



ارزیابی غیرمخرب سازه‌های دو لایه فلز-کامپوزیت به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت شونده لمب

یوسف پروری¹، حسن رضانی²، سیاوش کاظمی‌راد^{3*}

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

2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/10/18

پذیرش: 1401/01/01

کلیدواژگان

امواج هدایت شونده، موج لمب، پوشش کامپوزیتی، سازه‌های پوشش دهی شده، مدل‌سازی اجزای محدود

ارزیابی غیرمخرب افت خواص مکانیکی و ضخامت سازه‌های دو لایه به منظور پایش سلامت این سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف این پژوهش پیشنهاد یک روش ارزیابی غیرمخرب بر پایه گسترش امواج لمب برای بررسی سازه‌های دو لایه فلز-کامپوزیت بوده است. بدین منظور، مدل اجزای محدود یک صفحه فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت ایجاد شد که در آن پوشش کامپوزیتی از لایه‌های نمد الیاف شیشه خرد شده و پارچه فیبر شیشه روینگ بافته شده تشکیل شده بود. مود پادمقارن اصلی موج لمب (A_0) با فرکانسهای حرکتی مختلف در نمونه‌های دو لایه مدل شده گسترش یافتند. نمودارهای پراکندگی مود A_0 موج لمب با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف و افت خواص مکانیکی لایه فلزی و پوشش کامپوزیتی به دست آمدند. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که تأثیر ضخامت و افت خواص مکانیکی صفحه فولادی بر سرعت مود A_0 موج لمب بیشتر از تأثیر ضخامت و افت خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی بود. همچنین، تخمین ضخامت پوشش کامپوزیتی در فرکانس‌های پایین بهتر انجام شد، در حالی که شناسایی افت خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی و صفحه فولادی در فرکانس‌های بالاتر بهتر صورت گرفت. در نتیجه، روش شبیه‌سازی گسترش امواج لمب می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی برای ایجاد روشهایی برای ارزیابی غیرمخرب سازه‌های دو لایه فلز-کامپوزیت با خواص مکانیکی و ضخامت‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

Nondestructive evaluation of bilayer metal-composite structures using finite element simulation of guided Lamb wave propagation

Yousef Parvari¹, Hasan Ramezani¹, Siavash Kazemirad^{1*}

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

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

Keywords

Guided waves, Lamb wave, Composite coating, Coated structures, Finite element modeling

Abstract

Nondestructive evaluation (NDE) of the mechanical properties and thickness loss of bilayer structures is of great importance for health monitoring purposes. This study aimed to propose an NDE method based on the Lamb wave propagation for the inspection of bilayer metal-composite structures. The finite element model of a steel substrate coated with a layered composite material was developed, where the composite coating constituted by chopped strand glass fiber mat and woven roving glass fiber cloth layers. The fundamental antisymmetric Lamb wave mode (A_0) with different excitation frequencies were generated and propagated on the modeled bilayer specimens. The dispersion curves for the A_0 Lamb wave mode were obtained for the simulated specimens, considering different thicknesses and a range of material properties decay for the metal substrate and composite coating. The obtained results showed that the effect of the thickness and decay in the mechanical properties of the substrate on the A_0 Lamb wave mode velocity was more than the effect of the thickness and decay in the mechanical properties of the composite coating. Besides, the estimation of coating thickness was performed more accurately at low frequencies, while the decay in the mechanical properties of the coating and substrate was better evaluated at higher frequencies. It was concluded that the simulated Lamb wave propagation method can be used as a virtual lab for the development of methods for nondestructive evaluation of bilayer metal-composite structures with different material properties and thicknesses.

Please cite this article using:

Parvari, Y., Ramezani, H., Kazemirad, S., "Nondestructive evaluation of bilayer metal-composite structures using finite element simulation of guided Lamb wave propagation", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1700-1707, 2022.

<https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.546257.1765>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

فرآیند پوشش‌دهی¹ به منظور تقویت سازه‌های مهندسی و محافظت از آن‌ها در برابر خوردگی و زنگ زدگی کاربردهای زیادی دارد. بازرسی مداوم پوشش‌ها و سازه‌های پوشش داده شده برای نظارت بر وضعیت آن‌ها و اطمینان از سلامت و یکپارچگی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است [1]. در بسیاری از کاربردها مواد کامپوزیت² به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت مکانیکی، شیمیایی و خوردگی نسبت به فلزات رایج ترجیح داده می‌شوند. بنابراین از کامپوزیت‌ها معمولاً برای پوشش‌دهی سازه‌های فلزی به ویژه در صنایع هوافضا و نفت استفاده می‌شود [2]. بازرسی کارآمد سازه‌های فلزی پوشش‌دهی شده با کامپوزیت‌ها مسئله‌ای مهم در چنین کاربردهایی است. به عنوان مثال، ارزیابی کم شدن ضخامت (خوردگی) و خواص مکانیکی سازه‌های فلزی پوشش‌دهی شده در مخازن نفت و مخازن تحت فشار که به طور مستقیم برای بررسی در دسترس نیستند، بسیار مورد نیاز است.

استفاده از روش‌های مبتنی بر گسترش امواج لمب³ برای ارزیابی و آزمایش غیر مخرب⁴ سازه‌های صفحه‌ای شکل بسیار رایج است [3-10]. میرایی کم و ماهیت فرکانس بالای امواج لمب، آن‌ها را برای ارزیابی سریع سازه‌ها و تشخیص عیوب کوچک در آن‌ها به عنوان یک گزینه مناسب مطرح می‌سازد. برای مثال، ژنوت و همکاران از مود S_0 امواج لمب برای محاسبه ضخامت صفحاتی که دچار خوردگی شده بودند، استفاده کردند [11]. در تحقیقی دیگر راتو و همکاران از امواج هدایت شونده⁵ لمب جهت محاسبه نقشه خوردگی در سازه‌های صفحه‌ای شکل استفاده کردند [12]. از دیگر ویژگی‌های بارز استفاده از این روش، محاسبه سرعت وابسته به جهت در مواد ناهمسانگرد⁶ می‌باشد که با توجه به تفاوت خواص در جهات مختلف بسیار سودمند است و مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. برای مثال، داتا برای تخمین موقعیت دقیق آسیب در کامپوزیت‌ها، از سرعت و جهت انتشار امواج استفاده کرد [13]. همچنین از گسترش امواج لمب بعنوان یکی از روش‌های غیر مخرب برای تشخیص آسیب و مشخصه‌یابی خواص کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [14-18]. برای مثال، کستینگز و همکاران برای محاسبه ابعاد ترک ایجاد شده توسط ضربه در کامپوزیت، از مود S_0 امواج لمب استفاده کردند [19]. ژائو و همکاران از مود A_0 امواج لمب برای تخمین آسیب‌هایی مانند لایه‌لایه‌شدگی⁷ و از هم گسیختگی⁸ کامپوزیت استفاده کردند [20].

در تحقیقات بسیاری از گسترش امواج هدایت شونده در محیط‌های چند لایه استفاده شد. به طور مثال وانگ و رولین به بررسی گسترش امواج در محیط چند لایه ناهمسانگرد پرداختند [21]. کستینگز و هوستن گسترش امواج در صفحات ساندویچی که در آن‌ها از لایه‌های مواد ویسکوالاستیک استفاده شده و تشکیل یک ماده ناهمسانگرد را داده بودند را بررسی کردند [22]. داهمن و همکاران گسترش امواج لمب در نمونه‌های کامپوزیتی چند لایه ناهمسانگرد و ویسکوالاستیک را بررسی نمودند [23]. مسئله مستقیم گسترش موج لمب در محیط‌های چند لایه، که در آن خواص پراکندگی موج گسترش یافته با داشتن هندسه و خواص مواد هر لایه به دست می‌آید، به

طور قابل توجهی در ادبیات موضوع مطالعه شده است. با این حال، توجه کمتری به مسئله معکوس گسترش موج لمب در محیط‌های چند لایه شده است، جایی که خواص مواد و سازه باید با داشتن ویژگی‌های موج گسترش یافته ارزیابی شوند. همچنین، ارزیابی خوردگی و اندازه‌گیری ضخامت سازه‌های پوشش داده شده توسط گسترش امواج لمب در مقالات پیشین انجام نشده است.

محققین زیادی از روش شبیه‌سازی المان محدود بعنوان یکی از روش‌های حل عددی برای مطالعه گسترش امواج هدایت شونده در سازه‌های متفاوت استفاده می‌کنند [24]. برای مثال، الین و کاولی برهمکنش امواج لمب و آسیب در سازه‌های صفحه‌ای را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند [25]. راماداس و همکاران به دو صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی المان محدود ضریب میرایی امواج لمب در لایه‌های مختلف یک نمونه چند لایه کامپوزیتی محاسبه نمودند [26]. یانگ و همکاران از نرم‌افزار عددی آباکوس⁹ برای شبیه‌سازی مدل‌های المان محدود گسترش امواج لمب در صفحات کامپوزیتی استفاده کردند، که بخش‌های اصلی مدل‌های ایجاد شده شامل عملگرهای پیزوالکتریک و حسگرها بودند و برای ایجاد تحریک از سه طریق گشتاور خمشی، نیروهای برشی و جابجایی استفاده کردند [27].

شبیه‌سازی عددی گسترش امواج لمب در سازه‌های صفحه‌ای شکل پوشش داده شده با کامپوزیت به درک بهتری از برهمکنش امواج و این سازه‌ها کمک می‌کند، که این امر می‌تواند به توسعه روش‌های دقیق برای ارزیابی سریع و غیر مخرب این سازه‌ها بینجامد. هدف این مطالعه شبیه‌سازی المان محدود گسترش امواج لمب در صفحات فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت است. آزمایش کشش بر روی لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده انجام پذیرفت تا خواص مکانیکی آن‌ها که برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی گسترش امواج مورد نیاز است به دست آیند. اثر تغییرات ضخامت و خواص مکانیکی سازه فولادی و پوشش کامپوزیتی بر سرعت فاز مود A_0 موج لمب در فرکانس‌های مختلف بررسی شده است. در واقع فضای شبیه‌سازی عددی بعنوان یک آزمایشگاه مجازی دقیق و قابل اطمینان برای بررسی توانایی روش گسترش امواج لمب در ارزیابی غیر مخرب سازه‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- نمونه‌های دولایه فلز-کامپوزیت

یک صفحه فولادی با ابعاد $300 \times 300 \text{ mm}^2$ و با ضخامت متغیر 2، 4 و 6 و 8 میلی‌متر که با یک کامپوزیت لایه‌ای پوشش داده شده است برای این مطالعه در نظر گرفته شد. پوشش کامپوزیتی از چهار لایه نمد الیاف شیشه خرد شده¹⁰ با وزن مشخصه 450 g/m^2 ، دولایه پارچه فیبر شیشه روینگ بافته شده¹¹ با وزن مشخصه 400 g/m^2 و رزین و رزین وینیل استر Hetron 922 تشکیل شده است. لایه فولادی در اولین لایه، در لایه دوم نمد با ضخامت 0.6 mm ، در لایه سوم پارچه بافته شده یا ضخامت 0.38 mm ، در لایه چهارم و پنجم نمد، مجدداً در لایه ششم پارچه بافته شده و در لایه هفتم از نمد استفاده شد که ضخامت کلی پوشش کامپوزیتی به 3.16 mm رسید.

2-2- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده که برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی گسترش امواج لمب در صفحه دولایه فولاد-کامپوزیت

⁹ Abaqus¹⁰ Chopped strand glass fiber mat¹¹ Woven roving glass fiber cloth¹ Coating² Composite material³ Lamb wave propagation⁴ Non-destructive evaluation and testing⁵ Guided waves⁶ Anisotropic⁷ Delamination⁸ Disbonding

جابه‌جایی به دست آمده برای هر نمونه وارد نرم‌افزار اکسل شده و شیب قسمت ابتدایی نمودار محاسبه گردید. سرعت بارگذاری قطعات در آزمایش کشش برابر با 2 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. تصویری از ستاپ آزمایش کشش در شکل 2 نشان داده شده است.

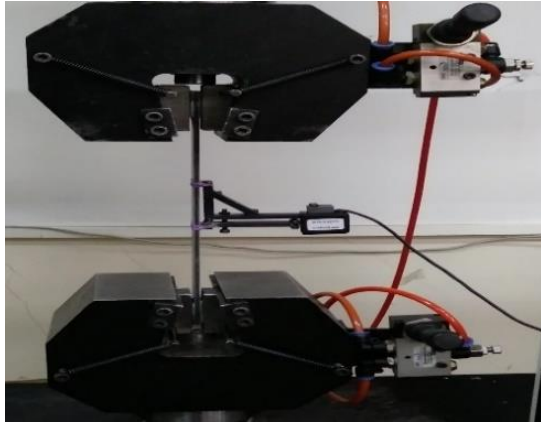


Fig. 2 The tensile test setup via Santam STM-150.

شکل 2 ستاپ آزمایش کشش با استفاده از دستگاه STM-150 شرکت سنتام.

4-2- شبیه‌سازی عددی

اندازه المان‌ها و طول بازه زمانی⁵ دو پارامتر بسیار مهم در شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت شونده لمب می‌باشند. طول بازه زمانی که دقت محاسبات عددی شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب را تضمین می‌کند مطابق معادله (1) به دست می‌آید:

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

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 می‌باشد. همچنین طبق منابع موجود برای تضمین دقت محاسبات و نتایج به دست آمده وجود 10 نود در هر طول موج ضرورت دارد [28، 29]. 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 محیط دولاایه فولاد-کامپوزیت از نرم‌افزار آباکوس با حلگر غیر ضمني⁶ استفاده شد. همچنین هندسه نمونه‌های دو لایه فولاد-کامپوزیت شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس در شکل 3 نشان داده شده است.

برای ایجاد موج لمب در نمونه مورد نظر یک جابجایی سینوسی متناوب با دامنه 1 nm در محل عملگر⁷ به نمونه اعمال شد و مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌هایی با ضخامت‌های مختلف برای هر دو لایه فولاد و کامپوزیت در فرکانس‌های تحریک 20-110 kHz انجام شد.

مورد نیاز است از آزمایش کشش به دست آیند. بدین منظور، نمونه‌های کامپوزیتی لایه‌ای نمد و بافته شده برای مشخصه‌یابی خواص مکانیکی ساخته شدند. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا حجم مورد نظر از رزین اپوکسی را درون بشر وزن نموده و با توجه به نوع رزین اپوکسی استفاده شده در این پژوهش، سخت‌کننده با نسبت وزنی 100 به 15 به آن افزوده شد. سپس با همزن مکانیکی به آرامی به مدت حداکثر 5 دقیقه و با سرعت 200 دور بر دقیقه ترکیب انجام شد. بعد از اتمام فرآیند هم زدن مکانیکی، محتوای بشر به درون محفظه‌ی خلأ منتقل گردید. حداکثر زمان خلأگیری در این مرحله 5 دقیقه در فشار 1 mbar در نظر گرفته شد. سپس لایه‌های مورد نظر از پارچه‌های نمد و بافته شده بریده شده و کنار گذاشته شدند. در ادامه این الیاف وزن شده و به میزان وزنشان با استفاده از قلم‌مو به ترکیب رزین و سخت‌کننده آغشته شدند تا کامپوزیت لایه‌ای با نسبت وزنی الیاف 50 درصد تولید گردد. پس از آغشته‌سازی پارچه‌ها، آن‌ها یک به یک روی هم قرار داده شده و با استفاده از غلتک، رزین توزیع شده تا نسبت به توزیع مناسب و خارج شدن حباب‌های احتمالی هوا اطمینان حاصل گردد. در پایان جهت حباب‌گیری و به دست آوردن ضخامت یکنواخت در قطعه، نمونه‌ها با اعمال نیروی 200 نیوتنی به مدت یک هفته تحت فشار قرار گرفتند. نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده در شکل 1 نشان داده شده‌اند، که در دو انتهای آن‌ها یک باریکه¹ برای جلوگیری از آسیب زیاد در ناحیه فک دستگاه کشش به وسیله چسب چسبانده شده است.



Fig. 1 The fabricated mat and woven composite specimens.

شکل 1 نمونه‌های کامپوزیتی لایه‌ای نمد و بافته شده.

3-2- آزمایش کشش

برای انجام آزمایش‌های کشش از دستگاه کشش سنتام مدل STM-150 استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری مقدار نیرو از نیروسنج² بونگشین³ 50 kgf استفاده شد و جهت اندازه‌گیری مقدار کرنش از کشش‌سنج⁴ دو فک سنتام نوع STT-100D استفاده شد. دلیل استفاده از کشش‌سنج محاسبه مدول الاستیک نمونه‌ها به درستی و با دقت بالا بوده است.

از آنجایی که در این پژوهش از الیاف شیشه به عنوان استحکام‌دهنده کامپوزیت استفاده شده و تمامی نمونه‌ها می‌توانند با توجه به نوع الیاف شیشه به کار رفته در آن‌ها (نمد و بافته شده) همسانگرد در نظر گرفته شوند، از استاندارد ASTM D638 برای انجام کلیه آزمایش‌های کشش در این مطالعه استفاده شده است. با توجه به تأکید استاندارد در خصوص انتخاب ظرفیت دستگاه نسبت به ابعاد نمونه‌ها برای رسیدن به دقت مناسب در نتایج آزمایش‌ها، از دستگاه STM-150 شرکت سنتام با استفاده از نیروسنج پنج تنی کمکی استفاده شد برای محاسبه مدول کششی نمونه‌ها، نمودار نیرو -

¹ Tab

² Load Cell

³ Bongshin

⁴ Extensometer

⁵ Time Interval length

⁶ Implicit solver

⁷ Actuator

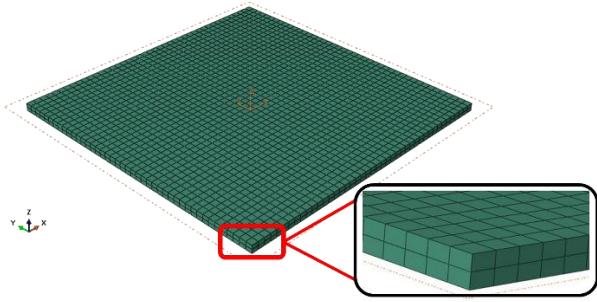


Fig. 5 The elements type used in the model.

شکل 5 خانواده المان‌های به کار رفته در مدل.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، در شبیه‌سازی‌های انجام شده یک بار پوشش کامپوزیتی به صورت لایه-لایه مدل شد و خواص مکانیکی هر لایه به طور جداگانه اعمال شد و یک بار هم پوشش کامپوزیتی به شکل بالک (جامد ارتوتروپیک) مدل شد و خواص به دست آمده از آزمایش‌های کشش انجام شده برای کامپوزیت لایه‌ای در مدل اعمال شد. خواص مورد استفاده در مدل بالک از ماتریس سختی ارتوتروپیک زیر به دست می‌آید [30]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\eta_{yz}\eta_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\eta_{yx} + \eta_{zx}\eta_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\eta_{xx} + \eta_{yx}\eta_{zy}}{E_y E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\eta_{xy} + \eta_{zx}\eta_{zy}}{E_x E_z \Delta} & \frac{1-\eta_{zx}\eta_{zx}}{E_x E_z \Delta} & \frac{\eta_{zy} + \eta_{zx}\eta_{xy}}{E_x E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\eta_{xz} + \eta_{xy}\eta_{yz}}{E_x E_y \Delta} & \frac{\eta_{yz} + \eta_{zx}\eta_{yx}}{E_x E_y \Delta} & \frac{1-\eta_{xy}\eta_{yx}}{E_x E_y \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن

$$\Delta = \frac{1 - \eta_{xy}\eta_{yx} - \eta_{yz}\eta_{zy} - \eta_{zx}\eta_{xz} - 2\eta_{xy}\eta_{zy}\eta_{zx}}{E_x E_x E_z} \quad (4)$$

که 9 ثابت الاستیک در معادلات ساختاری ارتوتروپیک از سه مدول یانگ E_x, E_y, E_z ، سه ضریب پواسون $\eta_{yx}, \eta_{zx}, \eta_{yz}$ و سه مدول برشی G_{yz}, G_{zx}, G_{xy} تشکیل شده است. سه ضریب پواسون دیگر نیز از روابط زیر به دست می‌آیند [30]:

$$\eta_{zy} = \frac{E_z}{E_y} \times \eta_{yz} \quad (5)$$

$$\eta_{xz} = \frac{E_z}{E_y} \times \eta_{zx} \quad (6)$$

$$\eta_{xy} = \frac{E_z}{E_y} \times \eta_{yx} \quad (7)$$

نمودار پراکندگی مودهای مختلف موج لمب برای نمونه فولاد-کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش متشکل از یک پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm و یک لایه فولادی با ضخامت‌های 4 mm و 8 mm به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است. از نرم‌افزار GUIGUW که مبتنی بر روابط المان محدود نیمه تحلیلی² است، برای استخراج منحنی‌های پراکندگی استفاده شد. فرکانس قطع به صورت خط چین قرمز رنگ در شکل‌های 6 و 7 مشخص شده است. برای اطمینان از ایجاد مود فرکانسی (A_0) از فرکانس-

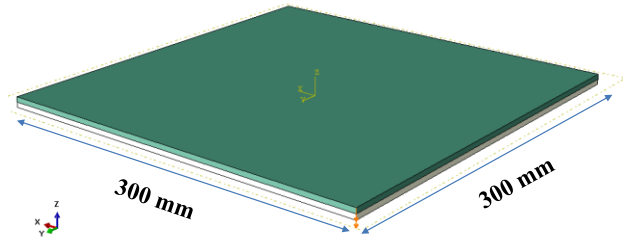


Fig. 3 Geometry of the steel-composite specimens simulated in ABAQUS.

شکل 3 هندسه نمونه‌های فولاد-کامپوزیت شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس.

از آنجایی که ایجاد مود A_0 موج لمب در عمل آسان‌تر است و همچنین سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس قطع حساسیت نسبتاً خوبی به تغییر ضخامت و خواص سازه نشان می‌دهد، در این مطالعه از این مود موج لمب استفاده شده است. برای اطمینان از ایجاد موج لمب نامتقارن مود (A_0) در تمامی نقاط نمونه، تحریک هم در بالا (لایه کامپوزیتی) و هم در پایین (لایه فولادی) نمونه انجام شد و شرایط مرزی برای تمامی لبه‌ها به صورت آزاد قرار داده شد. حسگرها¹ در فواصل مشخصی از عملگر جهت محاسبه سرعت فاز موج لمب گسترش یافته روی سطح نمونه قرار داده شدند که در شکل 4 مشاهده می‌شود. سرعت فاز مود A_0 موج لمب برای هر نمونه با استفاده از اختلاف فاز موج دریافتی در حسگرها اندازه‌گیری شد.

نمونه‌های دولایه فولاد-کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش را می‌توان بر اساس ضخامت لایه‌ها به دو گروه تقسیم‌بندی کرد. در گروه اول ضخامت لایه فولادی 4 mm ثابت در نظر گرفته شد و ضخامت پوشش کامپوزیتی مقادیر 0، 1، 2 و 3.16 میلی‌متر متغیر در نظر گرفته شد. در گروه دوم ضخامت پوشش کامپوزیتی 3.16 mm ثابت در نظر گرفته شد و ضخامت لایه فولادی مقادیر 2، 4، 6 و 8 میلی‌متر متغیر در نظر گرفته شد. از المان‌های سه‌بعدی مکعبی خطی هشت نقطه‌ای با انتگرال کاهش یافته و با کنترل ساعت شنی (C3D8R) در این کار استفاده شد که در شکل 5 تصویر این المان‌ها دیده می‌شود.

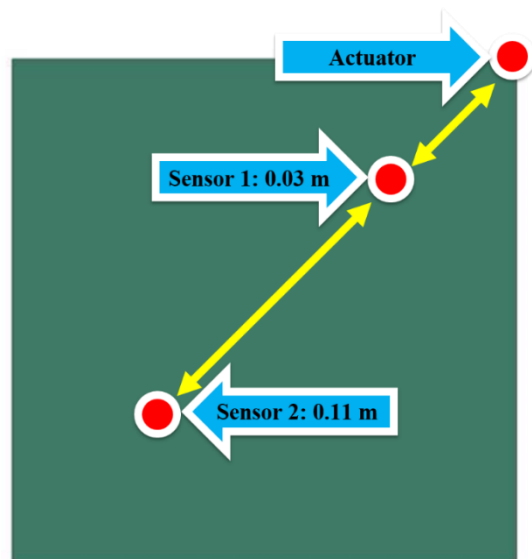


Fig. 4 The position of the actuator and sensors on the specimens.

شکل 4 جایگاه عملگر و حسگرها روی نمونه‌ها.

² Semi-analytical finite element

¹ Sensors

نیز کمتر از لایه فولادی است. این امر باعث ایجاد انعکاس قابل توجه موج در سطح مشترک صفحه فولادی و پوشش کامپوزیتی در تکنیک‌های مرسوم ارزیابی اولتراسوند، از جمله اندازه‌گیری ضخامت و اسکن مود A_0 یا B_1 می‌شود. در نتیجه، چنین تکنیک‌هایی برای ارزیابی چنین سازه‌های پوشش‌دهی شده مناسب نیستند، به ویژه زمانی که خواص مکانیکی و آکوستیکی صفحه فولادی و پوشش کامپوزیتی به طور قابل توجهی متفاوت باشد.

جدول 1 خواص مکانیکی صفحه فولادی، لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده و پوشش لایه‌ای کامپوزیتی.

Table 1 The mechanical properties of the carbon steel plate, mat and woven composite plies, and laminated composite coating.

ماده	سفتی در راستای x و y (GPa)	سفتی در راستای z (GPa)	$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	ρ (kg/m ³)
فولاد	200	200	0.29	7700
لایه نمد	26.4	26.4	0.27	1750
لایه بافته شده	21.74	10.56	0.27	1750
کامپوزیت لایه‌ای	10.42	9.5	0.27	1750

تصویری از خروجی شبیه‌سازی المان محدود که در آن موج لمب مود A_0 در صفحه فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت که با فرکانس تحریک 100 kHz گسترش یافته در شکل 8 نشان داده شده است. همچنین در شکل 9 تصویر دیگری از جایجایی در راستای Z در فرکانس تحریک 100 kHz نشان داده شده است. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود، گسترش موج لمب در فرکانس مربوطه به طور منظم و دقیق شبیه‌سازی شده است. در ضمن، افت دامنه دیده شده در شکل 9 مربوط به افزایش جبهه موج با فاصله انتشار نسبت به منبع موج (عملگر) است.

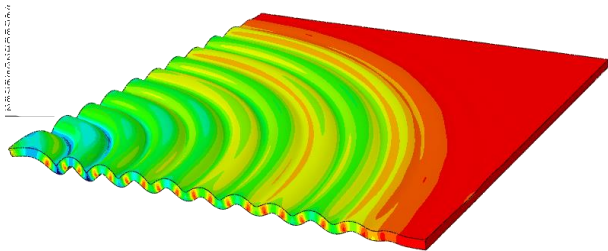


Fig. 8 A snapshot of the simulated waveform of Lamb wave mode A_0 in the specimen at the frequency of 100 kHz. The deformation scale factor is 1×10^8 in this figure.

شکل 8 تصویری از شکل موج لمب مود A_0 شبیه‌سازی شده در نمونه با فرکانس 100 kHz. ضریب تغییر شکل 1×10^8 است.

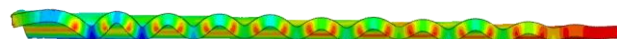


Fig. 9 A snapshot of Z displacement component of the simulated Lamb wave mode A_0 in the specimen at the frequency of 100 kHz. The deformation scale factor is 1×10^8 in this figure.

شکل 9 تصویری از مقدار جایجایی در راستای Z به واسطه موج لمب شبیه‌سازی شده مود A_0 در نمونه با فرکانس 100 kHz. ضریب تغییر شکل 1×10^8 است.

های کمتر از 110 kHz در شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب در نمونه‌ها استفاده شد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نمودار سرعت مود A_0 موج لمب بر حسب فرکانس در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس قطع شیب مناسبی دارد. در نتیجه مود A_0 موج لمب در این بازه فرکانسی حساسیت خوبی به تغییر ضخامت و خواص سازه نشان می‌دهد.

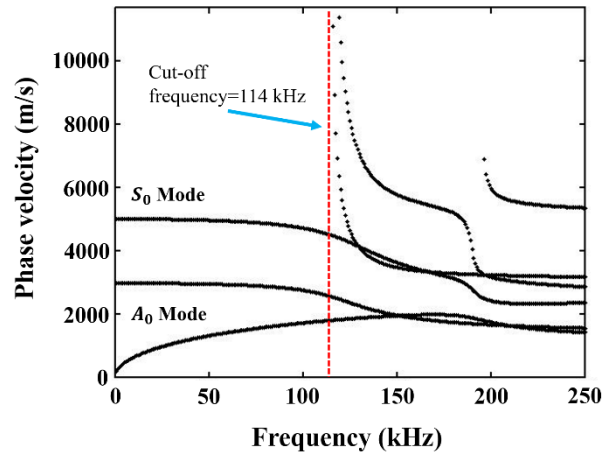


Fig. 6 The dispersion curves of Lamb wave modes obtained using the GUIGUW software for a 4 mm thick carbon steel plate coated with a 3.16 mm thick composite coating.

شکل 6 نمودار پراکندگی مدهای موج لمب برای نمونه فولاد-کامپوزیت متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm که با استفاده از نرم‌افزار GUIGUW به دست آمده است.

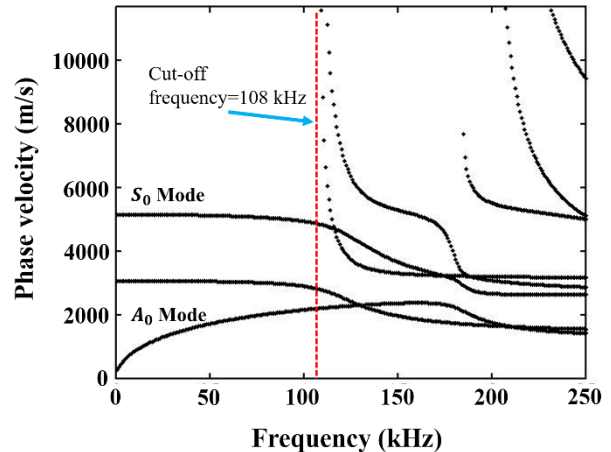


Fig. 7 The dispersion curves of Lamb wave modes obtained using the GUIGUW software for an 8 mm thick carbon steel plate coated with a 3.16 mm thick composite coating.

شکل 7 نمودار پراکندگی مدهای موج لمب برای نمونه فولاد-کامپوزیت متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 8 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm که با استفاده از نرم‌افزار GUIGUW به دست آمده است.

3- نتایج و بحث

خواص مکانیکی صفحه فولادی، لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده، و پوشش لایه‌ای کامپوزیتی در جدول 1 نشان داده شده است. اعداد گزارش شده در این جدول برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی گسترش امواج لمب در صفحه فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت لایه‌ای استفاده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، مدول الاستیک و چگالی پوشش کامپوزیتی کمتر از صفحه فولادی است و در نتیجه امپدانس آکوستیکی آن

¹ A- or B- mode scanning

پایین، سرعت موج لمب بیشتری در نمونه‌های با پوشش کامپوزیتی ضخیم‌تر محاسبه شد، در نتیجه می‌توان گفت که سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس‌های پایین بیشتر تحت تأثیر پارامتر ضخامت قرار دارد. اما در فرکانس‌های بالاتر اثر دو پارامتر ضخامت و سفتی تا حدودی با هم برابر شده و در نتیجه سرعت برای نمونه‌های مختلف نزدیک به هم محاسبه شد.

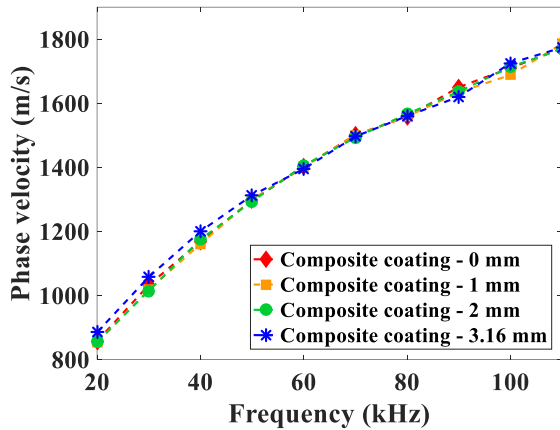


Fig. 10 The dispersion curves of the A_0 Lamb wave mode obtained for a 4 mm thick carbon steel plate coated with a composite coating with different thicknesses.

شکل 10 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت ثابت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف.

نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های دولایه‌ای فولاد- کامپوزیت متشکل از یک پوشش کامپوزیتی با ضخامت ثابت 3.16 mm و لایه فولادی با ضخامت‌های مختلف 2، 4، 6 و 8 میلی‌متری در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل 11 نشان داده شده است. این نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت لایه فولادی، سرعت موج لمب نیز افزایش می‌یابد و همچنین اختلاف تقریبی ثابتی در سرعت امواج در نمونه‌های مختلف با فرکانس‌های تحریک متفاوت مشاهده شد. این نتیجه به دو دلیل ضخامت کلی بالاتر و سفتی بیشتر برای نمونه‌های با ضخامت فولادی بیشتر حاصل شد.

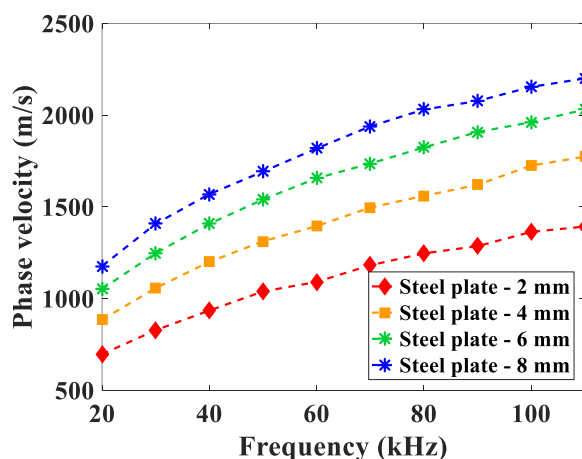


Fig. 11 The dispersion curves of the A_0 Lamb wave mode obtained for a carbon steel plate with different thicknesses coated with a 3.16 mm thick composite coating.

شکل 11 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک پوشش کامپوزیتی با ضخامت ثابت 3.16 mm و لایه فولادی با ضخامت‌های مختلف.

بعد از استخراج نمودارهای جابجایی-زمان برای هر یک از حسگرهای پیزوالکتریک (با فاصله‌های مشخص نسبت به عملگر)، سرعت موج لمب با توجه به محل قرارگیری عملگر و حسگرهای و اختلاف فاز موج در فواصل مختلف محاسبه شد و با سرعت محاسبه شده توسط نرم‌افزار GUIGUW مقایسه شد.

سرعت موج لمب گسترش یافت در نمونه‌های فولاد-کامپوزیتی در فرکانس‌های مختلف که با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود محاسبه شده در جدول 2 مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، در شبیه‌سازی‌های انجام شده یک بار پوشش کامپوزیتی به صورت لایه لایه مدل شد و خواص مکانیکی هر لایه به طور جداگانه اعمال شد، و یک بار هم پوشش کامپوزیتی به شکل بالک (جامد ارتوتروپیک) مدل شد و خواص به دست آمده از آزمایش‌های کشش انجام شده برای کامپوزیت لایه‌ای در مدل اعمال شد. نتایج ارائه شده در جدول 2 نشان می‌دهند که خطای موجود بین سرعت موج لمب به دست آمده از GUIGUW و شبیه‌سازی‌های المان محدود کمتر از 2% بوده که نشان دهنده دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس تحریک، سرعت موج لمب مود A_0 نیز افزایش می‌یابد که با توجه به ثابت بودن ضخامت و سفتی کل نمونه منطقی به نظر می‌رسد. همچنین، با توجه به یکسان بودن سرعت‌های محاسبه شده از شبیه‌سازی‌های المان محدود برای دو حالت لایه‌ای و بالک و کمتر بودن زمان ران برای مدل بالک، در ادامه کار و برای محاسبه نمودارهای پراکندگی پوشش کامپوزیتی به شکل بالک مدل شد.

جدول 2 سرعت موج لمب محاسبه شده برای نمونه با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود و نرم‌افزار GUIGUW.

Table 2 The Lamb wave phase velocity of the specimen obtained using the FE simulations and the GUIGUW software.

فرکانس (kHz)	سرعت موج برشی GUIGUW (m/s)	سرعت موج در شبیه-سازی بصورت لایه‌ای (m/s)	سرعت موج در شبیه-سازی بصورت بالک (m/s)
20	876.6	885	885 (0.95%)
40	1193	1200	1200 (0.53%)
60	1412	1395	1395 (1.2%)
80	1579	1560	1560 (1.2%)
100	1714	1725	1725 (0.64%)

نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های دولایه‌ای فولاد- کامپوزیت متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت ثابت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف 0، 1، 2 و 3.16 میلی‌متری در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل 10 نشان داده شده است. مشاهده شد که سرعت موج لمب در فرکانس‌های پایین برای نمونه‌های با ضخامت پوشش کامپوزیتی بیشتر کمی بیشتر بود، اما با افزایش فرکانس موج گسترش یافته اختلاف بین سرعت‌های موج لمب برای نمونه‌های مختلف کاهش یافت. سرعت موج لمب در مودهای مختلف تابعی از ضخامت و سفتی نمونه است. مشخصاً در مود A_0 موج لمب با افزایش ضخامت و سفتی، سرعت موج نیز افزایش می‌یابد و همچنین در فرکانس‌های مختلف تأثیرات دو پارامتر ضخامت و سفتی بر سرعت موج لمب متفاوت خواهد بود. ضخامت کل نمونه‌های دولایه‌ای فولاد- کامپوزیتی که دارای ضخامت لایه کامپوزیتی بیشتری هستند، در مجموع بیشتر بود، در حالی که نمونه‌های دارای ضخامت لایه کامپوزیتی کمتر سفتی برآیند بیشتری داشتند. در شکل 10 نشان داده شده است که در فرکانس‌های

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سرعت فاز مود A_0 موج لمب با کاهش سفتی لایه فولادی به دلیل کاهش سفتی کل نمونه کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تفاوت بین سرعت‌های محاسبه شده برای نمونه‌های مختلف در فرکانس‌های بالاتر بیشتر بود. این مشاهدات با تأثیر بیشتر سفتی کلی نمونه پوشش داده شده و همچنین تأثیر بیشتر خواص پوشش بر سرعت فاز در فرکانس‌های بالا (به دلیل داشتن طول موج کوتاه‌تر) توضیح داده می‌شود. نشان داده شد که ارزیابی کاهش خواص مکانیکی پوشش و صفحه فولادی با استفاده از روش گسترش امواج لمب پیشنهادی ممکن است در فرکانس‌های موج بالا، بصورت کارآمدتری انجام شود.

4- جمع بندی

در این مطالعه به کمک شبیه‌سازی المان محدود گسترش امواج لمب در صفحات فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت، اثر تغییرات ضخامت و خواص مکانیکی سازه فولادی و پوشش کامپوزیتی بر سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس‌های مختلف بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که سرعت فاز مود A_0 موج لمب بیشتر تحت تأثیر ضخامت نمونه‌ها در فرکانس‌های پایین و سفتی کلی نمونه‌ها در فرکانس‌های بالاتر قرار می‌گیرد. بنابراین، تخمین ضخامت پوشش در سازه‌های پوشش داده شده با استفاده از روش گسترش امواج لمب پیشنهادی در فرکانس‌های پایین بهتر انجام می‌شود. همچنین، شناسایی افت خواص مکانیکی پوشش و صفحه فولادی با استفاده از روش گسترش امواج لمب می‌تواند در فرکانس‌های بالاتر به طور مؤثرتری انجام شود. در نتیجه، شبیه‌سازی عددی المان محدود می‌تواند بعنوان یک آزمایشگاه مجازی دقیق و قابل اطمینان برای بررسی توانایی روش گسترش امواج لمب در ارزیابی غیر مخرب سازه‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان دادند که موج لمب به تغییر ضخامت و همچنین افت خواص مکانیکی صفحه فلزی و پوشش کامپوزیتی در صفحات فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت حساسیت خوبی نشان می‌دهد. ولی در شرایطی که تغییر ضخامت و یا افت خواص مکانیکی به طور هم‌زمان در صفحه فلزی و پوشش کامپوزیتی اتفاق بیفتند، تشخیص آن دشوارتر خواهد شد. یک راه مؤثر برای پایش صفحات فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت در این شرایط استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین است، که می‌تواند موضوع مطالعات آینده در این زمینه باشد. همچنین، تشخیص افت خواص و تغییر ضخامت موضعی در سازه‌های دو لایه نیز می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

5- مراجع

- [1] Lee, Y.-C. and Cheng, S.-W., "Measuring Lamb Wave Dispersion Curves of a Bi-Layered Plate and Its Application on Material Characterization of Coating" IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, Vol. 48, No. 3, pp. 830-837, 2001.
- [2] Shokrieh, M. M. and Omidi, M. J., "Reinforcement of Metallic Plates with Composite Materials" Journal of composite materials, Vol. 39, No. 8, pp. 723-744, 2005.
- [3] Masurkar, F., Tse, P. and Yelve, N. P., "Evaluation of Inherent and Dislocation Induced Material Nonlinearity in Metallic Plates Using Lamb Waves" Applied Acoustics, Vol. 136, pp. 76-85, 2018.
- [4] Cho, H., Hasanian, M., Shan, S. and Lissenden, C. J., "Nonlinear Guided Wave Technique for Localized Damage Detection in Plates with Surface-Bonded Sensors to Receive Lamb Waves Generated by Shear-Horizontal Wave Mixing" NDT & E International, Vol. 102, pp. 35-46, 2019.

نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل 12 نشان داده شده است، با این تفاوت نسبت به شکل‌های 10 و 11 که افت خواص مکانیکی معادل 0%، 20%، 40% و 60% برای پوشش کامپوزیتی در نظر گرفته شد. این نتایج نشان داد که سرعت مود A_0 موج لمب با افت خواص مکانیکی پوشش کامپوزیتی کمی کاهش پیدا کرد که این امر در اثر کاهش سفتی معادل دو لایه فولاد-کامپوزیت بوده است.

نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل 13 نشان داده شده است، که در آن افت خواص مکانیکی معادل 0%، 20%، 40% و 60% برای لایه فولادی در نظر گرفته شد.

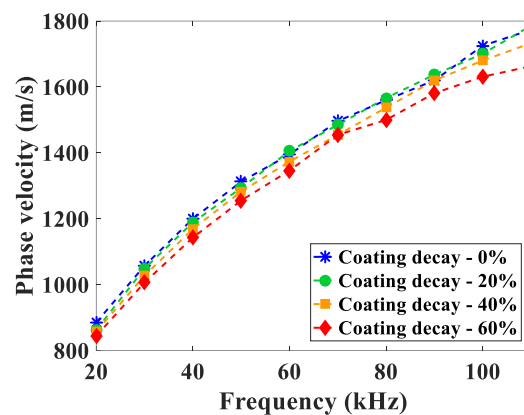


Fig. 12 The dispersion curves of the A_0 Lamb wave mode obtained for a 4 mm thick carbon steel plate coated with a 3.16 mm thick composite coating, where the coating material underwent different percentages of stiffness decay.

شکل 12 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm که دچار درصد‌های مختلف افت خواص مکانیکی شده است.

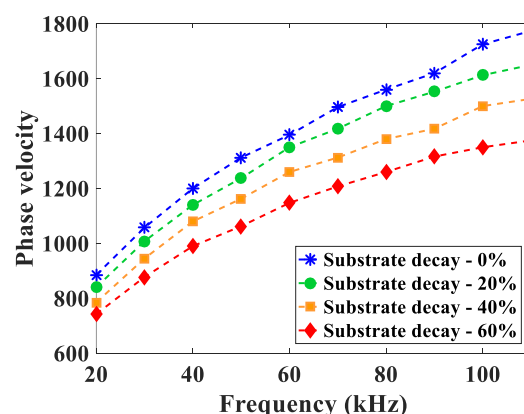


Fig. 13 The dispersion curves of the A_0 Lamb wave mode obtained for a 4 mm thick carbon steel plate coated with a 3.16 mm thick composite coating, where the substrate material underwent different percentages of stiffness decay.

شکل 13 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب برای نمونه‌های متشکل از یک پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm و لایه فولادی با ضخامت 4 mm که دچار درصد‌های مختلف افت خواص مکانیکی شده است.

- [22] Castaings, M. and Hosten, B., "Guided Waves Propagating in Sandwich Structures Made of Anisotropic, Viscoelastic, Composite Materials" *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 113, No. 5, pp. 2622-2634, 2003.
- [23] Dahmen, S., Amor, M. B. and Ghozlen, M. H. B., "Investigation of the Coupled Lamb Waves Propagation in Viscoelastic and Anisotropic Multilayer Composites by Legendre Polynomial Method" *Composite Structures*, Vol. 153, pp. 557-568, 2016.
- [24] Daryabor, p., Farzin, m. and Honarvar, F., "Calculating the Lamb Wave Modes in an Aluminum Sheet Bonded to a Composite Layer with Fem and Experiment" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 95-106, 2013.
- [25] Alleyne, D. N. and Cawley, P., "The Interaction of Lamb Waves with Defects" *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 39, No. 3, pp. 381-397, 1992.
- [26] Ramadas, C., Balasubramaniam, K., Hood, A., Joshi, M. and Krishnamurthy, C., "Modelling of Attenuation of Lamb Waves Using Rayleigh Damping: Numerical and Experimental Studies" *Composite Structures*, Vol. 93, No. 8, pp. 2020-2025, 2011.
- [27] Yang, C., Ye, L., Su, Z. and Bannister, M., "Some Aspects of Numerical Simulation for Lamb Wave Propagation in Composite Laminates" *Composite structures*, Vol. 75, No. 1-4, pp. 267-275, 2006.
- [28] 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.
- [29] Alleyne, D. and Cawley, P., "A Two-Dimensional Fourier Transform Method for the Measurement of Propagating Multimode Signals" *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, No. 3, pp. 1159-1168, 1991.
- [30] Donaldson, B. K., "Analysis of Aircraft Structures: An Introduction", Cambridge University Press, 2008.
- [5] Rosenkrantz, E., Bottero, A., Komatitsch, D. and Monteiller, V., "A Flexible Numerical Approach for Non-Destructive Ultrasonic Testing Based on a Time-Domain Spectral-Element Method: Ultrasonic Modeling of Lamb Waves in Immersed Defective Structures and of Bulk Waves in Damaged Anisotropic Materials" *NDT & E International*, Vol. 101, pp. 72-86, 2019.
- [6] Fathi, H., Kazemirad, S. and Nasir, V., "A Nondestructive Guided Wave Propagation Method for the Characterization of Moisture-Dependent Viscoelastic Properties of Wood Materials" *Materials and Structures*, Vol. 53, No. 6, pp. 1-14, 2020.
- [7] Fathi, H., Nasir, V. and Kazemirad, S., "Prediction of the Mechanical Properties of Wood Using Guided Wave Propagation and Machine Learning" *Construction and Building Materials*, Vol. 262, pp. 120848, 2020.
- [8] 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.
- [9] Rastegarmoghaddam, M., Nikkhoy Tanha, S. D. and Rajabi, M., "Use of Machine Learning to Identify Adhesive Joints Defects by Using Ultrasonic Waves," *In Persian, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 54, No. 2, pp. 1-6, 2021.
- [10] Taghipour Birgani, P., "Investigation of the Effect of Angle Beam Transducer Parameters on the Lamb Wave Field in the Three-Layer Plate by Normal Mode Expansion Method" *Journal of Computational Applied Mechanics*, Vol. 51, No. 2, pp. 482-485, 2020.
- [11] Jenot, F., Ouafthou, M., Duquennoy, M. and Ourak, M., "Corrosion Thickness Gauging in Plates Using Lamb Wave Group Velocity Measurements" *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, No. 8, pp. 1287, 2001.
- [12] Rao, J., Ratassepp, M., Lisevych, D., Hamzah Caffoor, M. and Fan, Z., "On-Line Corrosion Monitoring of Plate Structures Based on Guided Wave Tomography Using Piezoelectric Sensors" *Sensors*, Vol. 17, No. 12, pp. 2882, 2017.
- [13] Datta, S. K., "Elastic Waves in Composite Media and Structures: With Applications to Ultrasonic Nondestructive Evaluation", CRC Press, 2019.
- [14] Ramezani, H., Kazemirad, S., Shokrieh, M. and Mardanshahi, A., "Effects of Adding Carbon Nanofibers on the Reduction of Matrix Cracking in Laminated Composites: Experimental and Analytical Approaches" *Polymer Testing*, pp. 106988, 2020.
- [15] Mardanshahi, A., Nasir, V., Kazemirad, S. and Shokrieh, M., "Detection and Classification of Matrix Cracking in Laminated Composites Using Guided Wave Propagation and Artificial Neural Networks" *Composite Structures*, pp. 112403, 2020.
- [16] Mardanshahi, A., Shokrieh, M. and Kazemirad, S., "Identification of Matrix Cracking in Cross-Ply Laminated Composites Using Lamb Wave Propagation" *Composite Structures*, Vol. 235, pp. 111790, 2020.
- [17] Shafiei Alavijeh, M. and Soorgee, M. H., "Experimental and Numerical Study of Delamination Detection in a Wgf/Epoxy Composite Plate Using Ultrasonic Guided Waves and Signal Processing Tools" *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, Vol. 4, No. 2, pp. 141-152, 2018.
- [18] 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," *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 343-352, 2018.
- [19] Castaings, M., Singh, D. and Viot, P., "Sizing of Impact Damages in Composite Materials Using Ultrasonic Guided Waves" *NDT & E International*, Vol. 46, pp. 22-31, 2012.
- [20] Gao, F., Zeng, L., Lin, J. and Shao, Y., "Damage Assessment in Composite Laminates Via Broadband Lamb Wave" *Ultrasonics*, Vol. 86, pp. 49-58, 2018.
- [21] Wang, L. and Rokhlin, S., "Stable Reformulation of Transfer Matrix Method for Wave Propagation in Layered Anisotropic Media" *Ultrasonics*, Vol. 39, No. 6, pp. 413-424, 2001.