

شناسایی عیوب سطحی و زیرسطحی سازه بر اساس انتشار امواج لم

مهیار قمری^۱ و محمد طاهای ابدی^۲

پژوهشگاه هوافضا

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۱/۳۱)

چکیده

در این مقاله امواج لم ایجاد شده با تحریک لایه پیزوالکتریک متصل به سازه برای شناسایی عیوب سطحی و زیرسطحی استفاده می‌شود. لایه پیزوالکتریک در لحظه اولیه به صورت محرک عمل می‌کند تا امواج لم را در سازه ایجاد کند و سپس این لایه پیزوالکتریک به عنوان حسگری عمل می‌کند تا انعکاس امواج لم از سطوح مختلف سازه را شناسایی کند. مدل اجزای محدودی برای تحلیل پاسخ لایه پیزوالکتریک و سازه تحت اثر سیگنال تحریک ارائه می‌شود و انتشار دو دسته امواج لم متقارن و پادمقارن در سازه شبیه‌سازی می‌شود که با سرعت‌های مختلف نسبت به یکدیگر منتشر می‌شوند. انعکاس امواج لم در اثر برخورد با سطوح خارجی سازه یا سطوح عیوب داخلی آن با استفاده از مدل ارائه شده شناسایی می‌شود. عملکرد این روش برای سازه با یک یا دو شیار عرضی بررسی می‌شود که پهنای شیارها در مقایسه با ابعاد سازه بسیار کوچک است تا ترک عرضی در سازه را شبیه‌سازی کند. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که امواج لم ایجاد شده نسبت به این شیارهای عرضی بسیار حساس بوده و از انعکاس‌های آن می‌توان با دقت مناسبی موقعیت عیوب سطحی و داخلی سازه را شناسایی کرد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل سلامت سازه، امواج لم، امواج الاستیک، پیزوالکتریک، تحلیل اجزای محدود

Identification Surface/Subsurface Structural Damages Based on Lamb Wave Propagation

M. Ghamari, M. Tahaye Abadi

Aerospace Research Institute

(Received: 27 August, 2011; Accepted: 20 April, 2013)

ABSTRACT

The paper concerns with the identification of the surface and subsurface defects based on Lamb wave generation and propagation in a structure with piezoelectric wafer active sensor. The piezoelectric wafer acts as an actuator at the initial instant for Lamb wave generation and then as sensor to monitor Lamb waves reflected from different surfaces of the structure. A finite element model is developed to analyze the response of the structure and piezoelectric wafer subjected to initial activation signal. The model simulates the generation of Lamb waves which are divided into symmetric and anti-symmetric waves propagating with different velocities. The reflection of Lamb waves from exterior surfaces of the structure or the surfaces of the defects are identified using the present model. The performance of the damage identification procedure is evaluated for a plate structure with single or multiple transverse grooves whose dimensions are very small compared to structural dimensions in order to simulate the transverse cracks in the structure. The results have shown that Lamb waves are very sensitive to transverse grooves and determine the location of transverse damages with a reasonable accuracy.

Keywords: Structural Health Monitoring, Lamb Waves, Elastic Waves, Piezoelectric, Finite Element Analysis

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): abadi@ari.ac.ir

۱- مقدمه

آشکارسازی سلامت سازه‌های هوافضایی در حین سرویس‌دهی آنها اهمیت زیادی دارد و علاوه بر کاهش احتمال حوادث ناشی از شکست سازه و افزایش قابلیت اطمینان، زمان بازرسی تجهیزات را کاهش می‌دهد. ایجاد امواج الاستیک در سازه با استفاده از لایه‌های پیزوالکتریک و بررسی نحوه انتشار امواج الاستیک در سازه یکی از روش‌هایی است که بدون نیاز به جداسازی قطعات از تجهیزات می‌تواند موقعیت عیوب احتمالی در آنها را شناسایی کند. این قابلیت موجب شده است در سال‌های اخیر توجه زیادی به استفاده از این روش در صنایع مختلف به‌ویژه صنایع هوافضایی شود تا از وقوع حوادث ناگوار ناشی از عدم اطلاع از عیوب سازه جلوگیری شود.

امواج لم^۱ نوعی از امواج فراصوت الاستیک هستند که بین دو سطح آزاد موازی مانند سطوح بالایی و پایینی ورق منتشر می‌شوند. امواج لم با تغییر شکل ورق در دو حالت متقارن و پادمقارن نسبت به سطح میانی ورق منتشر می‌شود که هر دو حالت می‌توانند همزمان وجود داشته باشند [۱]. در این تحقیق امواج لم با استفاده از لایه پیزوالکتریک ایجاد می‌شود که به سطح سازه متصل شده است. اعمال ولتاژ به سطوح الکترود پیزوالکتریک موجب تغییر شکل سازه شده که این تغییر شکل در سازه منتشر می‌شود. تحقیقات پیشین نشان داده است [۲ و ۳] سرعت انتشار امواج لم به فرکانس تحریک وابسته است. بنابراین اگر سیگنال تحریک فقط در یک فرکانس معین دارای تبدیل فوریه مخالف با صفر باشد، شکل موج اولیه بدون پراکندگی^۲ و حفظ شکل موج اولیه در سازه گسترش می‌یابد [۴ و ۵].

معمولاً لایه‌های پیزوالکتریک برای ایجاد و اندازه‌گیری دامنه امواج لم در نقاط مختلف استفاده می‌شود که کرنش مکانیکی و میدان الکتریکی در آنها اثر متقابل بر یکدیگر دارند [۶]. وجود عیب در سازه باعث تغییر در نحوه انتشار امواج لم می‌شود و موقعیت عیوب را می‌توان با بررسی تغییر در نحوه انتشار امواج لم تعیین کرد [۷-۹]. امواج لم متقارن و پادمقارن به صورت مجزا موقعیت عیوب در سازه را تعیین می‌کنند که استفاده از نتایج به دست آمده از دو نوع امواج لم باعث افزایش دقت در تعیین موقعیت عیوب می‌شود [۱۰ و ۱۱]. تاکنون روش‌های مختلفی برای ایجاد و انتشار امواج لم در سازه بیان شده و نیاز است روشی برای شبیه‌سازی انتشار امواج لم و اثر عیوب داخلی بر نحوه انتشار این امواج بیان شود. از طرف دیگر نیاز است

روشی برای تفسیر نتایج تحلیل برای شناسایی موقعیت و شدت عیوب بیان شود [۱۲-۱۴]. در مطالعات آزمایشگاهی پیشین [۳ و ۱۲]، حسگرهای پیزوالکتریک بر روی سازه نصب شده تا دامنه امواج عبوری از سازه شناسایی و ثبت شود و مدت زمان لازم برای انتشار امواج نسبت به زمان تحریک سازه تعیین شود. اطلاعاتی درباره وجود عیوب در سازه از نتایج به دست آمده توسط حسگرها استخراج می‌شود. امواج لم در اثر برخورد با سطوح خارجی سازه یا سطوح عیوب احتمالی منعکس می‌شود. سرعت انتشار امواج براساس فرکانس تحریک معین است و با توجه به موقعیت لایه پیزوالکتریک، زمان لازم برای دریافت انعکاس امواج از سطوح خارجی سازه با توجه به ابعاد سازه تعیین می‌شود. اگر انعکاس‌های زودتر از موعد معین توسط لایه پیزوالکتریک حس شود، بیانگر عیوبی در سازه است که با توجه به سرعت انتشار و زمان دریافت انعکاس می‌توان موقعیت عیوب را تعیین کرد.

هدف از این مقاله ارائه روشی برای شناسایی موقعیت ترک‌های عرضی سطحی و زیرسطحی سازه براساس شبیه‌سازی انتشار امواج لم در سازه است. برای تولید امواج لم از لایه پیزوالکتریک متصل به سازه استفاده می‌شود و پس از ایجاد امواج لم، لایه پیزوالکتریک به عنوان حسگر عمل می‌کند تا انعکاس امواج لم را از سطوح مختلف شناسایی کند. در این تحقیق ابتدا معادلات حاکم بر انتشار امواج لم و معادلات حاکم بر رفتار خطی مواد پیزوالکتریک بیان می‌شود. سپس با تعریف مسئله، مدل اجزای محدودی برای ایجاد امواج لم و نحوه انتشار آن در تیر سالم و معیوب ارائه می‌شود. این مدل برای تعیین یک یا چند عیب عرضی سطحی با عمق‌های مختلف و عیوب داخلی با هندسه مختلف در تیر استفاده می‌شود.

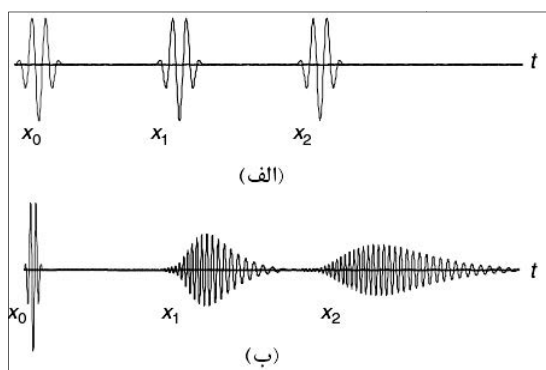
۲- روش ایجاد امواج لم

در مقاله حاضر اثر متقابل بین کرنش مکانیکی و میدان الکتریکی در مبدل‌های پیزوالکتریک برای ایجاد و بررسی نحوه انتشار امواج لم در نظر گرفته می‌شود، به طوری که میدان الکتریکی متناوبی در جهت ضخامت لایه پیزوالکتریک برای تحریک سازه در مدت زمان کوتاهی اعمال شده و سپس از مبدل پیزوالکتریک برای شناسایی امواج انعکاسی و اندازه‌گیری دامنه امواج در محل اتصال آنها به سازه استفاده می‌شود. اعمال ولتاژ به مبدل پیزوالکتریک موجب تغییر ضخامت و طول همزمان آن می‌شود. تحریک محرک پیزوالکتریک متصل به سطح سازه موجب ایجاد امواج طولی و خمشی می‌شود که از ترکیب آنها امواج لم در سازه ایجاد می‌شود. امواج لم به دو

1- Lamb Waves

2- Dispersion

سرعت انتشار امواج طولی در سازه مستقل از فرکانس سیگنال تحریک اولیه سازه است [۱] و مطابق با شکل ۲-الف، شکل موج اولیه بدون تغییر در راستای محور سازه منتشر می‌شود. اما سرعت انتشار امواج خمشی وابسته به فرکانس سیگنال تحریک است و اگر این شکل موج اولیه فرکانس‌های مختلفی داشته باشد شکل موج در حین انتشار مطابق با شکل ۲-ب تغییر می‌کند و پراکنده می‌شود.



شکل (۲): نحوه انتشار امواج، الف) بدون پراکندگی و ب) پراکنده شونده [۱].

امواج لم ماهیت مشابه با امواج خمشی دارند به طوری که اگر سیگنال تحریک ترکیبی از توابع متناوب با فرکانس‌های مختلف باشد این امواج پراکنده می‌شود. از طرفی اعمال سیگنال پیوسته متناوب با یک فرکانس معین برای بررسی انعکاس از نقاط مختلف دشوار است. برای رفع این مشکل سیگنال ولتاژ تحریک لایه پیزوالکتریک در مدت زمان محدودی طوری در نظر گرفته می‌شود که این سیگنال در فرکانس معینی دارای تبدیل فوریه مخالف با صفر باشد و مقدار دامنه آن در همسایگی این فرکانس به شدت کاهش یابد. بنابراین شکل موج با تغییر ناچیزی در سازه منتشر می‌شود. برای این منظور تغییرات ولتاژ در لایه پیزوالکتریک بدین صورت در نظر گرفته می‌شود:

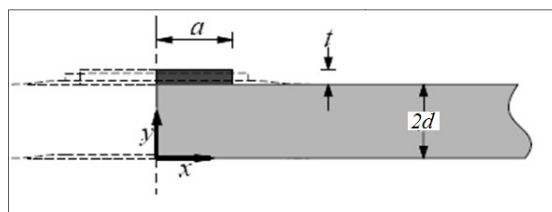
$$= \begin{cases} \sin T \sin^2 T/10 & T \leq 10 \\ 0 & T > 10 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، φ ولتاژ تحریک، ω فرکانس زاویه‌ای تحریک، φ_0 عددی ثابت و T فاصله زمانی نسبت به شروع تحریک است. شکل ۳-الف و ب سیگنال تحریک و تبدیل فوریه این سیگنال را نشان می‌دهد.

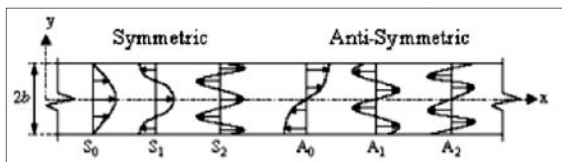
دسته متقارن و پادمقارن تقسیم می‌شود که با توجه به اینکه با سرعت‌های مختلف در سازه منتشر می‌شوند از یکدیگر پس از انتشار جدا می‌شوند. المان‌ها و زمان نمو برای شبیه‌سازی از جمله مسائل مهم در تحلیل انتشار امواج لم است. اندازه المان‌ها باید کوچک‌تر از طول موج انتخاب شود تا تغییر شکل سازه در اثر عبور امواج محاسبه شود. نمو زمانی برای تحلیل پاسخ دینامیک سازه و ماده پیزوالکتریک کوچک‌تر از دوره تناوب سیگنال تحریک در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه هر دو پارامتر به فرکانس تحریک وابسته‌اند. با کاهش مقدار نمو زمانی، دقت حل بیشتر می‌شود ولی حجم محاسبات و زمان انجام تحلیل افزایش می‌یابد.

۳- تحلیل انتشار امواج لم

امواج الاستیک در حالت کلی به سه دسته امواج طولی، پیچشی و خمشی تقسیم می‌شوند. جهت ارتعاش ذرات جسم در امواج طولی موازی با محور انتشار امواج و در امواج پیچشی و خمشی عمود بر محور انتشار امواج است. هرگاه امواج طولی و خمشی همزمان در ورق وجود داشته باشند انعکاس‌ها از سطح بالایی و پایینی ورق باعث به وجود آمدن امواج لم می‌شوند. تغییر شکل ورق در اثر امواج لم با دو حالت متقارن و پادمقارن نسبت به سطح میانی ورق منتشر می‌شود که هر دو حالت متقارن و پادمقارن می‌توانند همزمان ایجاد شوند. از آنجا که سرعت انتشار امواج متقارن و پادمقارن متفاوت است این امواج پس از ایجاد از یکدیگر جدا می‌شوند. تعداد مدهای متقارن و پادمقارن بیشتری در سازه با افزایش فرکانس تحریک ایجاد می‌شود. شکل ۱ لایه پیزوالکتریک را نشان می‌دهد که به سطح بالایی تیری متصل شده است و فقط نیمی از هندسی به علت تقارن در نظر گرفته می‌شود. محور پلاریزاسیون لایه پیزوالکتریک در راستای محور y نشان داده شده در شکل است و لایه رسانایی در سطوح فوقانی و تحتانی پیزوالکتریک ایجاد شده است. ولتاژ تحریک به سطوح رسانا اعمال می‌شود که موجب تغییر شکل لایه پیزوالکتریک در جهت ضخامت و طول آن می‌شود.

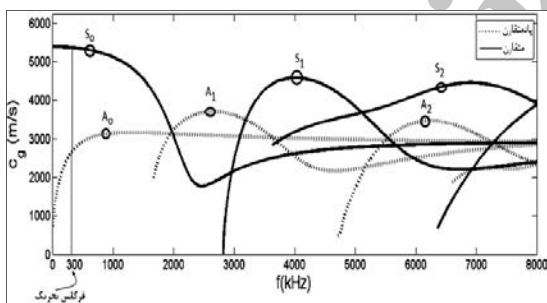


شکل (۱): هندسه تیر و لایه پیزوالکتریک متصل به سطح فوقانی تیر [۲].



شکل (۴): سه مد اول متقارن (S_0 ، S_1 و S_2) و پادمقارن (A_0 ، A_1 و A_2) امواج لم [۱].

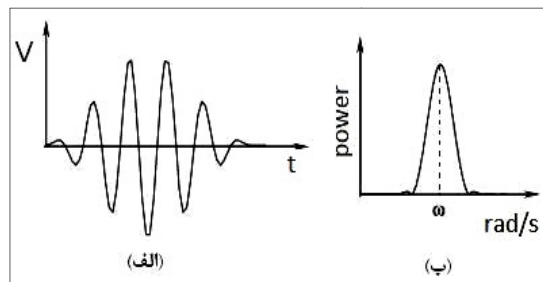
سرعت هر گروه از امواج متقارن و پادمقارن با توجه به حاصل ضرب ضخامت تیر در فرکانس تحریک تیر بیان می‌شود. نمودار شکل ۵ ارتباط بین سرعت انتشار هر گروه از امواج لم متقارن و پادمقارن در تیری از جنس آلومینیوم را برحسب فرکانس تحریک نشان می‌دهد که سرعت انتشار با C_T نشان داده شده است. مدول الاستیک آلومینیوم ۷۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳۳ و چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شده است و ضخامت تیر ۱/۵۹ میلی‌متر است. منحنی سرعت گروه‌های امواج لم برای تحلیل انتشار امواج لم اهمیت دارد زیرا علاوه بر تعیین سرعت انتشار هر گروه از امواج لم، نوع امواج ایجاد شده در سازه را برحسب فرکانس تعیین می‌کند. نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد سرعت امواج لم برخلاف امواج طولی به فرکانس وابسته است و اگر تابع تحریک در فرکانس‌های مختلف اعمال شود امواج اولیه پراکنده می‌شود.



شکل (۵): منحنی سرعت گروه‌های امواج لم متقارن و پادمقارن در ماده آلومینیومی نسبت به فرکانس تحریک.

۴- تحلیل لایه پیزوالکتریک

در تحقیق حاضر، برای تولید امواج لم در سازه از لایه پیزوالکتریکی متصل به سازه استفاده می‌شود. چگالی بار الکتریکی بر روی سطوح الکتروود مواد پیزوالکتریک وابسته به تغییر شکل آن است که موجب ایجاد میدان الکتریکی داخل پیزوالکتریک یا اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکتروودهای لایه پیزوالکتریک می‌شود. به این حالت اثر مستقیم پیزوالکتریک می‌گویند. در حالتی که ماده پیزوالکتریک تحت تأثیر میدان



شکل (۳): الف) سیگنال تحریک و ب) تبدیل فوریه سیگنال تحریک [۳].

معادله ریلی - لم برای توصیف انتشار امواج لم با فرض متقارن بودن تغییر شکل و توزیع تنش نسبت به صفحه میانی چنین بیان می‌شود [۱]:

$$\frac{\tan PD}{\tan QD} = -\frac{(2 - Q^2)^2}{4^2 PQ} \quad (2)$$

که در این معادله، d نصف ضخامت تیر، C عدد موج، c سرعت موج و ثابت‌های p و q برابرند با:

$$P^2 = \frac{2}{C_L^2} - 2, \quad (3)$$

$$Q^2 = \frac{2}{C_S^2} - 2, \quad (4)$$

که در روابط فوق، C_L و C_S به ترتیب بیانگر سرعت امواج طولی و برشی هستند که بدین صورت محاسبه می‌شوند:

$$C_L = \sqrt{\frac{1 - \frac{E}{2(1 + \nu)}}{1 - 2\nu}}, \quad (5)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{1 - \frac{E}{2(1 + \nu)}}{2(1 + \nu)}}, \quad (6)$$

در این روابط، E مدول الاستیسیته، ν نسبت پواسون و ρ چگالی تیر است. سرعت انتشار امواج متقارن برحسب فرکانس تحریک از معادله (۲) محاسبه می‌شود. معادله ریلی - لم برای توصیف سرعت انتشار امواج لم با اعمال شرایط تغییر شکل و توزیع تنش پادمقارن نسبت به صفحه میانی چنین است:

$$\frac{\tan PD}{\tan QD} = -\frac{4^2 PQ}{(2 - Q^2)^2} \quad (7)$$

معادلات (۲) و (۷) یک دسته جواب دارند که متناظر با هر جواب، امواج متقارن و پادمقارن تعیین می‌شود. تعدادی از مدهای متقارن و پادمقارن امواج لم در شکل ۴ نشان داده شده است.

مسائل کوپل میدان الکتریکی و میدان تغییر شکل را تحلیل کرد. در نتیجه نمی‌توان از روش صریح برای تحلیل همزمان تغییر شکل سازه و مبدل پیزوالکتریک متصل به آن استفاده کرد و برخی از پژوهشگران [۲ و ۳] برای حل این مشکل مبدل پیزوالکتریک را از سازه جدا کردند و نیروهای معادل در محل اتصال آن به سازه در نظر گرفتند که مقدار نیروهای معادل در تحلیل جداگانه‌ای محاسبه می‌شود. ولی در روش حل دینامیک ضمنی این مشکل برای تحلیل مواد پیزوالکتریک وجود ندارد و می‌توان میدان جابه‌جایی و میدان الکتریکی مبدل پیزوالکتریک را به صورت همزمان تعیین کرد. در تحقیق حاضر از اعمال مستقیم ولتاژ توسط لایه پیزوالکتریک به سازه استفاده می‌شود. در نتیجه برای حل معادلات از روش دینامیک ضمنی استفاده می‌شود. فرض می‌شود مبدل‌های پیزوالکتریک اتصال کاملی به سازه دارند و از اثر میرایی صرف‌نظر می‌شود.

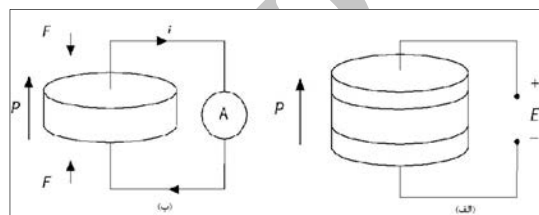
۶- مدل اجزای محدود

تیری از جنس آلومینیوم با خواص مکانیکی ارائه شده در بخش قبل بررسی می‌شود که طول و ضخامت آن به ترتیب ۶۰۰ و ۱/۵۹ میلی‌متر است. لایه پیزوالکتریک نوع PZT4 با طول و ضخامت به ترتیب ۶/۴ و ۰/۶۴ میلی‌متر است که به سطح فوقانی سازه متصل می‌شود. در این تحقیق ماده پیزوالکتریک به صورت ماده الاستیک همسانگرد عرضی در نظر گرفته شده است که مشخصات آن برای پیزوالکتریک PZT4 در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): خصوصیات ماده PZT4 [۵].

$E_1 = E_2 = 78/74$	مدول الاستیسیته (GPa)
$E_3 = 62/5$	
$\nu_{13} = \nu_{31} = 0/45$	نسبت پواسون
$\nu_{12} = 0/29$	
$\rho = 7500$	دانسیته (KG/M^3)
$D_{13} = D_{23} = 4/1$	ثابت‌های پیزوالکتریک (M/V)
$D_{33} = 14/1$	
$D_{31} = D_{32} = 10/5$	
$\epsilon_{11} = 7/12 \times 10^{-9}$	ثابت‌های دی‌الکتریک (F/M)
$\epsilon_{22} = 7/12 \times 10^{-9}$	
$\epsilon_{33} = 5/84 \times 10^{-9}$	

الکتریکی باشد تغییر شکل می‌دهد که به این حالت اثر معکوس پیزوالکتریک می‌گویند. در شکل ۶-الف و ب به ترتیب اثر معکوس و مستقیم پیزوالکتریک نشان داده شده است. اگر مواد پیزوالکتریک به صورت حسگر باشند از اثر مستقیم استفاده می‌شود و اگر مواد پیزوالکتریک به صورت عملگر باشند از اثر معکوس استفاده می‌شود. لایه پیزوالکتریک متصل به سازه می‌تواند در لحظه اولیه به صورت محرک عمل کند تا امواج الاستیک را در سازه ایجاد کند و سپس این لایه پیزوالکتریک به عنوان حسگر عمل می‌کند تا امواج الاستیک انعکاسی از قسمت‌های مختلف سازه را شناسایی کند.



شکل (۶): رفتار ماده پیزوالکتریک، الف) اثر معکوس و ب) اثر مستقیم.

معادله مشخصه حاکم بر رفتار خطی مواد پیزوالکتریک بدین صورت بیان می‌شود [۸]:

$$S_{IJ} = S_{IJKL}^E T_{KL} + D_{KIJ} E_K \quad (9)$$

$$D_J = D_{JKL} T_{KL} + T_{JK}^T E_K \quad (10)$$

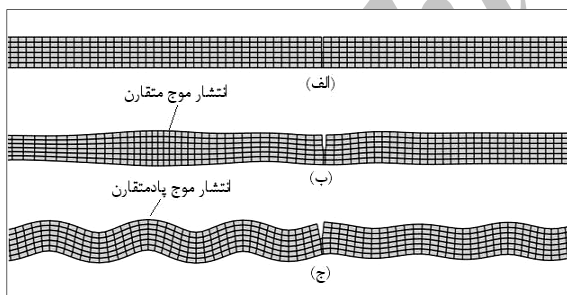
که در روابط فوق، S_{IJ} بیانگر مؤلفه‌های تانسور کرنش خطی، T_{KL} مؤلفه‌های تانسور تنش، E_K مؤلفه‌های بردار میدان الکتریکی، D_J مؤلفه‌های بردار جابه‌جایی الکتریکی (بار بر واحد سطح)، S_{IJKL}^E مؤلفه تانسور مرتبه چهارم نرمی در میدان الکتریکی صفر، T_{JK}^T ثابت‌های دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده در تنش صفر، D_{KIJ} ثابت‌های کوپل‌کننده میدان الکتریکی و مکانیکی (یا ثابت‌های پیزوالکتریک) است.

۵- روش شبیه‌سازی امواج لم

حل معادلات حاکم بر انتشار امواج الاستیک از طریق نرم‌افزار اجزای محدود به دو صورت دینامیک صریح^۱ و دینامیک ضمنی^۲ انجام می‌شود. در دینامیک صریح توسط نرم‌افزار آباکوس^۳ المان‌های پیزوالکتریک تعریف نشده است و نمی‌توان

1- Dynamic Explicit
2- Dynamic Implicit
3- Abaqus

زمان ایجاد بیشینه دامنه سیگنال تحریک به عنوان مبدأ زمانی در نظر گرفته می‌شود و اختلاف زمان لازم برای دریافت بیشینه امواج انعکاسی نسبت به این مبدأ زمانی اندازه‌گیری می‌شود. مدت زمان لازم برای رسیدن امواج متقارن به انتهای تیر و برگشت انعکاس آن به پیزوالکتریک در فرکانس تحریک ۳۰۰ کیلوهرتز از تحلیل اجزای محدود برابر با ۱۱۱/۵ میکروثانیه تعیین می‌شود. سرعت انتشار امواج متقارن با توجه به طول ۳۰۰ میلی‌متر تیر ۵۳۸۰ متر بر ثانیه محاسبه می‌شود که این مقدار با منحنی پراکندگی ماده آلومینیوم در شکل ۵ مطابقت دارد. به طور مشابه سرعت انتشار امواج پادمقارن ۲۹۸۰ متر بر ثانیه از تحلیل اجزای محدود تعیین می‌شود. امواج لم طول زیادی از سازه را در مدت زمان بسیار کوتاهی طی می‌کند و عیوب موجود در سازه در حین انتشار امواج لم در زمان کوتاهی شناسایی می‌شود. شکل ۸ - الف هندسه اولیه المان‌های مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود تیر را نشان می‌دهد. تغییر شکل المان‌های تیر در اطراف محل شیار عرضی و نحوه انتشار امواج لم در تیر برای تغییر شکل متقارن و پادمقارن به ترتیب در شکل ۸ - ب و ج نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیار در اثر عبور امواج لم باز می‌شود و این روش کارایی مناسبی برای شناسایی ترک‌های جفت‌شده غیرقابل تشخیص با روش‌های آزمایش غیر مخرب سنتی دارد.



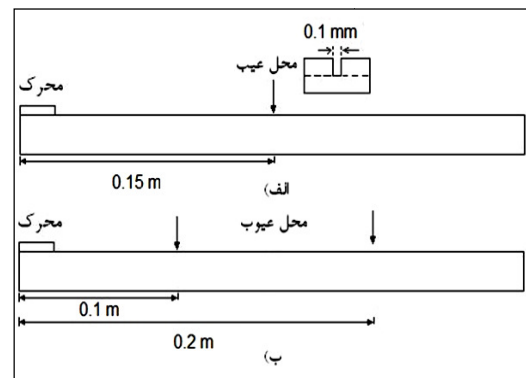
شکل ۸: (الف) المان‌بندی تیر دارای شیار عرضی قبل از انتشار امواج لم، (ب) تغییر شکل المان‌ها تحت اثر موج لم متقارن و (ج) تغییر شکل المان‌ها تحت اثر موج لم پادمقارن.

شکل ۹ جابه‌جایی عرضی سطح فوقانی تیر با یک شیار عرضی را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود امواج متقارن k_0 با سرعت بیشتری نسبت به امواج پادمقارن A_0 منتشر می‌شود. امواج متقارن و پادمقارن ایجاد شده در اثر تحریک اولیه به ترتیب پس از گذشت تقریباً ۳۵ و ۶۰ میکروثانیه به شیار واقع در وسط تیر برخورد می‌کند.

پاسخ سازه و لایه پیزوالکتریک تحت اثر سیگنال اعمالی با استفاده از تحلیل اجزای محدود شبیه‌سازی می‌شود. المان‌های کرنش صفحه‌ای چهارضلعی برای تیر در تحلیل المان محدود انتخاب می‌شود که دارای ۴ گره در راس‌های آن است و هر گره دو درجه آزادی جابه‌جایی در جهت محورهای x و y دارد. المان‌های کرنش صفحه‌ای چهارضلعی پیزوالکتریک مورد استفاده برای لایه پیزوالکتریک علاوه بر دو درجه آزادی مربوط به میدان جابه‌جایی، مقدار ولتاژ الکتریکی را در هر گره در نظر می‌گیرد تا اثر کوپل بین میدان جابه‌جایی و میدان الکتریکی در تحلیل اجزای محدود بررسی شود. جابه‌جایی گره‌های تیر و لایه پیزوالکتریک واقع بر خط تقارن در راستای محور x برابر صفر در نظر گرفته می‌شود تا شرایط تقارن شبیه‌سازی شود. اندازه المان‌ها ۴۰ برابر کوچک‌تر از طول موج انتخاب می‌شود تا تغییر شکل سازه در اثر عبور امواج با دقت بالایی محاسبه شود. نمو زمانی برای تحلیل پاسخ دینامیک سازه و ماده پیزوالکتریک ۲۰ برابر کوچک‌تر از دوره تناوب سیگنال تحریک در نظر گرفته می‌شود.

۷- عملکرد امواج لم در شناسایی عیوب سطحی و زیر سطحی

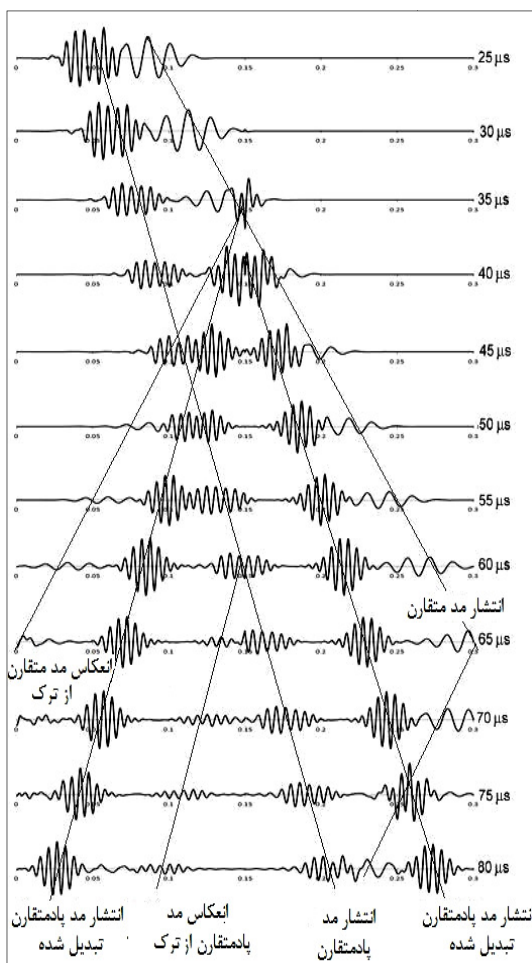
شکل ۷- الف و ب به ترتیب هندسه سازه با یک شیار و دو شیار عرضی را نشان می‌دهد که پهنای شیار در مقایسه با ابعاد سازه بسیار کوچک است تا شرایط مشابه با ایجاد ترک عرضی در سازه شبیه‌سازی شود. سرعت انتشار امواج با تحلیل اجزای محدود تیر بدون عیب تعیین می‌شود. برای این منظور فاصله زمانی بین تحریک اولیه و انعکاس امواج از سطح واقع بر انتهای تیر با تحلیل اجزای محدود محاسبه می‌شود.



شکل ۷: (الف) محل و اندازه عیب در سازه دارای الف) یک عیب و (ب) دو عیب.

حسگر می‌رسد و انعکاس موج پادمتقارن در زمان‌های ۱۰۰/۲ و ۱۶۷/۷ میکروثانیه توسط حسگر دریافت می‌شود.

نتایج مربوط به موقعیت شیارهای عرضی با توجه به فاصله زمانی تحریک و دریافت سیگنال انعکاسی و طول تیر برای یک و دو شیار عرضی با دقت مناسبی در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. مقدار خطای ناچیز به دست‌آمده حاکی از کارایی مدل اجزای محدود ارائه شده برای شناسایی ترک عرضی در تیر است. مقادیر خطا به پهنای شیار، اندازه المان‌ها و نمو زمانی در تحلیل اجزای محدود وابسته است.



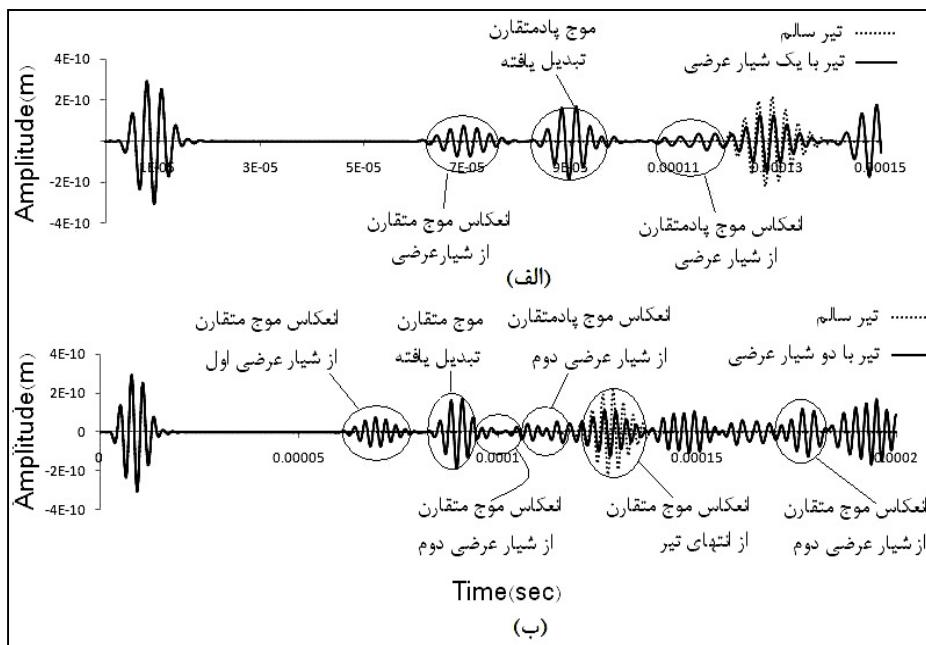
شکل ۹- نحوه انتشار امواج لم متقارن و پادمتقارن در راستای تیر دارای یک عیب.

جدول (۱): موقعیت یک شیار عرضی تعیین‌شده با تحلیل انتشار امواج لم.

نوع موج	محل عیب [m]	خطا [%]
متقارن	۰/۱۵۲	۱/۳
پادمتقارن	۰/۱۵۰	۰/۰

خطوط مورب نشان‌دهنده شده در شکل ۸ موقعیت امواج در زمان‌های مختلف را بیان می‌کند که شیب این خطوط با سرعت انتشار امواج متقارن و پادمتقارن متناسب است. موج متقارن در لحظه ۲۵ میکروثانیه با موقعیت نشان‌دهنده شده در شکل ۹ در هنگام برخورد به شیار عرضی که به صورت نامتقارن در ضخامت تیر ایجاد شده است، به دو دسته امواج متقارن و پادمتقارن جدیدی تقسیم می‌شود که هر یک از این امواج نیز به دو قسمت امواج عبوری و امواج انعکاسی از شیار تقسیم می‌شود. بنابراین موج متقارن با رسیدن به عیب به چهار موج تبدیل می‌شود که دامنه هر یک از آنها کمتر از موج اولیه متقارن است. پس چهار خط باید در لحظه برخورد موج متقارن به شیار رسم شود که این خطوط نشان‌دهنده موقعیت امواج متقارن و پادمتقارن عبوری و انعکاسی است که شیب این خطوط برابر با سرعت متناظر با موج متقارن و پادمتقارن اولیه است. نحوه انتشار امواج پادمتقارن ایجاد شده در لحظه ۲۵ میکروثانیه نیز مشابه با امواج متقارن ولی با سرعت کمتر است. چهار نوع موج در لحظه برخورد امواج پادمتقارن به شیار ایجاد می‌شود که به علت دامنه کم موج متقارن عبوری و انعکاسی، موقعیت آنها در لحظه‌های بعدی به خوبی مشاهده نمی‌شود و فقط موج پادمتقارن انعکاسی در شکل ۹ دیده می‌شود که با عنوان مد پادمتقارن تبدیل شده در این شکل نامگذاری شده است.

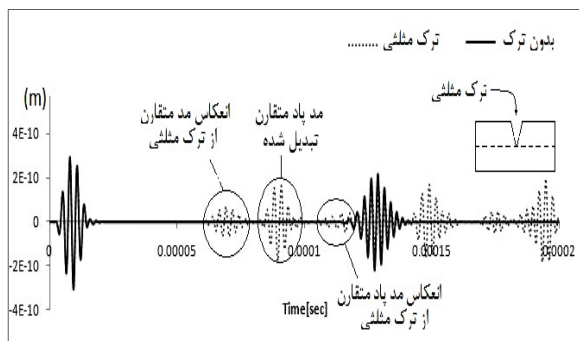
شکل ۱۰- الف و ب نمودار جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر خط تقارن و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر سالم و معیوب دارای یک یا دو شیار را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. مقدار محور عمودی این نمودار متناسب با ولتاژی است که توسط لایه پیزوالکتریک اندازه‌گیری می‌شود، زیرا ولتاژ لایه پیزوالکتریک متناسب با میدان الکتریکی است که طبق رابطه (۱) متناسب با کرنش است و کرنش نیز با جابه‌جایی عرضی حسگر نسبت مستقیم دارد. در نتیجه ولتاژ لایه پیزوالکتریک در شرایط آزمایشگاهی و در زمان‌های مختلف متناسب با جابه‌جایی عرضی حسگر است که از نقاط مختلف سازه منعکس شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود زمان ایجاد بیشینه موج تحریک ۸/۳ میکروثانیه است که به عنوان مبدأ زمانی انتخاب می‌شود. امواج متقارن و پادمتقارن تیر با یک عیب به ترتیب در زمان‌های حدود ۵۶/۸ و ۱۰۱ میکروثانیه نسبت به مبدأ زمانی ایجاد بیشینه تحریک به پیزوالکتریک می‌رسند. انعکاس موج متقارن برای تیر با دو شیار در زمان‌های ۵۵/۶ و ۹۲/۸ میکروثانیه از شیار اول و دوم به



شکل (۱۰): جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر محور تقارن تیر و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر دارای عیب (الف) یک عیب و (ب) دو عیب.

جدول (۲): موقعیت دو شیار عرضی تعیین شده با تحلیل انتشار امواج لم.

نوع موج	موقعیت عیب اول (متر)	خطا [%]	موقعیت عیب دوم (متر)	خطا [%]
متقارن	۰/۱۴۹	۰/۶	۰/۲۵۱	۰/۴
پادمتقارن	۰/۱۴۹	۰/۶	۰/۲۴۹	۰/۴

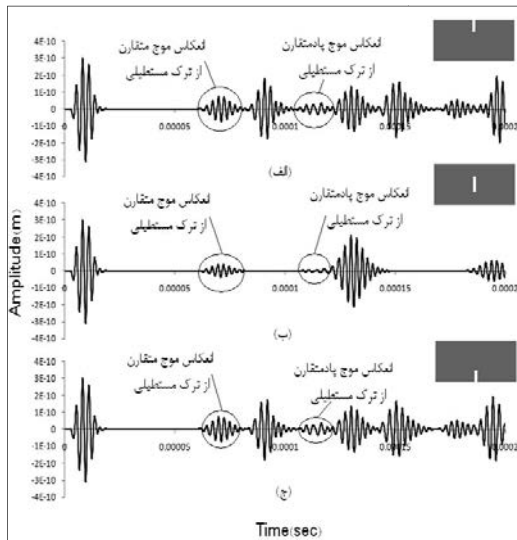


شکل (۱۱): جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر محور تقارن تیر و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر دارای یک شیار مثلثی.

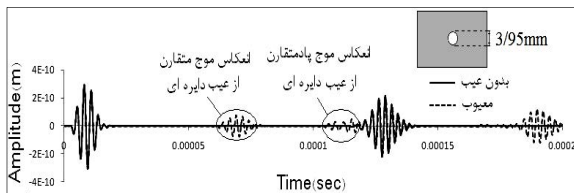
با ایجاد یک ترک مثلثی در فاصله ۱۵۰ میلی‌متری از خط تقارن تیر به عمق نصف ضخامت تیر و قاعده ۰/۰۳ ضخامت ورق، مدل اجزای محدود ارائه شده برای آشکارسازی عیوب مثلثی شکل استفاده می‌شود. جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر خط تقارن و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر دارای یک ترک مثلثی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

موقعیت ترک مثلثی با توجه به فاصله زمانی تحریک و دریافت سیگنال‌های انعکاسی موج متقارن و پادمتقارن و طول تیر تعیین می‌شود. انعکاس مدمتقارن و پادمتقارن به ترتیب در زمان‌های ۷۰ و ۱۱۶ میکروثانیه به لایه پیزوالکتریک می‌رسد. با استفاده از موج متقارن موقعیت عیب در ۱۶۳ میلی‌متری و با موج پادمتقارن در ۱۵۹ میلی‌متر تعیین می‌شود که به ترتیب ۸/۷ و ۶ درصد خطا دارند. علت خطا انعکاس از سطوح مایل عیوب هندسی و پراکندگی امواج است.

امواج لم در کل ضخامت سازه منتشر می‌شوند و تعیین عیوب موجود در داخل سازه امکان‌پذیر است که از مزایای استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های دیگر آزمایش غیرمخرب است. برای اثبات این موضوع توانایی آشکارسازی ترک مستطیلی در سطح بالای تیر، در قسمت داخلی و سطح پایین تیر با انتشار امواج لم بررسی می‌شود. مدل اجزای محدود برای تیر معیوب با وجود یک شیار مستطیلی در سطح بالایی، داخل ضخامت و همچنین در سطح تحتانی تیر بررسی می‌شود. پهنای شیار ۰/۱ میلی‌متر، عمق آن نصف ضخامت تیر و فاصله



شکل (۱۲): جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر خط تقارن تیر در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر با یک شیار مستطیلی در الف) سطح فوقانی، ب) وسط تیر و ج) سطح تحتانی.



شکل (۱۳): جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر محور تقارن تیر و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر دارای عیب با هندسه دایره‌ای.

با توجه به بررسی‌های فوق، عیوب موجود در کل مقطع تیر با هندسه‌های مختلف بدون نیاز به وجود حسگر و محرک در سطح بالایی و پایینی تیر تعیین می‌شود، زیرا امواج لم در کل ضخامت منتشر می‌شوند و به‌خوبی عیوب موجود در مقطع سازه را آشکار می‌نماید. امواج لم به شیارهای عرضی حتی با عمق بسیار کم حساس هستند. صحت این موضوع با ایجاد مدل اجزای محدود تیر معیوب با وجود یک شیار عرضی در مرکز تیر به پهنای ۰/۱ میلی‌متر و عمق‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ ضخامت تیر بررسی می‌شود. شکل ۱۴ جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر محور تقارن و در سطح پایینی لایه پیزوالکتریک متصل به تیر در زمان‌های مختلف پس از تحریک لایه پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. با افزایش عمق ترک، دامنه امواج متقارن و پادمقارن منعکس شده از شیار عرضی بیشتر می‌شود ولی دامنه موج متقارن منعکس شده از انتهای تیر روند

مرکز آن از محور تقارن تیر ۱۵۰ میلی‌متر است. جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر محور تقارن و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر برای هر سه حالت در شکل ۱۲ رسم شده است. با وجود اینکه در حالتی که شیار در سطح پایینی تیر قرار دارد و لایه پیزوالکتریک در سطح مقابل آن قرار دارد سیگنال انعکاسی در حالتی که شیار در سطح بالایی تیر قرار دارد کاملاً مشابه است. در نتیجه با تحریک لایه پیزوالکتریک کلیه عیوب موجود در مقطع تیر در عمق‌های مختلف شناسایی می‌شود. در حالتی که شیار در داخل سازه و به‌صورت متقارن نسبت به خط میانی تیر قرار دارد در سیگنال انعکاسی فقط انعکاس موج متقارن و پادمقارن از شیار و انعکاس موج متقارن از لبه انتهایی تیر وجود دارد. در هر سه حالت موقعیت شیار مستطیلی به‌خوبی تعیین می‌شود که برای محاسبه آن از مقدار طول تیر و اختلاف زمانی بین تحریک و دریافت سیگنال‌های انعکاسی موج متقارن و پادمقارن استفاده می‌شود. در جدول ۳ موقعیت شیار مستطیلی و مقادیر خطای محاسباتی در هر سه حالت با استفاده از تحلیل انتشار امواج لم آورده شده است.

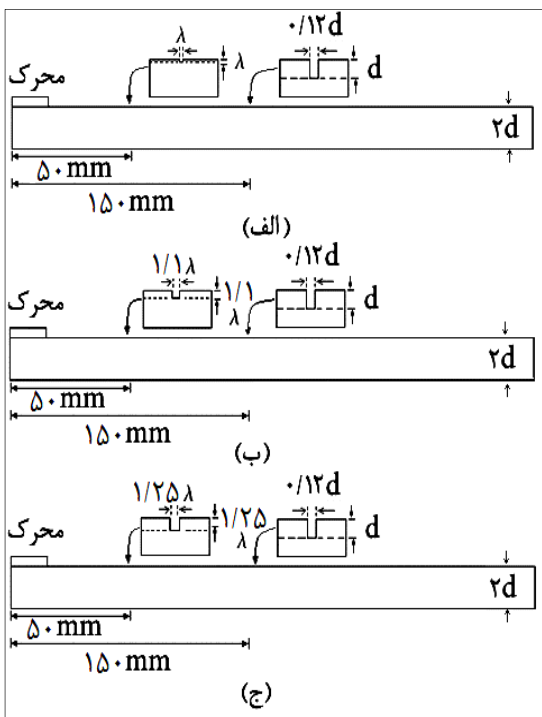
در ادامه با تحلیل اجزای محدود نحوه انتشار امواج لم در تیر با عیب دایره‌ای شکل به قطر یک‌چهارم ضخامت تیر و در فاصله ۱۵۰ میلی‌متری از محور تقارن تیر و در مرکز ضخامت آن، توانایی آشکارسازی این نوع عیب با این روش بررسی می‌گردد. جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر محور تقارن و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر در شکل ۱۳ نشان شده است. بخشی از موج‌های متقارن و پادمقارن بعد از برخورد با عیب در داخل تیر منعکس شده و زودتر از زمان انتظار از برگشت این موج‌ها از لبه انتهایی تیر در شکل ۱۳ دیده می‌شوند. با توجه به زمان به دست‌آمده از انعکاس موج‌های متقارن و پادمقارن و سرعت موج، موقعیت عیب دایره‌ای شکل در داخل تیر مشخص می‌شود.

جدول (۳): موقعیت تعیین شده شیار مستطیلی در عمق‌های مختلف با تحلیل انتشار امواج لم.

نوع موج	موقعیت عیب تعیین شده (متر)			درصد خطای محاسباتی (درصد)		
	سطح بالایی	داخل ضخامت	سطح پایینی	سطح بالایی	داخل ضخامت	سطح پایینی
مقارن	۰/۱۶۳	۰/۱۶۲	۰/۱۶۳	۸/۷	۸/۰	۸/۷
پادمقارن	۰/۱۵۶	۰/۱۵۸	۰/۱۵۶	۴/۰	۵/۴	۴/۰

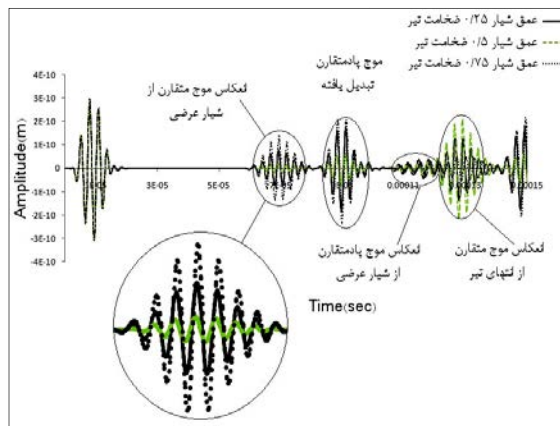
برای شیار اول ابعاد مختلف در نظر گرفته شده است تا حساسیت امواج لم مشخص شود. تیر دارای عیوب با ابعاد مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در شکل ۱۷-الف جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر محور تقارن و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر با وجود اندازه‌ای برابر طول موج برای شیار عرضی اول رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود انعکاس موج از ترک اول در سیگنال پاسخ سازه وجود ندارد. اگر پهنای شیار اول افزایش داده شود اندازه آن $1/1$ طول موج شود پادمقارن منعکس‌شده از ترک اول در شکل ۱۷-ب بیانگر وجود عیب در 50 میلی‌متری طول تیر است ولی شدت دامنه موج منعکس‌شده بدلیل کوچک بودن عیب کم است. با افزایش پهنای شیار اول به میزان $1/25$ طول موج فرکانس تحریک، به خوبی موج پادمقارن منعکس‌شده از آن در شکل ۱۷-ج دیده می‌شود.

از بررسی‌های فوق نتیجه می‌شود تا زمانی که اندازه شکاف بزرگ‌تر از طول موج تحریک باشد امواج لم در برابر وجود عیب حساسیت دارند و انعکاس‌های از سطوح عیب مستقل از موقعیت عیب در ضخامت تیر ایجاد می‌شود.

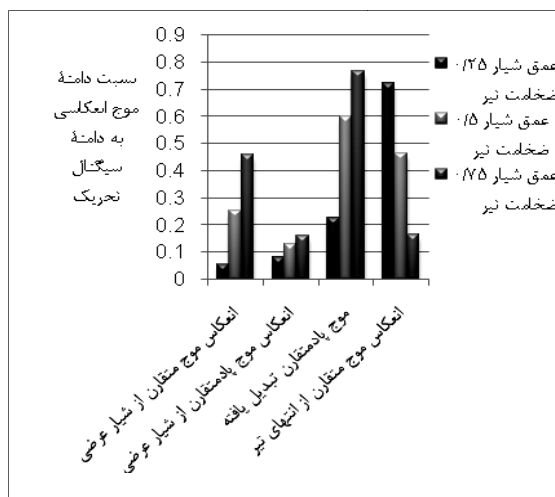


شکل (۱۶): هندسه تیر دارای عیوب با ابعاد مختلف.

مخالفی دارد، زیرا با افزایش عمق شیار قسمت بیشتری از موج متقارن و پادمقارن از شیار منعکس و قسمت کمتری از آن عبور می‌کند و در اثر برخورد با انتهای تیر دامنه کوچک‌تری خواهد داشت. نمودار شکل ۱۵ نشان‌دهنده دامنه انعکاس امواج لم به دامنه موج اولیه است که در عمق‌های شیار مختلفی به دست آمده است.



شکل ۱۴- مقایسه سیگنال دریافت شده توسط حسگر در تیرهای دارای شیارهای با عمق مختلف.



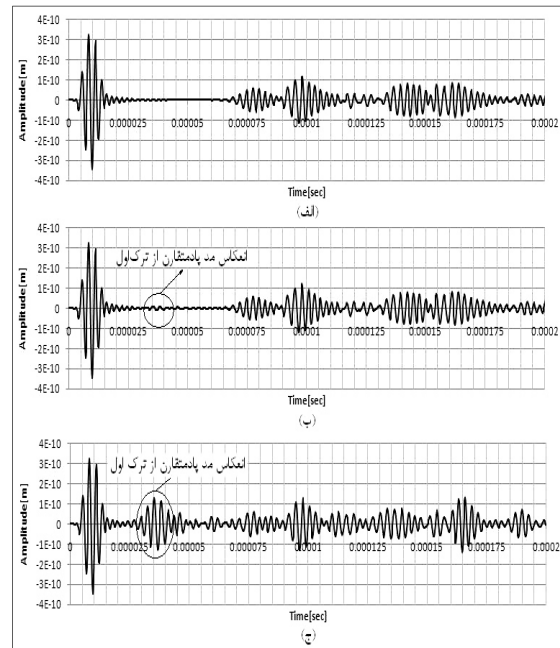
شکل (۱۵): تأثیر تغییر عمق شیار بر دامنه امواج لم انعکاسی.

۸- محدودیت شناسایی عیوب با امواج لم

امواج لم، توانایی شناسایی عیوبی را دارند که ابعاد آنها از طول موج تحریک بزرگ‌تر باشد. حساسیت امواج لم به عیوب با ابعاد مختلف با تحلیل اجزای محدود تیر با لایه پیزوالکتریک متصل به آن با وجود یک شیار عرضی در 50 میلی‌متری طول تیر و شیار عرضی دیگر در وسط تیر ارزیابی می‌شود.

۱۰- مراجع

- Giurgiutiu, V. "Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensor", Academic Press, 2008.
- Nieuwenhuis, J.H., Neumann, J., Greve, D.W. and Oppenheim, I.J., "Simulation and Testing of Transducers for Lamb Wave Generation", SEM Conf., Portugal, 2005.
- Oppenheim, I.J., Greve, D.W., and Tyson, N.L. "Use Of Lamb Waves to Monitor Plates: Experiments and Simulations", Proc. of SPIE, Vol. 5765, PP. 281-292, 2005.
- Tua, P.S., Quek, S.T., and Wang, Q. "Detection of Cracks in Plates using Piezo-Actuated Lamb waves", Smart Materials and Structures, Vol. 13, No. 4, pp. 643-60, 2004.
- Hu, N., Shimomukai T., Fukunaga H. and Su Z, "Damage Identification of Metallic Structures Using A_0 Mode of Lamb Waves", Structure Health Monitoring, Vol. 7, No. 3, pp. 271-285, 2008.
- Yang, J., "An Introduction to the Theory of Piezoelectricity", Editors: Gao, D.Y., Ogdan, R. W., Springer, 2005.
- Hillger, W. and Pfeiffer, U. "Structural Health Monitoring Using Lamb Waves", 9th European Conf. on Non-Destructive Testing, 2006.
- Giurgiutiu, V., Boa, J. and Zhao, W. "Piezoelectric Wafer Active Sensor Embedded Ultrasonic in Beams and Plates", Experimental Mech., Vol. 43, No. 4, pp. 428-449, 2003.
- Su, Z., Ye, L. "Identification of Damage Using Lamb Wave from Fundamental to Applications", Springer, 2009.
- Ghamari, M., Tahaye Abadi, M., "Simulation of Elastic Wave in Piezoelectric Activated Beam to Detect Transverse Cracks", Proc. of the 10th Conf. of Iranian Aerospace Society, Tehran, Iran, 2011 (In Persian)
- Ghamari, M., Tahaye Abadi, M., "Geometric Damage Location Detection in Thin Plates Using Lamb Waves", Proc. of the First Conf. of Aircraft Structural Integrity Program, Tehran, Iran, 2011 (In Persian)
- Giurgiutiu, Victor. "Lamb Wave Generation with Piezoelectric Wafer Active Sensor for Structural Health Monitoring", Proc. of SPIE, San Diego, Vol. 5056, pp. 111-122, 2003.
- Santoni, G.B., Yu, L., Xu, B., Giurgiutiu, V., "Lamb Wave-Mode Tuning of Piezoelectric Wafer Active Sensor for Structural Health Monitoring", J. Vibration and Acoustics, Vol. 129 No. 6, pp. 752-763, 2007.
- Raghavan, A. and Cesnik, C.E.S., "Finite-Dimensional Piezoelectric Transducer Modeling for Guided Wave Based Structural Health Monitoring", Smart Materials and Structures, Vol. 14, No. 6, pp. 1448-1461, 2005.



شکل (۱۷): جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر خط تقارن تیر و در زیر سطح لایه پیزوالکتریک متصل به تیر با وجود دو شیار عرضی با پهنای شیار اول برابر با الف (طول موج، ب) $1/1$ طول موج و ج) $1/25$ طول موج.

۹- نتیجه‌گیری

مدل اجزای محدود ارائه شده روش مناسبی برای بررسی نحوه ایجاد و انتشار امواج لم ارائه می‌کند. این مدل پیدایش امواج لم متقارن و پادمقارن را توسط تحریک لایه پیزوالکتریک شبیه‌سازی می‌کند و سرعت انتشار این امواج را تعیین می‌کند. امواج شبیه‌سازی شده نسبت به عیوب احتمالی در داخل سازه پاسخ می‌دهد و قسمتی از موج از سطوح عیوب منعکس و قسمت دیگر از عیوب عبور می‌کند. امواج متقارن و پادمقارن که از سطوح منعکس می‌شود توسط لایه پیزوالکتریک دریافت می‌شود و با توجه به فاصله زمانی تحریک و دریافت سیگنال انعکاسی، موقعیت عیوب با دقت مناسبی تعیین می‌شود. امواج لم که به دو دسته متقارن و پادمقارن تقسیم می‌شوند هر دسته از این امواج در اثر برخورد به عیوب سطحی سازه به دو دسته تقسیم می‌شود و هر دسته از این امواج در محل عیوب به چهار موج متقارن و پادمقارن انعکاسی و عبوری از عیوب تبدیل می‌شود. نتایج تحلیل نشان می‌دهد امواج لم نسبت به شیارهایی با اندازه بیشتر از طول موج حساس است و از این روش می‌توان برای شناسایی عیوب سطحی و زیرسطحی با هندسه‌های مختلف و ابعاد بیشتر از طول موج استفاده کرد.