ماهنامه علمى يژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

عادل صداقتى¹، فرهنگ هنرور^{2*}، آنتونى سىنكلر³

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 پستى honarvar@kntu.ac.ir ،1999143344

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 10 شهریور 1395 پذیرش: 26 ابان 1395 ارائه در سایت: 28 آذر 1395	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
<i>کلید واژگان:</i> امواج لمب روش اجزاء محدود عیب استوانهای پراکندگی	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 راهبهدر 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 راهبهدر انجام شد که نتایج حاصل از مدی اور 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 امکان بذیر 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 ABSTRACT Lamb waves are certain types of ultrasonic waves that can propagate in thin plates. Lamb waves are Original Research Paper Received 31 August 2016 particularly useful in testing large plate-shaped structures. Moreover, due to extensive flexibility in Accepted 16 November 2016 modeling sophisticated structures, finite element modeling (FEM) has been used in numerous Lamb Available Online 18 December 2016 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 Finite element method for modeling Lamb waves and the best model that can provide both good accuracy and high cylindrical hole 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 that 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.

ایجاد شود، ارزیابی قطعه صورت می گیرد. 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:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

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)

Keywords:

scattering

Lamb waves

محققان بسیاری شبیه سازی امواج لمب توسط روش اجزاء محدود را مورد بررسی قرار دادهاند. اما مسئلهای که در اینجا مطرح است عدم ارائه

اطلاعات كامل و جامع در خصوص تحقيقات انجام شده است. علاوه بر اين در بسیاری از موارد برای شبیه سازی از نرمافزارهای تجاری استفاده نشده است،

لذا امكان تعميم نتايج وجود ندارد. الناصر و همكارانش [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 محدوددر این مسئله از

طريق كد نويسي انجام شد تا امكان ادغام آن با روش تئوري فراهم آيد. آلين

و كاولى [5] به تأثير برهم كنش امواج لمب با عيوب 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 صحه گذاری 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 محدودانتشار

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

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 هدایت شده هستند که برای انتشار خود نیاز به دو مرز آزاد دارند. این امواج از مسیر مرزها پیروی میکنند و مى توانند در فواصل طولانى و با حداقل ميرايى انتشار يابند [1]. با توجه به اینکه این امواج معمولاً در ورق،های 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 زاویه های 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 نيز تكرار مي شود (شكل 1)، تا جايي كه ديگر امواج طولي و عرضي قابل تفکیک نبوده و فقط یک الگوی تداخلی وجود دارد که کل ورق را به ارتعاش درمیآورد. به همین خاطر مدهای متفاوتی در اثر تداخل های مختلف امواج ايجاد مي شوند [1].

امواج لمب با توجه به ویژگیهای منحصر به فرد خود کاربردهای متعددی دارند که در این میان شناسایی عیوب و پایش سلامتی سازه' 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 مى توان با استفاده از روش هاى عددى 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 ايجاد شود، مفيد خواهد بود [3].

درصورتی 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 می شود. هر چند در این روش امکان شبیه سازی هندسه های زیادی وجود دارد، اما مسئلهای که در این حالت مطرح است زمان بر 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.





Lower boundary of plate

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

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. هایاشی 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 كردند. ديليجنت و همكارانش[10] پراكندگي 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 صحه گذاری کردند. ليو و جرى [11] انتشار موج را در يک ساختار ورقى شكل 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 ايجاد شده توسط فراصوت ليزرى 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

SHM (Structure Health Monitoring)

² Scanning Tomographic Reconstructions

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دورہ 16، شمارہ 12

استفاده از روش اجزاء طیفی 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 پیزو الکتریک بر روی یک ورق حاوی ترک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج توسط آزمایشهای تجربی صحه گذاری 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 ورق های ترکیبی چندلایه مورد بررسی قرار دادند. نمونهای از این ورق ها در مخازن تحت فشار یافت می شود که از ترکیب فلز و کامپوزیت ساخته می شوند. با استفاده از روش اجزاء محدود مدل سازی انتشار امواج لمب در این ورق ناهمسانگرد تأثیر پارامترهایی همچون ضخامت و تغییرات لايهها تعيين و نتايج با نتايج تجربي مقايسه و صحهگذاري شد. سهر و همکارانش [18] با استفاده از روش اجزاء محدود پارامترهای تراگذار آكوستيكي الكترومغناطيسي²را بررسي كردند. هدف آنها تغيير پارامترها به منظور بررسی امکان تولید امواج لمب در یک ساختار بود. لذا مدلی از ترکیب حالات الكترومغناطيسي و الاستوديناميكي تهيه شد كه وابسته به پارامترهاي اصلی سیستم از جمله قطر آهنربا و فاصله تا ورق بود. با تغییر پارامترها مد ایجاد شد و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شد که از تطابق خوبی A_0 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 هوا⁴مورد 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 فرآیند 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.

2- مدل اجزاء محدود انتشار موج لمب

در این بخش فرآیند 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 ا ویژگیهای مدلهای مورد نظر نمایش داده شده است. در کلیه این موارد با توجه به اندازه پروب 20 mm از لبه قطعه برای بارگذاری در نظر گرفته شد.

با توجه به جدول ۱ حالات مختلف برای شبیهسازی طوری در نظر گرفته شدهاند که از کلی ترین حالت (حالت سهبعدی) تا ساده ترین حالت (دوبعدی 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 دوبعدی و پوسته توانایی نمایش تمامی مدهای امواج لمب به خصوص امواجی با جابجایی خارج از صفحه را ندارد. همچنین شیوههای مختلف بار گذاری نیز در این مدل ها 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 آلیاژ آلومینیوم 2014 در نظر گرفته شد. خواص فیزیکی و آکوستیکی این آلیاژ آلومینیوم در جدول 2 آمده است [21]. ضخامت قطعه مورد شبیهسازی برابر با mm 1 است.

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

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

جدول 1 مدل های ممکن برای شبیه سازی انتشار امواج لمب

Table. 1 Possible models that could be used for simulation of Lamb waves						
شكل	اندازہ مش (mm)	نوع اجزا	نوع تحليل	نحوہ بار گذاری	تعداد اجزاء در ضخامت	شماره
	0.25	S4R	پوسته (Shell)	در راستای انتشار	1	1
	0.25	CPS4R	دوبعدی صفحهای	در راستای انتشار	1	2
↑ ↑↑	0.25	C3D8R	سەبعدى	در راستای انتشار	4	3
↓ ↑	0.25	C3D8R	سەبعدى	عمود بر جهت (بار رو به داخل)	4	4
↓	0.25	C3D8R	سەبعدى	عمود بر جهت انتشار (بار رو به خارج)	4	5

1 Possible models that could be used for simulation of Lamb

¹ Spectral element method (SEM)

² EMAT ³ Looky lomb wave

³ Leaky lamb wave ⁴ Air-coupled transducer

⁵ ABAQUS ⁶ Tone burst

12000



Fig. 2 Geometry of the sample used in FEM

شکل 2 هندسه نمونه در انجام شبیهسازی اجزاء محدود

جدول 2 خواص فيزيكي و أكوستيكي AA2014 [21]

17.8 × 10 ⁵	3070	6320	2800	0.33	72.4 x 10⁹
امپدانس آکوستیکی (Rayl)	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج طولی (m/s)	چگالی (kg/m²)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)
Table. I Physical and acoustic properties of AA2014					

در این معادله f فرکانس تحریک برحسب N، Hz در این معادله معادله fتحریک و t زمان تحریک است که برابر با NIf است. فرکانس مرکزی برابر با 500 kHz و تعداد سیکل برابر با 5 در نظر گرفته شد که بهتبع آن زمان تحریک برابر با **10 μs** است. تحریک از نوع جابجایی است که به نودهایی به فاصله mm 20 از لبه ورق اعمال می شود. علت انتخاب فاصله 20 mm تناظر آن با پهنای پروب واقعی است.

تعیین اندازه صحیح مش در فرآیند شبیهسازی بسیار مهم است و از قانون خاصی تبعیت می کند. اندازه مش عمدتاً باید در حدود **۸/10** تا ۸**/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 می شود. سرعت انتشار موج در امواج لمب، برخلاف امواج حجمی، به فرکانس وابسته است که به این خاصیت پاشندگی گفته می شود [1]. برای تعیین سرعت گروه و سرعت فاز در امواج لمب معادله ریلی – لمب باید به صورت عددی حل و منحنی های یاشندگی رسم شود. منحنی یاشندگی برای مسئله مورد نظر با استفاده از یک نرمافزار تجاری [22] رسم شد. این نرم افزار بر اساس روش المان محدود شبه تحلیلی عمل می کند 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 kHz 500 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 كم، عمدتاً براي بازرسي قطعات استفاده مي شود [2].

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





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

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

 $500 \ \mathrm{kHz}$ سرعت گروه و فاز برای دو مد A_0 و S_0 در فرکانس $500 \ \mathrm{kHz}$ Table. 3 Group and phase velocity of A_0 and S_0 modes at 500 kHz

	2 0 0	
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 می شود. 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:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{V} \tag{2}$$

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

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.25.0

² Time Increment

محاسبات مقدار گام زمانی برابر با **۵ ⁸-10 × 4.5** است که برای تطابق با نتایج تجربی برابر با **۵ ⁸-10 × 1** 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. درصورتیکه 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 می شود. در بحث پراکندگی امواج، معمولاً بررسی در ناحیه دور انجام می شود. 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 می شود. به همین خاطر باید مدل تا حدی بزرگ باشد. هندسه مدل مورد نظر برای شبیه سازی در شکل 4 آمده است. مطابق شکل 4 در مرکز یک ورق از جنس آلومینیوم با ضخامت mn 0.5 یک سوراخ راهبهدر به شعاع ایجاد شده است. فرستنده در وسط یکی از لبه های ورق قرار دارد. گیرنده در دایره ای به شعاع 25 سانتی متر در اطراف سوراخ قابل جابجایی است و در نقاطی به فاصله 30 درجه از یکدیگر قرار داده می شود. با استفاده از اطلاعات بدست آمده می توان پروفیل زاویه ای پراکندگی در اطراف سوراخ را رسم کرد. برای شبیه سازی پراکندگی از فرکانس 2 MHZ

شرایط سرعت گروه دو مد $_{0}^{0}$ و A به ترتیب برابر با **5111 m/s** و دریافتی مد شرایط سرعت گروه دو مد $_{0}^{0}$ و A به ترتیب برابر با **3134 m/s 3134 m/s** مدارسانی و دریافتی مد S_{0} است. بر این اساس با توجه به اینکه مد ارسالی و دریافتی مد S_{0} محاسبه است که مقدار آن با احتساب $\lambda/10$ برابر با m 2.5 است. به علاوه برای بهبود مدل سازی لبه منحنی سوراخ دایرهای، اندازه مش کمتر از این مقدار و برابر با m 2.0 در نظر گرفته شد. گام زمانی نیز بر اساس معادله (2) برابر با 10^{-8} است. اساس معادله (2) برابر با 10^{-8} در نظر گرفته شد.

لبههای ورق معمولاً بازتابهایی با دامنه بالا ایجاد میکنند که خود باعث ییچیدگی 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

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 $y \in x$ دریافت میکنند. لازم به ذکر است در اینجا چون موج ارسالی و هندسه قطعه هر دو متقارن هستند، تغییر مد از 0 به A_0 رخ نمی دهد. لذا عدم نمایش جابجایی عمود بر صفحه مشکلی ایجاد نمیکند.

4- آزمون تجربي

برای صحهگذاری 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 mm 150 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 می شود که اختلاف زمان دو سیگنال دو برابر زمان حرکت سیگنال در فاصله بین عیب تا دیواره است. از یک پروب با فرکانس **500 kHz** موج لمب استفاده شد. برای تحریک پروب و ارسال موج از دستگاه ارسال کننده/دریافت کننده 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 اَزمایش برای سنجش سرعت انتشار موج لمب

¹ Panametrics ² pulse-echo

برای بررسی پراکندگی از یک ورق آلومینیومی به ابعاد × 1m × 1m د. 0.5 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 فرکانس 2 MHz و پهنای باند 644 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 نتيجه گيري**

5-1- 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 شبیهسازی، با سرعت گروه تئوری (جدول 3) مقایسه شد. در این مقایسه جابجایی در دو راستای U_3 و U_1 در نظر گرفته می شود. 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 هری این موضوع جابجایی حاکم مد و می در استای دو و مد ای مورد با توجه به این موضوع آن را در نظر داشت که در هریک از این دو راستا مد دیگر نیز دیده می شود ولی آنرژی آن کمتر از مد اصلی است. تفکیک مدها از طریق بررسی سرعت گروه آنها امکان پذیر است. لازم به ذکر است که با توجه به فیزیک مدل سازی در برخی حالات همچون حالات پوسته و دوبعدی صفحهای، امکان دریافت برخی حالات همچون حالات پوسته و دوبعدی صفحهای، امکان دریافت می برخی مالات مورد دارد. در این گونه موارد فقط امکان

در هر یک از مدلهای شبیهسازی، سیگنال برای حالت بازتابی و ارسال -دریافت مورد بررسی قرار می گیرد. 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.

 A_0 ارزیابی نتایج شبیه سازی بر اساس سرعت گروه برای مدهای S_0 و A_0 مورت 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 شكل 6 نمونه مورد استفاده برای بررسی پراكندگی

1 pitch-catch



Fig. 7 Signal compression for two types of tests (a) Pulse-Echo (b) Pitch-Catch شکل 7 مقایسه سیگنال برای دو حالت انجام آزمون ((لف): 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 S₀ و A₀ مناسب هستند. لذا درصورتی که مدلسازی در محدودهای صورت می گیرد 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				
خطای A ₀ (%)	سرعت پیشبینیشده مد (m/s) A ₀	خطای (%) S ₀	سرعت پیشربینیشده مد S ₀ (m/s)	شمارہ مدل
4.1	3030.3	2.3	5454.5455	1
4.3	3036.44	2.3	5454.5455	2
5.71	3080.82	4.89	5067.57	3
7.7	3151	4.3	5102	4
4.6	2772.64	17.2	4411	5

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 بهصورت 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 نمی کند ولی در خصوص مدل دوبعدی صفحهای میتوان اجزاء بینهایت را به کار برد. این موضوع در مدلهای پیچیده از اهمیت بسزایی برخوردار است.

برای صحه گذاری 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 استفاده میشود. بر این اساس سرعت تروه مد مارد موج ارسالی برابر 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.

5-2- پراکندگی موج از یک سوراخ استوانهای

با توجه به نتایج بخش قبل، برای شبیه سازی از حالت دوبعدی صفحه ای 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 دایره ای، بخش کوچکی از موج بازتابیده میشود. به علاوه با توجه به اینکه عیب دایره ای شکل است، موج در جهات مختلف منتشر میشود. این موضوع باعث می شود 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

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. این امر خود نشان دهنده استهلاک بالای موج پس از 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 mm 5 در فاصله mm 250 در شکل 11 نشان داده شده است. برای ایجاد امکان مقایسه نتایج، مقادیر به صورت بی بعد ارائه شده است. در این حالت کلیه مقادیر بر مقدار حداکثر داده ها 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 Increament 14000 : Step Time = 1.4000E-04 Primary Var : U Magnitude Deformed Var : U Deformation Scale Factor : +1.000e-08

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

(ت)

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



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 درجه با 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 دریافت کننده موج، تطابق بهتری بین نتایج مدل اجزاء محدود و نتایج تجربی ایجاد شود. یکی از مواردی که در نتایج آزمون تجربی مؤثر است، تجربی ایجاد شود. یکی از مواردی که در نتایج آزمون تجربی مؤثر است، نتایج مدل اجزاء محدود و نتایج تجربی موج توسط صافی سطح ناحیه عیب است. این موضوع میتواند تا حدی منجر به تفاوت 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



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

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

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 می شود بر حسب ولتاژ است، ولی در روش المان محدود جابجایی اندازه گیری می شود. این موضوع در شکل کلی پروفیل جابجایی تاثیری ندارد و فقط باعث تغییر عددی مقادیر می شود که به همین علت نتایج به صورت بی بعد شده مقابسه 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 شبیه سازی و نیز در انجام آزمایش ایجاد میشود، تداخل امواج ار سالی با امواج پراکنده شده از سوراخ است. اما میزان تداخل در آزمایش تجربی و شبیه سازی متفاوت خواهد بود. به نحوی که در حالت تجربی این امکان وجود دارد که میزان تداخل امواج ار سالی کاهش یابد. در حالت شبیه سازی 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 مواج ار سالی به امواج پراکنده شده باعث افزایش دامنه میشود در حالی که مواج ار سالی به امواج پراکنده شده باعث افزایش دامنه میشود در حالی که مواج ار سالی به امواج پراکنده شده باعث افزایش دامنه میشود در حالی که امواج ار سالی به امواج پراکنده شده باعث افزایش دامنه میشود در حالی که امواج ار سالی به امواج پراکنده شده باعث افزایش دامنه میشود در بری امواج ار الی به امواج پراکنده شده باعث افزایش دامنه میشود در مالی که در سایر بخشها این اتفاق نمیافتد. البته با استفاده از روش ارائه شده در امواج ار سالی نسبت به امواج پراکنده شده، حتی کمترین تداخل نیز باعث ایجاد اختلاف میشود. البته نحوه اندازه گیری موج در آزمایش تجربی نیز بر ایجاد اختلاف میشود. البته نحوه اندازه گیری موج در آزمایش تجربی نیز بر ایجاد این اختلاف میشود. البته نحوه اندازه گیری موج در آزمایش تجربی نیز بر

5-3- نتایج بررسی پراکندگی از یک ناحیه تیز

در بررسی پراکندگی در هنگام برخورد موج با گوشه تیز لبه ورق، موج به صورتی متفاوت بازتاب می کند 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 تاثیر 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.



Step : trans Increament 25500 : Step Time = 2.5500E-04 Primary Var : U Magnitude Deformed Var : U Deformation Scale Factor : +1.000e-08 Fig. 12 Reflection from a point or sharp corner

شكل 12 بازتابش از يك نقطه يا گوشه تيز

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 می فت، دامنه موج پراکنده شده نسبت به زوایای مجاور تا حدی بیشتر بود که ناشی از اثر گوشه تیز است ولی این میزان افزایش مطابق یدیده مشاهده شده در شکل 12 نبود. با توجه به آنکه در شکل مذکور بازتابش از ناحیهای بسیار کوچک صورت می گیرد 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 باتوجه به اضافه شدن موج عبوری به موج پراکنده شده دامنه تا حدی بالا رفته است. بنابراین می توان 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- نتیجه گیری

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



 Step : tr / rv

 Increament 2100 : Step Time = 2.1000E-05

 Primary Var : U Magnitude

 Deformed Var : U Deformation Scale Factor : +1.000e-07

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

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





مختلف شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت و سرعت انتشار موج به عنوان معیاری برای صحه گذاری نتایج در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج این بخش، مدل دوبعدی صفحه ای با خطای کمتر از 4% انتشار مد S_0 را شبیه سازی می کرد. این خطا برای انتشار مد A_0 در حدود 5% بود. سپس از پارامترهای این مدل برای بررسی پراکندگی موج لمب از یک سوراخ استوانه ای راه به در استفاده شد و پروفیل زاویه ای حاصل از نتایج رسم شد. نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود، با نتایج نمونه تجربی صحه گذاری 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 امکان پذیر است. بر اساس نتایج حاصل از پروفیل زاویه ای، 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

- 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.
- 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.
 D. N. Alleyne, P. Cawley, The interaction of Lamb waves with defects,
- [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 S0 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.

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-18]

- [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.
- J. Slotwinski, Ultrasonic Testing, L. Mordfin, Handbook of Reference Data for Nondestructive Testing, pp. 31-49, USA: ASTM, 2002.
 P. Bocchini, A. Marzani, E. Viola, Graphical user interface for guided acoustic waves, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 25, No. 3, 2020 2010 e02010. 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 [15] S. J. Ee, H. Soni, V. Hog, Interfevena oused producted transacter 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, No.
- 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.