http://mjmec.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

فروردین ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱ ص ص ۹۵-۱۰۶

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۳/۱۹
تاریخ پذیرش ۹۱/۷/۲۰
ارائه در سایت ۹۱/۱۰/۳۰

استخراج مدهای مختلف انتشار موج لمب در یک ورق آلومینیوم چسبیده شده به ورق کامپوزیت توسط اجزاء محدود و آزمایش

پژمان دریابر[۱]، محمود فرزین[۲*]، فرهنگ هنرور[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران
۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* اصفهان، صندوق پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، farzin@cc.iut.ac.ir

چکیده- در این مقاله با استفاده از انتشار موج لمب، نمودار پخشی (نموداری که مدهای مختلف را نشان می‌دهد) برای ورق آلومینیوم متصل به ورق کامپوزیت بدست آورده می‌شود. به این منظور ابتدا با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس، انتشار موج لمب شبیه‌سازی می‌شود و سپس با تبدیل فوریه دو بعدی سیگنال‌های خروجی، نمودار پخشی بدست می‌آید. در ادامه برای بررسی صحت نمودار پخشی، نمونه‌ای متشکل از یک ورق آلومینیوم متصل به ورق کامپوزیت آزمایش می‌شود. برای ایجاد مدهای مختلف از پروب زاویه متغیر با فرکانس مرکزی ۲ مگاهرتز استفاده می‌شود. با استفاده از فاصله سیگنال‌های ورودی و خروجی و همچنین فاصله پروب‌ها، سرعت گروه اندازه‌گیری می‌شود. مقایسه مدهای متناظر بدست آمده از نتایج المان محدود و آزمایش، نشان می‌دهد که سرعت گروه بدست آمده برای هر دو یکسان است. بنابراین سیگنال حاصل از آزمایش، مربوط به مد متناظری است که از شبیه‌سازی بدست آمده است. نتایج شبیه‌سازی برای سه مد اول موج لمب انجام شده است که به کمک آزمایش دو مد اول صحت‌سنجی شده‌اند.

کلیدواژگان: موج فراصوتی لمب، نمودار پخشی، تبدیل فوریه دوبعدی، مدل المان محدود، کامپوزیت.

Calculating the Lamb wave modes in an aluminum sheet bonded to a composite layer with FEM and experiment

P. Daryabor[1], M. Farzin[2*], F. Honarvar[3]

1- PhD. student, Mech. Eng., Iran Univ. of Science and Tech., Tehran, Iran
2- Prof., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
3- Assoc. Prof., Faculty of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
* P. O. B. 8415683111 Isfahan, Iran. farzin@cc.iut.ac.ir

Abstract- This research develops a Lamb wave technique to determine the dispersion curves of a two layered bonded component: an aluminum sheet attached to a composite layer by means of a cohesive. A commercial finite element code (Abaqus Explicit) is used to determine the dispersion curves of the Aluminum-cohesive-composite multilayer component. The finite element model includes three plain strain layers that the middle one is cohesive. Then a lamb wave is propagated in the model and some output signals are received. The dispersion curves are obtained by using 2D Fourier transformation of finite element model output signals. In addition, to produce various modes, experiments are carried out on a composite-aluminum assembly using two 2 MHz variable angle transducers. Comparison of modes obtained from finite element method and experiments shows that group velocities are almost identical. Hence, good agreement between finite element method results and experimental results indicates that finite element is reasonably accurate for determination of dispersion curves.

Keywords: Ultrasonic Lamb Wave, Dispersion Curve, 2D-FFT, Finite Element Model, Composite.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

۱- مقدمه

عیب‌یابی اتصالات از کاربردهای اصلی آزمون فراصوتی با استفاده از موج لمب است. استفاده از موج لمب به کمک پروب زاویه‌ای، سرعت و دقت عیب‌یابی را افزایش می‌دهد. مزیت این روش برای ارزیابی اتصالات این است که کوچکترین تغییری در خواص اتصال باعث تغییر در انتشار موج شده و قابل شناسایی خواهد بود، در حالی که در بسیاری از آزمون‌های غیرمخرب رایج، تغییر در خواص اتصال یا عدم اتصال قابل تشخیص نیست. مقدمه عیب‌یابی با موج لمب، استخراج منحنی‌های پخشی[1] برای نمونه مورد بازرسی است. این منحنی‌ها، مدهای مختلف انتشار موج لمب را نشان می‌دهند. تحقیقات بسیاری برای بدست آوردن این منحنی‌ها انجام شده است ولی در حالتی که ترکیبی از یک جسم همگن و یک جسم غیر همگن وجود دارد، نتیجه خاصی حاصل نشده است. در ادامه، تاریخچه‌ای از این تحقیقات بیان می‌شود.

در زمینه آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج فراصوتی در لایه‌های اتصال‌دهنده، مطالعات بسیاری صورت گرفته است. استفاده از مقاومت طولی در راستای ضخامت لایه‌ها [۱] و ضریب بازگشت موج در لایه‌ها [۲] از جمله مطالعاتی بوده که توسط روخلین و وانگ برای عیب‌یابی اتصالات ارائه شده است. استفاده از موج هدایت‌شده[2] نیز از معمول‌ترین روش‌های عیب‌یابی اتصالات است. این موج که در طول ورق با دو سطح آزاد منتشر می‌شود، به طور معمول موج لمب نام دارد. معادلات انتشار موج لمب برای اولین بار توسط ویکتوروف [۳] ارائه شده است.

برای استخراج معادلات انتشار موج لمب در ورق کامپوزیت به طور عمده دو روش ارائه شده است. روش اول پاسخ دقیق با تئوری الاستیسیته سه‌بعدی و روش دیگر، حل تقریبی به وسیله تئوری ورق و پوسته است. با استفاده از روش اول که توسط مال [۴] ارائه شد، رابطه منحنی پخشی برای ورق کامپوزیتی استخراج شد. هاسکل و نوپوف [۶،۵] روش ماتریس مرجع[3] و انتقال ماتریس را برای استخراج رابطه پخشی برای چند لایه‌ها ارائه کردند. شناسایی و ایجاد مدهای مناسب با استفاده از منحنی پخشی برای چند لایه فلز-فلز توسط روخلین ارائه شد [۷]. نحوه انتخاب مد مناسب برای شناسایی عیب توسط روخلین ارائه شده است [۸]. نحوه ایجاد مدهای مختلف نیز توسط رز ارائه شده است [۹]. به غیر از موج لمب، استفاده از موج‌های دیگر برای عیب‌یابی اتصالات نیز توسط گیوت و کالی بررسی شده است [۱۰].

استفاده از محاسبات برای استخراج منحنی‌های پخشی بسیار زمان‌بر و دشوار است. همچنین امکان ایجاد خطا در محاسبات نیز بسیار محتمل است. استفاده از المان محدود یکی دیگر از روش‌های استخراج این منحنی‌ها است که مشکلات روش قبل را ندارد. شبیه‌سازی انتشار امواج به روش المان محدود پیش از این نیز ارائه شده است [۱۱]. در زمینه کاربرد المان محدود در عیب‌یابی چندلایه‌ها نیز مطالعاتی صورت گرفته است [۱۲]. در این مطالعات، عوامل مختلف از جمله اندازه المان و بازه زمانی حل بررسی شده است [۱۳-۱۵]. در زمینه استفاده از المان محدود در استخراج منحنی‌های پخشی، جاکوبس و همکارانش مطالعاتی انجام داده‌اند. اخیراً آنها برای ورق آلومینیوم نیز این منحنی را ارائه کرده‌اند [۱۶].

با نگاهی به مطالعات انجام شده، واضح است که استخراج منحنی‌های پخشی برای اتصال دو لایه همگن و غیرهمگن هنوز انجام نشده است. در این مقاله، منحنی‌های پخشی برای یک لایه آلومینیوم متصل به یک لایه کامپوزیت، با شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، بدست خواهد آمد [۱۷].

برای این منظور ابتدا سه لایه کرنش صفحه‌ای در نرم‌افزار مدل می‌شوند (لایه میانی چسب است)، سپس با اعمال یک ورودی در یک نقطه، انتشار موج لمب در مدل شبیه‌سازی می‌شود. منحنی‌های پخشی با تبدیل فوریه سیگنال‌های خروجی، بدست می‌آیند. نمونه‌ای از قطعه ساخته شد و در آزمایشگاه آزمون غیرمخرب دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صحت مدهای بدست آمده از مدل با نتایج آزمایش مقایسه شده‌اند.

۲- مقدمه ای بر تئوری انتشار موج لمب

با توجه به خواص مواد، هندسه و روش تحریک، امواج مختلفی ممکن است در یک قطعه ایجاد شود [۱۸،۱۹]. معمولاً محیطی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، پیوسته، همگن و با خاصیت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود.

1. Dispersion Curves
2. Guided Wave
3. Global Matrix Method (GMM)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

برای حل معادله حرکت ناویر (معادله دیفرانسیل برای ترم‌های جابجایی) باید یک میدان جابجایی فرض شود؛

$$\mu \nabla^2 u+(\lambda+\mu)\nabla\nabla\cdot u=\rho\ddot{u} \qquad (۱)$$

اگر پاسخ به صورت یک ترکیب از توابع پتانسیل به صورت معادله (۲) فرض شود، معادله انتشار موج الاستیک بدست می‌آید.

$$u=\nabla\varphi+\nabla\times\psi \qquad (۲)$$

معادله (۲) بیانگر سه معادله جابجایی با چهار تابع φ و ψ_1 و ψ_2 و ψ_3 است. برای اینکه یگانه بودن پاسخ معادله تضمین شود، قید اضافه به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$\nabla\cdot\psi=0 \qquad (۳)$$

حل معادله (۱) برای حالت دوبعدی درون صفحه‌ای به صورت معادله (۴) بیان می‌شود. در این حالت $\psi_1=0$ و $\psi_2=0$ و $\psi_3=\psi$ می‌باشد و دو معادله موج جداگانه بر اساس توابع پتانسیل φ و ψ بدست می‌آید.

$$c_L^2\nabla^2\varphi=\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}$$
$$c_T^2\nabla^2\psi=\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} \qquad (۴)$$

در معادلات (۴)، c_L و c_T به ترتیب سرعت موج طولی و سرعت موج برشی می‌باشند.

$$c_L^2=\frac{\lambda+2\mu}{\rho}$$
$$c_T^2=\frac{\mu}{\rho} \qquad (۵)$$

که λ و μ ثابت‌های لامه و ρ چگالی ماده می‌باشند.

اگر وابستگی حرکت موج نسبت به زمان به صورت $\sin\omega t$، $\cos\omega t$ یا $e^{\mp i\omega t}$ باشد، آنگاه موج، هارمونیک نام می‌گیرد. هر تابعی از زمان می‌تواند توسط سری فوریه به صورت مجموعه‌ای از توابع هارمونیک بیان شود، بنابراین اگر پاسخ نسبت به زمان هارمونیک در دست باشد، پاسخ هر تابع وابسته به زمان دیگر را با انجام عکس تبدیل فوریه می‌توان بدست آورد. با توجه به وابستگی توابع φ و ψ نسبت به زمان، پاسخ هارمونیک این توابع، به صورت معادله (۶) بیان می‌شود:

$$\varphi(x_1,x_2,t)=Ae^{(ik_px_1\cos\theta+ik_px_2\sin\theta-i\omega t)}$$
$$=\varphi(x_1,x_2)e^{(-i\omega t)}$$
$$\psi(x_1,x_2,t)=Be^{(ik_sx_1\cos\theta+ik_sx_2\sin\theta-i\omega t)}$$
$$=\psi(x_1,x_2)e^{(-i\omega t)} \qquad (۶)$$

که k_p و k_s به ترتیب عدد موج طولی و عرضی هستند. ω سرعت زاویه‌ای است که رابطه آن با فرکانس به صورت رابطه (۷) می‌باشد.

$$\omega=2\pi f \qquad (۷)$$

A و B در معادله (۶) دامنه توابع پتانسیل φ و ψ هستند. برای معادله موج هارمونیک، معادلات حاکم بر توابع پتانسیل به صورت معادله (۸) تبدیل می‌شود:

$$\nabla^2\varphi+k_p^2\varphi=0$$
$$\nabla^2\psi+k_s^2\psi=0 \qquad (۸)$$

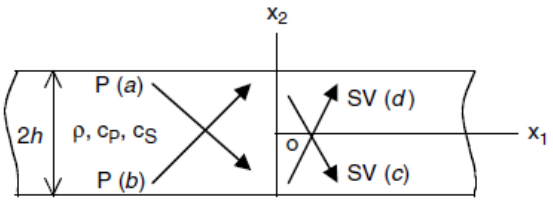
که ترم $e^{-i\omega t}$ در تمام ترم‌های معادله وجود دارد و در رابطه (۸) حذف شده است.

موج صفحه‌ای درون ورق موج لمب نام دارد (شکل ۱). با حل معادلات دیفرانسیل (۸) برای یک ورق همگن، توابع پتانسیل به صورت معادله (۹) بدست می‌آیند:

$$\varphi=(ae^{-i\eta x_2}+be^{i\eta x_2})e^{ikx_1}$$
$$\psi=(ce^{-i\beta x_2}+de^{i\beta x_2})e^{ikx_1} \qquad (۹)$$

$$\eta=\sqrt{k_p^2-k^2}\ ,\quad \beta=\sqrt{k_s^2-k^2} \qquad (۱۰)$$

با اعمال شرایط مرزی مربوط به تنش در سطوح آزاد، برای وجود پاسخ کلی برای متغیرهای a, b, c, d دترمینان ماتریس ضرائب باید صفر باشد. معادله حاصل از صفر شدن دترمینان ماتریس ضرائب، معادله پخشی نام دارد. انتشار موج درون محیط توسط عدد موج k و فرکانس f اندازه‌گیری می‌شود. برای یک عدد موج خاص، موج با فرکانس‌های مختلفی می‌تواند انتشار یابد. حل معادله پخشی، شاخه‌هایی را در دیاگرام فرکانس عدد موج تشکیل می‌دهد. هرکدام از این شاخه‌ها یک مد را نشان می‌دهد. در این معادله، متغیر عدد موج به عنوان تابعی از فرکانس مطرح می‌شود. سرعت فاز (سرعت انتشار موج) c_p که از رابطه $c_p=\omega/k$ بدست می‌آید نیز یک متغیر نسبت به فرکانس است.



شکل ۱ انتشار موج در یک ورق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

هنگامی که دو موج با دو عدد موج و فرکانس اندکی متفاوت جمع می‌شوند، موج حاصل دارای عدد موج و فرکانس میانگین و دامنه متغیر است. می‌توان گفت که موجی که با جمع دو موج تشکیل می‌شود، با همان فرکانس (ω) و عدد موج (k) منتشر می‌شود و دسته موجی بین دو گره متوالی شکل می‌گیرد و با سرعت گروه (c_g سرعت انتشار دسته موج) حرکت می‌کند.

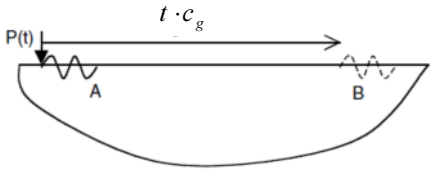
$$c_g=\frac{d\omega}{dk} \qquad (۱۱)$$

سرعت گروه به دلیل این که سرعت انتقال انرژی از یک نقطه به نقطه دیگر است، در محاسبات اهمیت دارد. با فرض اینکه نیروی وابسته به زمان $P(t)$ یک پالس محدود A را (شکل ۲) ایجاد کند، این پالس به عنوان جمع چند موج با فرکانس‌های متفاوت بیان می‌شود. هر کدام از این موج‌ها می‌تواند در ناحیه $\infty<x<+\infty$ وجود داشته باشد. وقتی همه این موج‌ها جمع می‌شوند، یک موج واحد (شکل ۲) ایجاد می‌شود. این موضوع مانند قضیه جمع سری فوریه است. بنابراین پالس A در شکل ۲ یک گروه موج است و باید با سرعت گروه c_g منتشر شود. بعد از زمان t همه پالس باید به مکان B در فاصله $t.c_g$ برسد.

در محیط‌هایی مانند ورق‌ها و لوله‌ها، سرعت فاز و سرعت گروه یکسان نبوده اما برای محیط‌هایی مانند اجسام نیمه بی‌نهایت، این سرعت ها یکسان هستند.

۳- نمونه مورد آزمایش

در مسألهٔ پیش‌رو یک ورق آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر توسط یک لایه چسب به یک ورق کامپوزیت با ضخامت حدود ۱/۶۵ میلی‌متر متصل شده است. لایه آلومینیم و لایه چسب همگن و لایه کامپوزیت غیرهمگن است. ضخامت لایه چسب از اختلاف بین ضخامت نمونه نهایی و ضخامت هر یک از لایه های کامپوزیت و آلومینیوم بدست می‌آید. این مقدار حدود ۰/۲۵ میلی‌متر است. کامپوزیت دارای الیاف تک جهته از جنس شیشه نوع E و ماتریس اپوکسی است. شماتیک نمونه ساخته شده در شکل ۳ مشخص است.



شکل ۲ انتقال موج روی سطح

شکل ۳ شماتیک نمونه ساخته شده

چسب به کار رفته در نمونه چسب فیلمی AF163-2K است که خواص آن در دمای اتاق در جدول ۱ آورده شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم به کار رفته نیز در جدول ۱ آورده شده است. خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده‌شده در نمونه نیز در جدول ۲ آورده‌شده است.

۴- مدل اجزاء محدود

الگوریتم حل صریح[1] آباکوس برای تحلیل مدل‌های گسترده با پاسخ دینامیکی کوتاه مدت، کاربردی‌تر است. این ویژگی این الگوریتم را برای شبیه‌سازی فرکانس‌های بالا مناسب می‌سازد. الگوریتم‌های صریح که در این برنامه المان محدود به کار می‌روند مقادیر دینامیکی در زمان $t+\Delta t$ را فقط بر اساس مقادیر قابل دسترس زمان t بدست می‌آورند.

جدول ۱ خواص لایه های نمونه

	E (MPa)	ν	ρ (kg/m^3)
آلومینیوم	۷۳۸۰۰	۰/۳۳	۲۷۰۰
چسب	۲۰۰۰	۰/۳۳	۱۲۰۰

جدول ۲ خواص لایه کامپوزیت

ρ_{Com} (kg/m^3)	G_{12Com} مدول برشی در صفحه نرمال بر x_3	ν_{12Com}	E_{2Com} مدول یانگ در راستای x_2	E_{1Com} مدول یانگ در راستای x_1
۱۵۰۰	۳۶۰۰	۰/۳۳	۷۵۰۰	۳۵۰۰۰

1. Explicit

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

۴-۱- ملاک‌های اجزا محدود

در این بخش دو ملاک اصلی اجزا محدود بیان می‌شود، که دقت و هزینه مدل‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۰].

الف) بازه زمانی:

در روش حل ضمنی از بازه‌های زمانی خیلی کوچک برای انتگرل‌گیری استفاده می‌شود. این عملگر فقط به صورت مشروط پایدار است. شرط پایداری، برابر بودن زمان عبور از کوچکترین ابعاد المان برای یک موج الاستیک در مدل است. پیش فرض این روش حل برای محاسبه این بازه زمانی به صورت خودکار چنین است:

$$\Delta t \approx \frac{l_{e\,min}}{c_L} \qquad (۱۲)$$

که $l_{e\,min}$ کوچکترین المان در مدل و c_L سرعت موج طولی است. این ارزیابی برای Δt تقریبی است، بنابراین ارزیابی محافظه کارانه برای مدل‌های دوبعدی به صورت زیر است:

$$\Delta t \approx \frac{l_{e\,min}}{\sqrt{2}\,c_L} \qquad (۱۳)$$

این نرم‌افزار به کاربر اجازه می‌دهد که بازه زمانی را انتخاب کند. اگر چه بازه زمانی محاسبه شده توسط روش حل صریح نتایج خوبی را بدست می‌دهد، ولی باید دو نکته دیگر نیز در نظر گرفته شود. اگر بازه زمانی زیاد شود، ارتعاشات با فرکانس بالا قابل حل نیستند و عملیات حل ممکن است ناپایدار شود. در بازه زمانی کوتاه نیز محاسبات بیهوده بسیاری انجام می‌شود. در مجموع با بررسی تجربیات گذشته می‌توان گفت، قانون مناسب معمول برای ارتباط بازه زمانی Δt و بیشینه فرکانس مورد بررسی به صورت رابطه (۱۴) است [۱۵]:

$$\Delta t = \frac{1}{20 f_{max}} \qquad (۱۴)$$

ب) اندازه المان‌ها:

اندازه المان باید به گونه‌ای انتخاب شود که موج منتشر شده به خوبی دیده شود. در مرجع [۱۰] پیشنهاد شده است که در هر طول موج، بیشتر از ۱۰ گره وجود داشته باشد، در حالی که در مرجع [۱۵] تعداد بیشتری پیشنهاد شده است. این تعداد به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود:

$$l_e = \frac{1}{20 k_{max}} \qquad (۱۵)$$

که:

$$k_{max} = \frac{1}{\lambda_{min}} \qquad (۱۶)$$

l_e طول المان و λ_{min} کوتاهترین طول موج و k_{max} بیشترین عدد موج مورد نظر است. کوتاهترین طول موج را می‌توان با سرعت موج برشی (c_T) و بیشینه فرکانس، تخمین زد. بنابراین رابطه (۱۷) حاصل می‌شود.

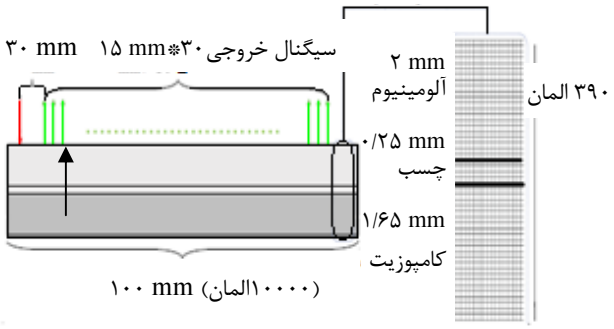
$$l_e = \frac{\lambda_{min}}{20} \approx \frac{c_T}{20 f_{max}} \qquad (۱۷)$$

با توجه به این توضیحات اگر k_{max} را ۵۰۰۰ یک بر متر در نظر بگیریم، مقدار λ_{min} ۰/۲ میلی‌متر خواهد بود. پس طول المان باید حدود ۰/۰۱ میلی‌متر باشد.

۴-۲- مدل تهیه شده در نرم‌افزار

همان‌طور که گفته‌شد پارامترهای مختلفی در مدل‌سازی موثر هستند. در مدل پیش رو، سه لایه برای انتشار موج، مدل شده‌اند. در این مدل برای لایه های آلومینیومی و کامپوزیتی از المان دوبعدی کرنش صفحه‌ای (CPE4R) استفاده شده است. این المان چهار گره دارد، که هر گره شامل دو درجه آزادی است. به دلیل این که طول مدل در راستای عمود بر صفحه حدود ۶۰ برابر ضخامت آن می باشد، فرض کرنش صفحه‌ای برای مدل کردن انتشار موج در آن مناسب است. در واقع معادلات انتشار موج لمب در ورق با فرض کرنش‌صفحه‌ای حل می‌شود [۲۰]. تغییرات انتشار موج لمب در راستای عمود بر صفحه در برابر تغییرات رخ داده در راستای ضخامت بسیار کمتر است. این موضوع بر صحت شبیه‌سازی موج لمب به صورت کرنش صفحه‌ای می‌افزاید. برای مدل کردن لایه چسب از المان (COH2D4) استفاده شده است. این المان دارای خواص ویژه‌ای است، که رفتار چسب را به طور کامل نشان می‌دهد. اندازه المان مهمترین پارامتر است که هزینه حل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. سرعت انتشار موج در چسب، نسبت به آلومینیوم کمتر است و این پارامتر در اندازه المان مورد احتیاج برای هر محیط تفاوت ایجاد می‌کند. با این حال بهتر است اندازه المان در کل لایه‌ها یکسان باشد. چرا که تغییر در اندازه المان‌ها ممکن است انعکاس‌های ریز ایجاد کند که در انتشار موج تاثیر می‌گذارد. به همین منظور در تعیین اندازه المان، آلومینیوم را ملاک قرار می‌دهیم. مدل اجزاء محدود تهیه شده، در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در جدول ۳ نیز مشخصات مدل آورده شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

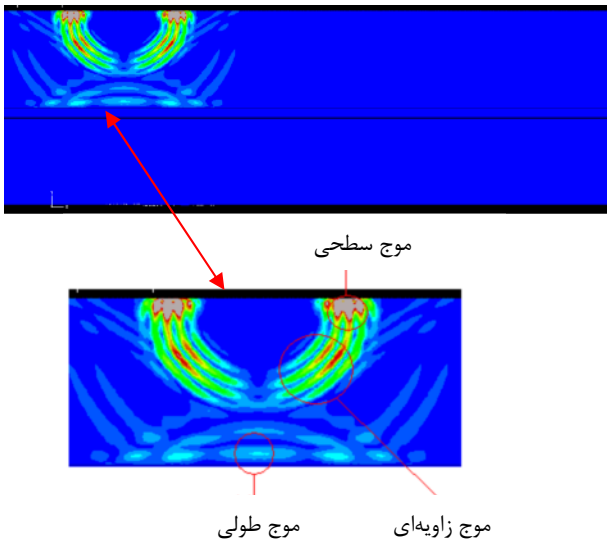


شکل ۴ مدل المان محدود تهیه شده

جدول ۳ مشخصات مدل اجزا محدود

اندازه هر المان (میلی‌متر)	تعداد کل المان‌ها	تعداد کل درجات آزادی	فاصله سیگنال‌های خروجی (میلی‌متر)
۰/۰۱	۳۹۰۰۰۰۰	۷۸۰۰۰۰۰	۰/۵

به منظور جلوگیری از تاثیر اغتشاشات ناشی از ورودی، فاصله بین تحریک و اولین سیگنال خروجی حدود ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۴، سیگنال‌های خروجی با رنگ سبز و سیگنال ورودی با رنگ قرمز مشخص شده است. نیروی ورودی، دامنه‌ای مثلثی با مدت زمان ۰/۱ میکروثانیه با فرکانسی در محدوده ۱۰ مگاهرتز است. این نوع ورودی به صورت منبع موج نقطه‌ای می‌باشد. منبع موج نقطه ای منجر به انتشار موج در همه راستاها می‌شود. در واقع با چنین ورودی انواع موج‌های ممکن بر اساس هندسه جسم منتشر می‌شود. همان طور که گفته شد، موج لمب، موجی است که توسط سطوح ورق هدایت می‌شود. در شکل ۵ انواع موجی که پس از گذشت اندکی از هم جدا می‌شوند، مشخص شده است. قسمت موج طولی که در همان راستای ضخامت حرکت می‌کنند. قسمت موج سطحی نیز فقط در سطح بالایی جسم در حرکت است. قسمت موج زاویه‌ای شامل یک دسته موج با تمام زوایای حرکت از حدود ۱۰ تا ۸۰ درجه می‌باشد. این دسته موج در راستای عمود بر ضخامت حرکت کرده و به سطوح بالا و پایین برخورد می‌کند. این دسته موج همان موج لمب می‌باشد که به حرکت خود در راستای عمود بر ضخامت ادامه می‌دهد. با گذشت زمان مد های مختلف این دسته موج بر اثر اختلاف در سرعت فاز از هم جدا می‌شوند. آنچه در نودهای خروجی در یافت می‌شود اثر این موج‌ها در سطح بالایی می‌باشد.



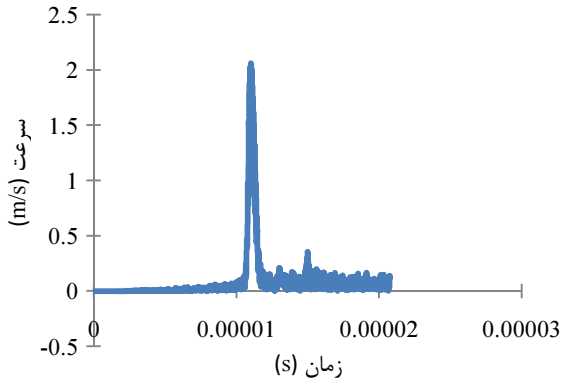
شکل ۵ انتشار موج بعد از گذشت ۰/۷۵ میکروثانیه از شروع انتشار

کل زمان حل حدود ۲۵ میکروثانیه در نظر گرفته می‌شود. به طوری که اثرات ناشی از انعکاس وجود نداشته باشد. در ادامه، انتشار موج مدل شده توسط نرم‌افزار در بازه‌های زمانی مختلف آورده شده است.

۴-۳- تحلیل خروجی

پاسخ مدل اجزاء محدود به عنوان سیگنال خروجی، نمودار سرعت بر حسب زمان است. نمونه‌ای از سیگنال خروجی در شکل ۶ آورده شده است. این سیگنال مربوط به اولین گره از خروجی است، که در شکل ۴ با پیکان مشکی مشخص شده است. قله اول که قوی‌تر است، نشان‌دهنده عبور مد اول پس از زمان حدود ۱۰ میکروثانیه می‌باشد. قله دوم که ارتفاع کمتری دارد می‌تواند نشان‌دهنده مد دیگری باشد که در این فاصله از مد اول جدا شده است. این به دلیل اختلاف در سرعت انتشار مدهای مختلف است. به دلیل فاصله کم خروجی ممکن است تمام مدها به خوبی تفکیک نشوند. به این دلیل برای این تحلیل از خروجی‌های مختلف در مکان‌های مختلف استفاده شده است. بیشتر تحلیل‌ها برای یک سیگنال خروجی صورت می‌گیرد ولی در این تحلیل از چندین سیگنال خروجی استفاده شده است. سیگنال‌های خروجی، همان طور که در مرجع [۱۵] آمده‌است، با تبدیل فوریه دوبعدی در حوزه فرکانس-عدد موج بیان می‌شوند. در ادامه، این تبدیل دوبعدی توضیح داده می‌شود.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]



شکل ۶ نمونه یک خروجی در یک گره

۴-۴- تبدیل فوریه دوبعدی[1]

تبدیل فوریه دوبعدی روش محاسباتی است که به منظور تحلیل و بررسی عددی داده‌ها، استفاده می‌شود. تبدیل فوریه دو بعدی اصولا برای تحلیل داده‌های تجربی که به صورت سیگنال‌های چند مدی هستند به کار برده می‌شود [۱۵].

تبدیل فوریه دوبعدی در واقع تبدیل فوریه از یک تبدیل فوریه است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

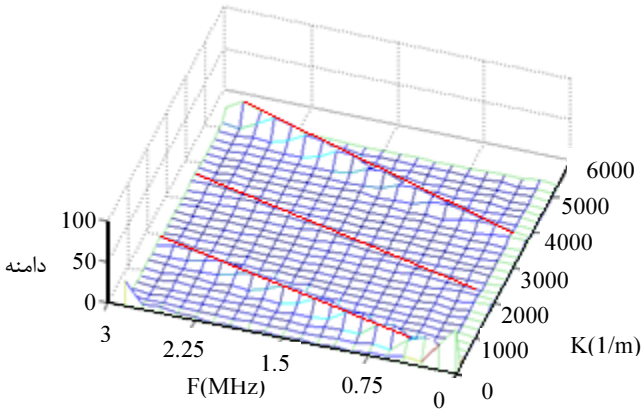
$$S(k,\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} s(x,t)\, e^{-i(\omega t+kx)}\, dxdt$$

که $s(x,t)$ می‌تواند هر تابع دو متغیره‌ای باشد. x و t می‌توانند هر دو متغیر مکان باشند یا یکی مکان و دیگری زمان باشد. به منظور اعمال تبدیل فوریه دوبعدی از این فرم معادله استفاده می‌شود.

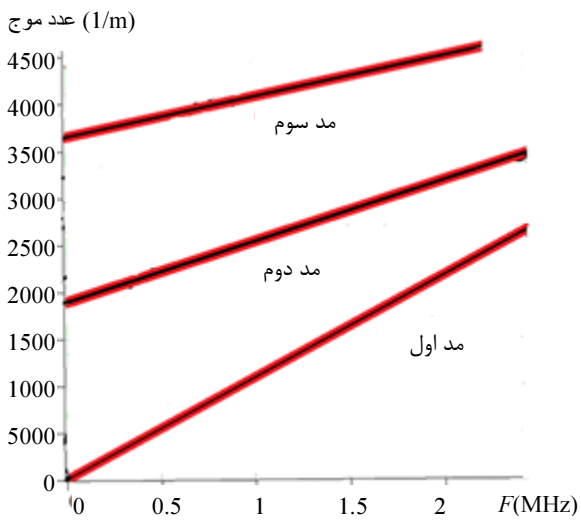
از نقطه نظر انتشار موج، تبدیل فوریه دوبعدی سیگنال اصلی $s(x,t)$ را به سیگنال $S(K,\omega)$ در حوزه فرکانس-عدد موج منتقل می‌کند. حاصل این تبدیل این است که مدهای مختلف به آسانی تفکیک می‌شوند چرا که هر مد از یک رابطه (K,ω) پیروی می‌کند.

با این روش سیگنال‌های خروجی به صورت یک ماتریس مرتب می‌شوند که هر ستون، داده‌های مربوط به یک خروجی در یک گره است. کلاً ۲۵۰ خروجی در فاصله ۳۰ تا ۴۵ میلی‌متر از مدل استخراج می‌شود. فاصله سیگنال‌های خروجی از یکدیگر ۵۰ برابر طول هر المان یعنی ۰/۵ میلی‌متر است. پس حاصل تبدیل فوریه تا عدد موج ۶۰۰۰ یک بر متر را می‌دهد. فاصله زمانی در یافت داده‌ها نیز ۵۰ میکروثانیه است که تا محدوده فرکانس ۶ مگاهرتز را پوشش می‌دهد. حاصل تبدیل در شکل ۷ آورده شده است. برآمدگی‌های مشاهده شده نمایانگر مدهای مختلف هستند.

اگر بر آمدگی‌ها را جدا کرده و در نمودار دوبعدی نمایش دهیم حاصل به صورت شکل ۸ می‌شود. این نمودار، همان منحنی‌های پخشی است. در این نمودار هر خط یک مد را نشان می‌دهد. البته همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، شدت برآمدگی برای مد میانی کمتر از دو مد دیگر است و این می‌تواند بیانگر ضعیف بودن قدرت انتشار این مد نسبت به دو مد دیگر باشد.



شکل ۷ نمودار حاصل از تبدیل فوریه دوبعدی



شکل ۸ نمودار پخشی

1. 2D-FFT

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

سه مد بدست آمده به ترتیب مد اول، مد دوم و مد سوم نامگذاری می‌شوند. صحت این مطلب که آیا واقعاً این ۳ مد در ورق انتشار می‌یابند، توسط آزمون فراصوتی بررسی می‌شود.

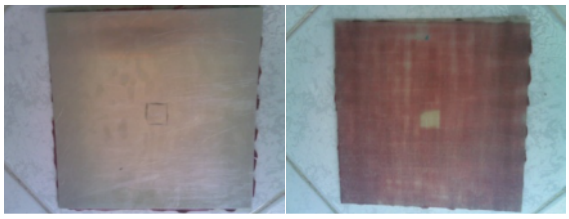
۵- آزمون فراصوتی

در این قسمت ابتدا در مورد نمونه توضیح داده می‌شود و سپس به نحوه انجام آزمایش پرداخته می‌شود. همان‌طور که در بخش ۳ توضیح داده شد، نمونه آزمایشگاهی از یک ورق آلومینیوم ۲۵ × ۲۵ سانتی‌متر مربع تشکیل می‌شود. ضخامت این ورق ۲ میلی‌متر است. یک ورق کامپوزیتی نیز با ابعاد ۲۵ × ۲۵ سانتی‌متر مربع با الیاف تک جهته از جنس شیشه نوع E و رزین اپوکسی با جنس LY564/hardener HY560 تهیه می‌شود. ورق کامپوزیتی حدود ۱/۶۵ میلی‌متر ضخامت دارد. ۴ لایه برای ایجاد این ورق استفاده شده است. ورق‌های آلومینیوم و کامپوزیت با استفاده از چسب فیلمی با جنس AF163-2K به هم متصل می‌شوند. پس از تهیه ورق‌ها و چسباندن آنها نمونه برای ۲۴ ساعت زیر پرس سرد قرار داده می‌شود. همان‌طور که در بخش ۳ گفته شد، ضخامت لایه چسب از اختلاف بین ضخامت نمونه نهایی و ضخامت هر یک از لایه‌های کامپوزیت و آلومینیوم بدست می‌آید که این مقدار حدود ۰/۲۵ میلی‌متر است. در شکل ۹، نمونه آماده برای آزمایش از دو طرف آلومینیومی و کامپوزیتی مشاهده می‌شود.

۵-۱- نحوه انجام آزمایش

آزمایشها در آزمایشگاه تست غیرمخرب دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده است. سیستم فراصوتی این آزمایشگاه شامل اجزای زیر است.

- پروب زاویه متغیر تماسی با فرکانس مرکزی ۲ مگاهرتز محصول شرکت تکنولوژی بازرسی[1] GE.

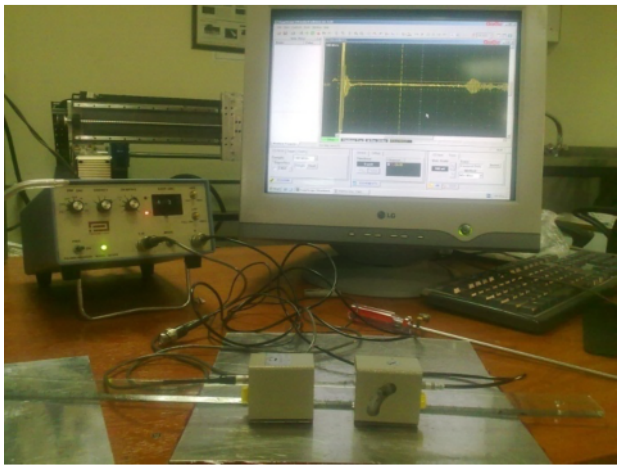


شکل ۹ نمونه تهیه شده برای آزمایش

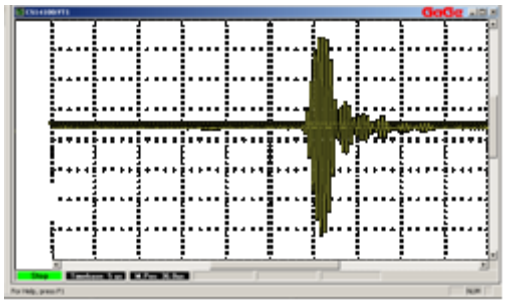
1. GE Inspection Technologies

- فرستنده-گیرنده: دستگاه مدل 5072PR محصول شرکت الیمپس[2].
- کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال به منظور ذخیره‌سازی و پردازش سیگنال‌ها. کارت موجود مدل 14100 Compu Scope محصول شرکت گیج[3] با قابلیت نمونه‌برداری ۱۰۰ MSample بر ثانیه است.

برای نمایش از نرم‌افزار مخصوص گیج اسکوپ[4] استفاده می‌شود. در شکل ۱۰، دستگاه آزمایش مشخص شده است. دو پروب زاویه متغیر به دستگاه فرستنده-گیرنده وصل می‌شوند که یکی نقش گیرنده امواج را دارد و دیگری نقش فرستنده را ایفا می‌کند. دستگاه فرستنده-گیرنده نیز به کارت A/D درون رایانه، متصل است. از این طریق سیگنال‌ها به صورت آنچه در شکل ۱۱ نشان داده شده است، روی صفحه نمایش نمایان می‌شود. این کارت تبدیل، خروجی را به صورت داده‌های دیجیتال قابل نمایش و ذخیره‌سازی می‌سازد.



شکل ۱۰ سیستم آزمون به وسیله پروب زاویه متغیر تماسی



شکل ۱۱ نمونه سیگنال حاصل از آزمون فراصوتی

2. OLYMPUS
3. GAGE
4. GAGE Scope

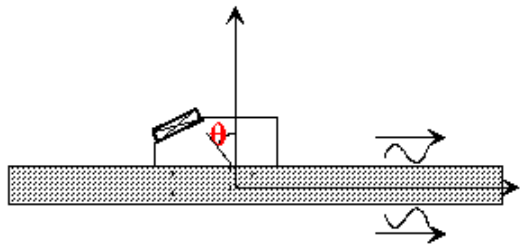
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

نرم‌افزار نمایش و پردازش سیگنال خروجی، نرم‌افزار گیج اسکوپ است. این نرم‌افزار نمایش و ذخیره سیگنال را آسان می‌سازد. برای انجام آزمون پس از متصل کردن تمام اجزا، ابتدا عملکرد سیستم بررسی می‌شود. به این صورت که دستگاه فرستنده-گیرنده را روی حالتی قرار داده که یک پروب هم نقش گیرنده و هم نقش فرستنده را ایفا می‌کند و پروب تا نزدیکی لبه نمونه حرکت داده می‌شود. در صورت مشاهده سیگنال، عملکرد دستگاه صحیح است. پس از بررسی کردن، دستگاه فرستنده-گیرنده را به حالت اولیه باز می‌گردانیم. با تنظیم ولتاژ پالس‌ساز، دامنه سیگنال خروجی تنظیم می‌شود. نکته مهم در طول انجام آزمایش این است که پروب‌ها دقیقاً در یک امتداد قرار گرفته باشند و همچنین فشار اعمالی روی آنها نیز به یک اندازه باشد.

همان‌طور که گفته شد، نمودار پخشی مدهای مختلف ممکن برای فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به وجود پروب زاویه‌ای ۲ مگاهرتز در آزمایشگاه، این فرکانس به عنوان فرکانس کاری انتخاب شد. برای ایجاد هر یک از ۳ مد (نمودار شکل ۸)، سرعت فاز (c_p) مربوط به هر مد را باید ایجاد کرد. برای این کار زاویه پروب ورودی تغییر داده می‌شود. رابطه بین زاویه ورودی و سرعت فاز، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

که c_l سرعت موج طولی محیط منتقل‌کننده موج از پیزوالکتریک به جسم است. در پروب مورد استفاده، این محیط پلکسی‌گلاس است که سرعت موج طولی در آن، حدود ۲۷۰۰ متر بر ثانیه است. بر این اساس زوایایی که در آنها مدهای مختلف ایجاد می‌شود به صورت جدول ۴ بدست می‌آید.

پروب‌های فرستنده و گیرنده برای ایجاد مد اول روی زاویه ۳۰ درجه تنظیم و دقیقاً روبروی یکدیگر قرار داده می‌شوند. بهتر است توسط قطعه خارجی، دو پروب در امتداد یکدیگر ثابت شوند.



شکل ۱۲ زاویه برخورد از محیط واسط به نمونه $\sin\theta=\frac{c_l}{c_p}$

جدول ۴ مدهای ممکن در فرکانس ۲ مگاهرتز

شماره مد	عدد موج (1/m)	سرعت فاز (km/s)	زاویه برخورد (درجه)
۱	۲۳۰۰	۵/۲۷	۳۰
۳	۳۳۰۰	۳/۸	۴۵
۶	۴۲۰۰	۲/۹۹	۶۵

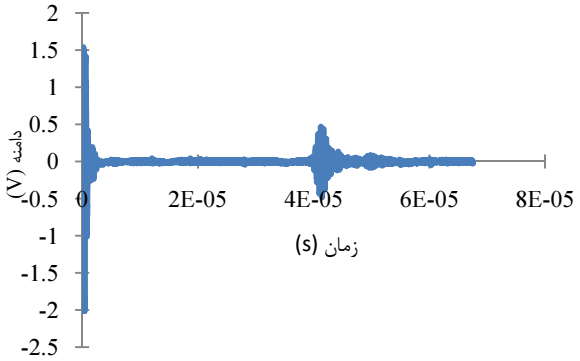
فاصله دو پروب از یکدیگر نباید خیلی زیاد باشد. در غیر این صورت، استهلاک موج باعث می‌شود که سیگنالی در خروجی دریافت نشود. همچنین اگر فاصله کم باشد نیز سیگنالی دریافت نمی‌شود. فاصله مناسب فاصله‌ای است که موج زاویه‌ای در این فاصله ۲ تا ۳ شکست داشته باشد. نکته قابل ذکر این است که قبل از تماس پروب، سطح نمونه توسط چند قطره روغن (به عنوان کوپلنت) پوشانده شود تا فاصله بین سطح پروب و سطح نمونه توسط روغن پر شود. همچنین سطحی که قطعه روی آن قرار می‌گیرد، باید صاف و صیقلی باشد. پس از ثابت شدن پروب‌ها، سیگنال خروجی ذخیره می‌شود. بهتر است تمامی مراحل آزمایش با فشار دست یکسان انجام شود. با اعمال فشار بیش از حد ممکن است، سطوح نمونه یا پروب تحت تأثیر قرار گیرد و تغییر شکل جزئی دهد. در صورتی که فشار دست به حد کافی نباشد نیز، در آزمایش خطا رخ می‌دهد. در این حالت به دلیل وجود ناصافی در سطح جسم، ممکن است حتی با وجود روغن، بین سطح پروب و جسم فاصله به وجود آید. این فاصله در برابر ورود موج به جسم مقاومت نشان می‌دهد. برای ایجاد مد دوم، زاویه ورودی روی ۴۵ درجه تنظیم می‌شود. در این حالت نیز، امتداد و فاصله پروب‌ها و فشار دست تنظیم می‌شود و سیگنال خروجی ذخیره می‌شود. امکان ایجاد مد سوم با زاویه تنظیمی ۶۵ وجود ندارد. چرا که پروب حداکثر تا زاویه ۶۰ درجه منحرف می‌شود و نمی‌توان زاویه ورودی ۶۵ را ایجاد کرد.

۵-۲- نتایج آزمایش

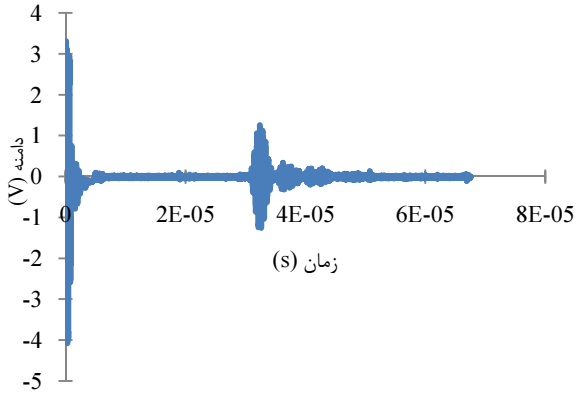
در شکل ۱۳ نتایج مربوط به هر مد به صورت نمودار آورده شده است. محور افقی زمان و محور عمودی دامنه سیگنال است. همان‌طور که اشاره شد، دو مد اول و سوم در نمونه ایجاد شد. شکل ۱۳- الف سیگنال خروجی مربوط به مد اول می‌باشد. برای ایجاد این سیگنال زاویه موج ورودی در ۳۰ درجه تنظیم

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

شد. شکل ۱۳- ب سیگنال خروجی مربوط به مد سوم می‌باشد. برای ایجاد این سیگنال زاویه موج ورودی در ۴۵ درجه تنظیم شد. به دلایل مختلف از جمله تأثیر کناره‌های پروب موج ورودی ممکن است در سیگنال خروجی علاوه بر قله‌ای که مربوط به مد مورد نظر می‌باشد قله‌های ضعیفی هم دیده شود. این موضوع در مورد مد سوم در سیگنال خروجی بیشتر دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳- ب مشخص است پس از قله قوی‌تر که مربوط به مد سوم می باشد دو قله ضعیف دیده می‌شود که مربوط به همین موضوع است و باید نادیده گرفته شود.



شکل ۱۳- الف سیگنال خروجی برای مد اول



شکل ۱۳- ب سیگنال خروجی برای مد دوم

در هر نمودار در ابتدا سیگنال ورودی مشخص است. پس از یک بازه زمانی، سیگنال خروجی نمایان می‌شود. سیگنال خروجی در بازه زمانی گسترده‌تری نسبت به سیگنال ورودی دیده می‌شود. این به دلیل اختلاف سرعت تک موج‌ها است. محور عمودی، دامنه سیگنال را نشان می‌دهد. برای هر یک از دو مد، شکل سیگنال خروجی هم‌شکل است. در ادامه سیگنال‌های خروجی، سیگنال‌هایی با دامنه کوچکتر نیز دیده می‌شوند که نویز ناشی از اختلالات هستند.

اکنون باید اطمینان حاصل شود که سیگنال دریافتی در آزمایش، مربوط به همان مدی است که از المان محدود بدست آمده است. برای این منظور سرعت گروه[1] از نتایج آزمایش و نتایج شبیه‌سازی محاسبه شده و با هم مقایسه می‌شود. با توجه به شکل ۸ و معادله ۱۱، سرعت گروه برای مد اول و دوم به ترتیب تقریباً ۵۱۰۰ متر بر ثانیه و ۷۶۰۰ متر بر ثانیه است.

برای محاسبه سرعت گروه از آزمایش، می‌توان فاصله پروب‌ها در آزمایش را بر اختلاف زمان بین سیگنال خروجی و ورودی تقسیم کرد. با توجه به فاصله حدود ۲۰ سانتی‌متر بین پروب‌ها و با توجه به فاصله بین سیگنال خروجی و ورودی (شکل ۱۳) که حدودا ۴۰ میکروثانیه برای مد اول و ۳۰ میکروثانیه برای مد دوم است، سرعت گروه به صورت نشان داده‌شده در جدول ۵ مقایسه می‌شود.

جدول ۵ مقایسه سرعت گروه حاصل از مدل المان محدود و آزمایش

	Cg (m/s) بدست آمده از نمودار	Cg (m/s) بدست آمده از آزمایش
مقایسه مد اول	۵۱۰۰	۵۰۰۰
مقایسه مد دوم	۷۶۰۰	۶۶۶۰

از مقایسه سرعت گروه‌های بدست آمده از مدل و آزمایش می‌توان مشاهده کرد که مدها به درستی تشخیص داده شده‌اند. اختلافی که در مد دوم دیده می‌شود، می‌تواند ناشی از خطا در اندازه‌گیری فاصله پروب‌ها و یا خطا در محاسبه اختلاف زمان بین سیگنال خروجی و ورودی و یا خطا در خواندن اعداد نمودار باشد.

۶- نتایج

در این مقاله به کمک مدل المان محدود در نرم‌افزار آباکوس، مدهای ممکن برای انتشار موج لمب در ورق آلومینیوم متصل به ورق کامپوزیت بدست آمد. در این فرایند، مدها بر اساس سرعت انتشار متفاوتشان، از هم تفکیک می‌شوند. سه مد متفاوت از روی نتایج شبیه‌سازی بدست آمد. برای صحت‌سنجی مدهای بدست آمده از مدل المان محدود، از دستگاه آزمون

1. Group Wave (Cg)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

موج زاویه‌ای استفاده شد. برای ایجاد هر مد در آزمایش، موجی با سرعت فاز مربوط به همان مد ایجاد می‌شود. برای ایجاد موج با سرعت فاز مشخص نیز، زاویه پروب ورودی تنظیم می‌شود. با تنظیم زاویه برخورد ۳۰ و ۴۰ درجه سیگنال‌هایی دریافت شدند، که مربوط به مدهای اول و دوم بدست آمده از شبیه‌سازی بودند.

در شکل سیگنال خروجی برای زاویه برخورد ۳۰ درجه فقط یک قله دیده می‌شود که مشخص می‌کند که مد اول با سرعت فازی مشخص و متفاوت نسبت به دیگر مدها منتشر می‌شود. در حالی که در سیگنال خروجی با زاویه برخورد ۴۰ درجه (مد دوم) چند قله ضعیف دیگر نیز دیده می‌شود که می‌تواند مربوط به مدهای ضعیفی باشد، که سرعت فازی نزدیک به سرعت فاز مد دوم دارند. برای اطمینان از اینکه، سیگنال خروجی حاصل از زاویه برخورد ۳۰ درجه همان مد اول بوده است یا خیر، سرعت گروهی استفاده می‌شود. برای این منظور با اندازه‌گیری فاصله بین پروب‌های ورودی و خروجی و همچنین فاصله زمانی بین سیگنال خروجی و ورودی در خروجی آزمایش، سرعت گروهی بدست آمد. این مقدار با سرعت گروهی حاصل از نتایج مدل المان محدود مقایسه شد. مقایسه سرعت گروهی تایید می‌کند که سیگنال خروجی در آزمایش، مربوط به همان مد اول است. محاسبات مشابه برای مد دوم نیز تایید می‌کند که، سیگنال خروجی برای زاویه برخورد ۴۰ درجه نیز مربوط به همان مد دوم می‌باشد. به این ترتیب، نمودار بدست آمده از شبیه‌سازی صحت‌سنجی شد.

با توجه به نتایج فوق، می‌توان در عیب‌یابی سازه‌هایی که دارای لایه‌های مختلف با خواص گوناگون هستند، نمودار پخشی و مدهای مختلف را بدست آورد. چند لایه‌ها که هم شامل لایه‌های همگن و هم شامل لایه‌های غیر همگن هستند، کاربردهای فراوانی دارند. عیب‌یابی لایه‌ها و اتصالات آنها، معمولا با استفاده از موج زاویه‌ای صورت می‌گیرد. همان‌طور که ذکر شد، برای این نوع عیب‌یابی ابتدا نمودار پخشی بدست آورده می‌شود. با داشتن این نمودار، تنظیمات اولیه برای انجام آزمون فراصوتی حاصل می‌شود. در این تحقیق روشی ارائه و صحه‌گذاری شد که بدون نیاز به وارد شدن در محاسبات پیچیده مربوط به تئوری انتشار موج لمب در چند لایه‌ها و یا استفاده از انجام آزمایشات مکرر، با استفاده از شبیه‌سازی مدل المان محدود و تبدیل فوریه نتایج حاصل از آن، این نمودار بدست آید. برای این منظور با توجه به جنس و ضخامت لایه‌ها و اتصالات هر نمونه‌ای، مدل المان محدود به صورت ذکر شده، تهیه می‌شود و به روش مشابه نمودار پخشی بدست می‌آید. با توجه به شرایط، مد مناسبی از مدهای موجود انتخاب شده و با استفاده از نمودار بدست آمده، فرکانس، سرعت فاز و در نتیجه زاویه تنظیمی برای انجام تست بدست می‌آید. به این ترتیب هر مدل چندلایه‌ای به شکلی صحیح عیب‌یابی می‌شود.

۶- مراجع

[1] Guyott C., Cawley, "Evaluation of the Cohesive Properties of Adhesive Joints using Ultrasonic Spectroscopy", *NDT International*, 1988, Vol. 21, pp. 233-240.

[2] Rokhlin S., Wang P. Wang, "Analysis of Boundary Conditions for Elastic Wave Interaction with an Interface Between Two Solids", *The Journal of the Acoustical Society of America,* 1991, Vol. 89, pp. 503-515.

[3] Viktorov I., *Rayleigh and Lamb Waves-Physical Theory and Application*, Plenum Press, New York, 1967.

[4] Mal A. K., "Wave Propagation in Layered Composite Laminates under Periodic Surface Loads", *Wave Motion*, 1998, Vol. 10, pp. 257-266.

[5] Knopoff, L., "A Matrix Method for Elastic Wave Problems", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1964, Vol. 54, pp. 431-438.

[6] Haskell N. A., "The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media", *Bulletin of the Seismological Society of America,* 1953, Vol. 43, pp. 17-34.

[7] Rokhlin S. I., "Lamb Wave Interaction with Lap-Shear Adhesive Joints: Theory and experiment", *Journal of the Acoustical Society of America,* 1991, Vol. 89, pp. 2758-2765.

[8] Rokhlin S.I., Li B., Lavrentyer A.I., *Ultrasonic Evaluation of Interfacial Properties in Adhesive Joints*, Assessment of environmental degradation, (Ultrasonics Symposium), 1992.

[9] Pilarski A., Rose J. L., "A Transversive Wave Ultrasonic Oblique Technique for Interfacial Weakness Detection in Adhesive Bonds", *Applied Physices*, 1988, Vol. 63, pp. 300-302.

[10] Guyott C. C. H., Cawley P., Adams R.D., "The Nondestructive Testing of Adhesive Bonded Structures: A review", *Journal of Adhesion*, 1986, Vol. 20, No. 2, pp. 129-159.

[11] Moser F., Jacobs L.J., Qu J., "Modeling Elastic Wave Propagation in Waveguides with the Finite Element Method", *NDT International*, 1999, Vol. 32, pp. 225-234.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]

[12] Lowe M.J.S., Challis R.E., Chan C.W., "The Transmission of Lamb Waves Across Adhesively Bonded Lap Joints", *Journal of the Acoustical Society of America,* 2000, Vol. 107, pp. 1333-1345.
[13] Seifried R., Jacobs L.J., Qu J. "Propagation of Guided Waves in Adhesive Bonded Components", *NDT International*, 2002, Vol. 35, pp. 317-328.
[14] Hosten B., Castaings M. "Finite Elements Methods for Modeling the Guided Waves Propagation in Structures with Weak Interfaces", *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, Vol. 117, pp. 1108-1113.
[15] Alleyne D., Cawley P., "A Two-Dimensional Fourier Transform Method for Measurement of Propagating Multimode Signals", *Journal of the Acoustical Society of America,* 1991, Vol. 89, pp. 1159-1168.
[16] Koreck J., Valle C., Qu J., Jacobs L.J., "Computational Characterization of Adhesive Layer Properties Using Guided Waves in Bonded Plates", *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2005, Vol. 26, pp. 97-105.
[17] Abaqus/Explicit Version 6.5: User Manual, Theory Manual, Example Problems Manual, 2006.
[18] David J., Cheeke N., "*Fundamental and Application of Ultrasonic Waves*", CRC Series in Pure and Applied Physics, 2002.
[19] Rose J. L., *"Ultrasonic Waves in Solid Media"*, Cambridge University Press, 1999.
[20] Kundu T., *Ultrasonic Non Distractive Evaluation*, Engineering and biological Material Characterization, Library of Cataloging in Publication Data, 2003.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.1.13.5]