



ارزیابی ترک زمینه در کامپوزیت‌های متعامد به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده لمب

امیررضا امیری‌نژاد¹، سیاوش کاظمی‌راد^{2*}، محمود مهرداد شکرپه³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* skazemirad@iust.ac.ir, 16846-13114، صندوق پستی

چکیده

اطلاعات مقاله:

ارزیابی غیرمخرب خواص مکانیکی و پایش سلامت سازه‌های کامپوزیتی از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این پژوهش، ارائه یک روش ارزیابی غیرمخرب بر پایه گسترش امواج لمب برای بررسی آسیب ترک زمینه در کامپوزیت‌های لایه‌ای است. بدین منظور، پس از ایجاد مدل اجزای محدود یک کامپوزیت شیشه/اپوکسی، رفتار موج لمب در دو مود پادمتقارن (A_0) و متقارن (S_0) با فرکانس‌های تحریک مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، نمودارهای پراکندگی مود A_0 و S_0 موج لمب با در نظر گرفتن چگالی ترک‌های متفاوت به دست آمدند. مشاهده شد که چگالی ترک زمینه و افت خواص مکانیکی کامپوزیت‌های متعامد بر روی سرعت مود S_0 موج لمب بیشتر از سرعت مود A_0 تأثیرگذار است. همچنین، تشخیص ترک زمینه به کمک افت سرعت موج لمب در فرکانس‌های بالا و نزدیک به فرکانس قطع دقیق‌تر انجام شد. مشاهده شد که با افزایش چگالی ترک، فرکانس قطع کاهش یافت و همچنین با افزایش تعداد لایه‌های 90 درجه در کامپوزیت متعامد، افت سرعت موج لمب بیشتر شد. نتیجه‌گیری شد که روش شبیه‌سازی گسترش امواج لمب می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی برای ارزیابی غیرمخرب کامپوزیت‌ها و تشخیص چگالی ترک زمینه در آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

دریافت: 1402/06/13

پذیرش: 1402/09/20

کلیدواژگان

امواج هدایت‌شونده، موج لمب، کامپوزیت متعامد، چگالی ترک، مدل‌سازی اجزای محدود

Evaluation of matrix cracking in cross-ply composites using the finite element simulation of guided Lamb wave propagation

Amirreza Amirinejad¹, Siavash Kazemirad^{1*}, Mahmood Mehrdad. Shokrieh¹

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*P.O. Box 16846-13114, Tehran, Iran, skazemirad@iust.ac.ir

Keywords

Guided waves, Lamb wave, Cross-ply composite, Crack density, Finite element modeling

Abstract

Nondestructive evaluation of mechanical properties and health monitoring of composite structures is of great importance. The aim of this research was to propose a nondestructive evaluation method based on the propagation of Lamb waves to investigate the matrix cracking damage in laminated cross-ply composites. For this purpose, after developing the finite element model of a glass/epoxy composite, the Lamb wave behavior was studied in two antisymmetric (A_0) and symmetric (S_0) modes with different excitation frequencies. The dispersion curves of the A_0 and S_0 modes of the Lamb wave are then obtained by considering different crack densities. It was observed that the effect of matrix crack density and the loss of mechanical properties of the cross-ply composites on the phase velocity of the S_0 Lamb wave mode was higher than that of the A_0 mode. Furthermore, the detection of matrix cracking was better performed using the Lamb wave velocity at high frequencies close to the cut-off frequency. It was observed that the cut-off frequency decreased by increasing the crack density, and the drop in the Lamb wave velocity increased by increasing the number of 90° layers in the cross-ply composite. It was concluded that the Lamb wave propagation simulation method can be used as a virtual laboratory for nondestructive evaluation of composites and detection of matrix crack density in them.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Amirinejad, A., Kazemirad, S., Shokrieh, M. M., "Evaluation of matrix cracking in cross-ply composites using the finite element simulation of guided Lamb wave propagation." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2257-2265, 2024.

https://doi.org/10.22068 /JSTC.2023.2009321.1852

1- مقدمه

کامپوزیت ماده‌ای غیرایزوتروپیک بوده که از اجزای مختلفی تشکیل شده است. تقویت‌کننده‌ها و ماده زمینه اجزای تشکیل‌دهنده مواد کامپوزیتی بوده که هر کدام دارای خواص مکانیکی متفاوتی هستند. ماده کامپوزیتی، معمولاً دارای خواص مکانیکی ویژه‌ای است [1]. با افزایش کاربرد کامپوزیت‌ها، شناخت دقیق مکانیزم‌های خرابی در این مواد شامل ترک ماده زمینه، تورق، شکستگی الیاف، گسیختگی، کشیدگی الیاف، میکرو کمانش، تاب برداشتن اتصال و ترکیبی از این مکانیزم‌ها برای طراحی ایمن باید مورد توجه قرار گیرد.

ترک زمینه معمولاً اولین آسیبی است که وقتی یک چندلایه‌ی کامپوزیتی تحت بارگذاری کششی شبه استاتیکی یا چرخه‌ای قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد [2]. ترک زمینه یکی از شایع‌ترین آسیب‌ها در کامپوزیت‌ها است اما این نوع آسیب به خودی خود منجر به واماندگی سازه‌ای نمی‌شود بلکه می‌تواند آغازگر حالت‌های دیگر واماندگی مانند تورق و شکست الیاف باشد. ترک‌ها در راستای ضخامت به دلیل استحکام/سفتی بسیار پایین ماتریس در مقایسه با الیاف تقویت‌کننده ایجاد می‌شوند. این امر باعث بزرگ‌نمایی کرنش در ماتریس در جهت خارج از محور می‌شود. از آنجایی که نسبت کرنش به واماندگی لایه‌ی خارج از محور به طور قابل‌توجهی پایین‌تر از لایه‌ی هم‌راستا با بارگذاری است، ترک‌خوردگی در راستای ضخامت ایجاد می‌شود. به همین ترتیب، ترک‌های عرضی به دلیل عدم تطابق بین نسبت پواسون درون صفحه‌ای لایه‌ها در جهت‌های بارگذاری شده و خارج از محور رخ می‌دهد [3]. این نوع از آسیب معمولاً در حین سرویس‌دهی در اثر کشش، خستگی و بارگذاری ضربه‌ای رخ داده و تحت تأثیر رفتار ماده زمینه پلیمری قرار دارد [4].

استفاده از روش‌های مبتنی بر گسترش امواج لمب¹ برای ارزیابی و آزمایش غیر مخرب سازه‌های کامپوزیتی بسیار رایج است [5-8]. میرایی کم و ماهیت فرکانس بالای امواج لمب باعث شده از آن‌ها برای ارزیابی سریع سازه‌ها و تشخیص عیوب استفاده شود. برای مثال، مردانشاهی و همکاران [9] به کمک گسترش امواج هدایت‌شده لمب خواص الاستیک و ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های متعامد پلیمری را تخمین زدند. آن‌ها به کمک این روش، موفق به شناسایی و طبقه‌بندی ترک ماده زمینه در این کامپوزیت‌ها شدند. در تحقیقی دیگر، مردانشاهی و همکاران [10] به مطالعه بر روی تشخیص و طبقه‌بندی ترک زمینه در کامپوزیت‌های چندلایه با استفاده از انتشار امواج لمب و به کمک هوش مصنوعی پرداختند. آن‌ها یک مدل هوشمند برای تشخیص و طبقه‌بندی خودکار ماتریس پیشنهاد دادند. رضائی و همکاران [11] در رویکردی تجربی و تحلیلی به بررسی اثرات افزودن نانوالیاف کربنی بر کاهش ترک‌خوردگی ماده زمینه در کامپوزیت‌های چندلایه به کمک روش گسترش امواج لمب پرداختند. ایلماز² و همکاران [12]، بر روی تعیین غیر مخرب ماتریس سفتی سازه کامپوزیت چندلایه به کمک گسترش امواج لمب تحقیق کردند.

محققین زیادی از روش شبیه‌سازی المان محدود به‌عنوان یکی از روش‌های حل عددی برای مطالعه گسترش امواج هدایت‌شونده در سازه‌های متفاوت استفاده می‌کنند [13]. برای مثال، مردانشاهی و همکاران [14] بر روی شبیه‌سازی اجزای محدود موج لمب به منظور پایش غیرمخرب ترک زمینه در کامپوزیت‌های چندلایه تحقیق کردند. آن‌ها دریافتند که روش گسترش موج لمب شبیه‌سازی شده می‌تواند در نظارت بر کامپوزیت‌های چندلایه دارای ترک زمینه کمک شایانی کند. همچنین، پروری و همکاران [15] بر روی ارزیابی غیرمخرب سازه‌های دولایه فلز-کامپوزیت به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود

گسترش امواج هدایت‌شونده لمب تحقیق کردند. دنگ³ و همکاران [16] نیز تحقیقاتی را بر روی روش مدل‌سازی ساده‌شده آسیب ضربه برای شبیه‌سازی عددی گسترش موج لمب در سازه‌های کامپوزیتی شبه همسانگرد انجام دادند. آن‌ها گزارش کردند که پیش‌بینی آسیب‌های میکروسکوپی مانند لایه‌لایه شدن، ترک‌های برشی و ترک‌های عرضی، به طور دقیق دشوار است.

با توجه به پیچیدگی انجام آزمایش‌های گسترش امواج لمب، پیچیدگی احتمالی ماده مورد مطالعه، شرایط مرزی و غیره برای تشخیص عیوب مختلف از جمله ترک زمینه، شبیه‌سازی عددی گسترش امواج لمب کمک می‌کند تا درک بهتری از آزمایش صورت گیرد و با کمترین هزینه یک مدل قابل‌اتکا برای بررسی گسترش امواج لمب در کامپوزیت‌ها حاصل شود.

هدف پژوهش حاضر ارائه یک آزمایشگاه مجازی دقیق و قابل‌اطمینان برای بررسی توانایی روش گسترش امواج لمب در ارزیابی غیرمخرب آسیب ترک زمینه در کامپوزیت‌های متعامد با لایه چینی دلخواه است. همچنین به منظور تعیین فرکانس تحریک و مود مناسب موج لمب برای ارزیابی آسیب ترک زمینه در کامپوزیت‌های متعامد، سرعت موج مودهای پادمتقارن A_0 و متقارن S_0 موج لمب در نرم‌افزار شبیه‌ساز عددی آباکوس در دو لایه چینی $[0_4/90_4]$ و $[0_2/90_6]$ برای قطعات سالم و ترک‌دار با چگالی ترک‌های متفاوت در یک محدوده فرکانسی نسبتاً گسترده مورد بررسی قرار گرفت.

2- مواد و روش‌ها

در این مطالعه شبیه‌سازی گسترش امواج لمب برای دو لایه چینی $[0_4/90_4]$ و $[0_2/90_6]$ با جنس یکسان (شیشه/اپوکسی) و چگالی ترک‌های متفاوت 0.05، 0.1 و 0.15 در فرکانس‌های تحریک 25، 50، 75، 100، 125، 150، 175، 200، 225 و 250 کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفته است. در هر دو لایه چینی، هندسه قطعه مورد بررسی ثابت بوده است.

2-1- خواص ماده کامپوزیتی

خواص مکانیکی تک لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی که در شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب در کامپوزیت‌های مورد مطالعه استفاده شده، در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی تک لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی استفاده‌شده در شبیه‌سازی اجزای محدود [9]

Table 1 Table 1 The mechanical properties of the glass/epoxy composite layer used in the finite element simulation [9]

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	$G_{12}=G_{13}$ (GPa)	G_{23} (GPa)	$\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$	t_{ply} (mm)	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)
31.3	9.5	9.5	4.12	3.653	0.27	0.197	1750

2-2- هندسه شبیه‌سازی‌شده

در شبیه‌سازی اجزای محدود، مکعبی به طول 205 میلی‌متر، عرض 5 میلی‌متر و با ضخامت 3.152 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه هر دو لایه چینی $[0_4/90_4]$ و $[0_2/90_6]$ دارای 16 لایه با ضخامت هر لایه 0.197 میلی‌متر بودند، ضخامت قطعه مدل شده 3.152 میلی‌متر به دست آمد. شکل 1 هندسه ایجادشده در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس را نشان می‌دهد.

برای ایجاد ترک زمینه با چگالی‌های مختلف در نمونه کامپوزیتی شبیه‌سازی‌شده، ترک‌های عرضی با ضخامت 5 میکرومتر در لایه‌های 90 درجه نمونه ایجاد شد. پس از ایجاد این ترک‌ها، برای ناحیه ترک خواص مکانیکی

³ Deng

¹ Lamb waves

² Yilmaz

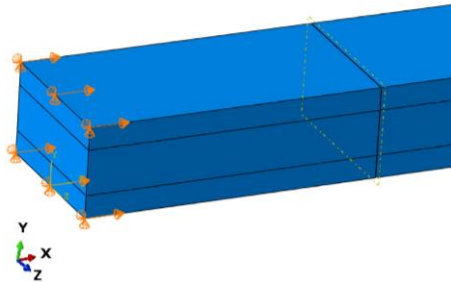


Fig. 4 The excitation exerted to the specimen for generating the S_0 Lamb wave mode in it

شکل 4 تحریک اعمال شده به نمونه برای ایجاد مود S_0 موج لمب در آن

اندازه المان‌ها و طول بازه زمانی^۲ دو پارامتر بسیار مهم در شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده لمب می‌باشند. طول بازه زمانی که دقت محاسبات عددی شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب را تضمین می‌کند مطابق معادله (1) به دست می‌آید [17]:

$$\Delta t \approx \frac{(l_e)_{min}}{c_p} = \frac{1}{20f_{max}} \quad (1)$$

که در آن Δt طول بازه زمانی، $(l_e)_{min}$ کوچک‌ترین اندازه المان در مدل اجزای محدود، f_{max} بیشینه فرکانس اعمالی و c_p سرعت موج فشاری است. همچنین طبق منابع موجود برای تضمین دقت محاسبات و نتایج به دست آمده وجود 10 نود در هر طول موج ضرورت دارد [17, 18]. با توجه به اینکه طول موج امواج برشی نسبت به امواج فشاری کوتاه‌تر است، رابطه بین اندازه المان‌ها با سرعت موج برشی به صورت معادله (2) خواهد شد:

$$l_e = \frac{\lambda_{min}}{20} \approx \frac{c_s}{20f_{max}} \quad (2)$$

که در آن λ_{min} طول موج و c_s سرعت موج برشی است. در این مطالعه برای شبیه‌سازی گسترش امواج لمب در نرم‌افزار آباکوس از حلگر غیرضمنی^۳ استفاده شد. در این تحلیل از المان‌های سه‌بعدی مکعبی خطی هشت نقطه‌ای (C3D8) استفاده شد که در شکل 5 تصویر این المان‌ها دیده می‌شود.

همچنین حسگرها^۴ در فواصل مشخصی از عملگر جهت محاسبه سرعت فاز موج لمب گسترش‌یافته روی سطح نمونه قرار داده شده که فاصله آن‌ها از یکدیگر 20 میلی‌متر بوده است. سرعت مودهای A_0 و S_0 موج لمب گسترش‌یافته در نمونه‌های کامپوزیتی شبیه‌سازی شده با استفاده از دو روش مختلف محاسبه شدند. در روش اول با داشتن فرکانس تحریک و محاسبه طول موج از روی شکل موج، سرعت موج لمب گسترش‌یافته در نمونه‌های کامپوزیتی با ضرب طول موج در فرکانس تحریک محاسبه شد. برای کاهش خطای این روش، فاصله چند طول موج از روی شکل موج استخراج و سپس این طول تقسیم بر تعداد طول موج‌های در نظر گرفته شده گردید تا مقدار یک طول موج به طور دقیق‌تری محاسبه شود. همچنین در روش دوم، سرعت مودهای A_0 و S_0 موج لمب گسترش‌یافته در نمونه‌های کامپوزیتی به کمک اختلاف زمانی رسیدن موج به حسگرهای مختلف محاسبه شد. شکل 6 جایگاه قرارگیری حسگرها روی نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

بسیار پایین‌تر از لایه‌های کامپوزیتی سالم اختصاص داده شد. شکل 2 ترک‌های زمینه ایجاد شده در نمونه کامپوزیتی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس را نشان می‌دهد.

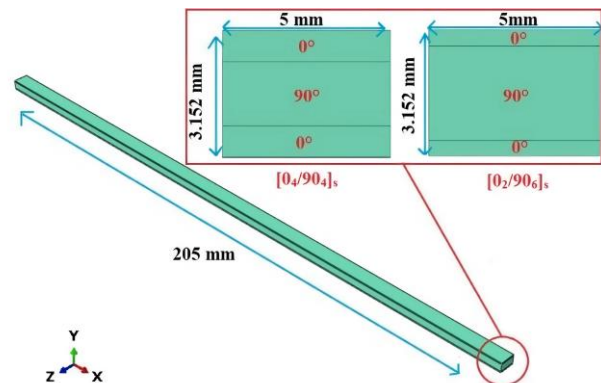


Fig. 1 The geometry of the composite specimens simulated in ABAQUS

شکل 1 هندسه نمونه‌های کامپوزیتی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

3-2- اعمال تحریک و مش بندی

با توجه به اینکه هر دو مود A_0 و S_0 موج لمب در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفت، بهترین نحوه ایجاد این دو مود موج لمب به کمک تحریک‌های اعمال شده به نمونه در شکل‌های 3 و 4 نمایش داده شده است. تحریک‌های اعمال شده یک جابجایی سینوسی متناوب با دامنه 1.0 میکرومتر در محل عملگر^۱ و با فرکانس‌های بین 25 تا 250 کیلوهرتز بوده است.

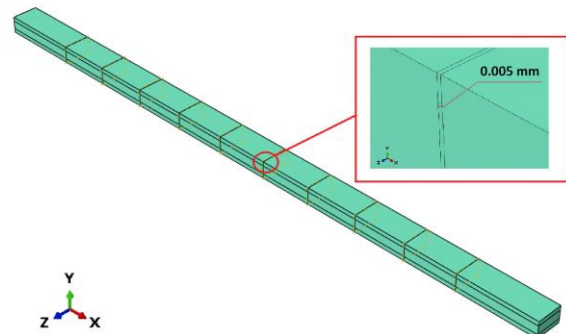


Fig. 2 Creating of cracks in the 90° layers of the composite specimen

شکل 2 ایجاد ترک زمینه در لایه‌های 90° درجه نمونه کامپوزیتی

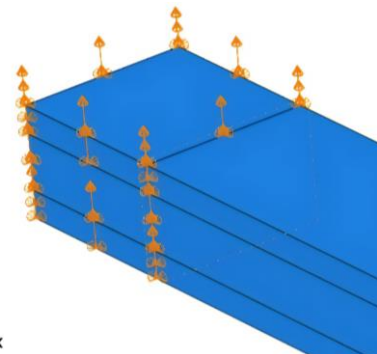


Fig. 3 The excitation exerted to the specimen for generating the A_0 Lamb wave mode in it

شکل 3 تحریک اعمال شده به نمونه برای ایجاد مود A_0 موج لمب در آن

³ Explicit solver

⁴ Sensors

¹ Actuator

² Time Interval length

آمده در جدول 2 نمایش داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، اندازه المان 0.5 میلی‌متر برای انجام شبیه‌سازی گسترش موج لمب در این فرکانس مناسب بوده است.

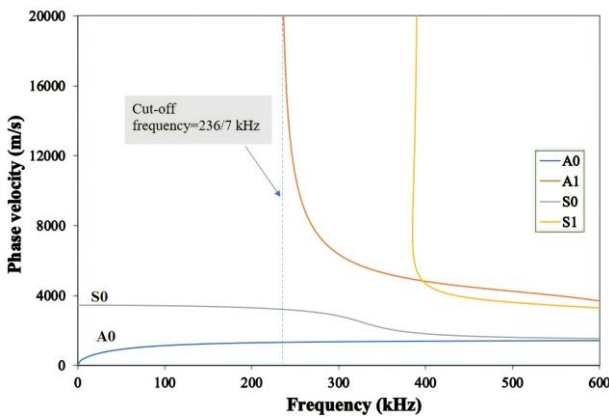


Fig. 7 The dispersion curves of Lamb wave modes obtained using the Dispersion Calculator software for a 3.152 mm thick glass-epoxy composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ شکل 7 نمودار پراکندگی مدهای موج لمب برای نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ با ضخامت 3.152 mm که با استفاده از نرم‌افزار Dispersion Calculator به دست آمده است

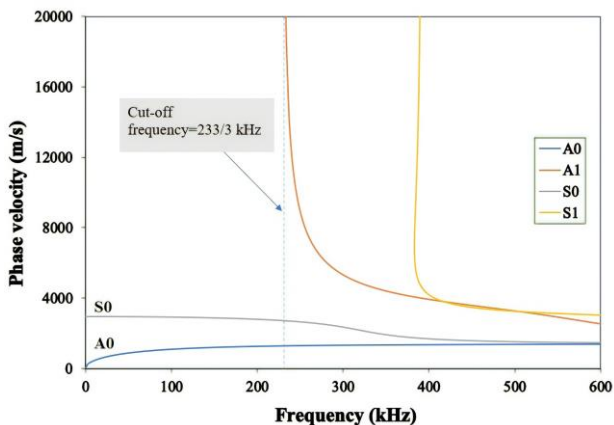


Fig. 8 The dispersion curves of Lamb wave modes obtained using the Dispersion Calculator software for a 3.152 mm thick glass-epoxy composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ شکل 8 نمودار پراکندگی مدهای موج لمب برای نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ با ضخامت 3.152 mm که با استفاده از نرم‌افزار Dispersion Calculator به دست آمده است

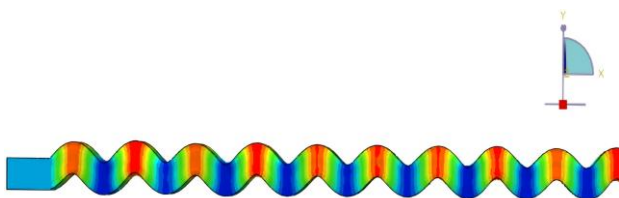


Fig. 9 Propagation of A_0 Lamb wave mode with the frequency of 175 kHz in the intact glass/epoxy composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ شکل 9 گسترش مود A_0 موج لمب در نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ در فرکانس 175 کیلوهرتز

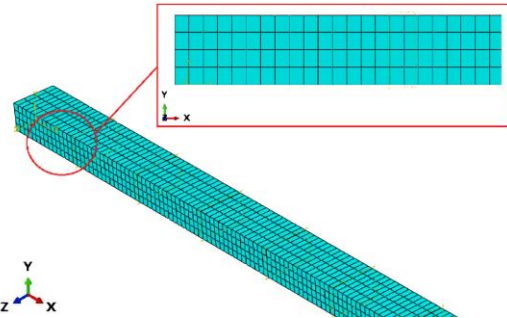


Fig. 5 The elements type used in the developed model شکل 5 نوع المان‌های به کاررفته در مدل توسعه‌یافته

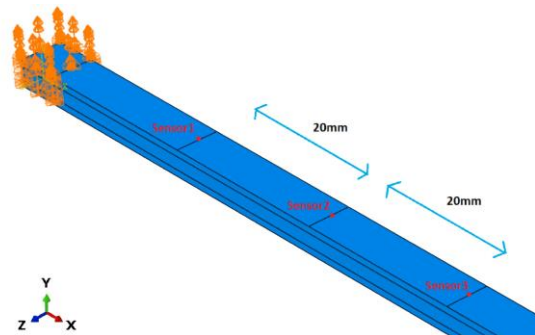


Fig. 6 The position of the sensors on the composite specimens شکل 6 جایگاه حسگرها روی نمونه کامپوزیتی

نمودار پراکندگی مدهای مختلف موج لمب برای نمونه‌های کامپوزیتی سالم با لایه چینی‌های $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ که با استفاده از نرم‌افزار Dispersion Calculator که مبتنی بر روابط المان محدود نیمه‌تحلیلی¹ است استخراج شده، به ترتیب در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده است. در لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ فرکانس قطع 236.7 کیلوهرتز و در لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ فرکانس قطع 233.3 کیلوهرتز محاسبه شد.

3- نتایج و بحث

شکل 9 جابجایی در راستای ضخامت در یک نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ را که مود A_0 موج لمب با فرکانس 175 کیلوهرتز در آن گسترش یافته نشان می‌دهد. همچنین شکل 10 جابجایی در راستای ضخامت در یک نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ را که مود S_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در آن گسترش یافته نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود یک موج سینوسی منظم با کمک تحریک اعمال‌شده در محیط شبیه‌سازی اجزای محدود در نمونه‌های تحت بررسی گسترش یافته است.

شکل 11 سیگنال جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ را نشان می‌دهد که مود A_0 موج لمب با فرکانس 175 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، از این سیگنال‌ها برای محاسبه سرعت موج لمب استفاده شده است.

برای بررسی استقلال نتایج خروجی از اندازه شبکه مش‌بندی، سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس 206 کیلوهرتز در یک نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ برای اندازه المان‌های مختلف محاسبه شد که نتایج به دست

¹ Semi-analytical finite element

در نمونه‌های کامپوزیتی تأیید شد. همچنین مردان‌شاهی و همکاران [9] در مطالعه تجربی خود، سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس 206 کیلوهرتز در یک نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ را 1361 متر بر ثانیه اندازه‌گیری کردند. این مقدار با سرعت مود A_0 موج لمب حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود مطالعه جاری در فرکانس 206 کیلوهرتز در یک نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ (1265 متر بر ثانیه) حدود 7 درصد اختلاف داشت که بار دیگر صحت شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب در نمونه کامپوزیتی را تأیید می‌کند.

در جدول‌های 3 تا 6 مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس تحریک، سرعت موج لمب برای مدهای A_0 و S_0 به ترتیب افزایش و کاهش پیدا می‌کند. همچنین در یک فرکانس ثابت، با افزایش تعداد لایه‌های صفر درجه در نمونه کامپوزیتی سالم سرعت موج لمب برای مدهای A_0 و S_0 به دلیل افزایش سفتی معادل نمونه در راستای گسترش موج افزایش پیدا کرد. به عبارت دیگر، سرعت موج لمب در یک فرکانس ثابت به تعداد لایه‌های صفر درجه حساسیت نشان داد که این موضوع می‌تواند در پژوهش‌های آینده برای تشخیص جهت لایه‌ها در نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول 3 سرعت مود A_0 موج لمب برای نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ محاسبه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار Dispersion Calculator

Table 3 The A_0 Lamb wave velocity for the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ calculated from the finite element simulation and Dispersion Calculator software

درصد اختلاف	سرعت موج شبیه‌سازی (m/s)	سرعت موج Dispersion Calculator (m/s)	فرکانس (kHz)
0.6	707.5	702.8	25
2.1	900	919.36	50
0.2	1050	1047.51	75
1	1120	1131.6	100
0.84	1200	1190	125
0.68	1223.77	1232.26	150
0.75	1254.36	1263.94	175
0.07	1287.42	1288.41	200
0.35	1312.5	1307.84	225
0.12	1325	1326.63	250

جدول 4 سرعت مود S_0 موج لمب برای نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ محاسبه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار Dispersion Calculator

Table 4 The S_0 Lamb wave velocity for the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ calculated from the finite element simulation and Dispersion Calculator software

درصد اختلاف	سرعت موج شبیه‌سازی (m/s)	سرعت موج Dispersion Calculator (m/s)	فرکانس (kHz)
0.79	3478.25	3450.86	25
2.18	3520	3445.38	50
0.46	3420	3435.99	75
0.26	3413.33	3422.24	100
2.0	3333.33	3403.45	125
2.3	3300	3378.5	150
3.2	3237.5	3345.8	175
2.3	3225	3302.47	200
5.2	3075	3243.85	225
1.1	3125	3161.23	250

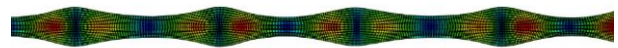


Fig. 10 Propagation of S_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz in the intact glass/epoxy composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$

شکل 10 گسترش مود S_0 موج لمب در نمونه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ در فرکانس 200 کیلوهرتز

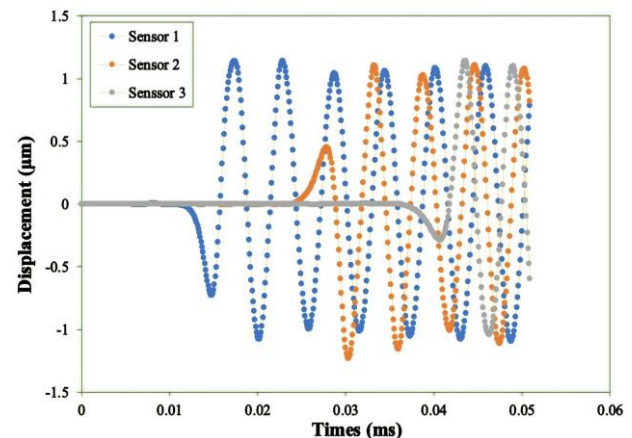


Fig. 11 The displacement-time diagram of sensors located on the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ in which the A_0 Lamb wave mode with the frequency of 175 kHz was propagated

شکل 11 نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ که مود A_0 موج لمب با فرکانس 175 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است

جدول 2 بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی گسترش موج لمب از اندازه شبکه مش‌بندی برای یک نمونه سالم کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ که مود A_0 موج لمب با فرکانس 206 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است

Table 2 Mesh independence analysis for an intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ in which the A_0 Lamb wave mode with the frequency of 175 kHz was propagated

سرعت موج (m/s)	اندازه المان‌ها (mm)
1256.6	1
1256.6	0.8
1270.32	0.5
1272.44	0.3
1272	0.2

به منظور صحت‌سنجی روش شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب ارائه‌شده در این مطالعه، مدهای A_0 و S_0 موج لمب در نمونه‌های کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ با فرکانس‌های 25، 50، 75، 100، 125، 150، 175، 200، 225 و 250 کیلوهرتز گسترش یافتند. همان‌طور که در جدول‌های 3، 4، 5 و 6 مشاهده می‌شود، سرعت موج به دست آمده از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود برای مدها و فرکانس‌های مختلف موج لمب با سرعت موج به دست آمده به کمک نرم‌افزار Dispersion Calculator برای مدهای A_0 و S_0 به ترتیب کمتر از 2.1 و 5.2 درصد اختلاف داشت. بنابراین صحت شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب

جدول 7 سرعت مود A_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی $[0_4/90_4]_s$ سالم و با چگالی ترک‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود

Table 7 The A_0 Lamb wave mode velocity for the intact $[0_4/90_4]_s$ composite specimen and those with different crack densities calculated using the finite element simulation

سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج بدون ترک	فرکانس (kHz)
$0.15 \frac{1}{mm}$ (m/s)	$0.1 \frac{1}{mm}$ (m/s)	$0.05 \frac{1}{mm}$ (m/s)	(m/s)	
1197	1238	1247	1264	175

جدول 8 سرعت مود S_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی $[0_4/90_4]_s$ سالم و با چگالی ترک‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود

Table 8 The S_0 Lamb wave mode velocity for the intact $[0_4/90_4]_s$ composite specimen and those with different crack densities calculated using the finite element simulation

سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج بدون ترک	فرکانس (kHz)
$0.15 \frac{1}{mm}$ (m/s)	$0.1 \frac{1}{mm}$ (m/s)	$0.05 \frac{1}{mm}$ (m/s)	(m/s)	
3208	3231	3260	3346	175

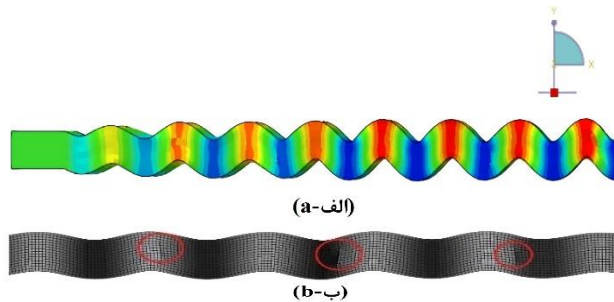


Fig. 12 (a) The propagation of the A_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz in the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.1 1/mm crack density and (b) the location of the matrix cracks induced in the specimen.

شکل 12 (الف) گسترش مود A_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ و (ب) محل ترکهای زمینه ایجاد شده در نمونه.

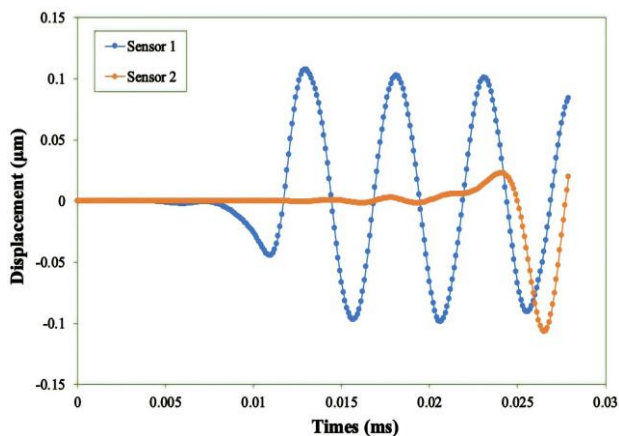


Fig. 13 The displacement-time diagram of sensors located on the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.1 1/mm crack density, in which the A_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz was propagated

جدول 5 سرعت مود A_0 موج لمب برای نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ محاسبه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار Dispersion Calculator

Table 5 The A_0 Lamb wave velocity for the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ calculated from the finite element simulation and Dispersion Calculator software

درصد اختلاف	سرعت موج شبیه‌سازی (m/s)	سرعت موج Dispersion Calculator (m/s)	فرکانس (kHz)
0.15	664.33	665.39	25
0.34	881.119	878.105	50
0.31	1011.48	1008.29	75
0.07	1095.57	1096.34	100
0.56	1165.5	1158.94	125
0.11	1206.29	1204.95	150
1.27	1223.77	1239.63	175
0.4	1261.26	1266.35	200
1.32	1270.26	1287.34	225
0.21	1301.3	1304.1	250

جدول 6 سرعت مود S_0 موج لمب برای نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ محاسبه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار Dispersion Calculator

Table 6 The S_0 Lamb wave velocity for the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ calculated from the finite element simulation and Dispersion Calculator software

درصد اختلاف	سرعت موج شبیه‌سازی (m/s)	سرعت موج Dispersion Calculator (m/s)	فرکانس (kHz)
0.09	2951	2953.82	25
0.06	2950	2948.14	50
0.35	2927.92	2938.4	75
0.72	2902.903	2924.17	100
1.78	2852.85	2904.77	125
1.95	2822.825	2879.12	150
1.19	2811.5	2845.51	175
1.37	2762.765	2801.22	200
1.42	2702.7	2741.68	225
-	-	2658.95	250

جدول‌های 7 و 8 به ترتیب سرعت مودهای A_0 و S_0 موج لمب به دست آمده از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود برای نمونه کامپوزیتی $[0_4/90_4]_s$ سالم و با چگالی ترک‌های مختلف در فرکانس تحریک 175 کیلوهرتز را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی ترک سرعت هر دو مود موج لمب به دلیل کاهش سفتی کل نمونه کاهش پیدا کرد. همان‌طور که در جدول‌های 7 و 8 مشاهده می‌شود سرعت موج لمب در چگالی ترک 0.05 در مود S_0 نسبت به مود A_0 کاهش بیشتری یافت که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر موج S_0 نسبت به ترک ماده زمینه است، هرچند که ایجاد موج متقارن S_0 در آزمایشگاه کمی سخت‌تر است. در شکل 12 گسترش مود A_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ نیز سیگنال جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی این نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

شکل 15 نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ که مود S_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است

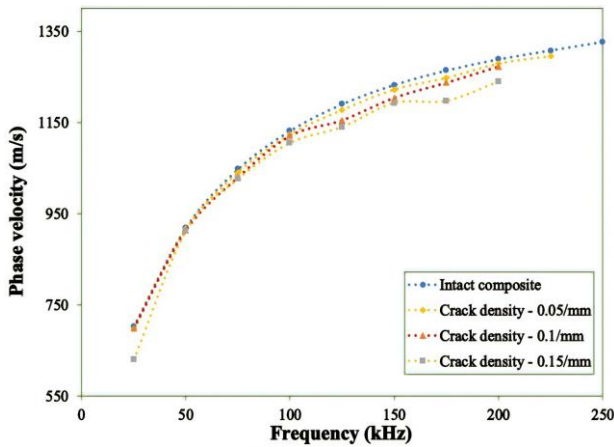


Fig. 16 The dispersion curve of the A_0 Lamb wave mode calculated for the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with different crack densities

شکل 16 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک‌های مختلف

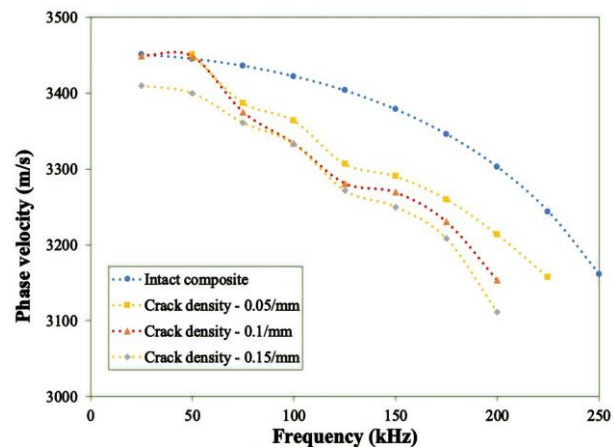
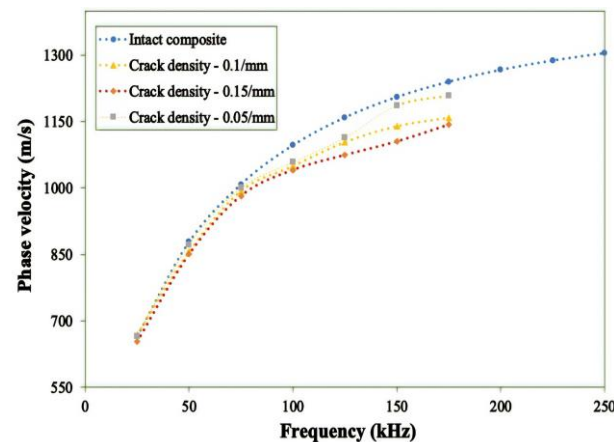


Fig. 17 The dispersion curve of the S_0 Lamb wave mode calculated for the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with different crack densities

شکل 17 نمودار پراکندگی مود S_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک‌های مختلف



شکل 13 نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ که مود A_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است

در شکل 14 گسترش مود S_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ نشان داده شده است. شکل 15 نیز سیگنال جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی این نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

در شکل‌های 16، 17، 18 و 19 نمودار سرعت فاز مدهای A_0 و S_0 موج لمب بر حسب فرکانس برای دو لایه‌چینی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ با چگالی ترک‌های مختلف نمایش داده شده است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که مود S_0 موج لمب به ترک زمینه حساسیت بیشتری دارد و افت سرعت بیشتری را در چگالی ترک‌های مختلف نمایش می‌دهد. همچنین مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه‌های 90 درجه در لایه‌چینی $[0_2/90_6]_s$ نسبت به $[0_4/90_4]_s$ افت سرعت بیشتری در چگالی ترک‌های مختلف در هر دو مود A_0 و S_0 موج لمب اتفاق افتاد. این موضوع به دلیل افت سختی بیشتر در نمونه کامپوزیتی دارای لایه‌های 90 درجه بیشتر در چگالی ترک‌های مختلف است.

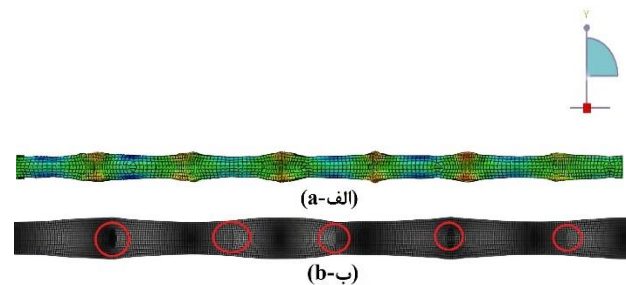


Fig. 14 (a) The propagation of the S_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz in the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.1 1/mm crack density and (b) the location of the matrix cracks induced in the specimen

شکل 14 الف) گسترش مود S_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ و ب) محل ترک‌های زمینه ایجاد شده در نمونه

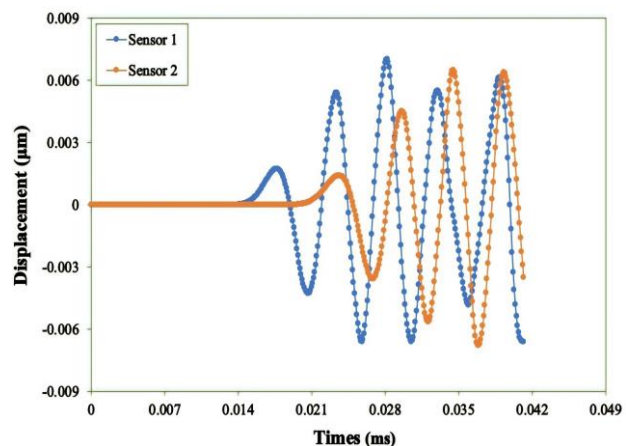


Fig. 15 The displacement-time diagram of sensors located on the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.1 1/mm crack density, in which the S_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz was propagated

امواج لمب در فرکانس‌های بالاتر به طور مؤثرتری انجام می‌شود چرا که افت سرعت در فرکانس‌های بالاتر، بیشتر خواهد بود. در نتیجه، شبیه‌سازی عددی المان محدود می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی دقیق و قابل اطمینان برای بررسی توانایی روش گسترش امواج لمب در ارزیابی غیر مخرب آسیب ترک زمینه در یک کامپوزیت متعامد با لایه چینی دلخواه مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به اینکه لایه چینی متعامد در صنعت استفاده زیادی دارند، شناسایی ترک زمینه امری مهم به شمار می‌آید. با این روش مدل‌سازی قبل از ارائه آزمایش می‌توان تا حدود زیادی متوجه رفتار کامپوزیت با ابعاد و لایه چینی دلخواه شد. در این مطالعه به دست آمد که در هر لایه چینی متعامد می‌توان به روش مدل‌سازی، قطعه ترک‌دار و سالم را از یکدیگر تمیز داد. همچنین مشخص شد که هرچه تعداد لایه 90 درجه بیشتر باشد و در این لایه‌ها ترک ایجاد گردد، تغییرات سرعت بیشتری ایجاد خواهد شد.

بر طبق نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، موج لمب به ترک و چگالی ترک‌های متفاوت در لایه چینی متعامد حساسیت خوبی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه وجود ترک باعث کاهش سفتی معادل یک قطعه کامپوزیتی می‌شود، اثرات این کاهش سفتی به‌خوبی در هر دو مود A_0 و S_0 قابل مشاهده بودند. همچنین مشاهده شد با افزایش چگالی ترک و کاهش سفتی معادل کامپوزیت، فرکانس قطع کاهش بیشتری خواهد داشت. لذا این موضوع باید در آزمایش‌ها لحاظ گردد تا فرکانس آزمایش زیر فرکانس قطع باشد.

5- تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره 4005317 انجام شده است.

6- مراجع

- [1] Daniel, I. M. and Ishai, O., "Engineering Mechanics of Composite Materials" Oxford university press New York, Vol. 3, 1994.
- [2] Gayathri, P., Umesh, K. and Ganguli, R., "Effect of Matrix Cracking and Material Uncertainty on Composite Plates" Reliability Engineering & System Safety, Vol. 95, No. 7, pp. 716-728, 2010.
- [3] Abrate, S., "Matrix Cracking in Laminated Composites: A Review" Composites Engineering, Vol. 1, No. 6, pp. 337-353, 1991.
- [4] Hu, H. W., "Physical Aging in Long Term Creep of Polymeric Composite Laminates" Journal of Mechanics, Vol. 23, No. 3, pp. 245-252, 2007.
- [5] Fathi, H., Kazemirad, S. and Nasir, V., "Lamb Wave Propagation Method for Nondestructive Characterization of the Elastic Properties of Wood" Applied Acoustics, Vol. 171, pp. 107565, 2021.
- [6] Gorgin, R., Luo, Y. and Wu, Z., "Environmental and Operational Conditions Effects on Lamb Wave Based Structural Health Monitoring Systems: A Review" Ultrasonics, Vol. 105, pp. 106114, 2020.
- [7] Ebrahiminejad, A., Mardanshahi, A. and Kazemirad, S., "Nondestructive Evaluation of Coated Structures Using Lamb Wave Propagation" Applied Acoustics, Vol. 185, pp. 108378, 2022.
- [8] Riahi, M. and Ahmadi, A., "Utilization of Artificial Neural Networks for Detection and Classification of Damages in Composite Plate-Like Structures Via Ultrasonic Guided Waves" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 343-352, 2018.
- [9] Mardanshahi, A., Shokrieh, M.M. and Kazemirad, S., "Identification of Matrix Cracking in Cross-Ply Laminated Composites Using Lamb Wave Propagation" Composite Structures, Vol. 235, pp. 111790, 2020.
- [10] Mardanshahi, A., Nasir, V., Kazemirad, S. and Shokrieh, M.M., "Detection and Classification of Matrix Cracking in Laminated

Fig. 18 The dispersion curve of the A_0 Lamb wave mode calculated for the composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ with different crack densities

شکل 18 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ و با چگالی ترک‌های مختلف

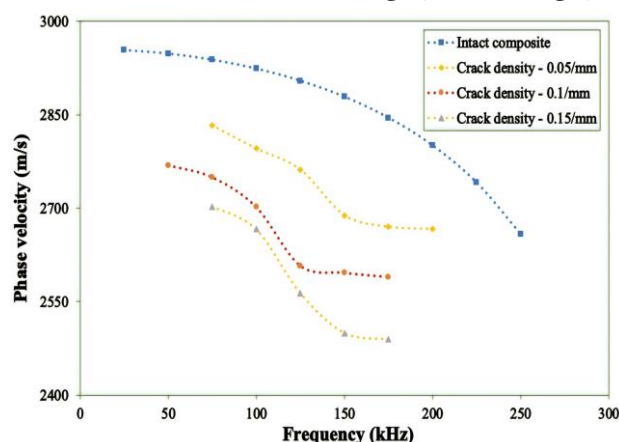


Fig. 19 The dispersion curve of the S_0 Lamb wave mode calculated for the composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ with different crack densities

شکل 19 نمودار پراکندگی مود S_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ و با چگالی ترک‌های مختلف

همان‌طور که در شکل‌های 16 الی 19 مشاهده می‌شود، در برخی از فرکانس‌ها سرعت موج لمب گزارش نشده است. این موضوع به این دلیل است که به علت وجود ترک زمینه در نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده، فرکانس قطع کاهش یافته و کمتر از فرکانس تحریک اعمالی شده است. در این شرایط چندین مود مختلف موج لمب به‌طور هم‌زمان در نمونه کامپوزیتی گسترش می‌یابد و در نتیجه سرعت محاسبه‌شده از شبیه‌سازی، سرعت گروه می‌شود که متفاوت از سرعت فاز است. به عنوان مثال در شکل 20 مود A_0 موج لمب که در نمونه با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک 0.15 در فرکانس 250 کیلوهرتز تحریک شده نشان داده شده است اما مشاهده می‌شود که موج گسترش‌یافته موج خالص A_0 نیست و ترکیبی از مدهای مختلف است. ترکیب مدهای مختلف موج لمب باعث شد که یافتن موج خالص A_0 و S_0 دشوار شود و در نتیجه پیدا کردن سرعت فاز موج لمب از طریق محاسبه طول موج از روی شکل موج غیرممکن گردد.

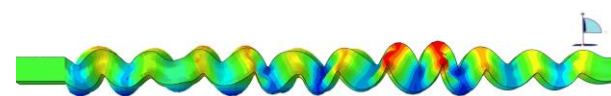


Fig. 20 The excitation of the A_0 Lamb wave mode at the frequency of 250 kHz in the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.15 1/mm crack density

شکل 20 تحریک مود A_0 موج لمب در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.15 \frac{1}{mm}$ در فرکانس 250 کیلوهرتز

4- جمع‌بندی

در تحقیق حاضر به کمک شبیه‌سازی المان محدود در دو لایه چینی شیشه/اپوکسی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ اثر چگالی ترک‌های متفاوت بر سرعت مود A_0 و S_0 موج لمب در فرکانس‌های مختلف بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که سرعت فاز مود متقارن S_0 بهتر می‌تواند ترک‌های زمینه را تشخیص دهد هرچند که در واقعیت انتشار این امواج سخت‌تر از انتشار موج پادمقارن A_0 خواهد بود. همچنین، شناسایی ترک‌های زمینه از روش گسترش

- Composites Using Guided Wave Propagation and Artificial Neural Networks“ *Composite Structures*, Vol. 246, pp. 112403, 2020.
- [11] Ramezani, H., Kazemirad, S., Shokrieh, M.M. and Mardanshahi, A., “Effects of Adding Carbon Nanofibers on the Reduction of Matrix Cracking in Laminated Composites: Experimental and Analytical Approaches“ *Polymer Testing*, Vol. 94, pp. 106988, 2021.
- [12] Yilmaz, C., Topal, S., Ali, H. Q., Tabrizi, I. E., Al-Nadhari, A., Suleman, A. and Yildiz, M., “Non-Destructive Determination of the Stiffness Matrix of a Laminated Composite Structure with Lamb Wave“ *Composite Structures*, Vol. 237, pp. 111956, 2020.
- [13] Fattahi, A., Ramezani, H., Shokrieh, M.M. and Kazemirad, S., “Detection and Characterization of Matrix Cracking in Fiber - Metal Laminates Using Lamb Wave Propagation “ *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 29, No. 10, pp. e3039, 2022.
- [14] Mardanshahi, A., Shokrieh, M.M. and Kazemirad, S., “Simulated Lamb Wave Propagation Method for Nondestructive Monitoring of Matrix Cracking in Laminated Composites“ *Structural Health Monitoring*, Vol. 21, No. 2, pp. 695-709, 2021.
- [15] Parvari, Y., Kazemirad, S. and Ramezani, H., “Nondestructive Evaluation of Bilayer Metal-Composite Structures Using Finite Element Simulation of Guided Lamb Wave Propagation“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 3, pp. 1700-1707, 2022.
- [16] Deng, P., Saito, O., Okabe, Y. and Soejima, H., “Simplified Modeling Method of Impact Damage for Numerical Simulation of Lamb Wave Propagation in Quasi-Isotropic Composite Structures“ *Composite Structures*, Vol. 243, pp. 112150, 2020.
- [17] Moser, F., Jacobs, L. J. and Qu, J., “Modeling Elastic Wave Propagation in Waveguides with the Finite Element Method“ *NDT & E International*, Vol. 32, No. 4, pp. 225-234, 1999.
- [18] Alleyne, D. N. and Cawley, P., “A Two-Dimensional Fourier Transform Method for the Measurement of Propagating Multimode Signals“ *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, pp. 1159-1168, 1991.