

## Ultrasonic Evaluation Using Higher Order Lamb Wave Modes

Sina Sodagar<sup>1\*</sup>, Mohammad Javad Ranjbar Naserabadi<sup>2</sup>

1-Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Petroleum University of Technology.

2-Department of Technical Inspection Engineering, Petroleum University of Technology.

\*sodagar@put.ac.ir

### Abstract

Long-range guided wave inspection systems are often used in low frequency–thickness ranges below the cut-off frequencies of higher wave modes to simplify data interpretation. In this paper, the potential of high-order guided wave modes for the inspection of plate structures is considered. The characteristics of high-order lamb wave modes and their corresponding sensitivity and detectability are investigated. Using a commercially available software package, finite element simulations are carried out to model the propagation of A1 and S1 wave modes in steel plate. Using a variable angle transducer, experimental pulse–echo measurements are also conducted to evaluate the measurement errors when implementing higher order modes A1 and S1 on a 2-mm thick steel plate at 4 MHz.mm. Experimental measurements show that when using S1 mode for short-range measurements, the relative error is less than 10%.

**Keywords:** Ultrasonic, Guided waves, Higher order modes, High frequency.

## ارزیابی فراصوتی با استفاده از مدهای مرتبه بالای امواج لمب

سینا سوداگر<sup>۱\*</sup>، محمدجواد رنجبر ناصرآبادی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت  
 ۲- کارشناسی ارشد، مهندسی بازرسی فنی و ایمنی، دانشگاه صنعت نفت  
 \* sodagar@put.ac.ir

### چکیده

در آزمون‌های فراصوتی با استفاده از امواج هدایت‌شونده برای افزایش محدوده بازرسی عموماً از امواج در محدوده فرکانس‌های پایین استفاده می‌شود. با کاهش فرکانس امواج ارسالی علاوه بر کمتر شدن تعداد مدهای تولید شده در سازه، تولید مدهای پایه، و ساده‌تر شدن تفسیر نتایج، رفتار غیرپاشنده و استهلاک پایین موج موجب افزایش طول قابل بازرسی می‌شود. با این وجود استفاده از فرکانس‌های پایین جهت انجام آزمون موجب کاهش حساسیت و قابلیت تفکیک این روش ارزیابی می‌شود. در این مقاله استفاده از مدهای بالاتر امواج هدایت‌شونده با فرکانس بالا برای بازرسی ورق‌ها در فاصله کوتاه برای بهبود حساسیت آزمون مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا با مدلسازی عددی امواج هدایت‌شونده تولید شده توسط یک ترنسدیوسر زاویه متغیر، مدهای  $A_1$  و  $S_1$  در محدوده فرکانس‌های بالا شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از این مدل، الگوی توزیع انرژی موج در این دو مد در سازه مورد ارزیابی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی برای یک ورق فولادی، نشان می‌دهد که خطای نسبی اندازه‌گیری مد  $S_1$  در فاصله‌های کوتاه با استفاده از یک پروب 2 MHz در محدوده کمتر از ۱۰٪ است.

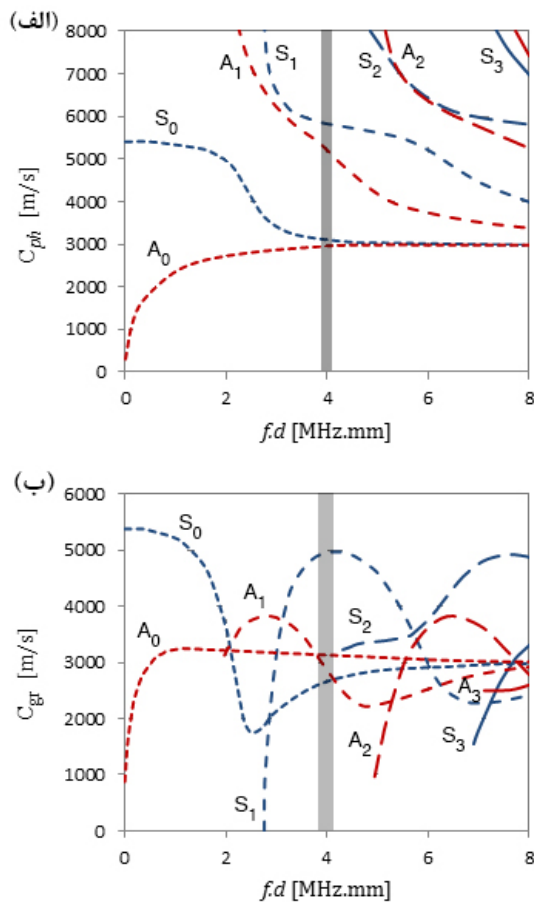
**واژگان کلیدی:** امواج هدایت‌شونده، مدهای مرتبه بالا، امواج فراصوتی، فرکانس بالا.

### ۱- مقدمه

محدود، پراکندگی ناشی از یک سوراخ استوانه‌ای را در یک ورق آلومینیومی مدل‌سازی کرده و نتایج بدست آمده را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. در سال‌های اخیر استفاده از امواج هدایت‌شونده در فرکانس بالا در آزمون‌های غیرمخرب مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. با استفاده از امواج در محدوده فرکانس‌های بالا پیش‌بینی می‌شود حساسیت آزمون در تشخیص عیوب و موقعیت آنها افزایش یابد [6]. ترین و همکارانش [7] از یک روش عددی هیبریدی برای تشخیص خوردگی با استفاده از مد  $S_0$  در فرکانس- ضخامت 5 MHz.mm استفاده کردند. گریو و همکارانش [8] برای بازرسی ورق‌ها از مدهای مختلف امواج هدایت‌شونده در فرکانس‌های بالا استفاده کردند. طول موجی که آنها برای آزمون‌ها استفاده کردند برای بهبود حساسیت تشخیص عیوب در محدوده طول موج متداول آزمون‌های فراصوتی قرار داشت. مسری و همکارانش [6] از مدهای  $S_0$  و  $A_0$  در فرکانس‌های بالا برای پیش‌رشد ترک

ارزیابی سازه‌های ورقی با استفاده از امواج فراصوتی هدایت‌شونده معمولاً با انتشار یک مد معین و اندازه‌گیری زمان پرواز تا دریافت پاسخ از ناپیوستگی موجود در سازه انجام می‌شود. برای ساده کردن تفسیر داده‌های بدست آمده و کاهش خطای اندازه‌گیری، این آزمون‌ها عموماً در محدوده فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس قطع مدهای بالا انجام می‌شوند [1]. تئوری امواج هدایت‌شونده در ورق‌های همسانگرد و برخی کاربردهای بازرسی با استفاده از این امواج توسط رز [2] مورد بررسی قرار گرفت. موزر و همکارانش [3] نتایج حاصل از حل تحلیلی معادلات حاکم بر انتشار امواج هدایت‌شونده و نتایج حاصل از حل المان محدود این معادلات را با یکدیگر مقایسه نمودند. فونگ [4] به بررسی و مطالعه تاثیر مسیرهای منحنی بر امواج هدایت‌شونده پرداخت. صداقتی و همکارانش [5] با بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی این امواج با استفاده از روش اجزاء

ریلی- لمب<sup>۲</sup> [14] بدست می‌آید که بیان کننده سرعت انتشار امواج در ورق بر حسب مشخصات هندسی و فیزیکی سازه برای مدهای متقارن و پادمقارن با مرتبه‌های مختلف است. بیان این معادلات به صورت تغییرات سرعت فاز و سرعت گروه موج بر حسب فرکانس برای مدهای مختلف به صورت منحنی پاشندگی<sup>۳</sup> ترسیم می‌شود. در شکل (۱) منحنی‌های سرعت فاز و سرعت گروه برای یک ورق فولادی ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود این منحنی‌ها عمدتاً بصورت تغییرات سرعت فاز و سرعت گروه بر حسب حاصل ضرب فرکانس موج در ضخامت ورق،  $f.d$  بیان می‌شوند. همچنین همانگونه که ملاحظه می‌شود در فرکانس‌های پایین‌تر عمدتاً فقط دو مد  $S_0$  و  $A_0$  در ورق تولید می‌شود درحالی‌که در فرکانس‌های میانی موج علاوه بر این دو مد،



شکل ۱- الف: سرعت فاز و ب: سرعت گروه مدهای مختلف در یک ورق فولادی

خستگی بصورت آزمایشگاهی استفاده کردند. چن و همکارانش [9] از تحریک مدهای پایه  $A_0$  و  $S_0$  در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس قطع برای پایش رشد ترک خستگی در یک ورق چندلایه استفاده کردند. مسری و همکارانش [10] با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود از برهم‌نهی مدهای  $A_0$  و  $S_0$  فرکانس بالا برای تشخیص عیوب در یک سازه آلومینیومی چندلایه استفاده کردند. چوپرین [11] با بهره‌گیری از تخمین‌های آزمایشگاهی و تحلیل منابع خطا برای تعیین فاصله لازم برای تولید مدهای پایه در فرکانس‌های  $1.8 \text{ MHz}$  و  $2.5 \text{ MHz}$  بهره گرفت. خوشه مدهای مرتبه بالای (HOMC) امواج هدایت‌شونده<sup>۱</sup> که دارای رفتاری غیرپاشنده هستند توسط جایارامان و همکارانش [12] با استفاده از روش اجزاء محدود در یک ورق آلومینیومی در محدوده فرکانس-ضخامت  $15 \text{ MHz.mm}$  تا  $35 \text{ MHz.mm}$  مورد مطالعه قرار گرفت. ردی و همکارانش [13] با شبیه‌سازی تاثیر متقابل خوشه مدهای مرتبه بالای محوری امواج هدایت‌شونده بر روی عیوب شبیه‌سازی شده شیار، با اندازه‌گیری ضریب بازتابش موج از شیار در عمق‌های مختلف امکان تخمین عمق عیب را مورد بررسی قرار دادند.

در بازرسی سازه‌های با طول زیاد، عموماً بر اساس مشخصات سازه و سیستم بازرسی از یک روش سیستماتیک برای انتخاب مد و طراحی تراگذار استفاده می‌شود. با این وجود به دلیل استفاده از طول موج بالا برای افزایش طول بازرسی، حساسیت آزمون پایین آمده و محدود می‌شود. در این مقاله با مطالعه رفتار و مشخصات انتشار مدهای  $A_1$  و  $S_1$  در محدوده فرکانس‌های بالا، امکان استفاده از مدهای مرتبه بالا در محدوده فرکانس‌های بالا برای بازرسی فاصله‌های کوتاه با حساسیت بالا بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲- انتشار امواج هدایت‌شونده در ورق‌ها

دو دسته موج فراصوتی می‌تواند در ورق‌های کشسان منتشر شود، امواج لمب و امواج برشی با پلاریزاسیون افقی. با حل معادلات موج و اعمال فرض کرنش صفحه‌ای، معادله فرکانسی مربوط به این سازه‌ها به صورت معادله

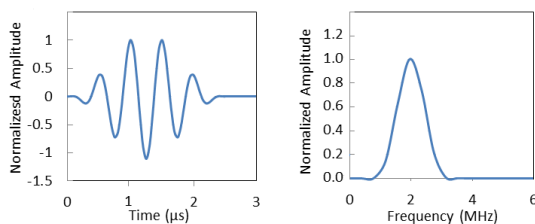
<sup>2</sup> Rayleigh-Lamb equation

<sup>3</sup> dispersion curve

<sup>1</sup> higher order modes cluster guided waves

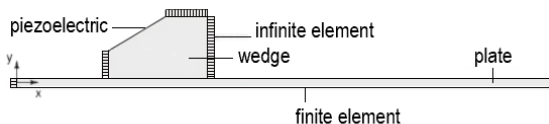
نقطه در هر سیکل استفاده شود. همچنین برای دستیابی به یک قابلیت تفکیک فضایی مناسب ۲۰ گره در هر طول موج پیشنهاد می‌شود [16].

برای شبیه‌سازی تحریک تراگذار پیزوالکتریک، از یک تابع فشار تون-برست<sup>۳</sup> با پنجره‌گذاری هنینگ<sup>۴</sup> ۵ سیکل و فرکانس میانی 2 MHz استفاده شده است. در شکل (۲) سیگنال زمانی و طیف فرکانسی را برای سیگنالی با تعداد سیکل ۵ و فرکانس مرکزی 2 MHz نشان داده شده است.



شکل ۲- سیگنال زمانی و طیف فرکانسی

در شکل (۳) شماتیک ساختار هندسی مسئله و چگونگی قرارگیری پروب زاویه‌ای برای انجام آزمون و المان بندی مربوطه نشان داده شده است.



شکل ۳- شماتیک هندسه مسئله و ساختار آزمون

برای جلوگیری از بازتابش موج و ایجاد اکوهای نامربوط بر روی دیواره کفشک از المان نامحدود CINPE4 استفاده شده است. در سطح تماس کفشک و ورق گره‌ها ادغام شده‌اند. شکل (۳) را ببینید. با به کارگیری این المان نامحدود از بازتابش امواج و تبدیل مد در لبه سمت چپ ورق نیز جلوگیری می‌شود، برای شبیه‌سازی خاصیت جذب کفشک پلکسی گلاس<sup>۵</sup> با اعمال میرایی تناسبی سختی و جرمی، از میرایی ریلی برای شبیه‌سازی خاصیت

دو مد S1 و A1 نیز تولید شده و با افزایش فرکانس مدهای مراتب بالاتر A2 و S2 نیز در ورق تولید و منتشر خواهند شد. لذا در آزمون‌های متداول با استفاده از امواج فراصوتی هدایت‌شونده که عموماً از پروب‌های فرکانس پایین به منظور کاهش استهلاک موج و افزایش طول بازرسی استفاده می‌شود، مدهای پایه معمولاً مدهای پایه S0 و A0، در نواحی فرکانسی که رفتار مد غیرپاشنده است، مورد توجه قرار می‌گیرد.

برای تولید مدهای مختلف امواج هدایت‌شونده، می‌توان از تابش مایل موج فراصوتی با زاویه معین، مطابق قانون اسنل<sup>۱</sup>، بر اساس سرعت فاز هر مد برای فرکانس پروب و ضخامت ورق مورد آزمون استفاده کرد.

### ۳- مدلسازی اجزاء محدود

مطالعه و بررسی مشخصات و رفتار مدهای مختلف امواج هدایت‌شونده در ورق با استفاده از روش اجزاء محدود انجام می‌شود. انتشار موج در یک سازه ورقی بر اساس فرمولاسیون دینامیکی صریح<sup>۲</sup> با استفاده از نرم افزار ABAQUS/Explicit شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی با استفاده از یک مدل دوبعدی و با فرض انتشار موج کرنش-صفحه‌ای انجام می‌گیرد. بدین منظور از المان‌های CPE4R چهار گرهی برای المان‌بندی ساختار یافته بهره گرفته می‌شود. برای اطمینان از همگرایی نتایج قابلیت تفکیک زمانی و فضایی مدل المان محدود باید مورد توجه قرار گیرد. برای جلوگیری از ناپایداری عددی، ABAQUS/Explicit حد پایداری برای گام‌های زمانی انتگرال‌گیری را بصورت زیر پیشنهاد می‌کند [15]:

$$\Delta t \leq L_{min}/c_L \quad (1)$$

بطوریکه  $L_{min}$  کوچکترین بعد المان‌ها است. در مدلسازی انتشار موج، گام‌های زمانی انتگرال‌گیری و ابعاد المان باید بر اساس فرکانس بیشینه،  $f_{max}$ ، نیز بررسی و انتخاب گردند. برای گام زمانی انتگرال‌گیری، بر اساس یک قاعده محافظه کارانه پیشنهاد می‌شود در بالاترین فرکانس از ۲۰

<sup>3</sup> tone-burst

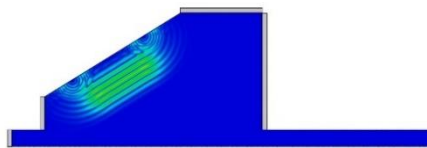
<sup>4</sup> Hanning windowing

<sup>5</sup> Plexi-glass wedge

<sup>1</sup> Snell's law

<sup>2</sup> explicit dynamic formulation

برای تولید امواج هدایت‌شونده در یک ورق فولادی با ضخامت 2 mm، ناحیه سایه زده شده در شکل (۱)، در چهار مد مختلف S0، A0، S1 و A1 تولید خواهد شد. برای تولید مدهای A1 و S1، مطابق قانون اسنل، کفشک پلکسی گلاس به ترتیب با زاویه‌های 32° و 28° مدل‌سازی می‌شود [18]، بطوریکه صفحه پیزوالکتریک فعال به صورت تحریک فشار تون-برست ۵ سیکل با فرکانس مرکزی 2 MHz، مطابق شکل (۲)، بر روی ضلع مورب آن اعمال شده است. موج طولی منتشر شده در کفشک پلکسی گلاس در شکل (۵) نشان داده شده است. برخورد موج طولی با سطح مشترک کفشک و ورق، به ترتیب موجب تولید مدهای A1 و S1 در ورق فولادی می‌شود. استفاده از المان‌های نامحدود بر روی وجه‌های کفشک پلکسی گلاس و اعمال خاصیت میرایی کفشک موجب کاهش انعکاس و تبدیل مد امواج در درون کفشک و کاهش اکوهای نامربوط و بهبود کیفیت سیگنال دریافتی می‌شود.



شکل ۵- مدل‌سازی تولید موج طولی در کفشک پلکسی گلاس و تابش امواج به ورق فولادی

در شکل (۶) توزیع تنش معادل فون-مایرز بر روی ساختار موج منتشر شده به همراه توزیع جابجایی ورق در دو مد پایه A1 و S1 نشان داده شده است. همچنین مولفه‌های در-صفحه<sup>۳</sup> و خارج-از-صفحه<sup>۴</sup> جابجایی مربوط به این دو مد برای نقطه‌ای بر روی سطح ورق و در فاصله 100 mm از لبه ورق در شکل (۷) نشان داده شده است. مقایسه تنش فون-مایرز مدهای A1 و S1 در شکل (۶) نشان می‌دهد که درحالی‌که در مد S1 انرژی موج بر روی سطح ورق گسترش یافته است، در مد A1 این توزیع عمدتاً بصورت زیر سطحی است. بنابراین انتظار می‌رود که مدهای مرتبه بالاتر S1 و A1 به ترتیب نسبت به عیوب سطحی و زیرسطحی دارای حساسیت بالاتری باشند.

<sup>3</sup> in-plane

<sup>4</sup> out-of-plane

جذب کفشک پلکسی گلاس استفاده می‌شود [17]. مشخصات مواد استفاده شده در مدل اجزاء محدود در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مواد

| Material    | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $E$ (GPa) | $\nu$ |
|-------------|-----------------------------|-----------|-------|
| Steel       | 7800                        | 207       | 0.3   |
| Plexi-glass | 1180                        | 5.5       | 0.35  |

#### ۴- تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام تست‌های آزمایشگاهی از یک دستگاه عیب یاب GE برای تحریک پروب در آزمون استاندارد بازتابی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. امواج فراصوتی هدایت‌شونده با استفاده از یک پروب 2 MHz زاویه متغیر کروتکرم<sup>۲</sup> (به عنوان فرستنده و گیرنده) در قطعه ایجاد می‌شود. آزمایش‌های مربوطه بر روی یک ورق فولادی با ضخامت 2 mm، عرض 400 mm و طول 1000 mm انجام شده است. شکل (۴) را ببینید. با به کارگیری روش بازتابی استاندارد، مشخصات و رفتار انتشار موج و دقت اندازه‌گیری در هر مد مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۴- نحوه قرارگیری پروب زاویه متغیر بر روی سطح ورق فولادی

#### ۵- نتایج و بحث

به منظور بررسی رفتار و مشخصات مدهای پایه و مدهای مرتبه بالاتر امواج هدایت‌شونده، یک ورق فولادی با ضخامت 2 mm و طول 500 mm مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی منحنی پاشندگی ورق فولادی، شکل (۱)، نشان می‌دهد با به کارگیری یک تراگذار 2 MHz

<sup>1</sup> pulse-echo

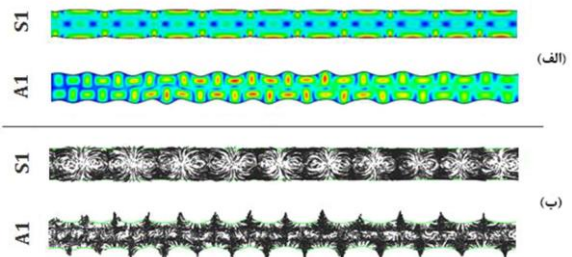
<sup>2</sup> Krautkramer



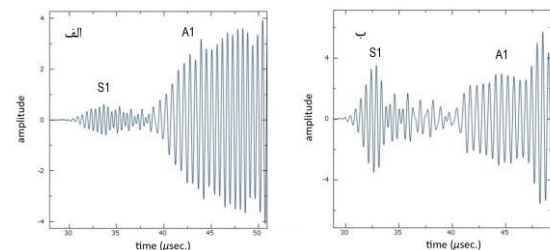
موقعیت پروب محاسبه شده است. اندازه‌گیری‌ها بر مبنای نقطه میانی اکوی دریافتی در هر مد انجام شده است.

در جدول ۴ زمان دریافت اکوهای مربوط به مد S1 در فاصله‌های 20 mm تا 100 mm با گام‌های 20 mm نشان داده شده است. همچنین در این جدول خطای نسبی فاصله اندازه‌گیری شده با استفاده از این مد در هر موقعیت پروب بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی محاسبه شده است. در شکل (۹) خطای نسبی اندازه‌گیری مربوط به مدهای A1 و S1 برای موقعیت‌های 20 mm تا 100 mm پروب با گام‌های 20 mm با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برای هر دو مد A1 و S1 خطای نسبی اندازه‌گیری با افزایش فاصله پروب از لبه ورق تا میزان معینی کاهش می‌یابد. با مقایسه خطای اندازه‌گیری در این دو مد، ملاحظه می‌شود که خطای اندازه‌گیری مد S1 برای همه موقعیت‌های پروب، از خطای اندازه‌گیری مد A1 کمتر است. این خطا برای مد S1 در موقعیت 20 mm پروب برابر 10.6% است که با افزایش فاصله پروب از لبه ورق تا میزان 5.6% در فاصله 100 mm کاهش می‌یابد. در حالیکه بیشترین خطای مد A1 در موقعیت 20 mm پروب نسبت به لبه ورق 26.4% است که تا 13.7% در موقعیت 100 mm کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در مرجع [14] بیانگر مطابقت مناسب نتایج حاصل از خطای اندازه‌گیری مدهای مربوطه در موقعیت 100 mm پروب نسبت به لبه ورق دارد. ارزیابی نتایج عددی و آزمایشگاهی دو مد S1 و A1 در فرکانس 2 MHz نشان می‌دهد، برای ارزیابی فواصل کوتاه تا طول‌های حدود 100 mm، با وجود رفتار پاشنده مد S1، خطای نسبی اندازه‌گیری در این مد در محدوده کمتر از 10٪ قرار دارد که با توجه به بالا بودن فرکانس امواج که منجر به بهبود حساسیت آزمون خواهد شد، این درصد خطای اندازه‌گیری در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

همچنین بررسی دامنه مولفه‌های در-صفحه و خارج-از-صفحه جابجایی مدهای A1 و S1 در شکل (۷) نشان می‌دهد که در حالیکه در مد A1 مولفه در-صفحه جابجایی نسبت به مولفه خارج-از-صفحه جابجایی غالب‌تر است، در مد S1 بخش عمده جابجایی بصورت جابجایی خارج-از-صفحه رخ می‌دهد.

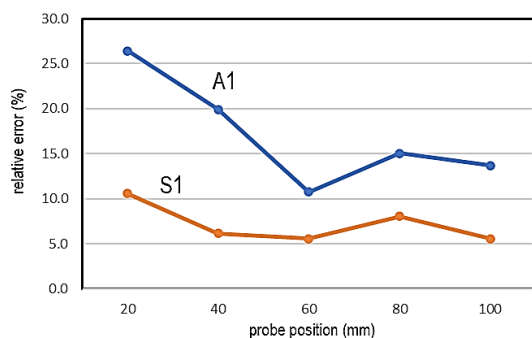


شکل ۶- الف) توزیع تنش معادل فون-مابیز و ب) توزیع جابجایی برآیند در مدهای S1 و A1 در فرکانس-ضخامت 4 MHz.mm

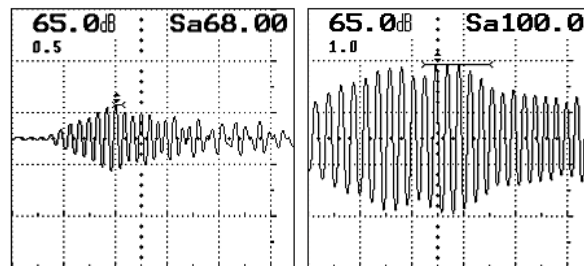


شکل ۷- جابجایی نقطه‌ای بر روی سطح ورق در مدهای A1 و S1، الف: مولفه جابجایی در-صفحه ب: مولفه جابجایی خارج-از-صفحه در فاصله 100 mm از لبه ورق

به منظور بررسی آزمایشگاهی خطای اندازه‌گیری حاصل از این دو مد، پروب زاویه متغیر بر روی سطح ورق فولادی قرار داده شده و اندازه‌گیری‌ها با فاصله‌های 20 mm و برای موقعیت قرارگیری در محدوده فاصله‌ای 20 mm تا 100 mm از لبه ورق انجام می‌گیرد. مدهای S1 و A1 با تابش موج فراصوتی با استفاده از پروب زاویه متغیر در ورق تولید شده و اکوهای بازتابیده شده از لبه ورق ثبت می‌شوند. زمان دریافت اکوهای مربوط به مد A1 در فاصله‌های 20 mm تا 100 mm با گام‌های 20 mm بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی در جدول ۳ نشان داده شده است. خطای نسبی فاصله اندازه‌گیری شده با استفاده از این مد در هر



شکل ۹- خطای اندازه‌گیری حاصل از نتایج آزمایشگاهی مدهای A1 و S1 برای موقعیت‌های مختلف پروب نسبت به لبه ورق



شکل ۸- سیگنال آزمایشگاهی مدهای A1 و S1 با قرارگیری پروب در فاصله 100 mm از لبه ورق

جدول ۳- مقادیر خطای نسبی حاصل از روش اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی برای مد A1

| position (mm) | time ( $\mu$ sec) |      | relative error (%) |      |
|---------------|-------------------|------|--------------------|------|
|               | experiment        | FEM  | experiment         | FEM  |
| 20            | 17.5              | 16.7 | 26.4               | 20.7 |
| 40            | 33.2              | 32.6 | 19.9               | 17.8 |
| 60            | 46.0              | 46.9 | 10.8               | 12.9 |
| 80            | 63.7              | 62.0 | 15.1               | 12.0 |
| 100           | 78.7              | 76.8 | 13.7               | 11.0 |

جدول ۴- مقادیر خطای نسبی اندازه‌گیری حاصل از روش اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی برای مد S1

| position (mm) | time ( $\mu$ sec) |      | relative error (%) |      |
|---------------|-------------------|------|--------------------|------|
|               | experiment        | FEM  | experiment         | FEM  |
| 20            | 8.9               | 8.8  | 10.6               | 9.34 |
| 40            | 15.1              | 17.4 | 6.2                | 8.1  |
| 60            | 22.8              | 25.8 | 5.6                | 6.9  |
| 80            | 29.6              | 33.8 | 8.1                | 5.0  |
| 100           | 38.0              | 38.4 | 5.6                | 4.6  |

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری  
در این مقاله قابلیت استفاده از مدهای مرتبه بالاتر امواج هدایت‌شونده برای بازرسی عیوب در سازه‌های ورقی در فاصله‌های کوتاه برای دستیابی به حساسیت بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور از شبیه‌سازی اجزاء محدود با استفاده از المان‌های محدود و نامحدود برای شناسایی خصوصیات و مشخصات مدهای A1 و S1 در محدوده فرکانس‌های بالا استفاده گردید. سپس خطای نسبی اندازه‌گیری این مدها با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی با به کارگیری یک پروب زاویه متغیر 2 MHz بر روی یک ورق فولادی با ضخامت 2 mm مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد استفاده از مد S1 برای بازرسی فواصل کوتاه (بین 20 تا 100 mm) در محدوده فرکانس-ضخامت 4 MHz.mm، خطای نسبی اندازه‌گیری در محدوده کمتر از 10٪ خواهد داشت که با توجه به بالا بودن فرکانس امواج امکان بهبود حساسیت آزمون در تشخیص و اندازه‌گیری عیوب را فراهم خواهد کرد.

- [10] Masserey, B., Raemy, C., Fromme, P. (2014). High frequency guided ultrasonic waves for hidden defect detection in multi-layered aircraft structures. *Ultrasonics* 54, 1720–1728.
- [11] Chuprin, V.A. (2013). An experimental study of the characteristics of the acoustic field of zero normal plate modes. *Acoust. Phys.* 59, 115–125.
- [12] Jayaraman, C., Krishnamurty, C.V., Balasubramaniam, K., (2009). Higher order modes cluster (HOMC) guided waves- A new technique for NDT inspection. In: *AIP Conference Proceedings 1096*, (pp 121-128).
- [13] Reddy, S.H., Rajagopal, P., C.V., Balasubramaniam, K., Dixon, S. (2017). Interaction of higher order modes cluster (HOMC) guided waves with notch-like defects in plates. In: *AIP Conference Proceedings 1806*, 030015.
- [14] Rose, J.L. (2014). *Ultrasonic guided waves in solid media*, Cambridge University Press.
- [15] Bartolia, I., Lanza di Scalea, F., Fateh, M., Viola, E. (2005). Modeling guided wave propagation with application to the long-range defect detection in railroad tracks. *NDT&E Int.*, 38, 325–334.
- [16] Mosera, F., Jacobsa, L.J., Qub, J. (1999). Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. *NDT and E Int.* 32, 225–234.
- [17] سید حیات غیب، ب؛ سوداگر، س. (۱۳۹۵) بررسی انتشار امواج فراصوتی در اندازه‌گیری عیوب صفحه‌ای با استفاده از المان‌های نامحدود. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۶، شماره ۱۱، ص ۲۱۰-۲۱۶.
- [18] Ranjbar Naserabadi, M.J., Sodagar, S. (2017). Ultrasonic high frequency lamb waves for evaluation of plate structures”, *Acoustical Physics*, 63, 402-409.

## ۷- منابع

- [1] Wilcox, P.D., Lowe, M.J., and Cawley, P. (2001). Mode and transducer selection for long range lamb wave inspection. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 12 (8), 553–565.
- [2] Rose, J.L. (2002). A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential. *J. Pressure Vessel Technol.*, 124 (3), 273– 282.
- [3] Moser, F., Jacobs, L.J., Q, J. (1999). Modeling of elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. *NDT&E Int.*, 32, 225-234.
- [4] Fong, K.L.J. (2005). A study of curvature effects on guided elastic waves. PhD dissertation, Imperial College, London.
- [۵] صداقتی، ع؛ هنرور، ف؛ سینکلی، آ. (۱۳۹۵) مطالعه پراکندگی امواج لمب از یک سوراخ استوانه‌ای با استفاده از روش اجزاء محدود و آزمون تجربی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۶، شماره ۱۲، ص ۳۹۵-۴۰۴.
- [6] Masserey, B., Fromme, P. (2013). Fatigue crack growth monitoring using high-frequency guided waves. *Struct. Health Monitor.*, 12, 484–493.
- [7] Terrien, N., Osmont, D., Royer, D. Lepoutre, F., Déom, A. (2007). A combined finite element and modal decomposition method to study the interaction of Lamb modes with micro-defects. *Ultrasonics*, 46, 74–88.
- [8] Greve, D.W., Zheng, P., Oppenheim, I.J. (2008). The transition from Lamb waves to longitudinal waves in plates. *Smart Mater. Struct.* 17, 035029.
- [9] Chan, H., Masserey, B., Fromme, P. (2015). High frequency guided ultrasonic waves for hidden fatigue crack growth monitoring in multi-layer model aerospace structures. *Smart Mater. Struct.* 24, 025037.