



مطالعه پراکندگی امواج لمب از یک سوراخ استوانه‌ای با استفاده از روش اجزاء محدود و آزمون تجربی

عادل صداقتی¹، فرهنگ هنرور^{2*}، آنتونی سینکلر³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تورنتو، تورنتو

* تهران، صندوق پستی 1999143344، honarvar@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 شهریور 1395

پذیرش: 26 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

امواج لمب

روش اجزاء محدود

عیب استوانه‌ای

پراکندگی

چکیده

امواج لمب یا امواج ورقی دسته‌ای از امواج فراصوتی هستند که در سازه‌های ورقی شکل انتشار می‌یابند. این امواج عمدتاً برای بازرسی سازه‌های بزرگ استفاده می‌شوند. با توجه به انعطاف پذیری بالای روش اجزاء محدود در مدل‌سازی سازه‌های پیچیده، این روش مدل‌سازی در مطالعه امواج لمب بسیار پرکاربرد است. نتایج حاصل از پراکندگی امواج لمب بسیار پیچیده است و روش اجزاء محدود می‌تواند کمک شایانی به تفسیر این نتایج نماید. در این مقاله، با بررسی رویکردهای مختلف در مدل‌سازی با روش اجزاء محدود، روشی با بهترین دقت و کمترین زمان انتخاب و با استفاده از آن پراکندگی ناشی از یک سوراخ استوانه‌ای راه‌بدر در یک ورق فلزی مدل‌سازی می‌شود. مطالعه پراکندگی حاصل از عیوب می‌تواند برای مواردی همچون پایش سلامتی سازه و تعیین ابعاد عیوب مورد استفاده قرار گیرد. نتایج مطالعات انجام شده حاکی از آن است که مدل اجزاء محدود دوبعدی دارای کمترین زمان محاسبه است و می‌تواند انتشار امواج لمب را با دقتی بالاتر از 95% شبیه‌سازی کند. به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، آزمایشات تجربی نیز بر روی یک ورق آلومینیومی با سوراخ راه‌بدر انجام شد که نتایج حاصل از مدل دوبعدی اجزاء محدود مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته است. بر اساس نتایج بدست آمده، با استفاده از اطلاعات حاصل از پروفیل زاویه‌ای پراکندگی، شناسایی مشخصات و موقعیت عیوب در ورق به آسانی امکان‌پذیر است.

Study of Lamb wave scattering from a cylindrical hole by using finite element modeling and experimental measurements

Adel Sedaghati¹, Farhang Honarvar^{1*}, Anthony N. Sinclair²

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada

*P.O.B. 1999143344, Tehran, Iran, honarvar@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 August 2016
Accepted 16 November 2016
Available Online 18 December 2016

Keywords:
Lamb waves
Finite element method
cylindrical hole
scattering

ABSTRACT

Lamb waves are certain types of ultrasonic waves that can propagate in thin plates. Lamb waves are particularly useful in testing large plate-shaped structures. Moreover, due to extensive flexibility in modeling sophisticated structures, finite element modeling (FEM) has been used in numerous Lamb wave studies. Due to the complexity of the scattering problem, interpretation of results is not easy. FEM helps us to better understand the complex issues that are associated with the scattering phenomenon. In this paper, we first consider a number of different finite-element modeling approaches that can be used for modeling Lamb waves and the best model that can provide both good accuracy and high computational speed is chosen. This approach is then used for modelling the scattering of Lamb waves from a through-thickness cylindrical hole in a large plate. This study has applications in structural health monitoring and defect sizing in plates. It is found that a 2D planar finite element model has the lowest computational cost and an accuracy of better than 95%. To verify the FEM results, experimental measurements are also conducted on an aluminum plate in which a through-thickness cylindrical hole is machined. The FEM results agree very well with those obtained from the experiments. It is concluded that by using this model, the position and properties of defects could be easily determined in plate structures.

1- مقدمه

ایجاد شود، ارزیابی قطعه صورت می‌گیرد. با توجه به گستردگی نیازها در صنایع مختلف، روش‌های ارزیابی غیرمخرب گوناگونی به کار گرفته شده است. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، ارزیابی غیرمخرب به کمک امواج

ارزیابی غیر مخرب قطعات صنعتی یکی از الزامات صنایع امروز است. در یک آزمون غیرمخرب بدون اینکه آسیبی به قطعه وارد و یا خللی در عملکرد آن

Please cite this article using:

A. Sedaghati, F. Honarvar, A. N. Sinclair, Study of Lamb wave scattering from a cylindrical hole by using finite element modeling and experimental measurements, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 395-404, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

فراصوتی است. امواج فراصوتی به طور کلی به سه دسته امواج حجمی، سطحی و ورقی (یا لمب) تقسیم می‌شوند. هر یک از این امواج برای بازرسی هندسه‌های مشخصی قابل استفاده است.

امواج لمب جزئی از خانواده امواج هدایت‌شده هستند که برای انتشار خود نیاز به دو مرز آزاد دارند. این امواج از مسیر مرزها پیروی می‌کنند و می‌توانند در فواصل طولانی و با حداقل میرایی انتشار یابند [1]. با توجه به اینکه این امواج معمولاً در ورق‌های نازک (نازک در مقایسه با طول موج) منتشر می‌شوند، به آنها امواج ورقی گفته می‌شود. یکی از روش‌های تولید امواج لمب، تابش موج با زاویه خاصی به درون ورق است. در این حالت، امواج لمب از تداخل امواج طولی و عرضی در زاویه‌های تابش مشخصی ایجاد می‌شوند. وقتی موج در یک ورق انتشار می‌یابد، با مرز ورق برخورد می‌کند و در هنگام بازتابش دچار تغییر حالت شده و در نتیجه هر دو موج طولی و عرضی بازتابیده می‌شوند. روند بازتابش متوالی برای این امواج طولی و عرضی نیز تکرار می‌شود (شکل 1)، تا جایی که دیگر امواج طولی و عرضی قابل تفکیک نبوده و فقط یک الگوی تداخلی وجود دارد که کل ورق را به ارتعاش درمی‌آورد. به همین خاطر مدهای متفاوتی در اثر تداخل‌های مختلف امواج ایجاد می‌شوند [1].

امواج لمب با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود کاربردهای متعددی دارند که در این میان شناسایی عیوب و پایش سلامتی سازه¹ شناخته شده‌تر از سایر موارد است [2]. در این روش‌ها با ارسال موج به درون ورق، بر اساس مشخصات سیگنال‌های بازگشتی، محل عیب و مشخصات آن شناسایی می‌شود. با این وجود در بسیاری از موارد تفسیر سیگنال‌های دریافتی به‌خصوص در قطعات معیوب کار دشواری است؛ به همین دلیل می‌توان با استفاده از روش‌های عددی همچون اجزاء محدود، مشخصات سیگنال‌های دریافتی را بررسی نمود تا امکان تفسیر سیگنال‌های بازتاب شده فراهم آید. بدین ترتیب با در دست داشتن اطلاعات دقیق‌تری می‌توان آزمایش‌ها را انجام داد و به نتایج بهتری رسید. این موضوع به‌خصوص در بازسازی تصویر به روش توموگرافی² که باید تصویر روشنی از ناحیه عیب ایجاد شود، مفید خواهد بود [3].

در صورتی که مدل‌سازی به روش تحلیلی انجام شود، برای هر حالت خاص باید مدل بازنویسی شود که این امر تا حدی دشوار و زمان‌بر خواهد بود. به‌علاوه برای بسیاری از هندسه‌های پیچیده، ایجاد یک مدل تئوری امری ناممکن است. لذا در بسیاری از موارد استفاده از روش اجزاء محدود توصیه می‌شود. هر چند در این روش امکان شبیه‌سازی هندسه‌های زیادی وجود دارد، اما مسئله‌ای که در این حالت مطرح است زمان‌بر بودن فرآیند تحلیل است. لذا با توجه به بزرگ بودن هندسه قطعات در مسائل موج لمب، ایجاد یک مدل مناسب که بهترین جواب را در کمترین زمان به دست دهد همواره مورد نظر بوده است.

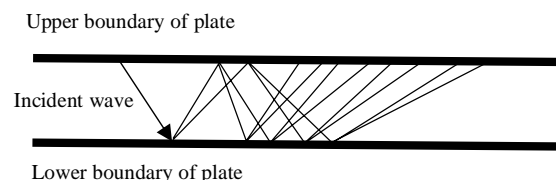


Fig.1 Generation of Lamb waves by using angle-beam ultrasonic probes.

شکل 1 نحوه ایجاد موج لمب در ورق با تابش زاویه‌ای موج به درون ورق

محققان بسیاری شبیه‌سازی امواج لمب توسط روش اجزاء محدود را مورد بررسی قرار داده‌اند. اما مسئله‌ای که در اینجا مطرح است عدم ارائه اطلاعات کامل و جامع در خصوص تحقیقات انجام شده است. علاوه بر این در بسیاری از موارد برای شبیه‌سازی از نرم‌افزارهای تجاری استفاده نشده است، لذا امکان تعمیم نتایج وجود ندارد. الناصر و همکارانش [4] با استفاده از ترکیب روش اجزاء محدود و گسترش مدها به بررسی پراکندگی موج لمب در خط جوش یک ورق فلزی پرداختند. تحلیل اجزاء محدود در این مسئله از طریق کد نویسی انجام شد تا امکان ادغام آن با روش تئوری فراهم آید. آلین و کاوولی [5] به تأثیر برهم‌کنش امواج لمب با عیوب مختلف پرداختند. آن‌ها از روش اجزاء محدود برای تحلیل عیوب دوبعدی مستطیلی و زاویه‌دار بر اساس ضریب عبور استفاده کرده و نتایج بدست آمده را با مقایسه با نتایج تجربی صحت‌گذاری کردند. چانگ و مال [6] انتشار موج در یک ورق نامحدود با سوراخ استوانه‌ای را با ترکیب روش اجزاء محدود با معادلات تئوری بررسی کردند. آن‌ها ناحیه دربرگیرنده حفره استوانه‌ای را به‌وسیله اجزاء محدود انتشار موج در فضای اطراف به‌صورت تئوری بررسی کردند. در این تحقیق علاوه بر سوراخ کامل استوانه‌ای، یک سوراخ ترک‌دار متناظر با ترک سوراخ پرچ نیز بررسی شد. نتایج اجزاء محدود با مقایسه با نتایج آزمون تجربی مورد تأیید قرار گرفت. مولین و همکارانش [7] با استفاده از ترکیب روش اجزاء محدود و روش تئوری گسترش مد نرمال، به بررسی گسترش امواج لمب در یک ورق کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها از روش اجزاء محدود برای تعیین برخی خواص اولیه مورد نیاز برای مدل تئوری استفاده کردند. این کار باعث کاهش زمان انجام محاسبات شد. هایشی و کاواشیما [8] با استفاده از روش اجزاء محدود شبه تحلیلی انتشار موج در یک ساختار لایه‌ای را بررسی کردند و از عیوب مربوط به جدایش لایه‌ها، بازتاب‌های متفاوتی را دریافت کردند. آن‌ها بر اساس نتایج بدست آمده برای مدهای مختلف، بازتاب‌ها را دسته‌بندی کردند که این کار کمک شایانی به تحلیل نتایج نمود. گالان و آباسکال [9] انتشار موج لمب را در یک ورق شبه نامحدود از طریق روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای ایجاد محیط نامحدود، از یک ماده با خاصیت جذب موج بالا استفاده کردند. دیلیجنت و همکارانش [10] پراکندگی موج لمب از یک سوراخ استوانه‌ای راه به در را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش‌های تحلیلی و اجزاء محدود انتشار و پراکندگی موج لمب را مدل‌سازی و نتایج مربوطه را با نتایج تجربی مقایسه و صحت‌گذاری کردند. لیو و جری [11] انتشار موج را در یک ساختار ورقی شکل توسط روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این تحقیق با استفاده از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار آباکوس، اجزاء نامحدود ایجاد کردند. ژو و همکارانش [12] با استفاده از روش اجزاء محدود، امواج لمب ایجاد شده توسط فراصوت لیزری ترموالاستیک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف تولید مدهای گوناگون موج لمب را بررسی کردند. ترین و همکارانش [13] برای بررسی عیوب در اندازه میکرون از یک روش ترکیبی، متشکل از روش اجزاء محدود و تجزیه مدها استفاده کردند. برای بررسی عیوب بسیار ریز در روش اجزاء محدود نیاز به مش‌بندی بسیار کوچک است و این امر باعث افزایش زمان تحلیل می‌شود. لذا آن‌ها فقط ناحیه اطراف عیب را به روش اجزاء محدود بررسی کردند و فضای اطراف توسط روش تجزیه مدها مدل‌سازی شد. برای ارزیابی صحت این روش، عیوبی در حد خوردگی حفره‌ای³ مدل‌سازی و به درستی شناسایی شد. پنگ و همکارانش [14] با

³ Pitting

¹ SHM (Structure Health Monitoring)

² Scanning Tomographic Reconstructions

2- مدل اجزاء محدود انتشار موج لمب

در این بخش فرایند مدل‌سازی توسط روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی امواج لمب، با توجه به مشخصات مسئله، روش‌های متعددی را می‌توان در نظر گرفت. در اینجا چندین مدل مورد بررسی قرار گرفته و از میان آن‌ها مناسب‌ترین حالت انتخاب می‌شود. در جدول 1 ویژگی‌های مدل‌های مورد نظر نمایش داده شده است. در کلیه این موارد با توجه به اندازه پروپ 20 mm از لبه قطعه برای بارگذاری در نظر گرفته شد.

با توجه به جدول 1 حالات مختلف برای شبیه‌سازی طوری در نظر گرفته شده‌اند که از کلی‌ترین حالت (حالت سه‌بعدی) تا ساده‌ترین حالت (دو بعدی صفحه‌ای) وجود داشته باشد. هر کدام از این حالات دارای معایب و مزایایی مختص به خود است. مثلاً حالت سه‌بعدی از لحاظ محاسباتی بسیار پیچیده است و زمان تحلیل بسیار طولانی است؛ از طرفی حالت دو بعدی و پوسته توانایی نمایش تمامی مدهای امواج لمب به‌خصوص امواجی با جابجایی خارج از صفحه را ندارد. همچنین شیوه‌های مختلف بارگذاری نیز در این مدل‌ها در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی انتشار امواج لمب در نرم‌افزار آباکوس⁵ 6.14 انجام شد. هندسه قطعه مورد شبیه‌سازی برای بررسی انتشار موج لمب در شکل 2 آمده است. خواص ماده مورد شبیه‌سازی مطابق خواص آلومینیوم 2014 در نظر گرفته شد. خواص فیزیکی و آکوستیکی این آلومینیوم در جدول 2 آمده است [21]. ضخامت قطعه مورد شبیه‌سازی برابر با 1 mm است.

تحریک امواج فراصوتی توسط یک سیگنال پالس کوتاه⁶ صورت می‌گیرد که معادله آن به صورت زیر است:

$$f(t) = \begin{cases} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{N}\right)\right] \sin(2\pi ft) & 0 \leq t \leq \frac{N}{f} \\ 0 & t < 0 \text{ یا } t > \frac{N}{f} \end{cases} \quad (1)$$

جدول 1 مدل‌های ممکن برای شبیه‌سازی انتشار امواج لمب

Table 1 Possible models that could be used for simulation of Lamb waves

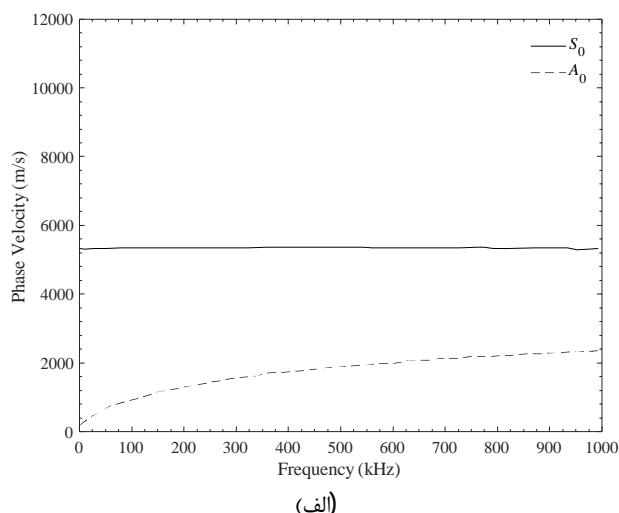
شماره	تعداد اجزاء در ضخامت	نحوه بارگذاری	نوع تحلیل	نوع اجزا	اندازه مش (mm)	شکل
1	1	در راستای انتشار	پوسته (Shell)	S4R	0.25	
2	1	در راستای انتشار	دو بعدی صفحه‌ای	CPS4R	0.25	
3	4	در راستای انتشار	سه بعدی	C3D8R	0.25	
4	4	عمود بر جهت (بار رو به داخل)	سه بعدی	C3D8R	0.25	
5	4	عمود بر جهت انتشار (بار رو به خارج)	سه بعدی	C3D8R	0.25	

⁵ ABAQUS⁶ Tone burst

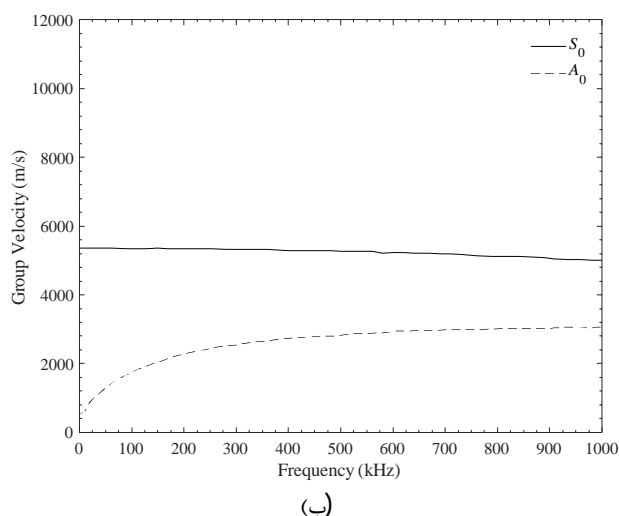
استفاده از روش اجزاء طیفی¹ سه‌بعدی به بررسی انتشار موج در یک ورق معیوب پرداختند. روش اجزاء طیفی در مقایسه با روش اجزاء محدود سنتی روش مؤثرتری است و امکان ارزیابی بهتر عیوب را فراهم می‌سازد. در این تحقیق مدهای مختلف موج لمب از طریق روش‌های تحریک متفاوت تولید شدند تا عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاکی از آن بود که مدل اجزاء طیفی توانایی بالایی در مدل‌سازی امواج لمب دارد و تفسیر درستی از عیوب را ارائه می‌دهد. لی و همکارانش [15] در یک ساختار مورد بازرسی توسط روش پایش سلامتی سازه اثر دما را مورد بررسی قرار دادند. در این راستا با استفاده از روش اجزاء محدود عملکرد ماده پیرو الکتریک بر روی یک ورق حاوی ترک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج توسط آزمایش‌های تجربی صحه‌گذاری شد که بر این اساس اثر تغییرات دما به‌خوبی مشهود بود. احمد و گابرت [16] با استفاده از روش اجزاء محدود شبه تحلیلی تأثیر بازتاب از لبه ورق را در انتشار موج لمب بررسی کردند. در این حالت با محاسبه ضرایب بازتاب از ورق و اعمال آن در معادلات اجزاء محدود، پیچیدگی تحلیل کاهش می‌یابد. ساوس و همکارانش [17] با استفاده از روش اجزاء محدود انتشار امواج لمب را در ورق‌های ترکیبی چندلایه مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ای از این ورق‌ها در مخازن تحت فشار یافت می‌شود که از ترکیب فلز و کامپوزیت ساخته می‌شوند. با استفاده از روش اجزاء محدود مدل‌سازی انتشار امواج لمب در این ورق ناهمسانگرد تأثیر پارامترهایی همچون ضخامت و تغییرات لایه‌ها تعیین و نتایج با نتایج تجربی مقایسه و صحه‌گذاری شد. سهر و همکارانش [18] با استفاده از روش اجزاء محدود پارامترهای تراگذار آکوستیکی الکترومغناطیسی² را بررسی کردند. هدف آن‌ها تغییر پارامترها به منظور بررسی امکان تولید امواج لمب در یک ساختار بود. لذا مدلی از ترکیب حالات الکترومغناطیسی و الاستودینامیکی تهیه شد که وابسته به پارامترهای اصلی سیستم از جمله قطر آهنربا و فاصله تا ورق بود. با تغییر پارامترها مد A_0 ایجاد شد و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شد که از تطابق خوبی برخوردار بود. وانگ و همکارانش [19] با استفاده از روش اجزاء محدود انتشار امواج لمب را در یک کریستال فونونیک مورد بررسی قرار دادند. این کریستال نوعی کامپوزیت است که از دو ماده با خواص الاستیکی و چگالی متفاوت تشکیل شده است. فن و همکارانش [20] با استفاده از روش اجزاء محدود تولید موج لمب نشت دار³ را توسط تراگذارهای با ماده واسط هوا⁴ مورد بررسی قرار دادند. با توجه به پیچیدگی فیزیک مسئله در این حالت، عمدتاً سیگنال‌های متفاوتی ایجاد می‌شود که بسته به فاصله هوایی و زاویه ارسال متفاوت خواهند بود. به همین علت در این تحقیق پارامترهای اساسی مورد بررسی قرار گرفت تا امکان تفسیر بهتر نتایج فراهم آید. نتایج مدل اجزاء محدود ایجاد شده تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت و برای پیش‌بینی نتایج مناسب بود.

در این مقاله در ابتدا به فرایند مدل‌سازی پرداخته می‌شود و با تغییر پارامترهای مختلف، مناسب‌ترین پارامترها برای مدل‌سازی انتشار امواج لمب تعیین می‌شود. بدین صورت در میان انبوهی از مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، مقایسه‌ای صورت می‌گیرد و روش مناسبی انتخاب خواهد شد. سپس بر اساس پارامترهای انتخاب شده، پراکندگی امواج لمب از یک سوراخ استوانه‌ای بررسی خواهد شد. در انتها نیز نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود با نتایج تجربی مقایسه خواهند شد.

¹ Spectral element method (SEM)² EMAT³ Leaky lamb wave⁴ Air-coupled transducer



(الف)



(ب)

Fig. 3 Dispersion curve for a 1 mm aluminum plate a) Phase velocity b) Group velocity

شکل 3 منحنی پاشندگی برای ورق آلومینیومی به ضخامت 1 mm (الف) سرعت فاز (ب) سرعت گروه

جدول 3 سرعت گروه و فاز برای دو مد S_0 و A_0 در فرکانس 500 kHz

Table. 3 Group and phase velocity of A_0 and S_0 modes at 500 kHz		
A_0 (m/s)	S_0 (m/s)	مد
1877	5368	سرعت فاز
2906	5328	سرعت گروه

مناسب خواهد بود. با توجه به اینکه ضخامت ورق مورد بررسی کم است، استفاده از مقدار کمتر نتیجه بهتری را در بر خواهد داشت، لذا اندازه 0.25 mm برای این تحقیق انتخاب شد. در نتیجه در ضخامت 1 mm چهار المان در ضخامت قرار دارد و این موضوع باعث شبیه‌سازی مناسب موج در راستای ضخامت می‌شود. علاوه بر این کاهش اندازه مش باعث بهبود شکل و دقت سیگنال نیز می‌شود. در این مدل‌ها گام زمانی² بر اساس کوچک‌ترین اندازه مش و سرعت گروه، از معادله زیر تعیین شد:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{V} \quad (2)$$

در این معادله Δx کوچک‌ترین اندازه مش و V سرعت گروه است. با این

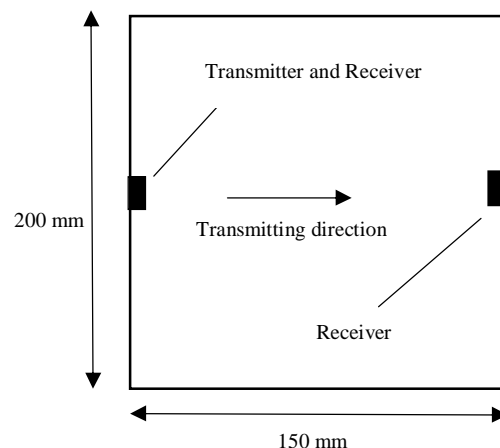


Fig. 2 Geometry of the sample used in FEM

شکل 2 هندسه نمونه در انجام شبیه‌سازی اجزاء محدود

جدول 2 خواص فیزیکی و آکوستیکی AA2014 [21]

Table. 1 Physical and acoustic properties of AA2014

مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	چگالی (kg/m ³)	سرعت موج طولی (m/s)	سرعت موج برشی (m/s)	امپدانس آکوستیکی (Rayl)
72.4 × 10 ⁹	0.33	2800	6320	3070	17.8 × 10 ⁵

در این معادله f فرکانس تحریک برحسب Hz، N تعداد سیکل‌های تابع تحریک و t زمان تحریک است که برابر با N/f است. فرکانس مرکزی برابر با 500 kHz و تعداد سیکل برابر با 5 در نظر گرفته شد که به تبع آن زمان تحریک برابر با 10 μs است. تحریک از نوع جابجایی است که به نودهایی به فاصله 20 mm از لبه ورق اعمال می‌شود. علت انتخاب فاصله 20 mm آن با پهنای پروب واقعی است.

تعیین اندازه صحیح مش در فرآیند شبیه‌سازی بسیار مهم است و از قانون خاصی تبعیت می‌کند. اندازه مش عمدتاً باید در حدود $\lambda/10$ تا $\lambda/20$ باشد که در آن λ طول موج است. اندازه مش بزرگ‌تر از این مقدار باعث عدم دریافت جواب‌های صحیح خواهد شد. برای تعیین طول موج نیاز به تعیین سرعت انتشار موج است. با توجه به اینکه در امواج لمب سرعت انتشار واقعی موج، سرعت گروه است [2]، این سرعت در نظر گرفته می‌شود. سرعت انتشار موج در امواج لمب، برخلاف امواج حجمی، به فرکانس وابسته است که به این خاصیت پاشندگی گفته می‌شود [1]. برای تعیین سرعت گروه و سرعت فاز در امواج لمب معادله ریلی – لمب باید به صورت عددی حل و منحنی‌های پاشندگی رسم شود. منحنی پاشندگی برای مسئله مورد نظر با استفاده از یک نرم‌افزار تجاری¹ [22] رسم شد. این نرم افزار بر اساس روش المان محدود شبه تحلیلی عمل می‌کند و قابلیت رسم منحنی پاشندگی برای مواد همسانگرد و ناهمسانگرد را دارد. منحنی‌های سرعت فاز و گروه در شکل 3 آمده است. سرعت‌های گروه و فاز برای فرکانس 500 kHz استخراج شد که در جدول 3 ارائه شده است. در این تحلیل از مد S_0 به عنوان مد ارسالی استفاده شد. این مد به علت ویژگی‌های مناسب از جمله خاصیت پاشندگی کم، عمدتاً برای بازرسی قطعات استفاده می‌شود [2].

لذا با توجه به این موارد، اندازه طول موج برابر با 10.656 mm و مقدار $\lambda/20$ آن حدود 0.5 mm است. در نتیجه اندازه مش 0.5 mm یا کمتر

² Time Increment

¹ GUIGUW

استفاده شد تا هیچ‌گونه بازتابی از لبه ورق ایجاد نشود. محل ارسال موج در زاویه 180 درجه نسبت به مرکز مختصات استوانه‌ای واقع در مرکز سوراخ در نظر گرفته شد. در این ناحیه گره‌های 20 mm از لبه قطعه در راستای انتشار تحریک شد. برای دریافت امواج در شعاع 250 میلی‌متر از مرکز ورق در هر 30 درجه یک گیرنده در نظر گرفته شد که جمعاً 12 گیرنده جابجایی را در راستاهای λ و $\lambda/2$ دریافت می‌کنند. لازم به ذکر است در اینجا چون موج ارسالی و هندسه قطعه هر دو متقارن هستند، تغییر مد از S_0 به A_0 رخ نمی‌دهد. لذا عدم نمایش جابجایی عمود بر صفحه مشکلی ایجاد نمی‌کند.

4- آزمون تجربی

برای صحت‌گذاری بر نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود، انتشار و پراکندگی موج لمب به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش انتشار موج، برای تطابق با نتایج اجزاء محدود قطعه‌ای از جنس آلومینیوم به ضخامت 1 mm برای انجام آزمایش انتخاب شد. در فاصله 150 mm از لبه قطعه شیاری نسبتاً عمیق ایجاد شد (دو طرف شیار در شکل 5 با نقاط سیاه نمایش داده شده است). در این حالت یک سیگنال از شیار و یک سیگنال از انتهای قطعه دریافت می‌شود که اختلاف زمان دو سیگنال دو برابر زمان حرکت سیگنال در فاصله بین عیب تا دیواره است. از یک پروپ با فرکانس 500 kHz با پهنای باند 84 kHz و یک کفشک با زاویه 30° برای ایجاد مد S_0 موج لمب استفاده شد. برای تحریک پروپ و ارسال موج از دستگاه ارسال‌کننده/دریافت‌کننده پانامتریکس¹ مدل 5072PR استفاده و آزمون به صورت بازتابی² انجام شد. تصویر قطعه مورد آزمایش در شکل 5 نمایش داده شده است.



Fig. 5 Experimental test sample in the study of Lamb wave velocity
شکل 5 قطعه مورد آزمایش برای سنجش سرعت انتشار موج لمب

محاسبات مقدار گام زمانی برابر با 4.5×10^{-8} s است که برای تطابق با نتایج تجربی برابر با 1×10^{-8} s در نظر گرفته می‌شود که برابر با نرخ نمونه‌گیری 100 میلیون نمونه در ثانیه است.

3- مدل اجزاء محدود پراکندگی موج لمب

بخشی از هر موج پس از برخورد با یک مانع، بازتاب می‌شود و بخشی دیگر عبور می‌کند. بر این اساس ضریب بازتاب و عبور تعریف می‌شود که مشخص کننده برخی از ویژگی‌های مانع مورد نظر است [10]. با این حال پراکندگی فرآیندی پیچیده است که تفسیر بخش‌های مختلف آن نیز پیچیده است. در صورتی که بتوان از یک مدل تئوری و یا عددی برای تفسیر نتایج کمک گرفت، اطلاعات مفیدی از جسم بازتاب‌کننده موج به دست می‌آید.

در این بخش پراکندگی از یک سوراخ استوانه‌ای راه‌به‌در بررسی می‌شود. در بحث پراکندگی امواج، معمولاً بررسی در ناحیه دور انجام می‌شود. ناحیه دور ناحیه‌ای است که در آن اثرات تداخلی امواج (مانند ناحیه نزدیک) وجود ندارد. شروع این ناحیه معمولاً به فاصله ده برابر شعاع استوانه انتخاب می‌شود. به همین خاطر باید مدل تا حدی بزرگ باشد. هندسه مدل مورد نظر برای شبیه‌سازی در شکل 4 آمده است. مطابق شکل 4 در مرکز یک ورق از جنس آلومینیوم با ضخامت 0.5 mm یک سوراخ راه‌به‌در به شعاع 5 mm ایجاد شده است. فرستنده در وسط یکی از لبه‌های ورق قرار دارد. گیرنده در دایره‌ای به شعاع 25 سانتی‌متر در اطراف سوراخ قابل جابجایی است و در نقاطی به فاصله 30 درجه از یکدیگر قرار داده می‌شود. با استفاده از اطلاعات بدست آمده می‌توان پروفیل زاویه‌ای پراکندگی در اطراف سوراخ را رسم کرد. برای شبیه‌سازی پراکندگی از فرکانس 2 MHz استفاده شد. در این شرایط سرعت گروه دو مد S_0 و A_0 به ترتیب برابر با 5111 m/s و 3134 m/s است. بر این اساس با توجه به اینکه مد ارسالی و دریافتی مد S_0 است، اندازه مش بر اساس موارد ذکر شده در بخش‌های قبلی، قابل محاسبه است که مقدار آن با احتساب $\lambda/10$ برابر با 0.25 mm است. به علاوه برای بهبود مدل‌سازی لبه منحنی سوراخ دایره‌ای، اندازه مش کمتر از این مقدار و برابر با 0.2 mm در نظر گرفته شد. گام زمانی نیز بر اساس معادله (2) برابر با 1×10^{-8} s در نظر گرفته شد.

لبه‌های ورق معمولاً بازتاب‌هایی با دامنه بالا ایجاد می‌کنند که خود باعث پیچیدگی تفسیر نتایج می‌شود. از اجزاء نامحدود CINPS4 در لبه‌های ورق

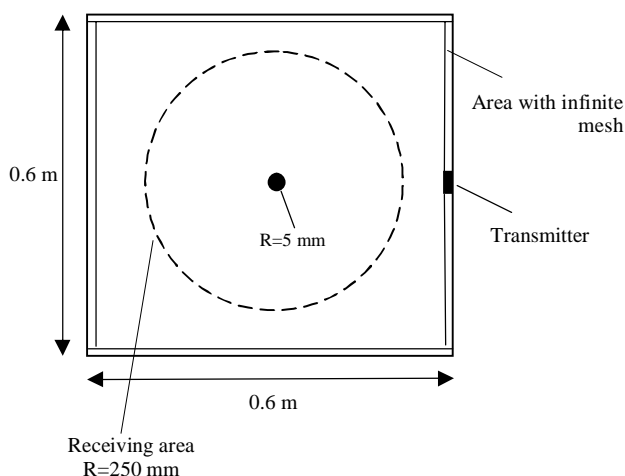


Fig. 4 Geometry of sample in scattering from a through-thickness hole
شکل 4 هندسه قطعه در آزمون بررسی پراکندگی از سوراخ استوانه‌ای راه‌به‌در

¹ Panametrics
² pulse-echo

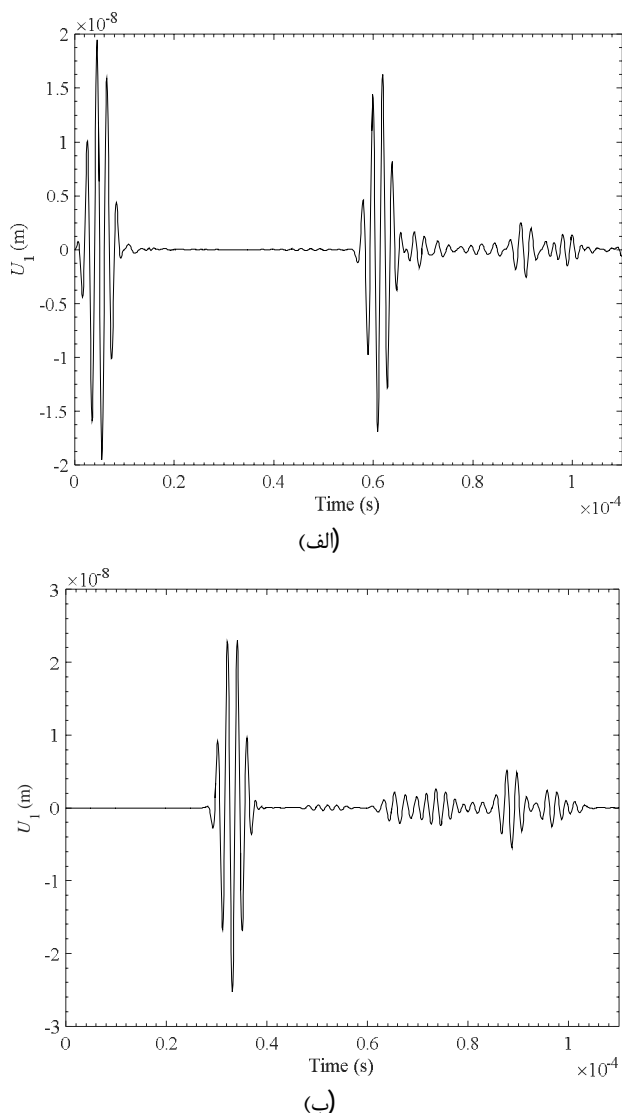


Fig. 7 Signal compression for two types of tests (a) Pulse-Echo (b) Pitch-Catch

شکل 7 مقایسه سیگنال برای دو حالت انجام آزمون (الف): حالت بازتابی (ب): حالت ارسال - دریافت

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، حالت دوبعدی صفحه‌ای و پوسته، از دقت بالاتری نسبت به سایر حالات برخوردار بودند. هر چند این مدل‌ها نمی‌توانند نیرو و جابجایی را در تمامی جهات نمایش دهند، اما برای نمایش دو مد S_0 و A_0 مناسب هستند. لذا در صورتی که مدل‌سازی در محدوده‌ای صورت می‌گیرد که مدهای مرتبه بالا مورد بررسی نیستند، استفاده از این مدل‌ها

جدول 4 خطای شبیه‌سازی در آزمون‌های مختلف

Table. 4 Simulation error in different simulation models

شماره مدل	سرعت پیش‌بینی شده مد S_0 (m/s)	خطای S_0 (%)	سرعت پیش‌بینی شده مد A_0 (m/s)	خطای A_0 (%)
1	5454.5455	2.3	3030.3	4.1
2	5454.5455	2.3	3036.44	4.3
3	5067.57	4.89	3080.82	5.71
4	5102	4.3	3151	7.7
5	4411	17.2	2772.64	4.6

برای بررسی پراکندگی از یک ورق آلومینیومی به ابعاد $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ mm}$ استفاده شد. در مرکز این ورق سوراخی به شعاع 5 mm ایجاد شد. برای تطابق با مدل اجزاء محدود، ارسال و دریافت موج در فاصله تقریبی 250 mm میلی‌متری سوراخ صورت گرفت. برای ارسال موج از پروب زاویه متغیر با فرکانس 2 MHz و پهنای باند 664 kHz استفاده شد. سایر پارامترها با آزمون تجربی قبلی یکسان بود. در شکل 6 تصویری از قطعه مورد آزمایش نشان داده شده است. در اینجا پروب فرستنده همانند مدل اجزاء محدود در زاویه 180° درجه قرار دارد و امواج توسط پروب گیرنده در سایر زوایا دریافت می‌شود.

5- بحث و نتیجه‌گیری

1-1- انتشار موج لمب

شبیه‌سازی برای تمامی موارد ذکر شده در جدول 1 صورت گرفت. برای بررسی صحت شبیه‌سازی، سرعت به‌دست‌آمده در سیگنال ناشی از شبیه‌سازی، با سرعت گروه تئوری (جدول 3) مقایسه شد. در این مقایسه جابجایی در دو راستای U_1 و U_3 در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه جابجایی حاکم مد S_0 در راستای ورق و مد A_0 عمود بر ورق است، جابجایی U_1 و U_3 به ترتیب معرف مدهای S_0 و A_0 است [2]. البته باید این موضوع را در نظر داشت که در هر یک از این دو راستا مد دیگر نیز دیده می‌شود ولی انرژی آن کمتر از مد اصلی است. تفکیک مدها از طریق بررسی سرعت گروه آن‌ها امکان‌پذیر است. لازم به ذکر است که با توجه به فیزیک مدل‌سازی در برخی حالات همچون حالات پوسته و دوبعدی صفحه‌ای، امکان دریافت جابجایی در راستای عمود بر ورق وجود ندارد. در این‌گونه موارد فقط امکان شبیه‌سازی مناسب مد S_0 وجود دارد.

در هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی، سیگنال برای حالت بازتابی و ارسال - دریافت مورد بررسی قرار می‌گیرد. معمولاً در حالت بازتابی، به علت برخورد موج با لبه ورق، سیگنال دریافتی دامنه کمتری دارد. در شکل 7، سیگنال مربوط به حالت بازتابی و ارسال - دریافت¹ در حالت شبیه‌سازی سه‌بعدی آورده شده است.

ارزیابی نتایج شبیه‌سازی بر اساس سرعت گروه برای مدهای S_0 و A_0 صورت گرفت و جابجایی در راستای ارسال موج و عمود بر آن ارزیابی شد. در برخی از مدل‌ها که جابجایی عمود بر سطح وجود نداشت، از نتایج جابجایی در راستای ارسال برای بررسی هر دو مد استفاده شد. نتایج ارزیابی این روش‌ها در جدول 4 آمده است.

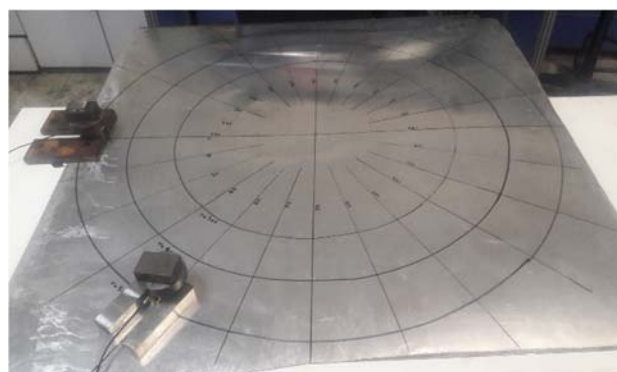


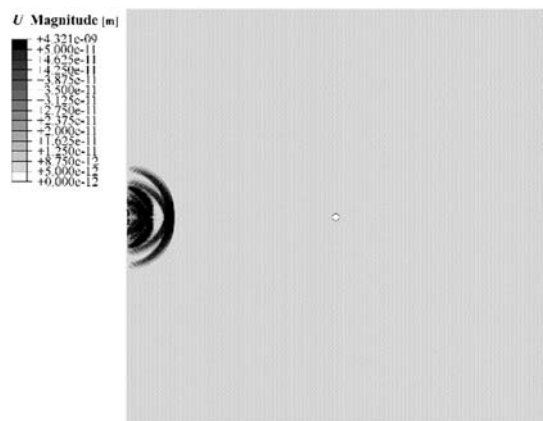
Fig. 6 Experimental test sample in the study of Lamb wave scattering

شکل 6 نمونه مورد استفاده برای بررسی پراکندگی

¹ pitch-catch

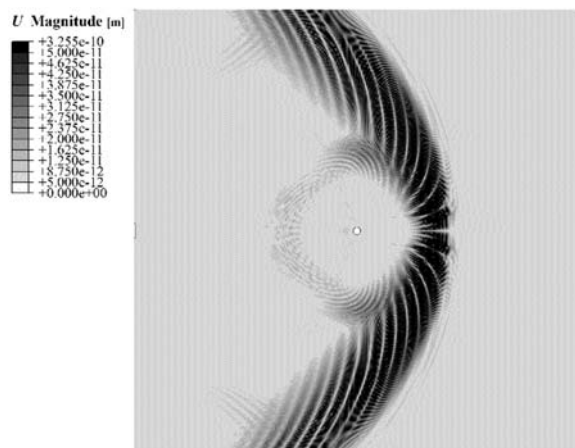
به شکل 9، موج ارسالی با موج پراکنده شده از سوراخ تداخل یافته و باعث ایجاد نتایج نادرست در نمودار پراکندگی می‌شود. لذا در یکی از نقاط که امکان تداخل موج ارسالی و پراکنده شده وجود ندارد، دامنه سیگنال موج پراکنده شده را در نظر گرفته و این مقدار به عنوان معیاری از دامنه پراکندگی تعیین شد و نقاطی که اختلاف زیاد با این مقدار را داشتند در رسم نمودار پراکندگی استفاده نشد. در زاویه 180 درجه امکان تداخل موج ارسالی و پراکنده شده بسیار کم است. سیگنال مربوط به این زاویه در شکل 10 نشان داده شده است. دامنه سیگنال پراکنده شده تقریباً برابر با 7% دامنه سیگنال ارسالی است. این امر خود نشان دهنده استهلاک بالای موج پس از برخورد با سوراخ دایره‌ای است.

نتایج تجربی و نتایج مدل اجزاء محدود حاصل از پراکندگی از یک سوراخ استوانه‌ای به شعاع 5 mm در فاصله 250 mm در شکل 11 نشان داده شده است. برای ایجاد امکان مقایسه نتایج، مقادیر به صورت بی‌بعد ارائه شده است. در این حالت کلیه مقادیر بر مقدار حداکثر داده‌ها تقسیم شد و کلیه داده‌ها در فاصله صفر تا یک قرار گرفت. در مدل اجزاء محدود، جابجایی و در آزمایش تجربی، ولتاژ به عنوان دامنه سیگنال در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل 11، روند کلی تغییرات در مدل اجزاء محدود و آزمایش یکسان



Step : trans
Increment 1000 : Step Time = 1.000E-05
Primary Var : U Magnitude
Deformed Var : U Deformation Scale Factor : +1.000e-08

(الف)



Step : trans
Increment 14000 : Step Time = 1.4000E-04
Primary Var : U Magnitude
Deformed Var : U Deformation Scale Factor : +1.000e-08

(ب)

Fig. 9 Finite element model results (a) wave transmission (b) wave scattering

شکل 9 مدل اجزاء محدود (الف) ارسال موج (ب) پراکندگی موج

پیشنهاد می‌شود که علاوه بر دقت مناسب، زمان تحلیل بسیار کمتری خواهند داشت. البته باید توجه شود که این نوع مدل‌سازی برای نمایش مدهای مرتبه بالاتر قابلیت‌های لازم را ندارند. در مدهای بالاتر امواج لمب، نمی‌توان از اثر ضخامت صرف نظر کرد و در هر ناحیه از ضخامت، مؤلفه‌های جابجایی مقدار متفاوتی خواهند داشت.

از میان دو مدل پوسته و دوبعدی، مدل دوبعدی انتخاب شد. یکی از مواردی که در مدل‌سازی امواج لمب اهمیت دارد، عدم بازتابش سیگنال‌های اضافی از دیواره است. به همین علت برای جلوگیری از این موضوع لبه ورق معمولاً به صورت اجزاء بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. اجزاء بی‌نهایت هیچ‌گونه بازتابی از خود ندارد. لذا باعث کاهش پیچیدگی تفسیر نتایج خواهند شد. مدل پوسته از اجزاء بی‌نهایت پشتیبانی نمی‌کند ولی در خصوص مدل دوبعدی صفحه‌ای می‌توان اجزاء بی‌نهایت را به کار برد. این موضوع در مدل‌های پیچیده از اهمیت بسزایی برخوردار است.

برای صحت‌گذاری بر نتایج، آزمون تجربی با شرایط مشابه انجام شد. سیگنال دریافتی از این قطعه در شکل 8 آمده است. اختلاف زمان بین سیگنال عیب و سیگنال دیواره پشتی به عنوان معیار سنجش سرعت انتشار استفاده می‌شود. بر این اساس سرعت گروه مد S_0 موج ارسالی برابر با 5267 m/s است. تفاوت این سرعت با سرعت تئوری به دست آمده، برابر با 1.15% است. همچنین اختلاف آن با سرعت تحلیل اجزاء محدود 3.4% است. علت این تفاوت را می‌توان در تفاوت بین خواص واقعی ورق و خواص وارد شده در نرم افزار رسم منحنی پاشندگی دانست. علاوه بر این، پهنای سیگنال نیز در تغییر جزئی نتایج مؤثر است.

2-5- پراکندگی موج از یک سوراخ استوانه‌ای

با توجه به نتایج بخش قبل، برای شبیه‌سازی از حالت دوبعدی صفحه‌ای استفاده شد تا علاوه بر کاهش زمان تحلیل، دقت نیز افزایش یابد. تصاویری از نتایج مدل اجزاء محدود در شکل 9 آورده شده است. با افزایش فاصله موج از منبع، موج باز شده و در فضای زیادی گسترش می‌یابد. در این حالت دامنه موج با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. پس از برخورد با سوراخ دایره‌ای، بخش کوچکی از موج بازتابیده می‌شود. به علاوه با توجه به اینکه عیب دایره‌ای شکل است، موج در جهات مختلف منتشر می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که دامنه موج بازتاب شده در مجاورت ناحیه ارسال بسیار کم باشد. با توجه

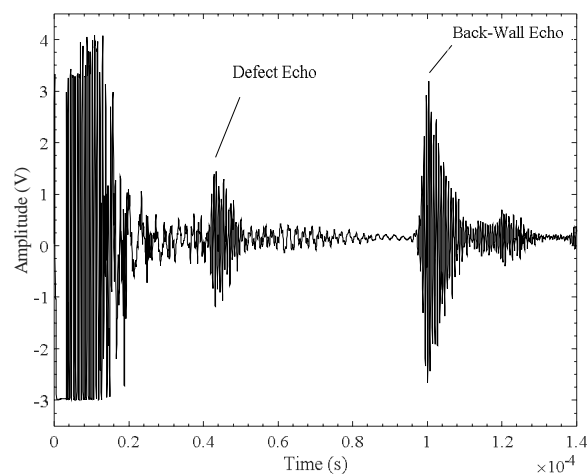


Fig. 8 Received signal in the study of Lamb wave velocity in the aluminum plate

شکل 8 سیگنال دریافتی برای سنجش سرعت در نمونه آلومینیومی

زاویه زیادی گسترش نمی‌یابد ولی در مدل اجزاء محدود گسترش موج شدید است. در نهایت در آزمون تجربی آنچه در دستگاه دریافت کننده سیگنال ارائه می‌شود بر حسب ولتاژ است، ولی در روش المان محدود جابجایی اندازه‌گیری می‌شود. این موضوع در شکل کلی پروفیل جابجایی تأثیری ندارد و فقط باعث تغییر عددی مقادیر می‌شود که به همین علت نتایج به صورت بی‌بعد شده مقایسه شده است.

با توجه به شکل 11 ملاحظه می‌شود که در برخی نقاط تفاوت بین نتایج تجربی و اجزاء محدود افزایش می‌یابد. یکی از مواردی که در شبیه‌سازی و نیز در انجام آزمایش ایجاد می‌شود، تداخل امواج ارسالی با امواج پراکنده شده از سوراخ است. اما میزان تداخل در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی متفاوت خواهد بود. به نحوی که در حالت تجربی این امکان وجود دارد که میزان تداخل امواج ارسالی کاهش یابد. در حالت شبیه‌سازی این تداخل باعث ایجاد اختلاف بین نتایج تجربی و اجزاء محدود می‌شود و از آنجایی که موج به تدریج دچار واگرایی و تضعیف می‌شود، میزان تداخل آن با امواج پراکنده شده در بخش‌های مختلف یکسان نیست. لذا در برخی نقاط اضافه شدن امواج ارسالی به امواج پراکنده شده باعث افزایش دامنه می‌شود در حالی که در سایر بخش‌ها این اتفاق نمی‌افتد. البته با استفاده از روش ارائه شده در مقاله تا حد امکان امواج ارسالی حذف شد. اما با توجه به تفاوت چند برابری امواج ارسالی نسبت به امواج پراکنده شده، حتی کمترین تداخل نیز باعث ایجاد اختلاف می‌شود. البته نحوه اندازه‌گیری موج در آزمایش تجربی نیز بر ایجاد این اختلاف موثر است.

3-5- نتایج بررسی پراکندگی از یک ناحیه تیز

در بررسی پراکندگی در هنگام برخورد موج با گوشه تیز لبه ورق، موج به صورتی متفاوت بازتاب می‌کند به نحوی که دامنه آن نسبت به دامنه موج در فرآیند پراکندگی بزرگتر است. تصویری از این حالت در شکل 12 نمایش داده شده است. در این حالت، این احتمال وجود دارد که تفاوت اندازه دامنه ناشی از تأثیر گوشه تیز ورق باشد. برای بررسی این امر مدلی از یک ورق با یک حفره مربع شکل مطابق شرایط مدل قبلی ایجاد شد و پراکندگی در آن مورد بررسی قرار گرفت.

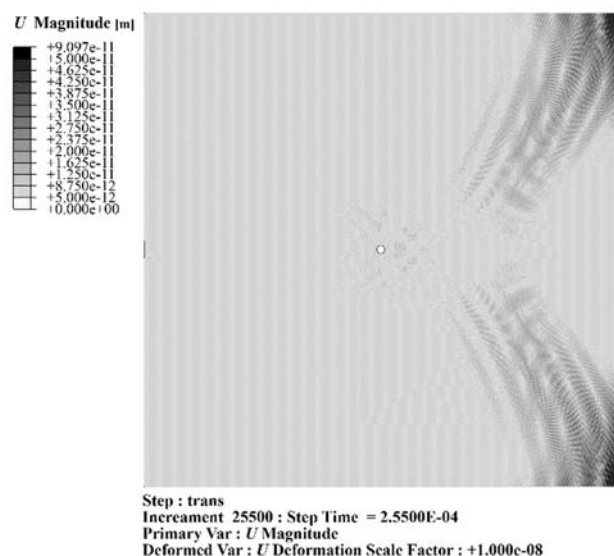


Fig. 12 Reflection from a point or sharp corner

شکل 12 بازتابش از یک نقطه یا گوشه تیز

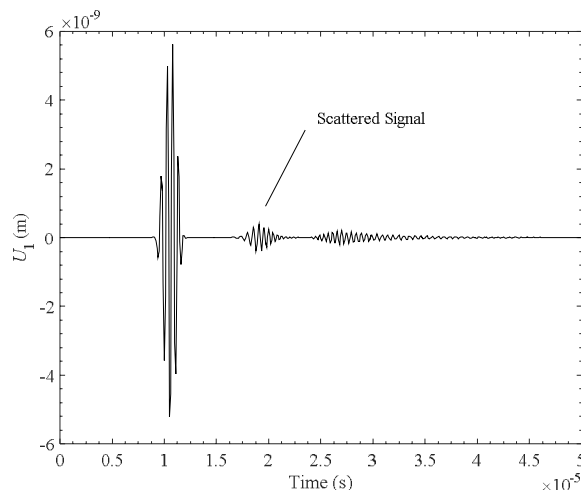


Fig. 10 Received signal from a node placed at 180° and at a distance of 50 mm from the transmitter

شکل 10 سیگنال دریافت شده در زاویه 180° در فاصله 50 میلی‌متر از فرستنده

است هر چند با توجه به تفاوت ماهیت کمیت‌ها امکان مقایسه کمی این مقادیر وجود ندارد. در نمودار مربوط به مدل اجزاء محدود، در برخی نقاط شکستگی‌هایی دیده می‌شود. این موضوع تا حدی مربوط به محدود بودن نقاط گیرنده در مدل اجزاء محدود است. در این مدل با توجه به زیاد بودن تعداد اجزاء، انتخاب گره‌هایی که دقیقاً در فاصله مشخصی از مرکز سوراخ باشند، کاری دشوار و زمان‌بر است. پیش‌بینی می‌شود که با افزایش تعداد نقاط دریافت‌کننده موج، تطابق بهتری بین نتایج مدل اجزاء محدود و نتایج تجربی ایجاد شود. یکی از مواردی که در نتایج آزمون تجربی مؤثر است، صافی سطح ناحیه عیب است. این موضوع می‌تواند تا حدی منجر به تفاوت نتایج مدل اجزاء محدود و نتایج تجربی شود. در آزمایش تجربی موج توسط یک پروب زاویه‌دار دریافت می‌شود، حال آنکه در مدل اجزاء محدود، جابجایی‌ها موازی سطح ورق است و خارج صفحه‌ای نیست. در مدل اجزاء محدود برای شبیه‌سازی پروب از تعداد زیادی گره که هر یک همانند یک منبع نقطه‌ای ارسال موج عمل می‌کند، استفاده می‌شود. همین امر باعث تفاوت در گسترش موج می‌شود به نحوی که در حالت تجربی مدل ارسالی در

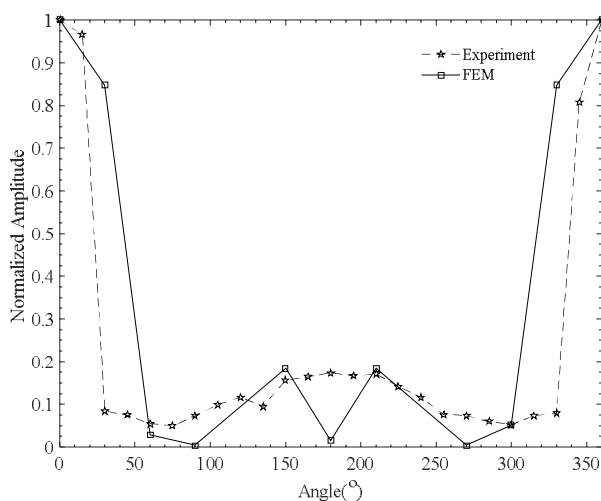


Fig. 11 Scattering angular profiles from a 5 mm cylindrical through-thickness hole at a radial distance of approximately 250 mm

شکل 11 نتایج حاصل از پراکندگی از یک سوراخ استوانه‌ای به شعاع 5 mm و در فاصله 250 mm

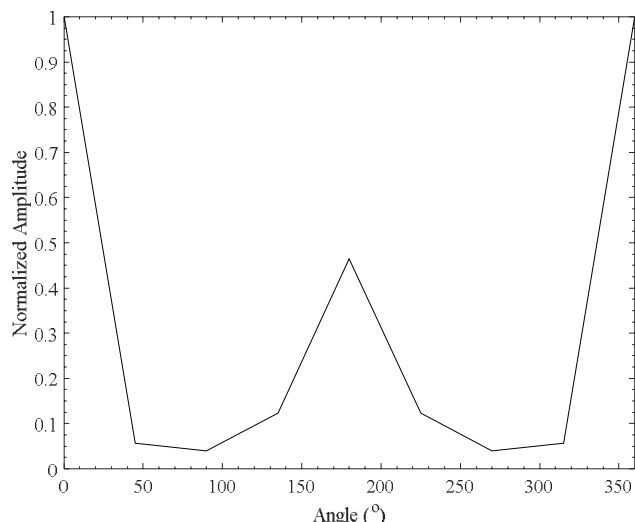


Fig. 14 Scattering angular profile for a square notch

شکل 14 پروفیل زاویه‌ای پراکندگی برای یک حفره مربعی

مختلف شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و سرعت انتشار موج به‌عنوان معیاری برای صحت‌گذاری نتایج در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج این بخش، مدل دوبعدی صفحه‌ای با خطای کمتر از 4% انتشار مد S_0 را شبیه‌سازی می‌کرد. این خطا برای انتشار مد A_0 در حدود 5% بود. سپس از پارامترهای این مدل برای بررسی پراکندگی موج لمب از یک سوراخ استوانه‌ای راه‌به‌در استفاده شد و پروفیل زاویه‌ای حاصل از نتایج رسم شد. نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود، با نتایج نمونه تجربی صحت‌گذاری شد. روند کلی تغییرات در دو نمودار یکی بود و اختلاف بین دو نمودار در حد قابل قبول بود که علل این اختلاف، مورد بحث قرار گرفت. با توجه به تطابق خوب مدل اجزاء محدود و تجربی، استفاده از این مدل در تفسیر پدیده پراکندگی امکان‌پذیر است. بر اساس نتایج حاصل از پروفیل زاویه‌ای، امکان تعیین موقعیت و مشخصات عیب وجود خواهد داشت که در مواردی همچون بازسازی تصویر و پایش سلامتی سازه قابل استفاده خواهد بود.

7- مراجع

- [1] J. L. Rose, *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*, pp. 77-106, England: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Z. Su, L. Ye, *Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications*, pp. 15-53, London: Springer, 2009.
- [3] J. McKeon, M. Hinders, Lamb wave scattering from a through hole, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 224, No. 5, pp. 843-862, 1999.
- [4] Y. Al-Nassar, S. Datta, A. Shah, Scattering of Lamb waves by a normal rectangular strip weldment, *Ultrasonics*, Vol. 29, No. 2, pp. 125-132, 1991.
- [5] D. N. Alleyne, P. Cawley, The interaction of Lamb waves with defects, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 39, No. 3, pp. 381-397, 1992.
- [6] Z. Chang, A. Mal, Scattering of Lamb waves from a rivet hole with edge cracks, *Mechanics of Materials*, Vol. 31, No. 3, pp. 197-204, 1999.
- [7] E. Moulin, J. Assaad, C. Delebarre, D. Osmont, Modeling of Lamb waves generated by integrated transducers in composite plates using a coupled finite element-normal modes expansion method, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 107, No. 1, pp. 87-94, 2000.
- [8] T. Hayashi, K. Kawashima, Multiple reflections of Lamb waves at a delamination, *Ultrasonics*, Vol. 40, No. 1, pp. 193-197, 2002.
- [9] J. M. Galán, R. Abascal, Numerical simulation of Lamb wave scattering in semi-infinite plates, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 53, No. 5, pp. 1145-1173, 2002.
- [10] O. Diligent, T. Grahn, A. Boström, P. Cawley, M. J. Lowe, The low-frequency reflection and scattering of the S_0 Lamb mode from a circular through-thickness hole in a plate: Finite Element, analytical and experimental studies, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 112, No. 6, pp. 2589-2601, 2002.
- [11] G. Liu, S. Q. Jerry, A non-reflecting boundary for analyzing wave propagation using the finite element method, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 39, No. 5, pp. 403-417, 2003.

در این مدل یک حفره مربع شکل در مرکز ورق در نظر گرفته شد و با ارسال موج از لبه ورق، پراکندگی مورد بررسی قرار گرفت. تصویر مدل اجزاء محدود و نمودار پراکندگی به ترتیب در شکل 13 و 14 نمایش داده شده‌اند. در این حالت بیشترین میزان پراکندگی در راستای ارسال موج بود که به علت وجود یک سطح بازتاب کننده بزرگ، بخش عمده‌ای از موج بازتاب شده است. در گوشه‌های مربع، مطابق آنچه انتظار می‌رفت، دامنه موج پراکنده شده نسبت به زوایای مجاور تا حدی بیشتر بود که ناشی از اثر گوشه تیز است ولی این میزان افزایش مطابق پدیده مشاهده شده در شکل 12 نبود. با توجه به آنکه در شکل مذکور بازتابش از ناحیه‌ای بسیار کوچک صورت می‌گیرد و نواحی مجاور بازتابنده نیستند، این پدیده رخ داده است که از نظر فیزیکی رخداد چنین پدیده‌ای با این دامنه دور از انتظار است. در شکل 13، بازتابش از نواحی با لبه تیز نسبت به نواحی مسطح (با اندازه سطح بازتابنده یکسان) تا حدی بیشتر است. همچنین در شکل 14، در زاویه 180 درجه به‌توجه به اضافه شدن موج عبوری به موج پراکنده شده دامنه تا حدی بالا رفته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شناسایی عیوبی با سطوح صاف و همچنین دارای لبه‌های تیز تا حدی آسان‌تر است. در این حالت نیز همانند عیب دایره‌ای، با توجه به اینکه هیچ عامل نامتقارنی در ضخامت وجود ندارد، تغییر مد رخ نداده است و امواج به صورت بسته‌های موج یکسان حرکت کرده‌اند و با افزایش فاصله جدا نشده‌اند، که این امر نشان‌دهنده سرعت برابر و تک مد بودن امواج پراکنده شده است.

6- نتیجه‌گیری

امواج لمب با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فردی که دارند در شناسایی موقعیت و هندسه عیوب کاربرد فراوانی دارند. با توجه به پیچیدگی سیگنال‌های حاصل از امواج لمب، استفاده از یک ابزار کمکی کمک شایانی به تفسیر نتایج خواهد کرد. در این تحقیق دو هدف اصلی پیگیری می‌شود که شامل انتخاب روش مناسب برای مدل‌سازی انتشار امواج لمب و شبیه‌سازی پراکندگی امواج لمب از یک سوراخ استوانه‌ای است. در این مقاله با استفاده از روش اجزاء محدود، انتشار و پراکندگی امواج لمب مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا برای دستیابی به بهترین پارامترها برای انجام مدل‌سازی، مدل‌های

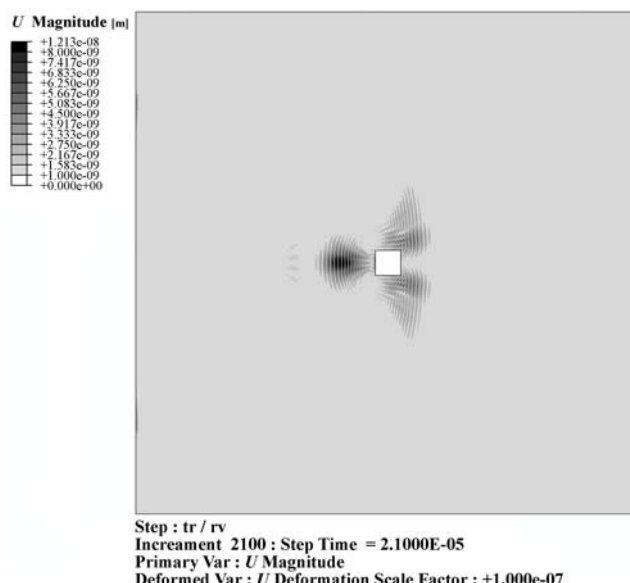


Fig. 13 FEM model for investigation of scattering from a square notch

شکل 13 مدل اجزاء محدود برای بررسی پراکندگی از یک حفره مربعی

- [18] M. Seher, P. Huthwaite, M. Lowe, P. Nagy, P. Cawley, Numerical design optimization of an EMAT for A0 Lamb wave generation in steel plates, *40th annual review of progress in quantitative nondestructive evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micro magnetic Testing*, Baltimore, Maryland, USA pp. 340-347, 2014.
- [19] J. Wang, L. Wang, X. Liu, Finite element investigation on Lamb waves in composite phononic crystals, *9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials)*, Oxford, England, pp. 542-545, 2015.
- [20] Z. Fan, W. Jiang, M. Cai, W. M. Wright, The effects of air gap reflections during air-coupled leaky Lamb wave inspection of thin plates, *Ultrasonics*, Vol. 65, No. 0, pp. 282-295, 2016.
- [21] J. Slotwinski, *Ultrasonic Testing*, L. Mordfin, *Handbook of Reference Data for Nondestructive Testing*, pp. 31-49, USA: ASTM, 2002.
- [22] P. Bocchini, A. Marzani, E. Viola, Graphical user interface for guided acoustic waves, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 202-210, 2010.
- [12] B. Xu, Z. Shen, X. Ni, J. Lu, Numerical simulation of laser-generated ultrasound by the finite element method, *Journal of Applied Physics*, Vol. 95, No. 4, pp. 2116-2122, 2004.
- [13] N. Terrien, D. Osmont, D. Royer, F. Lepoutre, A. Déom, A combined finite element and modal decomposition method to study the interaction of Lamb modes with micro-defects, *Ultrasonics*, Vol. 46, No. 1, pp. 74-88, 2007.
- [14] H. Peng, G. Meng, F. Li, Modeling of wave propagation in plate structures using three-dimensional spectral element method for damage detection, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 320, No. 4, pp 942-954, 2009.
- [15] S. J. Lee, H. Sohn, J.-W. Hong, Time reversal based piezoelectric transducer self-diagnosis under varying temperature, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 29, No. 2, pp. 75-91, 2010.
- [16] Z. Ahmad, U. Gabbert, Simulation of Lamb wave reflections at plate edges using the semi-analytical finite element method, *Ultrasonics*, Vol. 52, No. 7, pp. 815-820, 2012.
- [17] M. G. Sause, M. A. Hamstad, S. Horn, Finite element modeling of lamb wave propagation in anisotropic hybrid materials, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 53, No. 0, pp. 249-257, 2013.