

شبیه سازی تست غیر مخرب اولتراسونیک با پروب موج عمودی در اتصال بین ورق کامپوزیت و آلومینیوم توسط اجزای محدود

پژمان دریاپر^{۱*}، محمود فرزین^۲ و سعیده کوهستانی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: تست غیرمخرب اولتراسونیک، انتشار موج، مدل المان محدود، لایه چسب، آلومینیوم، کامپوزیت.</p>	<p>در این تحقیق، عیب‌یابی اتصال ورق آلومینیوم و ورق کامپوزیت شبیه‌سازی شده است. برای این منظور، انتشار موج عمودی در لایه‌ها و اتصال بین آن‌ها که توسط پروب موج عمودی ایجاد می‌شود، مدل شده است. این شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS صورت گرفته است. در مدل اجزای محدود سه لایه وجود دارد، که لایه میانی چسب (لایه‌ای که مورد ارزیابی قرار می‌گیرد) می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر وجود عیب در خروجی، یک بار مدل به طور کامل و بار دیگر در قسمت اتصال حفره ایجاد می‌شود. سیگنال‌های خروجی حاصل از شبیه‌سازی با خروجی آزمایش که با دستگاه تست غیر مخرب با پروب موج عمودی انجام شده، مقایسه می‌شود تا صحت شبیه‌سازی تأیید شود. نمونه ساخته شده برای آزمایش، همانند مدل، شامل لایه آلومینیوم متصل به لایه کامپوزیت می‌باشد. در یک ناحیه خاص در نمونه، تست عدم اتصال انجام می‌شود تا هم سیگنال ناشی از اتصال کامل و هم سیگنال ناشی از عدم اتصال، مقایسه شود. نتایج به دست آمده از آزمایش کاملاً بر نتایج شبیه‌سازی منطبق می‌باشد.</p>

۱- مقدمه

در آوردن شرایط عیب‌یابی اتصالات صورت گرفته است. مطالعات اولیه در این زمینه مربوط به استفاده از مقاومت و ضریب بازگشت موج در لایه‌ها بوده است، که توسط روخلین و وانگ [۱] و گایوت و کاولی [۲] ارائه شد. لاو و کالی [۳] نیز با استفاده از تئوری انتشار موج در ورق‌ها، عیب‌یابی اتصالات را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات دیگر همچنین عوامل تأثیرگذار بر انتشار موج و عیب‌یابی در اتصالات را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴-۶]. این مطالعات نشان می‌دهند که چگونه شرایط اتصال در نحوه انتشار موج و عیب‌یابی تأثیر می‌گذارند.

روش المان محدود یکی از پرکاربردترین روش‌های حل مسائل می‌باشد. این روش در شبیه‌سازی انتشار امواج نیز

در صنایع هوافضا، اتصالات ورق‌های کامپوزیتی و آلومینیومی کاربرد زیادی دارند. معمولاً این اتصالات در اثر عوامل مختلف دچار نقص می‌شوند و با توجه به حساسیت این قطعات، عیب‌یابی آن‌ها بسیار مهم می‌باشد. به طور معمول، از موج عمودی برای عیب‌یابی اتصالات استفاده می‌شود. تلاش‌های زیادی به منظور تحت کنترل

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: pejmandaryabor@gmail.com

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

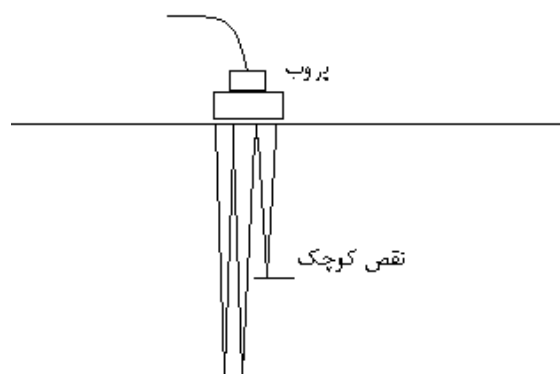
۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

تهران

که هم فرستنده و هم گیرنده می باشد، دریافت می شود. فاصله زمانی بین فرستادن پالس و دریافت پالس برای تعیین فاصله نقص از پروب به کار می رود.

این روش برتری های ویژه ای نسبت به دیگر روش ها دارد که عبارتند از [۱۸]:

- الف) نمونه می تواند هر شکلی داشته باشد.
- ب) تنها دسترسی به یک طرف قطعه تست نیاز است.
- ج) تنها یک نقطه جفت کننده وجود دارد. بنابراین خطا به حداقل می رسد.
- د) فاصله نقص ها را از پروب می توان اندازه گیری کرد.



شکل ۱- شماتیک عیب یابی با پروب موج عمودی

در صنایع هوافضا، برای عیب یابی اتصالات از موج عمودی استفاده می شود. با استفاده از مدل اجزای محدود می توان آنچه را رخ می دهد بررسی کرد و نحوه تشخیص انواع عیوب را دریافت. با داشتن یک مدل از این تست می توان عوامل مؤثر در آسیب یابی و نقش آنها را دریافت. از جمله این عوامل فرکانس موج ورودی، نوع ماده مورد تست، جهت انجام تست، نوع آسیب مورد بررسی و ضخامت لایه ها می باشند، که هر کدام می توانند در عیب یابی نقش داشته باشند. با وجود مدل اجزا محدود، نیاز به ساخت نمونه تست برای بررسی این عوامل از بین می رود و تنها با تغییر پارامترهای نرم افزار می توان شرایط پیش رو را بررسی کرد.

مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. در زمینه کاربرد المان محدود در عیب یابی اتصالات نیز مطالعاتی صورت گرفته است [۸ و ۹]. در این مطالعات، عوامل مختلف از جمله اندازه المان و بازه زمانی حل بررسی شده است [۱۰-۱۲]. در مورد آزمایش های انجام شده در زمینه بررسی اتصالات بین کامپوزیت ها نیز اخیراً فعالیت هایی انجام شده است [۱۳-۱۶]. در این فعالیت ها، معادلات اجزای محدود و نحوه انجام آزمایش برای مقایسه نتایج نیز آورده شده است.

با بررسی تحقیقات ذکر شده به نظر می رسد شبیه سازی المان محدود انتشار موج در اتصالات بین کامپوزیت ها و فلزها و مقایسه نتایج آن با آزمایش، در دسترس نمی باشد. در این مقاله، از الگوریتم صریح^۱ نرم افزار ABAQUS برای این شبیه سازی استفاده شده است [۱۷]. آنچه این مطالعه را برجسته می کند نحوه مدل شدن اتصال به عنوان یک لایه در مدل المان محدود می باشد. این نوع مدل سازی تأثیر شرایط چسب در انتشار موج عمودی را ممکن می سازد. شماره بالانویس ها را در تمام مقاله اصاح کنید در ادامه، ابتدا راجع به تست اولتراسونیک بحث می شود و سپس مدل المان محدود برای شبیه سازی انتشار موج و نتایج حاصل از آن بیان می شود. در ادامه، نمونه تستی که برای آزمایش تهیه شده است توضیح داده می شود و نحوه آزمایش و نتایج به دست آمده از آن نیز آورده می شود. در پایان، نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی مقایسه می شود.

۲- تست اولتراسونیک با پروب موج

عمودی

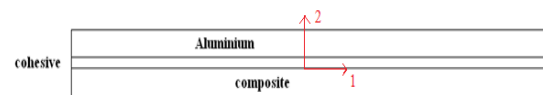
روش عیب یابی با پروب عمودی معمول ترین روش مورد استفاده در تست اولتراسونیک است. در شکل ۱، این روش به صورت شماتیک دیده می شود. تمام یا بخشی از پالس به وسیله نقص درون ماده بازتابیده می شود و توسط پروبی

^۱ Explicit

۳- نمونه مورد بررسی

چسب به کار رفته، چسب فیلمی AF163-2K می‌باشد، که خواص آن در دمای اتاق در جدول ۱ آورده شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم به کار رفته از استاندارد استخراج شده که آن نیز در جدول ۱ آورده شده است. برای ساخت کامپوزیت از الیاف E-Glass و ماتریس آن Epoxy استفاده شده است. درصد حجمی الیاف به طور میانگین ۵۵٪ می‌باشد. البته برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی نمونه‌ای مشابه برای تست آماده شد و مورد آزمایش قرار گرفت. خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده شده در نمونه در جدول ۲ آورده شده است.

در مسئله پیش رو، یک ورق آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر توسط یک لایه چسب به یک ورق کامپوزیت با ضخامت حدود ۱/۶۵ میلی‌متر متصل است (شکل ۲). لایه آلومینیوم و لایه چسب همگن و لایه کامپوزیت غیر همگن می‌باشند. برای لایه چسب، ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر تخمین زده می‌شود.



شکل ۲- شماتیک نمونه

جدول ۱- خواص لایه‌های نمونه

E_{Al}	ν_{Al}	ρ_{Al}	E_{Coh}	ν_{Coh}	ρ_{Coh}
73.8 GPa	0.33	2700 kg/m ³	2 GPa	0.33	1200 kg/m ³

جدول ۲- خواص لایه کامپوزیت

E_{1Com} مدول یانگ در راستای x1	E_{2Com} مدول یانگ در راستای x2	ν_{12Com}	G_{12Com} مدول برشی در صفحه نرمال بر 3x	ρ_{Com}
35 GPa	7.5 GPa	0.33	3.6 MPa	1500 kg/m ³

۴-۱- ملاک‌های اجزای حدود

در این بخش، دو ملاک اصلی اجزای محدود بیان می‌شوند، که هزینه و دقت نتایج مدل‌سازی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد [۱۹]:

الف) بازه زمانی

روش حل ضمنی با استفاده از بازه‌های زمانی خیلی کوچک از زمان انتگرال‌گیری می‌کند. این عملگر فقط به صورت مشروط پایدار است. شرط پایداری، برابر بودن زمان عبور از کوچک‌ترین ابعاد المان برای یک موج

۴-۲- مدل اجزای محدود

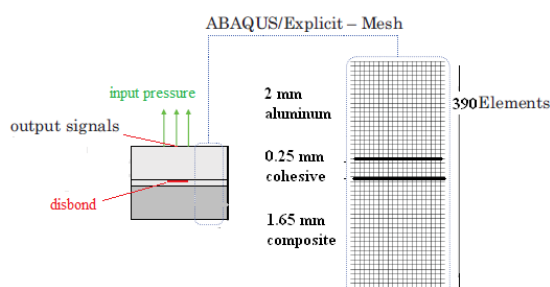
الگوریتم حل صریح ABAQUS برای آنالیز مدل‌های گسترده با پاسخ دینامیکی کوتاه‌مدت کاربردی‌تر است. این ویژگی این الگوریتم را برای شبیه‌سازی فرکانس‌های زیاد بهینه می‌سازد. الگوریتم‌های صریح که در این برنامه المان محدود به کار می‌روند مقادیر دینامیکی در زمان $t+\Delta t$ را فقط بر اساس مقادیر قابل دسترس زمان t به دست می‌آورند.

$$l_e = \frac{\lambda_{min}}{20} \approx \frac{c_T}{20f_{max}} \quad (۶)$$

با توجه به این توضیحات، اگر k_{max} را ۵۰۰۰ متر به توان منفی یک در نظر بگیریم، λ_{min} ۰/۲ میلی متر خواهد بود. پس طول المان باید حدود ۰/۱ میلی متر باشد.

۴-۲- مدل تهیه شده در نرم افزار

همان طور که گفته شد پارامترهای مختلفی برای موفقیت مدل سازی نقش ایفا می کنند. در مدل پیش رو، سه لایه برای انتشار موج مدل شده اند. در این مدل، برای لایه های آلومینیومی و کامپوزیتی از المان 2D کرنش صفحه ای (CPE4R) استفاده شده است. این المان چهار گره دارد، که هر گره شامل دو درجه آزادی می باشد. برای مدل کردن لایه چسب از المان COH2D4 استفاده شده است. این المان دارای خواص ویژه ای است که رفتار چسب را به طور کامل نشان می دهد. اندازه المان حیاتی ترین پارامتر است که هزینه حل را تحت تأثیر قرار می دهد. سرعت انتشار موج در چسب نسبت به آلومینیوم کمتر است و این در اندازه المان مورد احتیاج برای هر محیط تفاوت ایجاد می کند. با این حال بهتر است اندازه المان در کل لایه ها یکسان باشد. چرا که تغییر در اندازه المان ها ممکن است انعکاس های ریز ایجاد کند و این در انتشار موج تأثیر می گذارد. به همین منظور در تعیین اندازه المان، آلومینیوم را ملاک قرار می دهیم. مدل اجزای محدود تهیه شده در شکل ۳ مشاهده می شود.



شکل ۳- مدل FEM تهیه شده برای مدل سازی تست با پروب عمودی

الاستیک در مدل است. پیش فرض این روش حل برای محاسبه این بازه زمانی به صورت خودکار چنین است:

$$\Delta t \approx \frac{l_{e \min}}{c_L} \quad (۱)$$

که $l_{e \min}$ کوچک ترین المان در مدل و c_L سرعت موج طولی است. این ارزیابی برای Δt تقریبی است. بنابراین ارزیابی محافظه کارانه برای مدل های 2D به صورت زیر است:

$$\Delta t \approx \frac{l_{e \min}}{\sqrt{2} \cdot c_L} \quad (۲)$$

این نرم افزار به کاربر اجازه داده است که بازه زمانی را انتخاب کند. اگر چه بازه زمانی محاسبه شده توسط روش حل صریح نتایج خوبی را حاصل می کند، ولی باید دو واقعیت در نظر گرفته شود. اگر بازه زمانی زیاد شود، ارتعاشات با فرکانس زیاد قابل حل نیستند و عملیات حل ممکن است ناپایدار شود. در بازه زمانی کوتاه نیز محاسبات بیهوده زیادی انجام می شود. در مجموع، با بررسی تجربیات گذشته می توان گفت قانون مناسب معمول برای ارتباط بازه زمانی Δt و حداکثر فرکانس مورد بررسی به این صورت است [۱۹]:

$$\Delta t = \frac{1}{20f_{max}} \quad (۳)$$

(ب) اندازه المان ها

اندازه المان باید به گونه ای انتخاب شود که موج منتشر شده به دقت دیده شود. در مرجع [۱۲] پیشنهاد شده است که در هر طول موج، بیشتر از ۱۰ گره وجود داشته باشد. در حالی که مرجع [۱۹] تعداد بیشتری پیشنهاد کرده است. در نهایت می توان از معادله (۴) استفاده کرد:

$$l_e = \frac{1}{20k_{max}} \quad (۴)$$

که:

$$k_{max} = \frac{1}{\lambda_{min}} \quad (۵)$$

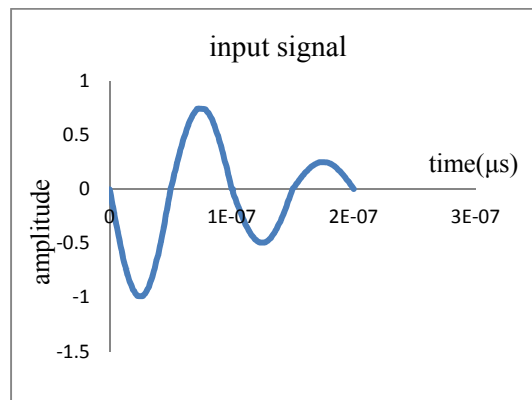
که l_e طول المان، λ_{min} کوتاه ترین طول موج و k_{max} بیشترین عدد موج مورد نظر است. کوتاه ترین طول موج را می توان با سرعت موج برشی (c_T) و حداکثر فرکانس تخمین زد که منجر به رابطه (۶) می شود.

نفوذ بخشی از انرژی در مدل سالم کاملاً مشخص است. در واقع بعد از برخورد موج به خط قرمز (مرز بین چسب و آلومینیوم) قسمت عمده‌ای از موج بازگشت شده و بخشی نیز به لایه چسب و سپس به لایه کامپوزیت منتقل شده است. این همان انتقال انرژی به لایه‌های پایین‌تر در مدل سالم می‌باشد. همچنین عدم نفوذ انرژی به دلیل وجود عدم اتصال بین لایه‌ها در شکل ۶ کاملاً مشخص است. در شکل ۶ که مراحل انتشار موج در مدل با عدم اتصال را نشان می‌دهد، موج پس از برخورد به لایه چسب (منطقه عدم اتصال) تماماً بازگشت شده و به سمت سطح تحریک برمی‌گردد. مشخص است که در این حالت انرژی به لایه‌های پایین‌تر منتقل نشده است.

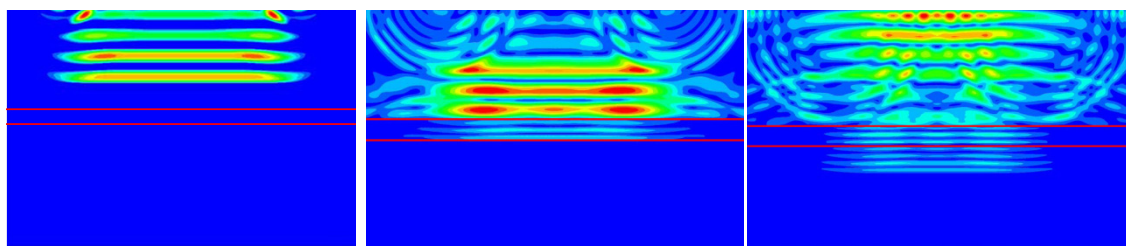
همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، اندازه المان‌ها ۰/۰۱ میلی‌متر می‌باشد. عدم اتصال در مدل از طریق حذف المان‌های چسب در لبه پایین آلومینیومی ایجاد شده است. به منظور مقایسه قطعه سالم و قطعه معیوب، یک بار مدل کامل و بار دیگر این تعداد المان چسب حذف می‌شود.

سیگنال ورودی (شکل ۴) دارای فرکانس ۱۰ MHz می‌باشد و دامنه آن در مدت زمان ۰/۲ میکروثانیه صفر می‌شود.

شکل‌های ۵ و ۶ نحوه انتشار موج در زمان‌های متوالی برای مدل سالم و مدل معیوب را نشان می‌دهند. در شکل ۵ که مراحل انتشار موج برای مدل سالم را نشان می‌دهد،



شکل ۴- نمونه سیگنال ورودی برای مدل FEM

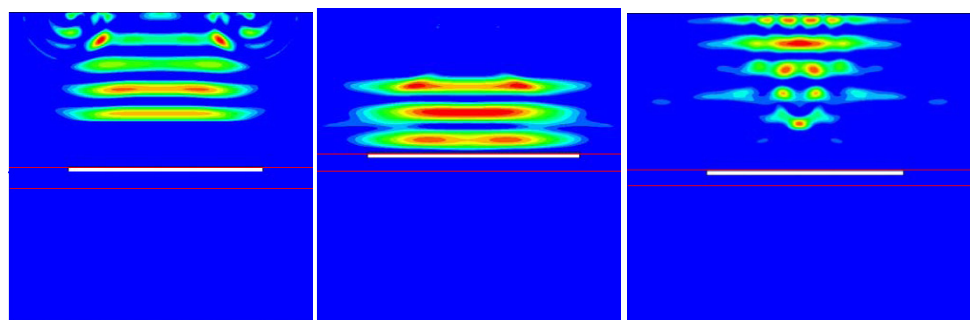


(۱)

(۲)

(۳)

شکل ۵- مراحل مختلف انتشار موج در مدل سالم



(۱)

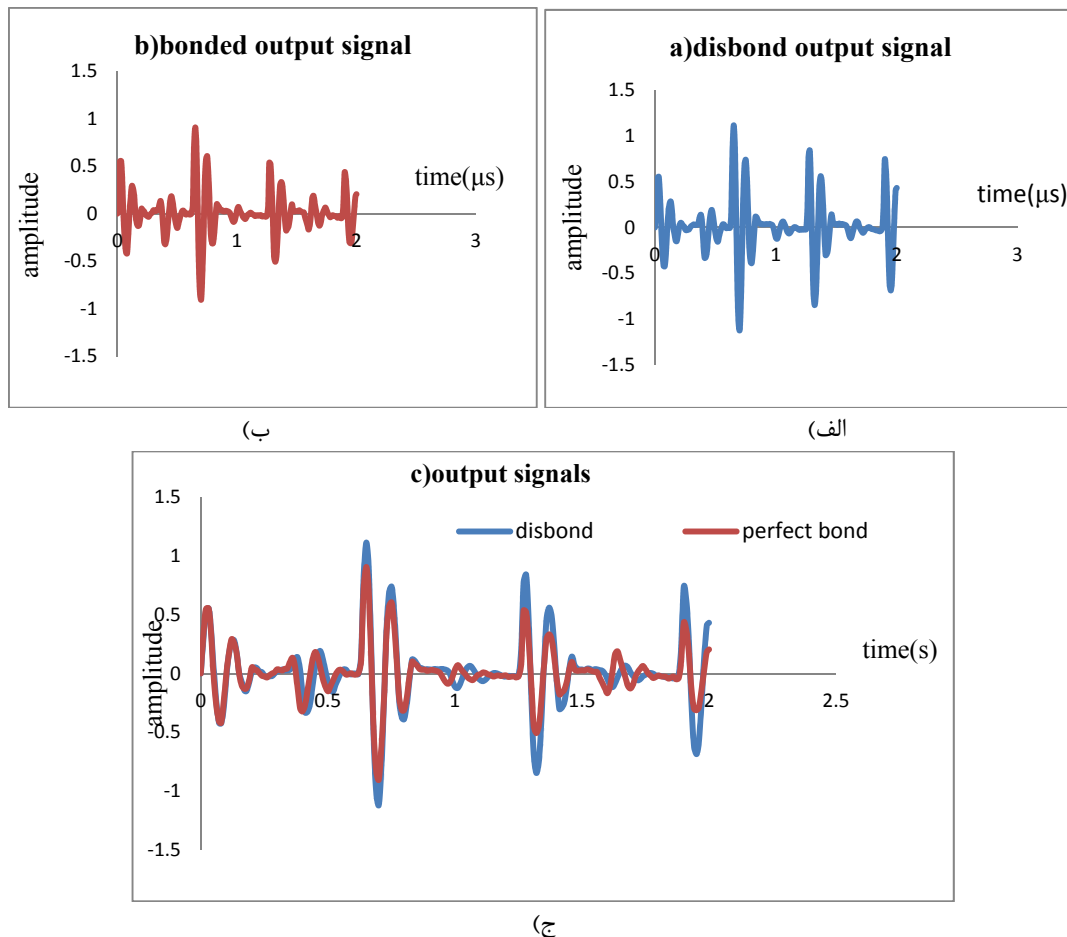
(۲)

(۳)

شکل ۶- مراحل مختلف انتشار موج در مدل معیوب

حسب زمان می‌باشند. کل مدت زمان حل ۲ میکروثانیه طول می‌کشد. شکل سیگنال‌های خروجی به دست آمده از شبیه‌سازی را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد.

در این روش تست از یک پروب استفاده می‌شود، که خود هم نقش گیرنده و هم فرستنده را دارد. پس برای استخراج سیگنال خروجی از همان ناحیه ورودی، خروجی گرفته می‌شود. سیگنال‌های خروجی، منحنی سرعت بر



شکل ۷- الف) سیگنال خروجی برای نمونه با اتصال سالم، ب) سیگنال خروجی برای نمونه با عدم اتصال و ج) مقایسه دو سیگنال الف و ب

نفوذ موج به لایه‌های پایینی برای قطعه معیوب موجب می‌شود انرژی به طور کامل بازگشت شود و دامنه خروجی نسبت به حالت اتصال کامل افزایش یابد. در ادامه، نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

۵- آزمایش

در این بخش، ابتدا نمونه تست توضیح داده می‌شود. برای تهیه نمونه، ورق آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر و لایه

در این نمودار، خط آبی رنگ خروجی مدل با عدم اتصال و خط قرمز رنگ خروجی مدل با اتصال کامل می‌باشد. تکرار سیکل‌های موج، به دلیل بازگشت‌های متعدد در این زمان حل می‌باشد و کاهش پیک برای سیکل‌ها، به دلیل برخورد موج‌های ناشی از بازگشت‌های متعدد بر همدیگر است. سیگنال‌های ضعیف بین سیکل‌ها به دلیل ایجاد موج‌های سطحی^۱ می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش پیک برای مدل معیوب کاملاً واضح است. این به دلیل عدم نفوذ موج به لایه‌های پایینی است.

^۱. surface wave



شکل ۱۰- چند پروب

- یک محیط ۱ برای انتقال انرژی امواج اولتراسونیک به قطعه.

نمونه، همان طور که در شکل ۱۱ مشخص است، روی سطح صافی قرار داده می‌شود. ابتدا سطح نمونه با مایع خیس می‌شود. این همان مایعی است که برای جلوگیری از اتلاف انرژی در انتقال موج از پروب به نمونه استفاده می‌شود. سپس پروب روی نمونه قرار داده می‌شود. با تنظیم دامنه و فرکانس روی دستگاه پالسر/رسیور، موج مورد نظر ایجاد می‌شود. در شکل ۱۲ نحوه گرفتن پروب مشخص است.

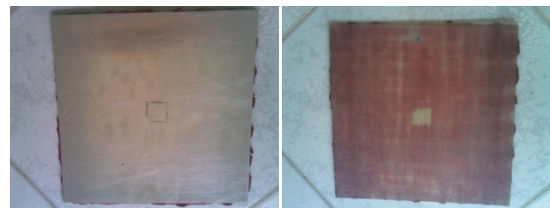


شکل ۱۱- کل لوازم تست مورد استفاده



شکل ۱۲- تست قسمت معیوب

کامپوزیتی به ضخامت $1/65$ میلی‌متر تهیه می‌شود. سپس این دو لایه با چسب به هم متصل می‌شود. به هنگام اتصال لایه‌ها، به منظور ایجاد نقص، در ناحیه‌ای به مساحت $0/25 \times 0/25$ میلی‌متر در وسط نمونه، تفلون قرار داده می‌شود. در واقع تفلون مانع از چسبیدن لایه آلومینیوم و لایه کامپوزیت می‌گردد. در شکل ۸ نمونه مشاهده می‌شود. ناحیه‌ای که در وسط نمونه مشخص است عدم اتصال را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمونه تست تهیه شده

۵-۱- نحوه انجام آزمایش

وسایل آزمایش شامل یک پروب موج عمودی با فرکانس 10 MHz ، پالسر-رسیور و یک پرینتر می‌باشد. دستگاه سوار شده تست در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به طور کلی دستگاه تست اولتراسونیک از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شود:

- یک آشکارساز الکترونیکی که شامل قسمت تولید کننده پالس نیز می‌باشد (شکل ۹).

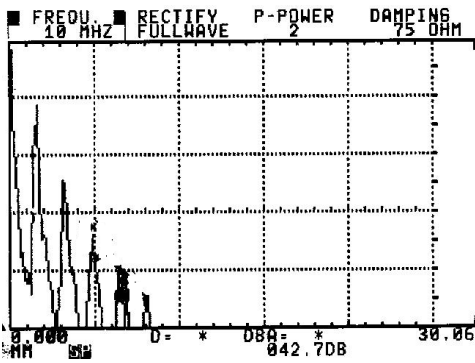


شکل ۹- آشکارساز

- یک پروب دارای کریستال پیزوالکتریک (شکل ۱۰).

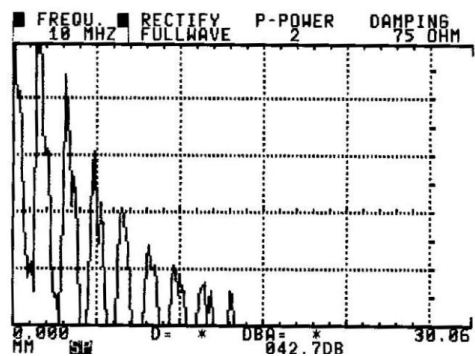
¹ Couplet

برای بررسی صحت نظریه افزایش قله سیگنال خروجی به دلیل وجود عیب، از سیگنال‌های اصلاح شده استفاده شده است. سیگنال‌های اصلاح شده در مواردی که صرفاً مقایسه قدرت انتشار موج مد نظر باشد استفاده می‌شود. شکل ۱۵ سیگنال اصلاح شده دریافتی برای قسمت سالم را نشان می‌دهد.



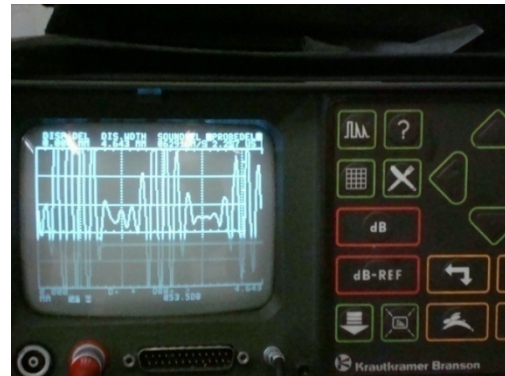
شکل ۱۵- فرم سیگنال دریافتی اصلاح شده برای قسمت سالم

هر کدام از قله‌های نشان داده در این شکل، سیگنال‌های رفت و برگشت را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، با گذشت زمان، قدرت (دامنه) سیگنال‌ها کاهش می‌یابد تا به صفر می‌رسد، که به دلیل وجود میرایی در قطعه می‌باشد. حدود پنج رفت و برگشت برای موج ارسالی رخ داده تا موج از بین رفته است. در شکل ۱۶ همین نوع سیگنال خروجی برای قسمت معیوب آورده شده است. همان طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود قدرت (دامنه) سیگنال‌های رفت و برگشت شده در این حالت نسبت به قدرت سیگنال دریافتی از قطعه سالم افزایش یافته است. این افزایش قله که در نتایج شبیه‌سازی نیز کاملاً مشخص بود، به دلیل وجود عیب می‌باشد.

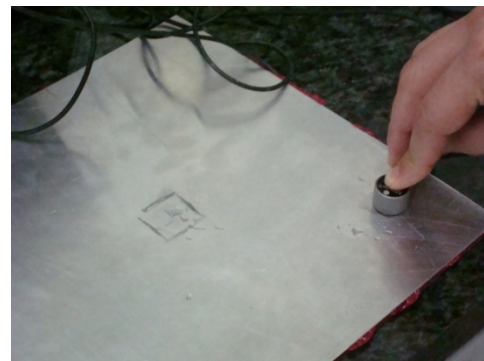


شکل ۱۶- سیگنال دریافتی اصلاح شده برای قسمت معیوب

پس از ثابت کردن پروب و کنترل فشار دست، سیگنال خروجی (شکل ۱۳) ثابت می‌شود. همین روند، برای قسمت سالم نیز تکرار می‌شود (شکل ۱۴) و مجدداً سیگنال خروجی چاپ می‌گردد. برای تست قسمت معیوب، از محل مشخص شده استفاده می‌شود و از باقی نواحی به عنوان تست قسمت سالم استفاده می‌شود.



شکل ۱۳- مانیتور دستگاه تست



شکل ۱۴- تست قسمت سالم

۵-۲- نتایج آزمایش

سیگنال‌های خروجی با توجه به تنظیمات دستگاه به دو شکل اصلاح شده^۱ و معمولی^۲ دریافت شده است. شکل معمولی سیگنال‌ها برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی استفاده شده است. در ادامه، ابتدا شکل اصلاح شده سیگنال‌های خروجی به دست آمده از آزمایش مقایسه می‌شود و سپس شکل معمولی این سیگنال‌ها بررسی و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌شود.

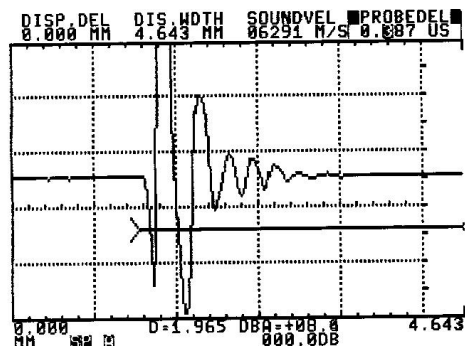
^۱ FFT wave
^۲ Full wave

الف) در نظر نگرفتن خواص میرایی برای ماده شبیه‌سازی شده

ب) اتلاف انرژی ناشی از انتقال موج از پروب‌های گیرنده و فرستنده به نمونه آزمایش

ج) خطاهای ناشی از اپراتور همچون تغییر فشار دست در طول آزمایش یا اشتباه در نحوه قرار دادن پروب‌ها

در ادامه، سیگنال خروجی معمولی به‌دست آمده از آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا شکل سیگنال ورودی آزمایش با آنچه در شبیه‌سازی استفاده شد، مقایسه شده است. شکل ۱۷ سیگنال ورودی آزمایش را نشان می‌دهد. این سیگنال از نظر شکل همانند سیگنال ورودی در مدل نرم‌افزار (شکل ۴) است. فرکانس و ضریب کاهش دامنه (ورودی دامنه مثلثی) برای ورودی آزمایش به گونه‌ای انتخاب شده که با ورودی شبیه‌سازی تطابق داشته باشد. به همین دلیل انتظار می‌رود که شکل سیگنال‌های خروجی در مدل نرم‌افزار و آزمایش شبیه هم باشد.



شکل ۱۷- سیگنال فرستاده شده

در شکل ۱۸، سیگنال خروجی به فرم معمولی برای قسمت سالم دیده می‌شود. همان طور که مشخص است سیکل‌های متوالی به طور مرتب تکرار شده‌اند. افت دامنه در اثر برخورد بازگشت‌های متعدد به یکدیگر کاملاً مشخص است.

تعداد سیگنال‌های رفت و برگشت شده که در شکل ۱۶ مشخص است، بیشتر از تعداد سیگنال‌های رفت و برگشت شده برای قطعه سالم است (حدود هشت رفت و برگشت) که به دلیل عدم نفوذ موج به لایه‌های پایین‌تر در این حالت می‌باشد. در واقع، کل سیگنال ارسالی از سطح عدم اتصال بازگشت شده و میرایی کمتری در این سطح رخ می‌دهد. این مقایسه در جدول ۳ به صورت عددی آورده شده است.

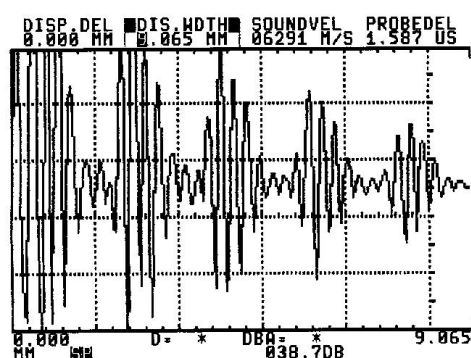
در جدول ۳، درصد افزایش دامنه به دلیل وجود عیب در آزمایش و شبیه‌سازی مقایسه شده است. درصد افزایش دامنه مربوط به سه دسته موج برگشتی به‌دست آمده از شبیه‌سازی که در شکل ۷ نشان داده شده بود، در ردیف اول جدول آورده شده است. در ردیف دوم نیز درصد افت سه قله اول از سیگنال اصلاحی (سه دسته موج برگشتی اولیه)، به‌دست آمده از آزمایش، نشان داده شده است. در این جدول، اندازه دامنه، نسبت اندازه دامنه به دامنه سیگنال ورودی است. گرچه درصد افزایش قله در سه دسته موج اول برای آزمایش و شبیه‌سازی تفاوت دارد، ولی روند این افزایش برای هر دو یکسان است. در کل، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش دیده می‌شود.

جدول ۳- مقایسه میزان افزایش دامنه در شبیه‌سازی و

درصد افزایش دامنه	آزمایش			
	اندازه دامنه نتایج شبیه‌سازی	اندازه دامنه نتایج آزمایش	نمونه سالم	نمونه معیوب
۲۲	۱/۲	۱/۳۱	۰/۷۷	۰/۹۹
۴۳	۱/۰۱	۱/۱۷	۰/۵۱	۰/۹
۳۸	۰/۹۷	۱/۱۲	۰/۳۷	۰/۶

اختلافی که بین درصد افزایش سیگنال مدل شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایش وجود دارد می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

دیده می‌شود. البته این افزایش دامنه به صورت عددی در جدول ۳ نیز آورده شده است.



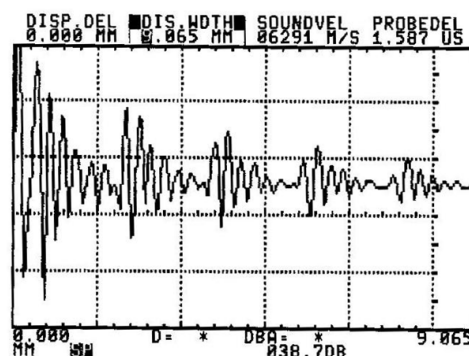
شکل ۲۰- سیگنال دریافتی معمولی برای قسمت معیوب

همان طور که مشخص است، تطابق خوبی بین نتایج آزمایش و نتایج مدل اجزای محدود مشاهده می‌شود. این تطابق چه در مورد شکل سیگنال‌های دریافتی و چه در مورد تغییراتی که به دلیل وجود عیب در دامنه سیگنال رخ می‌دهد، دیده می‌شود. در بخش نتایج، به تفصیل به بررسی نتایج حاصل از مقایسه شبیه‌سازی و تست پرداخته می‌شود.

۶- نتایج

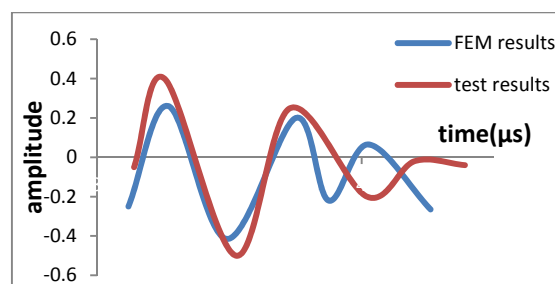
در این مقاله، ابتدا مدل تشکیل شده از سه لایه آلومینیوم-چسب-کامپوزیت به صورت کرنش صفحه‌ای در نرم‌افزار ABAQUS مدل شد. در این مدل، لایه چسب هم به صورت کامل و هم با وجود نقص شبیه‌سازی شد. از نتایج مدل المان محدود یاد شده افزایش پیک سیگنال خروجی ناشی از وجود عیب کاملاً مشهود بود. در این مدل، انتقال انرژی از لایه‌ها به یکدیگر کاملاً مشخص بود.

این نتایج با آزمایش به طور عملی تست شد. برای این کار، نمونه‌ای متشکل از دو لایه آلومینیوم و کامپوزیت متصل به هم تهیه شد. در ناحیه‌ای از وسط نمونه عدم اتصال ایجاد شد. از پروب موج عمودی برای تست استفاده



شکل ۱۸- سیگنال دریافتی معمولی برای قسمت سالم

برای مقایسه این سیگنال (شکل ۱۸) با سیگنال به دست آمده از شبیه‌سازی برای مدل سالم (شکل ۷) یک دسته موج از هر دو در یک نمودار در شکل ۱۹ آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، فرم سیگنال‌ها تا حدود زیادی شبیه هم است. البته اختلاف جزئی که دیده می‌شود می‌تواند به دلیل عواملی که قبلاً اشاره شد، باشد. به طور کل، تشابه شکل موج دریافتی در شبیه‌سازی و آزمایش نشان می‌دهد که آنچه که برای موج ارسالی در شبیه‌سازی رخ می‌دهد، عیناً در آزمایش نیز رخ داده است.



شکل ۱۹- مقایسه یک دسته موج دریافتی از قسمت سالم برای شبیه‌سازی و آزمایش

سیگنال خروجی به فرم معمولی، برای قسمت معیوب در شکل ۲۰ آورده شده است. افزایش دامنه نسبت به سیگنال حاصل از قسمت سالم کاملاً مشخص است. مقایسه شکل این سیگنال با شکل سیگنال حاصل از شبیه‌سازی نیز تأیید می‌کند که میزان افزایش دامنه حاصل از وجود عیب در شبیه‌سازی عیناً در نتایج آزمایش

و ... کاملاً مشابه آن چیزی است که در واقعیت رخ می‌دهد.

۲- تطابق افزایش پیک در سیگنال‌های خروجی

در این مورد درصد افزایش پیک در شبیه‌سازی کاملاً مشابه آن چیزی است که در آزمایش‌ها دیده می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر عوامل مختلف در آزمایش و مدل نرم‌افزاری یکسان بوده است.

با توجه به این نتایج می‌توان به مدل نرم‌افزاری اطمینان کرد و آن را مرجعی قابل اطمینان برای بررسی پارامترهای مؤثر در آزمایش دانست.

شد. نتایج آزمایش نشان داد که بر اثر وجود آسیب در سیگنال خروجی افزایش قله رخ می‌دهد.

آنچه از نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آنها با نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمد را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱- تطابق شکل سیگنال‌های خروجی

در این مورد حتی محل ایجاد قله‌ها و دره‌ها نیز بر هم منطبق بود. از این تطابق می‌توان دریافت که آنچه در مدل نرم‌افزاری رخ می‌دهد (مانند انتقال و بازگشت موج در لایه‌های مختلف، بازگشت‌های ناشی از لبه‌های ورودی

مراجع

- [1] Guyott, C., Cawley, P. (1988), "Evaluation of the cohesive properties of adhesive joints using ultrasonic spectroscopy". NDT Intl., Vol. 21, pp. 233-240.
- [2] Rokhlin, S., Wang, P. (1991), "Analysis of boundary conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids". Acoustic Soc. Am., Vol. 89, pp. 503-515.
- [3] Lowe, M.J.S., Cawley, P. (1994), "The applicability of plate wave techniques for the inspection of adhesive and diffusion bonded joints". Nondestructive Evaluation, Vol. 13, pp.185-200.
- [4] Segal, E., Rose, J.L. (1980), "Nondestructive Testing of Adhesive Bond Joints, Research Techniques in Nondestructive Testing". Edited by R.S. Sharp, Academic Press, London, Chapter 18.
- [5] Pilarski, A. (1985), "Ultrasonic evaluation of the adhesion degree in layered joints". Mater. Evaluation, Vol. 43, pp. 765-770.
- [6] Rose, J.L., Avioli, M.J., Bilgram, R. (1983), "A feasibility study on the NDE of an adhesively bonded metal-to-metal bond". NDT Intl., Vol. 25, pp. 67-71.
- [7] Moser, F., Jacobs, L.J., Qu, J. (1999), "Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method". NDT Intl., Vol. 32, pp. 225-234.
- [8] Lowe, M.J.S., Challis, R.E., Chan, C.W. (2000), "The transmission of Lamb waves across adhesively bonded lap joints". Acoustic Soc. Am., Vol. 107, pp.1333-1345.
- [9] Guyott, C.C.H., Cawley, P., Adams, R.D. (1968), "The nondestructive testing of adhesive bonded structures: A review". J. Adhesion, Vol. 20, pp. 129-159.
- [10] Seifried, R., Jacobs, L.J., Qu, J. (2002), "Propagation of guided waves in adhesive bonded components". NDT Intl., Vol. 35, pp. 317-328.
- [11] Hosten, B., Castaings, M. (2005), "Finite elements methods for modeling the guided waves propagation in structures with weak interfaces". Acoustic Soc. Am., Vol. 117, pp. 1108-1113.
- [12] Alleyne, D., Cawley, P. (1991), "A two-dimensional Fourier transform method for measurement of propagating multimode signals". Acoustic Soc. Am., Vol. 89, pp. 1159-1168.
- [13] Bartoli, I., Marzani, A., Lanza di Scalea, F. (2006), "Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section". J. Sound and Vibration, Vol. 295, pp. 685-707.
- [14] Ech-Cherif El-Kettani, M., Luppé, F., Guillet, A. (2004), "Guided waves in a plate with linearly varying thickness: Experimental and numerical results". J. Ultrasonics, Vol. 42, pp. 807-812.

- [15] De Marchi, L., Marzani, A., Specoale, N., Viola, E. (2010), "Predication of pulse dispersion in tapered waveguides". *NDT & Evaluation Intl.*, Vol. 43, pp. 265-271.
- [16] Marzani, A., Viola, E., Bartoli, I., Lanza di Scalea, F., Rizzo, P. (2008), "A semi-analytical finite element formulation for modeling stress wave propagation in axisymmetric damped waveguides". *J. Sound and Vibration*, Vol. 318, pp. 488-505.
- [17] ABAQUS/Explicit version 6.5: User manual, theory manual, example problems manual (2006).
- [۱۸] هنرور، ف. (۱۳۸۲). آزمون‌های غیر مخرب (NDT) آزمون فرا صوتی. نشر نورپردازان، تهران.
- [19] Koreck, J., Valle, C., Qu, J., Jacobs, L.J. (2007), "Computational characterization of adhesive layer properties using guided waves in bonded plates". *Nondestructive Evaluation*, Vol. 26, pp. 95-107.

MODELING OF NONDESTRUCTIVE ULTRASONIC TEST OF BONDING BETWEEN ALUMINUM AND COMPOSITE USING FEM

P. Daryabor^{1*}, M. Farzin² and S. Koohestani³

1. PhD Student, Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2. Professor, Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
3. PhD Student, Nuclear Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author: pejmandaryabor@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords:

Nondestructive ultrasonic test,
Wave propagation,
FEM,
Cohesive layer,
Aluminum,
Composite.

ABSTRACT

In this research, inspection of bonding between aluminum and composite layer is simulated. To this aim, propagation of vertical wave in layers and their connection, which is created by vertical wave probe, was modelled. This simulation is performed by ABAQUS finite element software. There are three layers in finite element model, which the middle one is cohesive. To show the effect of disbond on the output signals, cohesive layer is modeled with and without hole. The results of simulated output signals were compared to test results, which was performed with nondestructive vertical wave probe, to verify the simulations. The test specimen was made of aluminum bonded to composite. In a special zone in the test specimen, disbond test was performed to compare the signals from complete bonding and nonbonding. There was good agreement between simulation and test results.
