهده می‌شود که همگی در شکل نشان داده شده‌اند. سایر سیگنال‌های موجود، مربوط به اثرات دیواره می‌باشند. در نقطه ۴۰ سانتی‌متری، مود  $S_0$  به دلیل سرعت بسیار بالا حتی پس از برخورد با دیوار نیز زودتر از مود  $A_0$  دریافت شده است که در شکل مشهود است.



شکل (۱۰) - تحلیل موجک مربوط به سیگنال‌های دریافتی در نقاط مختلف و با فرکانس تحریک ۹۰ کیلوهرتز

با اندکی دقت در نتایج فواصل ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری مشاهده می‌شود که مود  $S_0$  در این دو نقطه نیز دریافت می‌شود، اما چون دامنه آن در مقابل مود  $A_0$  دریافتی بسیار ضعیف است، به سختی قابل تشخیص است. اما در فواصل ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری مود  $S_0$  اختلاف دامنه کمتری با مود  $A_0$  دارد. این مسئله نشان می‌دهد که مود  $S_0$  تحت اضمحلال کمتری قرار گرفته است.



۲ و ۳ (فواصل ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر) کاهش چشمگیری را از خود نشان می‌دهد.

به دلیل وجود نویز شدید در سیگنال‌های دریافتی، نیاز به پردازش سیگنال به شدت مشهود بود. لذا با استفاده از جدیدترین روش‌های پردازش سیگنال به پردازش سیگنال‌ها پرداخته شد. نخست با اعمال فیلتراسیون مناسب نویز موجود روی سیگنال‌ها حذف شد تا سیگنال واضح‌تر و شفاف‌تری به دست آید. (شکل ۷) سپس از سیگنال‌های فیلترشده تحلیل موجک گرفته و الگوی انتشار موج در قطعه بررسی شد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، ابتدا مود  $S_0$  با سرعت بسیار بالا و دامنه بسیار ضعیف دریافت می‌شود و پس از آن مود  $A_0$  با سرعت کمتر و دامنه بیشتر دریافت می‌شود. تشخیص مود  $S_0$  به دلیل ویژگی ساختاری آن بسیار دشوار است، اما با بررسی مود  $A_0$  مشاهده می‌شود که سرعت آن با سرعت مود  $A_0$  به دست آمده از منحنی پراکندگی شکل (۵) کاملاً مطابقت دارد.

در فاصله ۱۰ سانتی‌متری، دسته موج اول دریافت شده مربوط به مود  $A_0$  می‌باشد که به وضوح و با قدرت بالایی در تصویر مشخص است. دسته موج دوم مربوط به انعکاس همان مود  $A_0$  از دیواره‌ها می‌باشد که اندکی پس از موج اول به نقطه دریافت می‌رسد. با کمی دقت مشاهده می‌شود الگوی این دو موج، اعم از شکل و محتوای فرکانسی و طول سیگنال، کاملاً مشابه با یکدیگر بوده که اثباتی بر یکسان بودن مود هر دو موج و الگوی انتشار آنها می‌باشد.

نتایج تجربی و تئوری نشان می‌دهند که مود  $S_0$  به دلیل سرعت بسیار بالا (در حدود ۲/۵ برابر مود  $A_0$ ) بسیار زودتر از مود  $A_0$  دریافت می‌شود و حتی در فاصله ۴۰ سانتی‌متری دیده می‌شود که اثرات بازگشت از دیواره

مربوط به مود  $S_0$  زودتر سیگنال اصلی مود  $A_0$  دریافت شده است. اما در این نقطه به دلیل دور شدن پراب گیرنده و فرستنده، اثرات بازگشت از دیواره مربوط به مودهای مختلف به شدت در سیگنال دریافتی ادغام شده و تفسیر آن را با پیچیدگی همراه می‌سازند. لذا پیشنهاد می‌شود که جهت عیب‌یابی و تفسیر سیگنال‌های ناشی از حضور عیب با استفاده از این روش، از فواصل کمتر استفاده شود. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشخص است، سیگنال در یافتی در فاصله ۲۰ سانتی‌متری بسیار واضح بوده و فقط مود  $A_0$  را در خود دارد که همان مود مورد استفاده برای بازرسی است.

### مراجع

- [1] Hegeon Kwun, Sang-Young Kim, and Glenn M. Light, "Long-Range Guided Wave Inspection of Structures Using the Magnetostrictive Sensor"
- [2] James N. Barshinger, *Guided Wave Propagation in Pipes with Viscoelastic Coatings*, A Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, The Pennsylvania State University, August 2001
- [3] Zhongqing Su and Lin Ye, *Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review*, journal of sound and vibration 295 (2006) 735-780
- [4] Daniel Balageas and Claus Piter Fritzen, *Structural Health Monitoring*, ISTE Ltd, 2006
- [5] Tribikram kundu, "ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE EVALUATION", CRC PRESS, London, 2004
- [6] Seth S Kessler, S Mark Spearing, *Damage detection in composite plate materials using lamb wave methods*
- [7] Zhenggan Zhou, Zhanying Feng, Yifei Gao, Jicheng Bai, *AN OUTLINE OF APPLICATIONS OF ULTRASONIC*

## پی‌نوشت

- 1- Wave Packet
- 2- Lamb
- 3- Dispersion Curve
- 4- Wave Structure
- 5- Out of plane
- 6- In plane
- 7- Wavelet
- 8- Function Generator
- 9- Couplant
- 10- Filtration
- 11- Butterworth
- 12- Backwall Echo

\* \* \*

*GUIDED WAVES IN NON-DESTRUCTIVE TESTING OF LARGE STRUCTURES*, 12th APCNDT 2006 – Asia-Pacific Conference on NDT, 5th – 10th Nov 2006, Auckland, New Zealand

- [8] Wang X, et al. *Experimental investigation of reflection in guided wave-based inspection for the characterization of pipeline defects*. NDT&E Int (2010), doi:10.1016/j.ndteint.2010.01.002
- [9] Jochen VALLEN, Hartmut VALLEN, “Latest improvements on Freeware AGU-Vallen-Wavelet”, European Working Group of Acoustic Emission, EWGAE 2010, Vienna, 8th to 10th September
- [10] A.Graps, “An Introduction to Wavelets”, IEEE Computational Science and Engineering, 1995

**آموزش جامع:**

- ◀ اتوماسیون طراحی مکانیکی
- ◀ آشنایی با ساختار نرم‌افزارهای طراحی مکانیکی
- ◀ روش‌های طراحی در نرم‌افزارهای طراحی مکانیکی
- ◀ طراحی پارامتریک قطعات
- ◀ روش ایجاد مدل‌های صلب
- ◀ مونتاژ قطعات
- ◀ تهیه نقشه دوبعدی از مدل سه‌بعدی
- ◀ روش ایجاد مدل‌های سیم و سطح



**CDهای همراه شما**

CATIA V5R16 نسخه کامل نرم‌افزار

راهنمای تصویری نصب CATIA V5R16

فایل‌های مثال‌ها و پروژه‌های کتاب

**مجموعه کتاب‌های مثلث نارنجی و موج سبز**

**خود آموز طراحی مکانیکی با CATIA V5**

قیمت به همراه ۲ عدد CD: ۱۶۰۰۰ تومان



---

**آموزش جامع:**

- ◀ کدهای استاندارد
- ◀ شناخت نیروها و تنش‌های وارد بر سیستم لوله‌کشی
- ◀ شناخت انواع تکیه‌گاهها
- ◀ مقدمات ساپورتینک
- ◀ روش‌های مدل‌سازی
- ◀ آنالیز استاتیکی مدل
- ◀ تحلیل لوله‌های مدفون
- ◀ تحلیل تجهیزات به‌کاررفته در سیستم
- ◀ مدل‌سازی اتصالات انبساطی
- ◀ مدل‌سازی آویزهای فتری
- ◀ مباحث تکنیکی تحلیل تنش در سیستم لوله‌کشی



**CDهای همراه شما**

CAESAR II 5.10 نسخه کامل و بدون محدودیت نرم‌افزار

فایل مثال‌ها و پروژه‌های کتاب

مجموعه‌ای از کدهای استاندارد سیستم لوله‌کشی

مجموعه‌ای از کاتالوگ‌ها و مدارک فنی

دو نرم‌افزار سودمند برای شناخت اجزای سیستم لوله‌کشی و ساپورتینک

**راهنمای جامع تحلیل تنش Piping CAESAR II**

قیمت به همراه ۲ عدد CD: ۱۷۹۰۰ تومان



---

**برای مشاهده فهرست کامل کتاب‌ها سایت ما را ببینید**

[www.afrangpub.com](http://www.afrangpub.com)



نشر افراژ

تلفن: ۰۲۱-۹۹۹۹۹۹۹۹ - ۰۲۱-۹۹۹۹۹۹۹۹

◀ راهنمای جامع **MATLAB** و **Simulink** جدید

◀ مهندسی معکوس با **CATIA** جدید

◀ خودآموز طراحی مکانیکی با **SolidWorks** چاپ هفتم

◀ خودآموز کامل **AutoCAD 2010** - محیط دوبعدی چاپ دهم

◀ آموزش طراحی اجزا و مفاهیم مصالح به کمک نرم‌افزار **ANSYS** چاپ چهارم

◀ راهنمای جامع **LabVIEW** زبان برنامه‌نویسی گرافیکی جدید

از این مجموعه کتاب‌ها

