



ارزیابی غیرمخرب خوردگی در لوله‌های فلزی دارای روکش کامپوزیتی با شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده

پارسا قاسمی¹، سیاوش کاظمی‌راد^{2*}

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

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

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

چکیده

اطلاعات مقاله:

هدف این پژوهش پیشنهاد یک روش ارزیابی غیرمخرب به وسیله گسترش امواج هدایت‌شونده برای بررسی کاهش ضخامت (خوردگی) در لوله‌های فلزی پوشش داده با کامپوزیت بوده است. ابتدا مدل اجزای محدود یک لوله فولادی به ضخامت 4 mm و قطر 200 mm پوشش‌دهی شده با کامپوزیت لایه‌ای ایجاد شد، که در آن روکش کامپوزیتی از لایه‌های نمد الیاف شیشه خرد شده و پارچه فیبر شیشه روینگ بافته شده تشکیل شده بود. سپس مود نامتقارن اساسی موج هدایت‌شونده با فرکانس 100 kHz در راستای طولی سازه گسترش داده شد و سرعت فازی موج در نمونه‌هایی با میزان خوردگی متفاوت لوله فولادی اندازه‌گیری شد. در مرحله اول، خوردگی به صورت یکپارچه در سرتاسر لوله و در مرحله بعد در قسمتی از لوله با طول مشخص و زوایای محیطی 90، 180 و 360 درجه ایجاد شد. نشان داده شد که میزان کاهش سرعت فاز موج در قسمت‌های دارای خوردگی نسبت به قسمت سالم بین 9% تا 33% برای میزان خوردگی‌های مختلف بوده است. همچنین، تشخیص وجود، محل و میزان خوردگی در قسمت فولادی لوله به کمک روش گسترش امواج هدایت‌شونده با دقت مناسبی انجام شد. نتیجه‌گیری شد که روش شبیه‌سازی گسترش امواج هدایت‌شونده می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی به منظور توسعه روش‌هایی برای ارزیابی غیرمخرب لوله‌های پوشش‌دهی شده با کامپوزیت و تشخیص محل و میزان خوردگی در آنها مورد استفاده قرار گیرد.

دریافت: 1402/08/24

پذیرش: 1402/10/26

کلیدواژگان

امواج هدایت‌شونده، پوشش کامپوزیتی، سازه‌های پوشش‌دهی شده، مدل‌سازی اجزای محدود، فراصوت

Nondestructive evaluation of corrosion in pipes with composite coating with the finite element simulation of guided wave propagation

Parsa Ghasemi¹, 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, Composite coating, Coated structures, Finite element modeling, Ultrasound

Abstract

This study aimed to propose an NDE method based on the guided wave propagation for assessing the thickness loss (corrosion) in the metal pipes coated with composites. First, the finite element model of a steel pipe with the thickness of 4 mm and diameter of 200 mm coated with a layered composite material was developed, in which the composite coating constituted by the chopped strand glass fiber mat and woven roving glass fiber cloth layers. Then, the fundamental antisymmetric guided wave mode with the frequency of 100 kHz was propagated in the longitudinal direction of the structure and the phase velocity of the propagated wave was measured in specimens with different corrosion extent in the steel pipe. In the first step, a uniform corrosion was induced throughout the pipe, and in the next step, it was induced in a part of the pipe with a specific length and circumferential angles of 90, 180 and 360 degrees. It was shown that the reduction in the wave phase velocity in the corroded regions compared with the intact regions was between 9% to 33% for different corrosion extents. Besides, the detection of the corrosion in the steel pipe and its location and extent was properly performed using the guided wave propagation method. It was concluded that the simulated guided wave propagation method can be used as a virtual lab for the development of methods for nondestructive evaluation of pipes coated with composites and detection of the location and extent of corrosion in them.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Ghasemi, P., Kazemirad, S., "Nondestructive evaluation of corrosion in pipes with composite coating with the finite element simulation of guided wave propagation," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2312-2319, 2024.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2015779.1866

1- مقدمه

امروزه مهندسان در صنعت به منظور افزایش استحکام سازه‌ها و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر خوردگی و زنگ‌زدگی از فرآیند پوشش‌دهی¹ استفاده می‌کنند. یکی از مهم‌ترین موادی که در این فرآیند به عنوان پوشش استفاده می‌شود، کامپوزیت‌ها هستند. این مواد به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و همچنین مقاومت مکانیکی، شیمیایی و خوردگی بالایی که دارند به عنوان پوشش لایه-مقاومت فلزی در صنایع نفت و هوافضا به کار می‌روند [1]. پایش سلامت این سازه‌های چندلایه و بازرسی مداوم پوشش‌ها و لایه‌های پوشش داده شده از اهمیت بالایی برخوردار است [2]. به طور مثال ارزیابی کاهش ضخامت (خوردگی) و خواص مکانیکی لایه‌ی بستر² در لوله‌های پوشش‌دهی شده با کامپوزیت که به طور مستقیم در دسترس نیستند یکی از نیازهای صنعت است. روش‌های زیادی برای ارزیابی و آزمایش غیرمخرب³ سازه‌ها وجود دارند که هر کدام نقاط ضعف و قوت متفاوتی دارند. به دلیل محدودیت‌های این روش‌ها، بسیاری از آن‌ها برای استفاده در محیط‌های چندلایه مناسب نیستند. به طور مثال روش ارزیابی فراصوت⁴ به دلیل اختلاف امپدانس آکوستیکی بسیار زیاد بین کامپوزیت و فلز و انعکاس قابل توجه موج در سطح مشترک آن‌ها، در این محیط‌ها قابل استفاده نیستند [3]. عیب‌یابی توسط گسترش امواج هدایت‌شونده⁵ یکی از روش‌هایی است که برای ارزیابی و آزمایش غیرمخرب سازه‌های مختلف بسیار رایج است [4-10]. روش گسترش امواج هدایت‌شونده قابل استفاده در فرکانس‌های بالاست و در نتیجه دارای حساسیت به خرابی و قدرت عیب‌یابی بالایی است. همچنین، میرایی کم که از ویژگی‌های ذاتی این امواج است، کمک می‌کند این امواج بتوانند تا فواصل نسبتاً دور گسترش پیدا کرده و قسمت بزرگی از سازه را مورد ارزیابی قرار دهند. قابلیت ارزیابی مواد ناهمسانگرد⁶ و کامپوزیت‌ها ویژگی مهم دیگر این امواج است.

تاکنون در پژوهش‌های بسیاری از روش گسترش امواج هدایت‌شونده برای ارزیابی محیط‌های چندلایه استفاده شده است. برای مثال، وانگ و روخیلن از یک روش بازگشتی برای مطالعه گسترش موج در محیط‌های ناهمسانگرد چندلایه به کمک روش ماتریس انتقال استفاده کردند [11]. کستینگ و هوستن گسترش امواج هدایت‌شونده در محیط‌های ساندویچی تشکیل شده از لایه‌های ناهمسانگرد و ویسکوالاستیک را مورد بررسی قرار دادند و منحنی‌های پراکندگی حالت‌های گسترش را با استفاده از ماتریس انتقال به دست آوردند [12]. سیمونتی تاثیر میرایی داخلی پوشش بر سرعت فاز و تضعیف موج هدایت‌شونده را بر روی صفحات الاستیک پوشش داده شده با مواد ویسکوالاستیک مطالعه کرد [13]. کاظمی‌راد و مونزو روشی را بر اساس گسترش امواج رابلی به منظور تشخیص ویژگی‌های ویسکوالاستیک بیومواد توسعه دادند [14]. داهمن و همکاران انتشار موج هدایت‌شونده را در کامپوزیت‌های چندلایه ناهمسانگرد و ویسکوالاستیک با استفاده از رویکرد چندجمله‌ای متعامد بررسی کردند. پراکندگی و تضعیف امواج هدایت‌شونده در این روش مورد بررسی قرار گرفت [15]. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده قبلی به مسئله مستقیم گسترش امواج هدایت‌شونده پرداخته شده است که در آن خواص پراکندگی موج گسترش یافته با داشتن خواص مواد و هندسه‌ی هر لایه به دست می‌آید. با این حال توجه کمتری به مسئله معکوس گسترش امواج هدایت‌شونده شده است که در آن خواص مکانیکی، هندسه‌ی لایه‌ها و سازه و

آسیب‌های موجود در سازه با داشتن خواص موج گسترش یافته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در برخی از مطالعات گذشته به حل مسئله معکوس گسترش امواج هدایت‌شونده جهت تهیه نقشه‌ی خوردگی و اندازه‌گیری ضخامت سازه‌ها پرداخته شده است [16-18]. برای مثال، جنوت و همکاران روشی برای اندازه‌گیری ضخامت صفحات خورده شده با استفاده از مود S₀ موج لمب پیشنهاد کردند [16]. راثو و همکاران یک روش توموگرافی موج هدایت شده اولتراسونیک بر اساس موج هدایت‌شونده برای نقشه‌برداری از خوردگی سازه‌های صفحه‌مانند ارائه کردند [17]. همچنین عظیمی و همکاران یک روش غیرمخرب دو مرحله‌ای برای پایش سریع خوردگی در سازه‌های صفحه‌مانند با استفاده از گسترش امواج هدایت‌شونده پیشنهاد کردند [18]. ارزیابی نقشه‌ی خوردگی و اندازه‌گیری ضخامت کامپوزیت و دیواره‌ی فلزی در لوله‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت تا کنون در مطالعات گذشته انجام نشده است.

در برخی از مطالعات پیشین از شبیه‌سازی گسترش امواج هدایت‌شونده به روش اجزای محدود به عنوان یکی از روش‌های حل عددی استفاده شده است [19-24]. برای مثال، الین و کاولی روش اجزای محدود را برای توضیح برهمکنش امواج هدایت‌شونده و آسیب‌های ایجاد شده در سازه‌های صفحه‌ای به کار بردند [20]. راماداس و همکاران ضریب میرایی امواج هدایت‌شونده در لایه‌های مختلف یک نمونه‌ی کامپوزیتی را به دو روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود محاسبه کردند [21]. پروری و همکاران با استفاده از روش اجزای محدود و گسترش امواج هدایت‌شونده به بررسی کاهش ضخامت و میزان خوردگی در محیط‌های دو لایه‌ی فلز-کامپوزیت پرداختند [23].

هدف این مقاله پیشنهاد یک روش ارزیابی غیرمخرب بر پایه گسترش امواج هدایت‌شونده برای بررسی خوردگی در لوله‌های پوشش‌دهی شده با کامپوزیت است. همانطور که گفته شد، ارزیابی خوردگی لایه‌ی فلزی این لوله‌ها که در طی زمان با عبور سیال و یا به دلیل ایرادهای ساختی ایجاد می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش ابتدا نمونه‌ای از یک لوله‌ی فولادی با روکش کامپوزیتی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل شد و تحریک و گسترش امواج هدایت‌شونده بر روی آن انجام گرفت. سپس کاهش ضخامت بخش‌هایی از لایه‌ی فلزی مدل اجزای محدود ایجاد شد و محل و میزان خوردگی در آن به کمک ویژگی‌های موج گسترش یافته مورد ارزیابی قرار گرفت.

2- مواد و روش‌ها

2-1- امواج هدایت‌شونده

امواج هدایت‌شونده در واقع بسته‌های موجی حاصل از برهم‌نهی موج‌های فشاری و برشی نزدیک سطح آزاد سازه‌ها می‌باشند. از مهم‌ترین ویژگی‌های امواج هدایت‌شونده می‌توان به قابلیت استفاده در فرکانس‌های بالا، میرایی پایین، حساسیت به خرابی بالا و ارزیابی سریع اشاره کرد. یکی دیگر از ویژگی‌های امواج هدایت‌شونده، پراکنده‌شوندگی بودن آن‌ها است. به آن معنی که سرعت این امواج برخلاف امواجی مانند امواج رابلی به فرکانس تحریک وابسته است و در هر فرکانس سرعت متفاوتی دارند. همچنین این امواج می‌توانند بر خلاف امواج رابلی در یک فرکانس با مودهای متفاوت گسترش یابند [6].

⁴ Ultrasonic testing method

⁵ Guided wave propagation

⁶ Anisotropic

¹ Coating

² Substrate layer

³ Non-destructive evaluation and testing

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 و ضخامت مجموع لوله و پوشش کامپوزیتی به 7.16 mm رسید. خواص مکانیکی صفحه فولادی و لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده در جدول 1 نشان داده شده است. همچنین هندسه لوله فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس در شکل 2 نشان داده شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی لوله فولادی و لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده [23].

Table 1 The mechanical properties of the carbon steel pipe, and mat and woven composite plies [23].

G_{xy}, G_{yz}, G_{zx} (GPa)	$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$	E_z (GPa)	E_x, E_y (GPa)	ρ (kg/m ³)	ماده
-	0.29	200	200	7700	فولاد
-	0.27	26.4	26.4	1750	لایه نمد
4.6	0.27	10.56	21.74	1750	لایه بافته شده

لایه‌های فولاد و نمد همسانگرد بوده و خواص آن‌ها در همه‌ی جهات یکسان است. ولی خواص مکانیکی لایه‌ی بافته شده ناهمسانگرد بوده و در جدول 1 در مختصات کارتزین داده شده است. این خواص در نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود با تعریف مختصات استوانه‌ای به جهت مناسب نسبت داده شدند. بدین منظور، خواص مکانیکی در راستای محوره‌های x و y معادل خواص مکانیکی در راستای طولی و محیطی و خواص مکانیکی در راستای محور z معادل خواص مکانیکی در راستای شعاعی در نظر گرفته شدند.

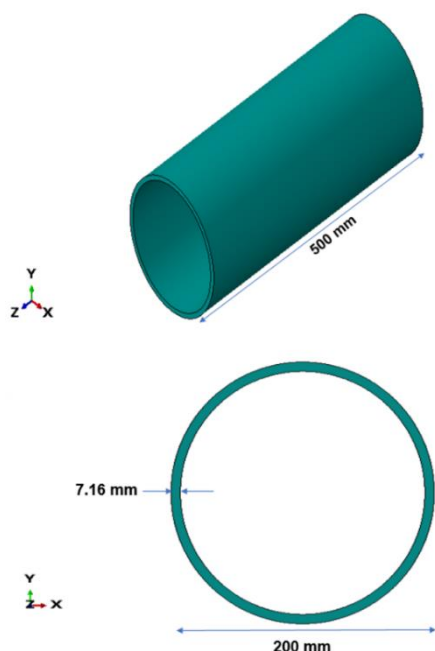


Fig. 1 Geometry of the steel pipe coated with composite material and simulated in ABAQUS.

شکل 1 هندسه لوله فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس.

با حل معادلات حاکم بر امواج هدایت‌شونده در سازه‌ها، نموداری به نام نمودار پراکندگی مودهای مختلف موج به دست می‌آید. این منحنی سرعت مودهای مختلف موج هدایت‌شونده را بر حسب فرکانس-ضخامت سازه محل گسترش موج بیان می‌کند. در ابتدای نمودار پراکندگی (در فرکانس-ضخامت‌های پایین)، تنها دو مود متقارن (S_0) و نامتقارن (A_0) اساسی موج هدایت‌شونده حضور دارند. از فرکانسی به بعد، مودهای دیگر موج هدایت‌شونده نیز ظاهر می‌شوند که به آن فرکانس قطع¹ گفته می‌شود.

ظاهر شدن مودهای مختلف موج هدایت‌شونده در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس قطع نشان‌دهنده افزایش پراکندگی در این فرکانس‌ها است. همچنین با افزایش فرکانس میرایی موج نیز افزایش پیدا می‌کند و حضور مودهای زیاد در یک محدوده فرکانسی قابلیت آشکارسازی را کاهش می‌دهد. بنابراین ناحیه قبل از خط فرکانس قطع برای ارزیابی و پایش سلامت سازه‌ها مناسب‌تر است. با توجه به طول موج کوتاه‌تر مود A_0 موج هدایت‌شونده نسبت به مود S_0 و همچنین تحریک و گسترش آسان‌تر مودهای نامتقارن، مود A_0 موج هدایت‌شونده برای انجام این پژوهش انتخاب شد.

2-2- شبیه‌سازی عددی

دو معیار مهم برای کاهش خطای شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج، بیشینه گام زمانی² و اندازه‌ی المان می‌باشند. اندازه‌ی المان باید به گونه‌ای باشد که در هر طول موج بین 10 الی 20 المان قرار بگیرد [24,23]. از آنجایی که طول موج برشی کوتاه‌تر از موج فشاری است، اندازه‌ی المان بر حسب سرعت موج برشی و طبق معادله (1) به دست می‌آید [23]:

$$l_e = \frac{\lambda_{min}}{20} \approx \frac{c_s}{20f_{max}} \quad (1)$$

در معادله‌ی بالا l_e اندازه‌ی المان، λ_{min} اندازه‌ی طول موج، f_{max} بیشینه فرکانس تحریک و c_s سرعت موج برشی است. همچنین، در یک گام زمانی با توجه به سرعت موج و اندازه‌ی المان، نباید یک طول موج به طور کامل یک المان را رد کند تا تحلیل به درستی انجام شود. بنابراین با توجه به اندازه‌ی المان به دست آمده از معادله (1)، اندازه‌ی بیشینه گام زمانی طبق معادله‌ی (2) محاسبه می‌شود:

$$\Delta t_{max} \approx \frac{(l_e)_{min}}{c_p} = \frac{1}{20f_{max}} \quad (2)$$

که در آن Δt_{max} بیشینه گام زمانی، $(l_e)_{min}$ اندازه‌ی کوچکترین المان در شبیه‌سازی و c_p سرعت موج فشاری می‌باشد.

در این مطالعه، شبیه‌سازی گسترش امواج هدایت‌شونده در لوله فولادی با روکش کامپوزیتی در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته است. نوع حلگر برای این مدل‌سازی از نوع صریح دینامیکی³ بوده و شبیه‌سازی به صورت لایه‌ای انجام شده است. به آن معنی که خواص لایه‌های مختلف کامپوزیت و فولاد به صورت جداگانه تعریف و تخصیص داده شده‌اند. لوله فولادی در نظر گرفته شده مطابق شکل 1 دارای طول 500 mm، قطر 200 mm و ضخامت 4 mm بوده است. پوشش کامپوزیتی از چهار لایه نمد الیاف شیشه خرد شده⁴ با وزن مشخصه 450 g/m²، دولا به پارچه فیبر شیشه روینگ بافته شده⁵ با وزن مشخصه 400 g/m² و رزین وینیل استر 922 Hetron تشکیل شده است. لایه فولادی در

⁴ Chopped strand glass fiber mat

⁵ Woven roving glass fiber cloth

¹ Cut-off frequency

² Maximum time increment

³ Dynamic explicit

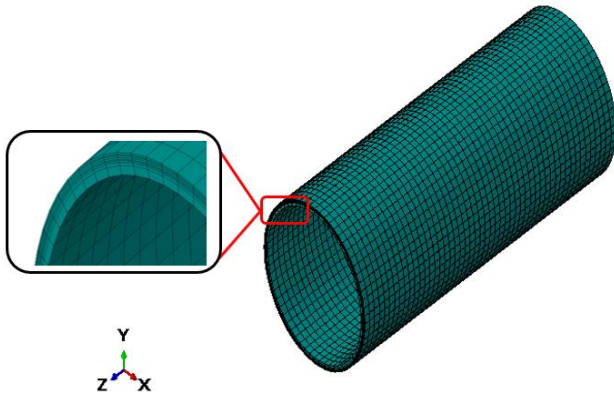


Fig. 3 The elements type used in the developed finite element model.

شکل 3 خانواده المان‌های به کار رفته در مدل اجزای محدود توسعه یافته.

برای به دست آوردن نمودار پراکندگی و همچنین اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده و ارزیابی دقت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار GUIGUW استفاده شده است. این نرم‌افزار مبتنی بر روابط المان محدود نیمه تحلیلی⁴ است و بر اساس مسئله مستقیم گسترش امواج هدایت‌شونده عمل می‌کند. بدین صورت که با دریافت خواص مکانیکی و هندسه‌ی هر لایه از سازه، سرعت فاز مودهای مختلف موج گسترش یافته در آن را ارائه می‌کند. برای تعریف خواص لایه ناهمسانگرد سازه (لایه بافته شده) نیاز به ماتریس سفتی⁵ ارتوتوپیک می‌باشد. این ماتریس از معکوس کردن ماتریس نرمی⁶ مطابق معادله (3) به دست می‌آید. ماتریس نرمی انتقال یافته به مختصات استوانه‌ای، با نام ماتریس لخنیتسکی⁷ شناخته می‌شود و برای مسئله موجود در این پژوهش با توجه به معادله (4) دست می‌آید.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & 0 & 0 \\ & L_{22} & L_{23} & L_{24} & 0 & 0 \\ & & L_{33} & L_{34} & 0 & 0 \\ & & & L_{44} & 0 & 0 \\ & & & & L_{55} & L_{56} \\ & & & & & L_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{33} & S_{32} & S_{31} & S_{36} & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{21} & S_{26} & 0 & 0 \\ & & S_{11} & S_{16} & 0 & 0 \\ & & & S_{66} & 0 & 0 \\ & & & & S_{55} & S_{54} \\ & & & & & S_{44} \end{bmatrix} \quad (4)$$

برای ایجاد موج هدایت‌شونده در نمونه مورد نظر، یک جابجایی سینوسی متناوب با فرکانس تحریک 100 kHz و دامنه 1 mm در محل عملگر¹ به نمونه اعمال شد و مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها با میزان خوردگی مختلف در لایه فولادی انجام شد. مطابق شکل 3 تحریک به صورت نقطه‌ای در گوشه‌ی ابتدایی لوله و در لبه‌ی بالایی آن انجام شد. همچنین، شرایط مرزی در انتهای لوله و به صورت نقطه‌ای تعریف شد، به این صورت که دو نقطه در راستای طولی و یک نقطه در دو راستای دیگر بسته شد. برای دریافت امواج گسترش یافته در لوله، شش حسگر² مطابق شکل 2 در راستای گسترش موج در طول نمونه در فاصله‌ی 220 تا 320 میلی‌متری از لبه‌ی لوله (محل قرارگیری عملگر) و با فاصله مساوی 20 میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند و جابجایی در راستای شعاعی را بر حسب زمان ثبت کردند. سپس، سرعت فاز موج گسترش یافته روی سطح نمونه با استفاده از اختلاف فاز موج دریافتی در حسگرها اندازه‌گیری شد. یکی دیگر از پارامترهای مهم برای استخراج نتایج صحیح از شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج روی نمونه زمان حل می‌باشد. زمان حل در این مطالعه به گونه‌ای تعیین شد که امواج گسترش یافته به طور کامل به همگی حسگرها برسند و همچنین از حدی بزرگ‌تر نباشد که با برخورد موج به انتهای لوله و بازگشت موج و تداخل با موج رفت گسترش یافته مشاهده شود.

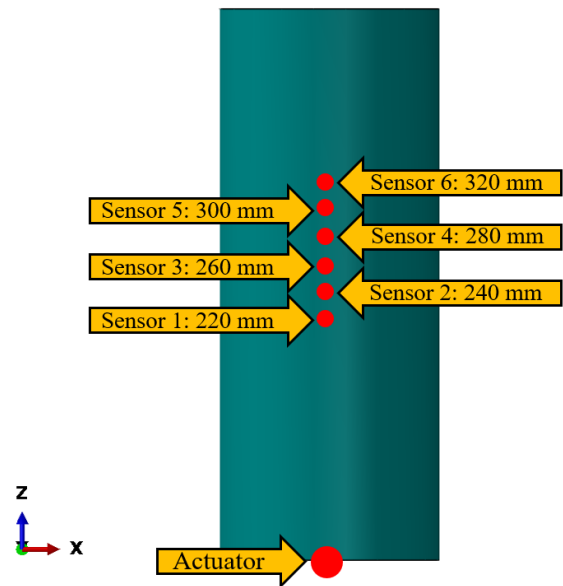


Fig. 2 The position of the actuator and sensors on the specimens.

شکل 2 جایگاه عملگر و حسگرها روی نمونه‌ها.

برای کاهش خطای شبیه‌سازی، یکدستی و یکنواختی المان‌ها در مدل اجزای محدود توسعه یافته از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین دلیل و برای افزایش کیفیت مش‌بندی، علاوه بر قسمت‌های³ ایجاد شده، در ضخامت لوله به منظور تفکیک درست لایه‌های فولادی و کامپوزیتی نمد و بافته شده، قسمت‌های دیگری در جهت قطر لوله ایجاد شدند (شکل 3). در این پژوهش، از المان‌های سبده‌ی مکعبی خطی هشت نقطه‌ای با انتگرال کاهش یافته و با کنترل ساعت شنی (C3D8R) استفاده شد.

¹ Actuator

² Sensor

³ Partition

⁴ Semi-analytical finite element

⁵ Stiffness matrix

⁶ Compliance matrix

⁷ Lekhnitskii



Fig. 6 Partial corrosion in the pipe with a length of 40 mm and a circumferential angle of 90 degrees.

شکل 6 خوردگی تکه‌ای در قسمتی از لوله به طول 40 میلی‌متر و زاویه محیطی 90 درجه.

3- نتایج و بحث

3-1- محاسبه سرعت فاز موج هدایت‌شونده

نمودار پراکندگی مودهای مختلف امواج هدایت‌شونده برای لوله فولاد-کامپوزیت متشکل از یک لایه فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm با خواص مکانیکی داده شده در جدول 1، در شکل 7 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فرکانس قطع که بصورت خط چین قرمز رنگ در شکل 7 مشخص شده است در فرکانس 174 kHz قرار دارد. همچنین مود A₀ موج هدایت‌شونده در فرکانس تحریک تعیین شده (100 kHz) دارای شیب مطلوبی است که نشان‌دهنده حساسیت بالا به خوردگی (تغییر ضخامت) در این فرکانس است.

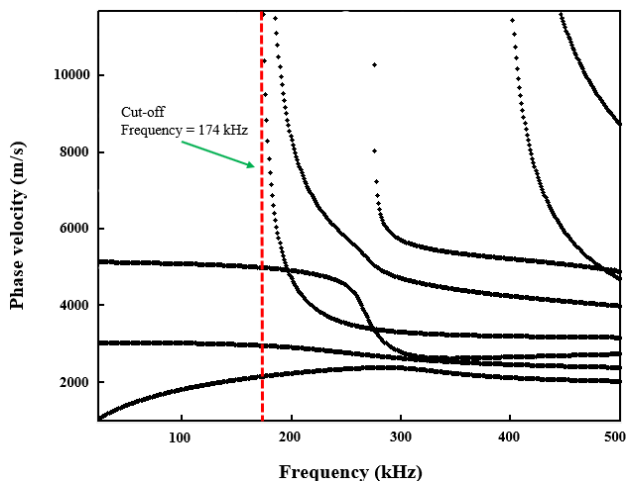


Fig. 7 The dispersion curves of guided wave modes obtained using the GUIGUW software for a 4 mm thick carbon steel pipe coated with a 3.16 mm thick composite coating.

شکل 7 نمودار پراکندگی مودهای امواج هدایت‌شونده برای لوله 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 بدست آمده است.

در مرحله‌ی اول مدل‌سازی خوردگی، خوردگی در مدل اجزای محدود به صورت یکپارچه در سرتاسر طول لوله و به صورت 360 درجه ایجاد شد. منظور از ایجاد خوردگی به صورت یکپارچه، کاهش ضخامت لوله فولادی به طور سرتاسری به عددی کمتر از 4 mm است. هدف از انجام این مرحله اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود از طریق مقایسه نتایج با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار GUIGUW بوده است. در مرحله بعدی به منظور بررسی شرایط واقعی در صنعت، خوردگی‌های تکه‌ای در قسمتی از لوله با طول ثابت 40 mm و زوایای محیطی 90، 180 و 360 درجه ایجاد شد (شکل‌های 4، 5 و 6). سپس به کمک حسگرهای قرار داده شده روی نمونه (دو حسگر قبل، دو حسگر بعد و دو حسگر در محل خوردگی) سرعت موج گسترش یافته در نواحی سالم و دارای خوردگی لوله محاسبه شده است. این نکته لازم به ذکر است که خوردگی‌های ایجاد شده همگی در راستای خط واصل عملگر و حسگرها مدل‌سازی شده و خوردگی در زوایای دیگر مورد بررسی قرار نگرفته است.

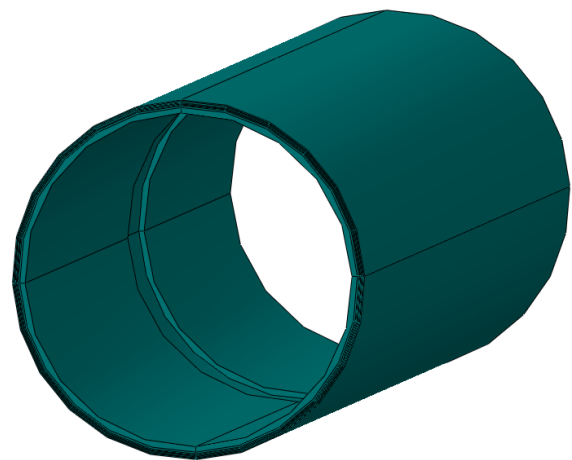


Fig. 4 Partial corrosion in the pipe with a length of 40 mm and a circumferential angle of 360 degrees.

شکل 4 خوردگی تکه‌ای در قسمتی از لوله به طول 40 میلی‌متر و زاویه محیطی 360 درجه.

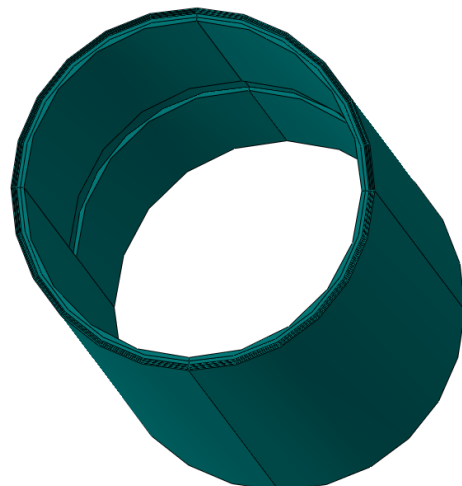


Fig. 5 Partial corrosion in the pipe with a length of 40 mm and a circumferential angle of 180 degrees.

شکل 5 خوردگی تکه‌ای در قسمتی از لوله به طول 40 میلی‌متر و زاویه محیطی 180 درجه.

جدول نشان می‌دهند که خطای موجود بین سرعت موج هدایت‌شونده بدست آمده از GUIGUW و شبیه‌سازی‌های اجزای محدود کمتر از 2% بوده که نشان دهنده دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌باشد. همچنین مشاهده شد که با افزایش میزان خوردگی در قسمت فولادی لوله (کاهش ضخامت لوله)، سرعت انتشار موج کاهش می‌یابد. به بیان بهتر، سرعت موج با ضخامت لایه‌ی فولادی رابطه‌ی مستقیم دارد که این امر با روند صعودی نمودار پراکندگی مود نامتقارن اساسی موج هدایت‌شونده برحسب فرکانس-ضخامت در فرکانس تحریک همخوانی دارد.

3-3- خوردگی 360، 180 و 90 درجه در قسمتی از لوله

سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های سالم و دارای خوردگی 360 درجه لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی در ناحیه خوردگی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود به ترتیب در جدول‌های 3، 4 و 5 ارائه شده است. همچنین درصد اختلاف نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج حاصل از GUIGUW برای نمونه سالم و دارای خوردگی یکپارچه (جدول 2) به منظور بررسی توانایی روش گسترش امواج هدایت‌شونده برای ارزیابی لوله‌های پوشش‌دهی شده دارای خوردگی تکه‌ای در این جدول نشان داده شده است. همانطور که در جدول‌های 3، 4 و 5 مشاهده می‌شود، سرعت فاز موج در قسمت‌های دارای خوردگی کوچک‌تر از سرعت در قسمت سالم بوده است. میزان کاهش سرعت فاز موج در قسمت‌های دارای خوردگی نسبت به قسمت سالم بین 9% تا 33% برای میزان خوردگی‌های (کاهش ضخامت‌های) مختلف بوده است. این مشاهده نشان دهنده حساسیت کافی مود نامتقارن اساسی موج هدایت‌شونده در فرکانس انتخاب شده نسبت به کاهش ضخامت در لوله‌های فلزی دارای پوشش کامپوزیتی است. همچنین مشاهده شد که فارغ از زاویه خوردگی، سرعت فاز موج در قسمت سالم لوله (قبل و بعد از خوردگی) در همه مدل‌های اجزای محدود ایجاد شده تقریباً یکسان و نزدیک به مقدار بدست آمده برای نمونه سالم بوده است. مورد جالب توجه در نتایج بدست آمده این است که سرعت فاز موج در قسمت‌های دارای خوردگی به زاویه محیطی خوردگی بستگی چندانی نداشته و فارغ از زاویه خوردگی، سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های دارای خوردگی تکه‌ای نزدیک به سرعت در نمونه دارای خوردگی یکپارچه با کاهش ضخامت مشابه بوده است.

جدول 2 سرعت فاز موج هدایت‌شونده در لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار GUIGUW

Table 2 The guided wave phase velocity in the steel-composite pipe obtained for different thicknesses of the steel layer using the FE simulations and the GUIGUW software.

درصد اختلاف	سرعت موج GUIGUW	سرعت موج شبیه‌سازی	ضخامت لایه فولادی
0.4 %	1279	1284	0
2.0 %	1357	1330	1
1.3 %	1505	1485	2
1.0 %	1677	1660	3
1.1 %	1831	1810	4

جدول 3 سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های سالم و دارای خوردگی 360 درجه لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی در ناحیه خوردگی به طول 40 میلی‌متر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود.

Table 3 The guided wave phase velocity in the intact and 360 degrees corroded parts of the steel-composite pipe obtained for different thicknesses of the steel layer in the corrosion region with the length of 40 mm using the FE simulations.

درصد اختلاف سالم	سرعت موج سالم	درصد اختلاف خورده شده	سرعت موج خورده شده	ضخامت لایه فولادی
1.7 %	1800	6.0 %	1202	0
1.7 %	1800	1.8 %	1333	1
1.5 %	1803	5.0 %	1580	2
0.2 %	1835	0.7 %	1665	3

نمونه‌ای از نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده در فاصله‌های 240، 280 و 320 میلی‌متری روی لوله فولاد-کامپوزیت در فرکانس 100 kHz در شکل 8 نشان داده شده است. همانطور که قبلاً گفته شد، سرعت فاز موج گسترش یافته روی سطح نمونه با استفاده از اختلاف فاز موج دریافتی در حسگرها اندازه‌گیری شد. برای افزایش دقت و کاهش میزان خطای محاسبه سرعت فاز موج، محاسبه سرعت با استفاده از سیگنال بدست آمده از حسگرهای مختلف انجام شد و در نهایت میانگین مقدارهای به دست آمده به عنوان سرعت فاز موج هدایت‌شونده در راستای طولی هر نمونه در نظر گرفته شد.

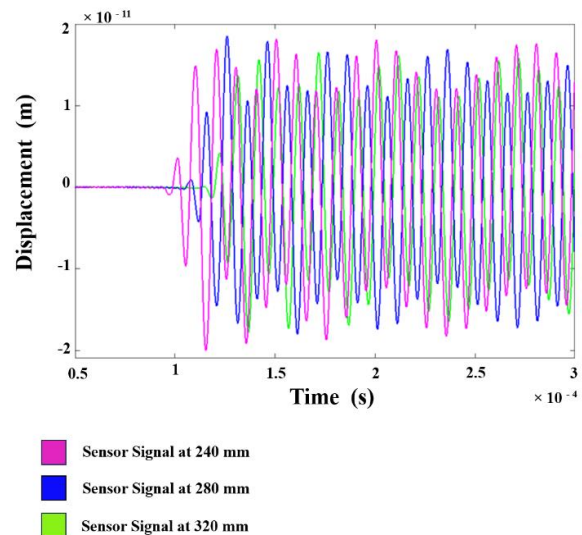


Fig. 8 The displacement-time diagram of sensors located at the distances of 240, 280, and 320 mm on the steel-composite pipe at the frequency of 100 kHz.

شکل 8 نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده در فاصله‌های 280، 240 و 320 میلی‌متری روی لوله فولاد-کامپوزیت در فرکانس 100 kHz.

2-3- خوردگی یکپارچه در سرتاسر لوله

سرعت فاز موج هدایت‌شونده در لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار GUIGUW در جدول 2 مشاهده می‌شود. نتایج ارائه شده در این

جدول 4 سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های سالم و دارای خوردگی 180 درجه لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی در ناحیه خوردگی به طول 40 میلی‌متر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود.

Table 4 The guided wave phase velocity in the intact and 180 degrees corroded parts of the steel-composite pipe obtained for different thicknesses of the steel layer in the corrosion region with the length of 40 mm using the FE simulations.

ضخامت لایه فولادی	سرعت موج خورده شده	درصد اختلاف خورده شده	سرعت موج سالم	درصد اختلاف سالم
0	1233	3.4 %	1777	2.9 %
1	1330	2.0 %	1770	3.3 %
2	1400	6.9 %	1798	1.8 %
3	1667	0.6 %	1842	0.6 %

جدول 5 سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های سالم و دارای خوردگی 90 درجه لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی در ناحیه خوردگی به طول 40 میلی‌متر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود.

Table 5 The guided wave phase velocity in the intact and 90 degrees corroded parts of the steel-composite pipe obtained for different thicknesses of the steel layer in the corrosion region with the length of 40 mm using the FE simulations.

ضخامت لایه فولادی	سرعت موج خورده شده	درصد اختلاف خورده شده	سرعت موج سالم	درصد اختلاف سالم
0	1240	3.0 %	1802	1.6 %
1	1398	3.0 %	1800	1.7 %
2	1519	0.9 %	1860	1.6 %
3	1633	2.6 %	1800	1.7 %

4- جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده در لوله‌های پوشش داده شده با کامپوزیت، ارزیابی غیرمخرب تغییر ضخامت این لوله‌ها در اثر خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که با افزایش میزان خوردگی در قسمت فولادی لوله (کاهش ضخامت لوله)، سرعت انتشار موج کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که تشخیص وجود، موقعیت مکانی و میزان خوردگی در قسمت فولادی لوله به کمک روش گسترش امواج هدایت‌شونده در لوله‌های پوشش داده شده با کامپوزیت امکان‌پذیر بود. نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان دادند که مود نامتقارن اساسی امواج هدایت‌شونده به خوردگی در لوله‌های فلزی پوشش‌دهی شده با کامپوزیت چه به صورت خوردگی یکپارچه و چه به صورت خوردگی تکه‌ای (در قسمتی از لوله) حساسیت خوبی نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان از شبیه‌سازی عددی اجزای محدود به عنوان یک آزمایشگاه مجازی قابل اطمینان برای بررسی کاربرد روش گسترش امواج هدایت‌شونده در ارزیابی غیرمخرب لوله‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت استفاده کرد. همچنین، در مطالعات آینده می‌توان از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی وضعیت لوله‌های پوشش داده شده با کامپوزیت که دارای چند عیب به طور هم‌زمان هستند، استفاده کرد. تشخیص افت موضعی خواص مکانیکی در لوله‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت نیز می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

5- مراجع

- 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.
- 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.
- 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.
- Fattahi, A., Ramezani, H., Shokrieh, M. M., Kazemirad S., "Detection and characterization of matrix cracking in fiber - metal laminates using Lamb wave propagation" *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 29, pp. e3039, 2022.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Simonetti, F., "Lamb wave propagation in elastic plates coated with viscoelastic materials" *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 115, No. 5, pp. 2041-2053, 2004.
- Kazemirad, S., Mongeau, L., "Rayleigh wave propagation method for the characterization of a thin layer of biomaterials" *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 133, No. 6, pp. 4332-4342, 2013.
- Dahmen, S., Amor, M. B. and Ghazlen, 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.
- Shokrieh, M. M. and Omid, M. J., "Reinforcement of Metallic Plates with Composite Materials" *Journal of composite materials*, Vol. 39, No. 8, pp. 723-744, 2005.
- 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.
- Ebrahiminejad, A., Mardanshahi, A., Kazemirad, S., "Nondestructive evaluation of coated structures using Lamb wave propagation" *Applied Acoustics*, Vol. 185, pp. 108378, 2022.

- [16] Jenot, F., Ouafouh, 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.
- [17] 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.
- [18] Azimi, S.A., Mardanshahi, A., Kazemirad S., "Nondestructive thickness mapping of corroded plate structures using guided Lamb wave propagation" *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, Vol. 7, No. 1, pp. 15-28, 2021.
- [19] 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 Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 95-106, 2013.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Parvari, Y., Ramezani, H., Kazemirad, S., Nondestructive evaluation of bilayer metal-composite structures using finite element simulation of guided Lamb wave propagation, *Journal of Science and Technology of Composites*, 8 (2022), 1700-1701.
- [24] Mardanshahi, A., Shokrieh, 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, 2022.