Archive of SID

مقاله

بررسی تجربی الگوی انتشار امواج هدایت‌شدهٔ فراصـــوتی در امتداد نمونهٔ 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 ... به‌دلیل کاهش هزینه‌های ناشی از تعمیر و نگه‌داری و پیش‌گیری از خرابی‌های ناگهانی از اهمیت بسیاری برخوردارند. یکی از شیوه‌های نوین به‌کار رفته در سیستم‌های پایش سلامت، به‌کارگیری امواج هدایت‌شدهٔ فراصوتی است. الگوی انتشار امواج هدایت‌شده در محیط‌های مادی به‌شدت متأثر از پارامترهایی چون فرکانس تحریک، ضخامت قطعه، نوع ماده و مسافت طی‌شده توسط موج است که تحلیل این امواج را پیچیده می‌کند. در این مقاله سعی شده است تا نحوهٔ تأثیر مسافت طی‌شده در انتشار امواج روی مشخصات امواج دریافتی بررسی شود. برای این منظور آزمون امواج هدایت‌شده روی نمونهٔ ایرفویلی از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵، که در صنایع هوانوردی کاربردهای بسیاری دارد، انجام شده و نتایج به‌دست‌آمده 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 هدایت‌شدهٔ فراصوتی، امواج لمب، آلومینیوم ۷۰۷۵، پردازش سیگنال، تحلیل موجک

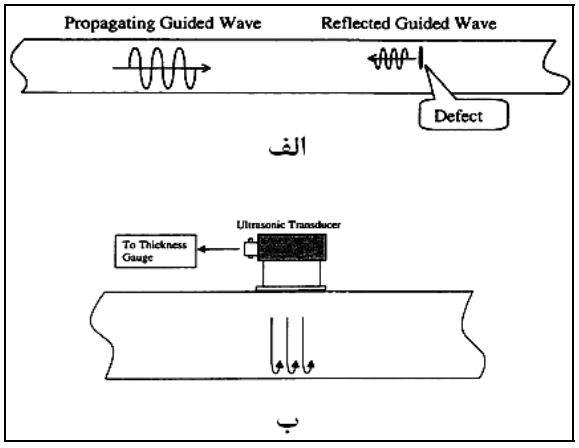
www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

در سال‌های اخیر، در حوزهٔ تست‌های غیرمخرب فراصوتی بخش جدیدی با عنوان امواج هدایت‌شدهٔ فراصوتی توسعه یافته است که در مقایسه با سایر روش‌های بازرسی مزایای بسیاری دارد. این روش باوجود ویژگی‌ها و توانایی‌های منحصر به فرد، به‌دلیل پیچیدگی‌های مربوط به نحوهٔ انتشار و همچنین تفسیر نتایج، همچنان در حال مطالعه است. بنابر تعریف، امواج هدایت‌شده به امواجی گفته می‌شود که به‌صورت دسته‌ای از امواج[1] منتشر می‌شوند و شامل مودهای 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 تسمیهٔ 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 به‌عنوان امواج لمب[2] نیز شناخته می‌شوند که به نام مخترع آن نامیده می‌شوند.[۱] سرعت این امواج به حاصل‌ضرب 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 به‌خوبی عیوب سطحی می‌باشند.



شکل (۱)- مقایسهٔ 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 به‌دلیل خواص ویژهٔ 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 موردنظر انتخاب کرد.

ب: انتشار در یک محدودهٔ 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. [٤]

رسم تغییرات سرعت موج به‌عنوان تابعی از فرکانس، نمودارهای پراکندگی[3] را تشکیل می‌دهد. تغییرات تنش و جابه‌جایی در طول ضخامت ورق نیز شکل مود نامیده می‌شود. جهت تحلیل صحیح و تشخیص

mech_mag@yahoo.com
www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

درست وقوع عیب لازم است این نمودارها با دقت کامل رسم‌شده، و مودهای تحریک‌شده در هر فرکانس معین گردند. تئوری نحوهٔ 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 به‌دست می‌دهد. به‌طوری که در آن داریم:

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

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

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

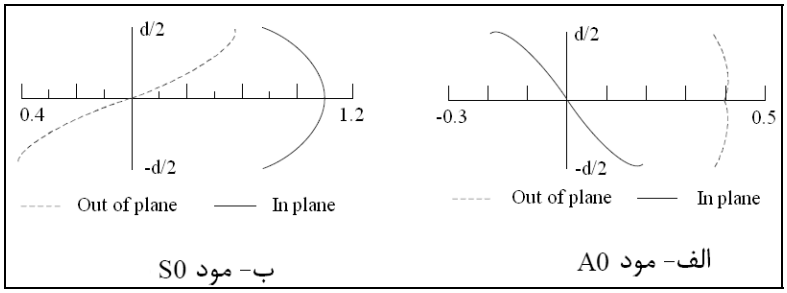
همچنین C_1 سرعت موج لمب (سرعت فازی)، C_p سرعت موج اولیه (موج P) و C_s سرعت موج دومی (موج S) است. ω نیز فرکانس دایره‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه موج منتشر شده است [۵]. در واقع، در یک ورق با ضخامت d و فرکانس آکوستیکی f تعداد معدودی از مودهای انتشار موجود است که با سرعت‌های فازی مشخص تعیین می‌شوند و می‌توان 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 می‌باشند، نامگذاری می‌شوند [٦].

یکی از دلایل اهمیت مطالعهٔ الگوی انتشار امواج هدایت‌شده، داشتن دامنهٔ قابل توجه ارتعاش در عمق ورق می‌باشد. حضور این ارتعاش، که نحوهٔ توزیع آن در ضخامت قطعه در مودهای مختلف متفاوت است، توانایی شناسایی عیوبی که در وسط ضخامت قطعه می‌باشند را نیز فراهم می‌کند. میزان این دامنه، که به‌عنوان ساختار موج شناخته می‌شود[٤]، برای دو مود A_0 و S_0 ورق آلومینیومی در شکل ۲ نمایش داده شده است. [۷] همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ساختار امواج هدایت‌شده از دو مؤلفهٔ تشکیل شده است: مؤلفهٔ خارج از صفحه[٥] بیانگر ارتعاشات عمود بر صفحهٔ ورق، و مؤلفهٔ داخل صفحه[٦] بیانگر ارتعاشات در صفحهٔ ورق می‌باشند. طبق شکل (۲)، مود A_0 دارای مؤلفهٔ خارج از صفحهٔ قوی‌تری از مود S_0 می‌باشد. در مطالعات تجربی که از پراب نرمال اولتراسونیک استفاده می‌شود، همین مؤلفهٔ خارج از صفحه اندازه‌گیری می‌شود. به همین دلیل در آزمایشات انجام‌شده توسط پراب نرمال، مود A_0 بسیار قوی‌تر از مود S_0 دریافت می‌شود.

مزایای امواج هدایت‌شده که شامل حساسیت و تطبیق-پذیری بالا می‌باشند، پتانسیل فوق‌العاده‌ای را برای شناسایی عیوب متفاوت ارائه می‌دهند؛ اما برای توصیف دقیق مشخصات عیوب، دشواری‌ها و پیچیدگی‌های بسیاری در تفسیر داده‌های موج دریافت شده وجود دارد. [۸]

mech_mag@yahoo.com
www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID



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

در این مقاله انتشار امواج هدایت‌شدهٔ فراصوتی در یک نمونه ایرفویل مدل‌شده از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵، که در صنایع هواپیمایی و کشتی‌سازی به‌وفور استفاده شود، بررسی شده، سپس با مقایسهٔ امواج دریافت‌شده توسط پراب اولتراسونیکی، که در نقاط مختلف و با فواصل متفاوت از تحریک‌گر موج قرار دارد، تأثیر پارامتر فاصلهٔ پراب گیرنده تا فرستنده بررسی شده است. در قسمت بعد نحوهٔ چیدمان اجزای به‌کار رفته در آزمون و نتایج به‌دست آمده به تفصیل بیان شده است. سپس نتایج از طریق مقایسه با سرعت‌های به‌دست آمده از حل تئوری صحه‌گذاری شده‌اند. در پایان سیگنال‌های دریافتی بررسی شده و با استفاده از روش‌های پیشرفتهٔ پردازش سیگنال فیلتر شده و با استفاده از تحلیل موجک[۷] در دو حوزهٔ فرکانسی و زمانی مقایسه شده‌اند.

مطالعهٔ تجربی

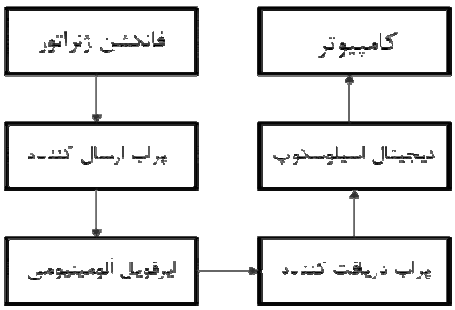
برای انجام تحقیقات آزمایشگاهی در حوزهٔ امواج هدایت‌شده، به چیدمان آزمایشگاهی[۲] ویژه‌ای نیاز است که نمونه‌ای از آن در این مرکز طراحی و راه‌اندازی شده است. شکل(۳) سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مرکز برای ایجاد امواج هدایت‌شدهٔ فراصوتی را نمایش می‌دهد. برای ایجاد امواج هدایت‌شده و تحریک مودهای مختلف به ارسال یک پالس سینوسی به‌درون پراب نیاز است. برای این منظور از یک فانکشن ژنراتور[۸] استفاده شده است که این سیگنال سینوسی را با تعداد پالس دلخواه ایجاد می‌کند. در این تحقیق از چهار پالس سینوسی استفاده شده است. دامنهٔ سیگنال خروجی از فانکشن ژنراتور ۱۲ ولت می‌باشد. برای تبدیل این سیگنال ولتاژ به سیگنال مکانیکی و ارسال موج الاستیک به‌درون قطعه عموماً از پراب اولتراسونیک و یا مبدل پیزوالکتریک استفاده می‌شود. در این تحقیق برای ارسال امواج به‌درون قطعه از یک پراب اولتراسونیک استفاده شده است. این پراب با استفاده از کوپلنت[۹] (برای پرکردن فاصلهٔ هوایی بین پراب و قطعه) روی ورق متصل شده است. در شکل (٤) پراب مورد استفاده و نحوهٔ قرارگیری آن روی ایرفویل نمایش داده شده است. پس از انتشار موج هدایت‌شده 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 اسیوسکوپ دیجیتال برای ذخیرهٔ اطلاعات دریافتی استفاده شده است. در این مطالعه فرکانس نمونه‌برداری توسط دیجیتال اسیلوسکوپ برابر با ۲/۵ MS/s می‌باشد.

همچنین جهت مدل‌سازی ایرفویل، از یک ورق آلومینیوم ۷۰۷۵، که به‌صورت ایرفویل فرم داده شده، استفاده شد.

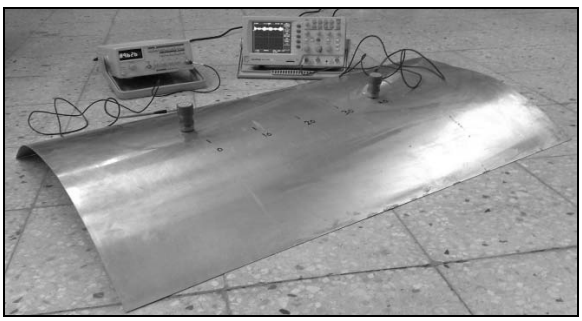
mech_mag@yahoo.com
www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

این سری از آلومینیوم به‌دلیل 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 گلایدر 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)- نمونهٔ 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

مطالعهٔ تئوری و صحه‌گذاری

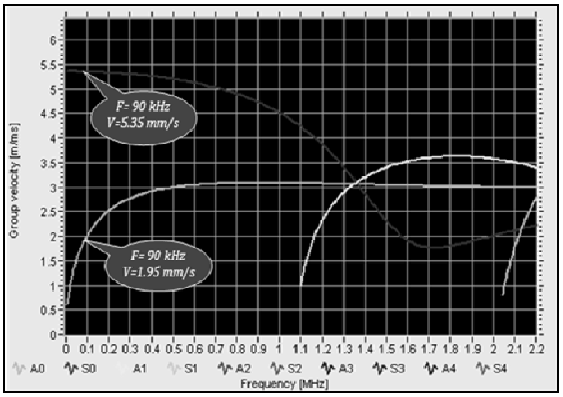
برای بررسی صحت داده‌های به‌دست آمده در بخش تجربی، به محاسبهٔ سرعت حرکت امواج و مقایسهٔ آن با سرعت تئوری به‌دست آمده از منحنی پراکندگی پرداخته می‌شود. این منحنی‌ها با استفاده از نرم‌افزار تجاری AGU-Vallen Wavelet که توسط The Acoustic Emission Company توسعه داده شده است، استفاده شده است. [۹] در شکل (۵) منحنی پراکندگی مربوط به ورق آلومینیومی به ضخامت ۱/٤ میلی‌متر نشان داده شده است. این منحنی با استفاده از روابط تئوری ارائه‌شده در بخش ۱ به‌دست آمده است. پس از استخراج منحنی پراکندگی سرعت گروهی، با درنظرگیری 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 اندازه‌گیری‌شده مربوط به مود A_0 می‌باشند.

لازم به ذکر است که به‌دلیل یکسان‌نبودن پایهٔ 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 ۳۰ µs از زمان دریافت مود کسر شد تا سرعت با دقت بیشتری محاسبه شود. نتایج این محاسبات در شکل (٦) نمایش داده شده است.

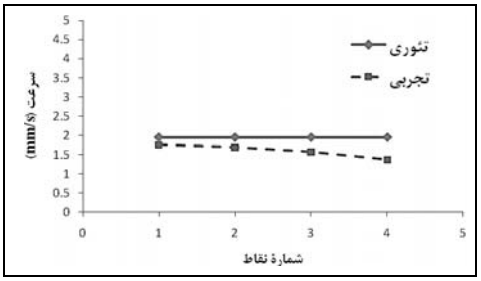
همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت مود A_0 به‌دست آمده از داده‌های تجربی همپوشانی مناسبی با نتایج تئوری دارد. تنها در نقطهٔ ٤ (٤۰ سانتی‌متر) سرعت تجربی به‌دست آمده تفاوت زیادی با مقدار تئوری دارد

mech_mag@yahoo.com
www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID



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



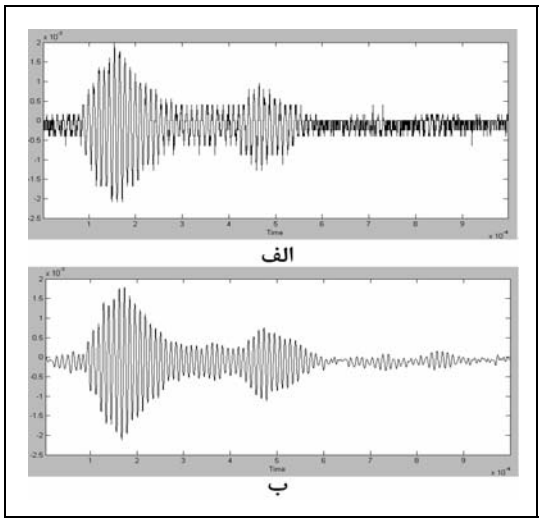
شکل (۶)- مقایسهٔ سرعت مود A0 به‌دست آمده از تئوری و نتایج تجربی

که آن هم به چند دلیل می‌باشد: نخست همان‌طور که در روند نمودار مشخص است با دورشدن از نقطهٔ ارسال، سرعت موج کاهش می‌یابد و در نقطهٔ ٤ به حداقل می‌رسد که این کاهش سرعت به‌دلیل ویژگی پراکنده‌شوندگی امواج هدایت‌شده می‌باشد. بدان معنا که با طی‌کردن مسیر، سرعت موج کاهش یافته، اما شکل سیگنال موج طولانی‌تر می‌شود. دیگراینکه، در نقطهٔ ٤ به‌دلیل دوربودن نقطهٔ دریافت از نقطهٔ ارسال، مود S_0، 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_0 را دشوار می‌کند که همین مسئله باعث اعمال خطا در اندازه‌گیری می‌شود.

نتایج

فیلتراسیون

پس از دریافت و ذخیرهٔ سیگنال‌ها، برای وضوح بیشتر سیگنال، از پردازش سیگنال و خصوصاً فیلتراسیون[10] استفاده شده است تا نویزهای موجود در سیگنال دریافتی را حذف کند. برای این منظور، یک فیلتر پایین‌گذر از نوع باترورث[11] با مرتبهٔ ۱۰ روی سیگنال‌ها اعمال شده تا فرکانس‌های بالای ۱٤۰ 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 فاصلهٔ ۱۰ سانتی‌متر با فرکانس ۸۵ کیلوهرتز قبل و بعد از اعمال فیلتر مشاهده می‌شود.



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

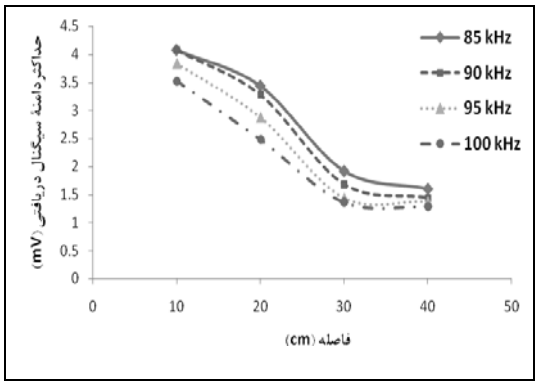
مقایسهٔ دامنه

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

mech_mag@yahoo.com
www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

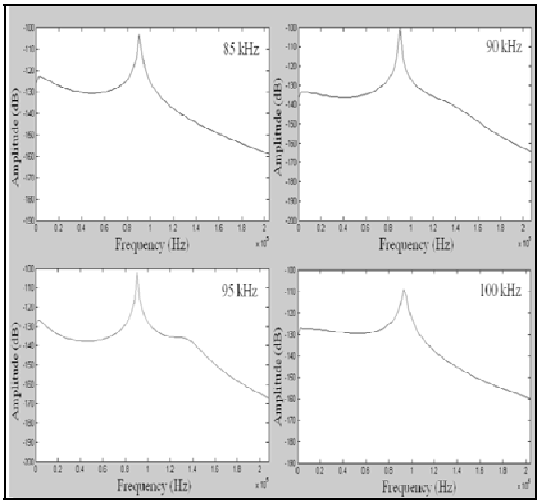
سیگنال‌ها در چهار فرکانس تحریک ۸۵ کیلو هرتز، ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ بررسی شده‌اند. این چهار فرکانس در نزدیکی فرکانس مرکزی پراب قرار دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با دورشدن از نقطهٔ ارسال، دامنهٔ سیگنال دریافتی روند نزولی داشته و بعد از فاصلهٔ ۲۰ سانتی‌متری به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فرکانس تحریک دامنهٔ سیگنال دریافتی کاهش پیدا کرده است.



شکل (۸)- منحنی تغییرات حداکثر دامنهٔ 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 فاصلهٔ 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 مرتبهٔ ۱۰ در بخش پردازش سیگنال نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، محتوای فرکانسی کلیهٔ سیگنال‌ها یکسان بوده و دارای فرکانس مرکزی ۹۰ کیلوهرتز می‌باشند. بنابراین در ادامهٔ مطالعه از این فرکانس، که فرکانس مرکزی پراب می‌باشد، استفاده می‌شود.



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

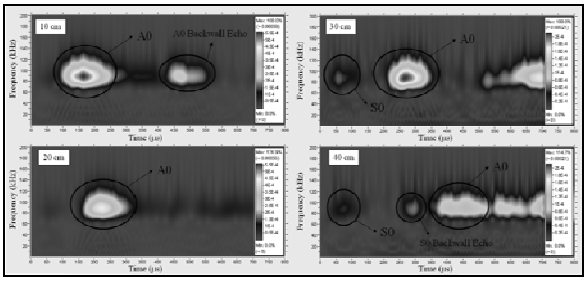
تحلیل موجک

تحلیل موج دسته‌ای از توابع ریاضی می‌باشند که امکان بررسی سیگنال در دو حوزهٔ زمان و فرکانس را به‌صورت همزمان فراهم می‌کنند. [۱۰] در این بخش سیگنال‌های دریافتی در چهار نقطهٔ آزمایش و با فرکانس تحریک ۹۰ کیلوهرتز، پس از پردازش اولیه و فیلتراسیون، تحت تحلیل موجک قرار گرفته شده‌اند. نتیجهٔ این تحلیل در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل مربوط به فاصلهٔ 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 تضعیف‌شدهٔ دیگری نیز با همان فرکانس مرکزی مشاهده می‌شود که اثرات بازگشت از دیواره[۱۲] می‌باشند و به‌دلیل طی مسافت بیشتر دچار اضمحلال شده‌اند. با توجه به نمودار کاملاً مشهود است که هر دو موج دریافت‌شده دارای محتوای فرکانسی یکسان بوده، از یک الگو پیروی می‌کنند. در سیگنال دریافتی از فاصلهٔ ۲۰

mech_mag@yahoo.com
www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

سانتی‌متر نیز فقط مود A_0 مشاهده می‌شود که اندکی دیرتر دریافت شده است. در این نقطه اثرات بازگشت از دیواره به‌دلیل 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. به‌علاوه در این دو نقطه مود S_0، که دارای سرعت بالا و دامنهٔ کمی (به‌دلیل ضعیف‌بودن دامنهٔ مؤلفهٔ 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 نقطهٔ ۴۰ سانتی‌متری، مود S_0 به‌دلیل 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 دامنهٔ 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 دامنهٔ کمتری با مود A_0 دارد. این مسئله نشان می‌دهد که مود S_0 تحت اضمحلال کمتری قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوی انتشار امواج هدایت‌شده 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 به‌درون قطعه هدایت‌شده و در طرف دیگر توسط پراب دریافت‌کننده 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 پردازش‌شده از لحاظ مود تحریک‌شده، سرعت مود منتشرشده در طی مسیر، میزان اضمحلال دامنه در طی مسافت انتشار و محتوای فرکانسی با یکدیگر مقایسه شدند. لازم به‌ذکر است که به‌دلیل ضعیف‌بودن مود S_0 در مقایسه با مود A_0، کلیهٔ 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 به‌دست آمده از آزمایش با سرعت محاسبه‌شده از تئوری مطابقت دارد. اما سرعت مود A_0 در طی مسافت به‌دلیل خاصیت پراکنده‌شوندگی امواج هدایت‌شده کاهش می‌یابد. همچنین به‌دلیل ترکیب اثر دیواره‌ها، که ناشی از مود S_0 می‌باشند، با مود اولیه، تشخیص لحظهٔ شروع سیگنال (به‌خصوص در فاصلهٔ ۴۰ سانتی‌متری) دشوار بوده و محاسبهٔ سرعت را با خطا همراه می‌سازد. شکل (۸) الگوی کاهش دامنهٔ 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 نقطهٔ

mech_mag@yahoo.com
www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

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

به‌دلیل وجود نویز شدید در سیگنال‌های دریافتی، نیاز به پردازش سیگنال به‌شدت 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 به‌دست 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 دامنهٔ بسیار ضعیف دریافت می‌شود و پس از آن مود A_0 با سرعت کمتر و دامنهٔ بیشتر دریافت می‌شود. تشخیص مود S_0 به‌دلیل ویژگی ساختاری آن بسیار دشوار است، اما با بررسی مود A_0 مشاهده می‌شود که سرعت آن با سرعت مود A_0 به‌دست آمده از منحنی پراکندگی شکل (۵) کاملاً مطابقت دارد.

در فاصلهٔ ۱۰ سانتی‌متری، دسته موج اول دریافت‌شده مربوط به مود A_0 می‌باشد که به‌وضوح و با قدرت بالایی در تصویر مشخص است. دستهٔ موج دوم مربوط به انعکاس همان مود A_0 از دیواره‌ها می‌باشد که اندکی پس از موج اول به نقطهٔ 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 یکسان‌بودن 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 فاصلهٔ ۴۰ سانتی‌متری دیده می‌شود که اثرات بازگشت از دیوارهٔ مربوط به مود S_0 زودتر سیگنال اصلی مود A_0 دریافت شده است. اما در این نقطه به‌دلیل دورشدن پراب گیرنده و فرستنده، اثرات بازگشت از دیوارهٔ مربوط به مودهای مختلف به‌شدت در سیگنال دریافتی ادغام شده و تفسیر آن را با پیچیدگی همراه می‌سازند. لذا پیشنهاد می‌شود که جهت عیب‌یابی و تفسیر سیگنال‌های ناشی از حظور عیب با استفاده از این روش، از فواصل کمتر استفاده شود. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشخص است، سیگنال در یافتی در فاصلهٔ 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*

www.SID.ir

Archive of SID

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 STRUTURES, 12th A-PCNDT 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

www.SID.ir