

Research Paper

Numerical and Experimental Location Detection of Through Defect in Homogenized Plates using Tomography of Surface Wave Method

S. Zohoori^{1*} and S. Shakhesi²

1. Faculty of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, IRAN

2. Iranian Space Research Center, Tehran, IRAN

* s.shakhesi@isrc.ac.ir

Using surface guided wave is one of the most reliable methods of structural health monitoring. Mostly the bulk wave is preferred for identification of internal defects, which is inefficient in localizing the surface cracks. In this paper the procedure of ultrasonic surface wave tomography for crack detection in an aluminum plate is investigated and applied for three cracks with the length of 4, 7 and 10 millimeters. Analytical equations and numerical simulations are used to extract dispersion curves as a means for selection of plate thickness and piezoelectric characteristics. Layout selection for transducers and providing numerical and experimental models are the next steps of inspection procedure. All the piezoelectric discs are actuated respectively. Meanwhile, other piezoelectric elements are used as sensors and their received signal is stored in both healthy and defected structures for both numerical and experimental models. Definition of signal difference criteria, signal reconstruction and tomogram generation are the last steps of the procedure presented in this paper.

Keywords: Tomography, Guided wave, Fault detection, Surface wave

1. M. Sc. Student
2. Associate Professor (Corresponding Author)

مقاله علمی - پژوهشی

عیب‌یابی تجربی و عددی محل عیب راه‌به‌در صفحات همگن به روش توموگرافی امواج ورق

سعید ظهوری^۱ و سعید شاکھی^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

* s.shakhesi@isrc.ac.ir

استفاده از امواج هدایت شده ورق، یکی از قابل اطمینان‌ترین روش‌های پایش سلامت است. اغلب به منظور شناسایی عیوب داخلی از امواج حجمی استفاده می‌گردد که در تشخیص موقعیت ترک‌های سطحی ناکارآمد است. در این مقاله، فرآیند استفاده از روش توموگرافی امواج ورق جهت تشخیص ترک در یک ورق آلومینیومی بررسی گردیده و برای سه ترک با طول‌های ۷.۴ و ۱۰ میلی‌متر پیاده‌سازی شده است. روابط تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی جهت استخراج منحنی دیسپرز به عنوان ابزاری جهت انتخاب ضخامت ورق و مشخصات پیزوالکتریک، مورد استفاده قرار گرفته است. تعیین چیدمان قرارگیری تراگذرها و ایجاد مدل‌های عددی و تجربی، گام‌های بعدی در فرآیند بازرسی است. سپس تمام پیزوالکتریک‌ها به ترتیب تحریک شده‌اند و ساینز تراگذرها به عنوان حسگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و سیگنال خروجی آن‌ها در هر دو حالت سالم و معیوب در مدل‌های عددی و تجربی ذخیره گردیده است. تعیین معیار اختلاف سیگنال‌ها، بازسازی سیگنال‌ها و ایجاد توموگرام، مراحل نهایی فرآیند ارائه شده در این مقاله می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: توموگرافی، امواج هدایت‌شده، عیب‌یابی، موج ورق

علائم و اختصارات

H	میدان پتانسیل برداری		
k	عدد موج		
P_{ij}	احتمال وجود عیب در سیگنال از i به j	A_{ij}	ضریب تغییرات سیگنال
t	ضخامت	B_i	مؤلفه‌های نیروی حجمی
u_i	مؤلفه‌های بردار جابجایی	C_g	سرعت گروه
w	عرض	C_L	سرعت انتشار موج طولی
x_i	مؤلفه‌های مختصات لاگرانژی	C_p	سرعت فاز
V	ولتاژ اعمالی	C_T	سرعت انتشار موج عرضی
λ	ضریب لامه	d_{th}	ضخامت سازه
λ_{wave}	طول موج	E	مدول الاستیسیته
μ	ضریب لامه	F_i	مؤلفه‌های نیروی خارجی
ρ	جرم واحد حجم ماده	F	نیروی معادل
φ	میدان پتانسیل اسکالر	f	فرکانس مرکزی موج
ω	فرکانس انتشار موج		

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد

۲. دانشیار (نویسنده مخاطب)

مقدمه

توسعه روز افزون صنایع گوناگون نظیر صنایع حمل و نقل، تولید و توزیع انرژی، هوافضا و نفت و گاز منجر به تولید و استفاده از سیستم‌های پیچیده‌تر و حساس‌تر شده است. در این میان مبحث ایمنی سیستم‌ها با توجه به خسارات احتمالی هنگفت ناشی از بروز خرابی در سیستم، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار گشته است. از همین رو تلاش متخصصان صنایع گوناگون همواره بر این است تا در حد امکان از بروز خرابی در سیستم جلوگیری کنند. در این میان اهمیت وجود سیستمی که بتواند سلامت سازه را به طور پیوسته یا در مقاطع زمانی مشخص پایش کند، بیش از پیش آشکار گردیده است.

ساختار بسیاری از سازه‌های پرکاربرد و حیاتی در صنایع مختلف، از اتصال ورق‌های متعدد به یکدیگر ایجاد شده است. از میان روش‌های مختلف موجود برای بازرسی سازه‌های ورقی، استفاده از امواج هدایت شده دارای ویژگی‌ها و قابلیت‌های منحصر به فردی است که علی‌رغم پیچیدگی نسبی، به‌صورت روزافزونی مورد توجه مراکز علمی و صنعتی قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های بازرسی به کمک امواج ورقی می‌توان به سرعت بالا در بازرسی سازه، قابلیت تشخیص عیوب ریز، عدم نیاز به حرکت دادن تراکرها و قابلیت تشخیص عیوب داخلی و خارجی سازه اشاره نمود. هنگامی که ضخامت سازه کمتر از سه برابر طول موج منتشر شده باشد، فرض انتشار امواج ورقی صحیح خواهد بود [۱]. از سایر ویژگی‌های مهم امواج ورقی، وجود مودهای مختلف انتشار این امواج است که به طور کلی به مودهای متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شوند. فرآیند بازرسی توسط امواج ورقی به‌صورت کلی شامل مراحل زیر است:

- انتخاب نحوه ایجاد موج ورقی (نوع عملگر)
- انتخاب فرکانس و شکل سیگنال تحریک
- انتخاب محل قرار دادن عملگرها و حسگرها و تعداد آن‌ها
- تحریک عملگر
- دریافت پاسخ سیستم از حسگرها
- پردازش سیگنال دریافتی و استخراج شاخص‌های مناسب
- تشخیص وجود یا عدم وجود عیب در سیستم

امواج ورقی نخستین بار توسط هوراس لمب در سال ۱۹۱۷ معرفی گردیدند. در واقع وی نشان داد که وجود دو مرز آزاد در صفحه منجر به انتشار نوع خاصی از امواج می‌شود که بدین دلیل این امواج بعضاً امواج لمب نیز نامیده می‌شوند [۲]. رز در سال ۲۰۰۲، مبانی و افق پیش روی بازرسی به کمک امواج هدایت شده فراصوتی را در مقاله‌ای ارائه کرده است. وی در این مقاله

قابلیت‌های بازرسی به کمک امواج ورقی را به عنوان یک روش تست غیرمخرب برشمرده است [۳].

از مطالعات اخیر انجام گرفته در این حوزه می‌توان به زیانگ و همکاران اشاره نمود که در سال ۲۰۱۷ به مطالعه ماتریس‌های پراکندگی امواج فراصوت هدایت شده و توموگرافی با استفاده از ارائه‌های پراکندگی به منظور شناسایی عیب پرداختند [۴]. آن‌ها در ابتدا معادلات حاکم بر پراکندگی امواج را بررسی نموده و در ادامه با شبیه‌سازی و تست‌های تجربی، عملکرد روش خود را اعتبارسنجی نمودند. سازه مورد بررسی، یک ورق آلومینیومی به ضخامت ۳ میلی‌متر بوده است و از مود S_0 برای شناسایی عیب استفاده گردیده است.

یکی از ویژگی‌های امواج ورقی، قابلیت پایش سلامت سازه‌های کامپوزیتی است که کاربرد بسیاری در صنایع فضایی دارند. از فعالیت‌های صورت گرفته در این حوزه بر روی کامپوزیت‌ها می‌توان به مقاله آقای خو و همکاران در سال ۲۰۱۸ اشاره نمود [۵]. آن‌ها در این مقاله روش جدیدی برای بازسازی تصویر سیگنال‌ها معرفی نموده‌اند و از توابع وزنی و یک مجموعه مرجع برای این منظور استفاده کرده‌اند. از این رو در تست‌های تجربی از ورق فیبر کربن تقویت شده با پلاستیک استفاده کردند و با ایجاد عیوب مختلف، امواج منتشر شده و پراکنده شده را دریافت نمودند و از آن‌ها برای تکمیل مجموعه مرجع خود استفاده کردند. در نهایت با به کارگیری داده‌های موجود و توابع وزنی، وجود و محل عیب‌های موجود شناسایی گردیده است. در همین راستا می‌توان به مقاله گولاتو در سال ۲۰۱۵ نیز اشاره کرد که از بازسازی پراکندگی امواج ورقی در فرکانس‌ها و مودهای مختلف برای پایش سلامت استفاده نموده است [۶]. روش مورد استفاده در این مقاله نیز گردآوری یک مرجع از حالت‌های مختلف انتشار امواج متقارن و غیرمتقارن پراکنده شده در اثر برخورد با عیب است. برای این منظور از دو فرکانس مختلف برای تحریک هر یک از مودها به‌صورت مجزا استفاده شده و تأثیر عیب بر هر کدام بررسی گردیده است و با استفاده از بازسازی موج‌های پراکنده شده، محل عیب مشخص گردیده است.

اساس عیب‌یابی توسط همه انواع امواج فراصوتی، انعکاس و به عبارت دیگر تأثیر پذیرفتن موج منتشر شده از برخورد با عیب است. البته موج در برخورد با مرز آزاد جسم نیز منعکس می‌گردد. لذا رفتار موج در برخورد با عیوب مختلف و نحوه انعکاس یا عبور آن از عیب، نقش مهمی در فرآیند عیب‌یابی دارد. مختاری و همکاران در پژوهش خود به بازسازی شکل عیب در ورق آلومینیومی توسط امواج ورقی پرداختند. آن‌ها با استفاده از ۴ ارائه فازی متشکل از ۲۵ عملگر و حسگر پیزوالکتریک، امواج ورقی را در زاویه‌های مورد نظر در سازه منتشر کرده و با انجام تبدیل رادن بر روی سیگنال‌های

مختصات ایجاد عیوب به صورت (۲۵ و -۲۵) میلی‌متر نسبت به مرکز دایره چیدمان پیزوالکتریک‌ها است.

فرآیند کلی معرفی شده در این پژوهش بدین صورت است که تعداد مشخصی تراگذر پیزوالکتریک بر روی سازه هدف قرار گرفته و به ترتیب با استفاده از هر یک از این تراگذرها، امواج ورقی درون سازه ایجاد شده و موج منتشر شده با استفاده از سایر پیزوالکتریک‌ها دریافت می‌گردد. با تکرار این فرآیند در طول زمان و مقایسه سیگنال‌های دریافتی با سیگنال‌های اولیه می‌توان هرگونه تغییر در سازه که خود را به صورت تغییر سیگنال‌های دریافتی نشان می‌دهد را شناسایی نمود.

روش چیدمان این تراگذرهای پیزوالکتریک با استفاده از مطالعات پیشین صورت گرفته توسط میرصادقی انتخاب گردیده است. وی در پژوهش خود اشاره کرده است که استفاده از ارائه موازی شبکه حسگرها، به دلیل ضعف آن در پوشش بعضی نواحی بازرسی، در بسیاری از موارد مناسب ناست. بنابراین در بیشتر حالات، استفاده از یکی از دو روش چیدمان مستطیلی یا دایره‌ای مد نظر قرار می‌گیرد. توزیع یکنواخت‌تر مسیرهای انتشار امواج ورقی در چیدمان دایره‌ای نسبت به چیدمان مربعی شبکه حسگرها، منجر به تشکیل یک توموگرام منظم‌تر برای عیب‌یابی می‌شود. از این رو در شبیه‌سازی‌های عددی و تست‌های تجربی از چیدمان دایره‌ای استفاده خواهد گردید [۱۳].

لازم به ذکر است از نتایج این مقاله می‌توان به منظور پایش سلامت اجزای آلومینیومی سازه‌های فضایی مانند بدنه یا سازه‌های ورقی مورد استفاده از قبیل ورق رویه پنل‌های خورشیدی، سازه مکعبی ماهواره و همچنین قسمت‌هایی که به منظور اتصال آنتن و سایر تجهیزات که نیاز به سوراخکاری داشته و منجر به تمرکز تنش در سازه‌های ماهواره خواهند شد، استفاده کرد.

مبانی علمی و فنی انتشار امواج ورقی و عیب‌یابی به کمک آن‌ها

مطابق با شکل ۱ با در نظر گرفتن یک المان سه بعدی از جسم، با اعمال قانون دوم نیوتن، استفاده از بسط تیلور و با فرض جامد همسانگرد، معادله انتشار موج را می‌توان مطابق رابطه (۱) نوشت:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

در این رابطه λ و μ ضرایب لامه، u_i بردار جابجایی، x_i مؤلفه مختصات لاگرانژی و ρ جرم واحد حجم ماده هستند.

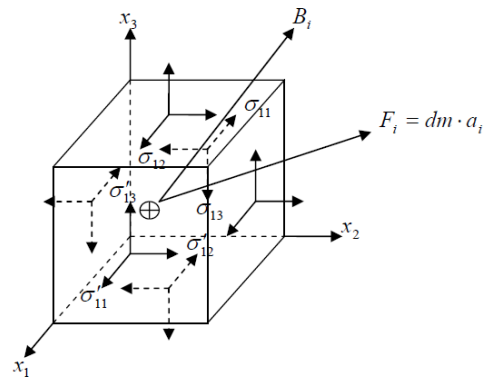
دریافتی، مختصات رئوس عیب مثلی ایجاد شده در مدل عددی را تعیین نمودند [۷]. از دیگر تحقیقات انجام شده بر روی عیب‌یابی با استفاده از امواج ورقی، می‌توان به دو مقاله بنمذور در سال‌های ۲۰۰۸ [۸] و ۲۰۰۹ [۹] اشاره کرد. وی و همکارانش در مقاله اول خود به صورت تئوری و عددی، تقابل اثر و برخورد مدهای اصلی امواج ورقی را با شکاف‌های متقارن در صفحات همگن بررسی کردند. اساس کار آن‌ها تفکیک یک شکاف متقارن به دو شکاف مستقیم و معکوس در ضخامت ورق است. سپس ضرایب توان آکوستیکی عبوری و نیز منعکس شده از شکاف به دو روش محاسبه شده است. روش اول بر مبنای استفاده از جابجایی و تنش در ضخامت ورق است؛ در حالی که در روش دوم تنها جابجایی قائم و مماسی در نقطه‌ای از سطح ورق مورد استفاده قرار گرفته است. وی در انتها روابطی برای محاسبه توان آکوستیکی موج ورقی در عبور از شیار متقارن ارائه کرده است [۸]. در مقاله دوم، در سال ۲۰۰۹ کار مقاله اول به صورت کامل‌تر و با تست‌های تجربی انجام گرفته است و در نهایت نشان داده شده است که نتایج مقاله اول با کارهای تجربی هم‌خوانی دارد و مود A_0 نسبت به شیارهای متقارن از مود S_0 حساس‌تر است [۹]. دنگ و یانگ، پراکنش^۳ مدهای A_0 و S_0 را از عیوب متعدد در صفحه همگن بررسی کردند و با استفاده از حل تحلیلی مبتنی بر توابع بسل، به بررسی اثر هندسه عیب بر میدان موج پراکنش شده پرداختند [۱۰، ۱۱]. لیو و همکاران به بررسی عددی اثرات دیسپرز^۴، شکل عیب، فرکانس تحریک و زاویه برخورد موج تحریک شده با یک عیب بیضوی بر شدت انعکاس نسبی^۵ مود A_0 از عیب بیضوی پرداختند. بررسی‌های وی نشان داد که دیسپرز^۶ موج ورقی تأثیری بر شدت انعکاس نسبی ندارد، اما سایر پارامترهای ذکر شده، تأثیر به‌سزایی بر شدت انعکاس نسبی از یک عیب راه‌به‌در بیضوی شکل خواهد داشت [۱۲].

تعریف مسئله

هدف از این مقاله، تعیین موقعیت ترک‌هایی به طول‌های ۴، ۷ و ۱۰ میلی‌متر در یک ورق مربعی آلومینیومی با طول ۷۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر به روش توموگرافی امواج ورقی و به صورت تجربی و عددی است. برای این منظور از ۲۰ عدد پیزوالکتریک با چیدمان دایره‌ای به قطر ۲۵۰ میلی‌متر استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است، به منظور ارزیابی دقیق‌تر قابلیت روش مورد استفاده در تعیین محل عیب، موقعیت ترک به گونه‌ای انتخاب گردیده است که در مسیر مستقیم هیچ دو تراگذری قرار نداشته باشد و از این رو،

3. Scattering
4. Dispersion
5. Relative Reflection Intensity (RRI)

به عنوان ابزار عیب‌یابی پرداخت [۱۵]. منحنی‌های دیسپرز، روش سودمند و رایجی از نمایش رابطه فرکانس با سرعت گروه و سرعت فاز از مودهای مختلف است. در فرآیند عیب‌یابی به کمک موج ورق، منحنی دیسپرز اهمیت به سزایی دارد؛ زیرا با استفاده از این منحنی و با توجه به شرایط سازه، فرکانس موردنظر جهت تحریک مود دلخواه را می‌توان استخراج نمود [۱۶]. علاوه بر این با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده توسط منحنی دیسپرز می‌توان زمان رسیدن امواج را پیش‌بینی نمود. در یک منحنی دیسپرز، سرعت فاز یا سرعت گروه در یک صفحه با جنس و ابعاد معین به عنوان تابعی از فرکانس رسم می‌شود.



شکل ۱- مؤلفه‌های نیرو و تنش در یک نقطه دلخواه از جسم جامد [۱۴]

با در نظر گرفتن یک ورق همگن و همسانگرد به ضخامت $2h$ ، شرایط مرزی به صورت $\sigma_{31} = \sigma_{33} = 0$ در $y = \pm h$ بیان می‌گردد. با حل معادله (۶) به همراه اعمال شرایط مرزی بیان شده می‌توان منحنی دیسپرز را برای یک ورق به دست آورد. یکی از روش‌های مرسوم برای حل معادلات انتشار موج استفاده از تبدیل هلمولتز است [۱۷]. با استفاده از این تبدیل می‌توان میدان جابجایی را به صورت ترکیبی از میدان‌های پتانسیل اسکالر و برداری نوشت [۱۸].

$$\vec{u} = \nabla \cdot \varphi + \nabla \times \vec{H} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، φ میدان پتانسیل اسکالر و \vec{H} میدان پتانسیل برداری است. علاوه بر رابطه (۴)، تبدیل هلمولتز قید دیگری نیز دارد که به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (۵)$$

با فرض مدل کرنش صفحه‌ای و با جایگذاری روابط (۴) و (۵) در معادله (۱) می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (۶) \quad \text{معادله انتشار موج طول}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (۷) \quad \text{معادله انتشار موج عرضی}$$

در روابط (۶) و (۷)، c_L سرعت انتشار موج طولی و c_T سرعت انتشار موج عرضی است. برای حل معادلات انتشار موج‌های طولی و عرضی، φ و H به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [۱۹].

$$\varphi = [A_1 \sin(px_3) + A_2 \cos(px_3)] e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (۸)$$

$$H = [B_1 \sin(qx_3) + B_2 \cos(qx_3)] e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (۹)$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2, \quad p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda_{wave}} \quad (۱۰)$$

در روابط فوق، A_1 ، A_2 ، B_1 و B_2 ثابت‌های نامعلوم و k عدد موج است. با توجه به فرض کرنش صفحه‌ای، جابجایی در جهت‌های اصلی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \\ u_2 = 0 \\ u_3 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} - \frac{\partial H}{\partial x_1} \end{cases} \quad (۱۱)$$

سرعت و چگونگی انتشار این نوع موج، برخلاف سایر امواج، علاوه بر جنس قطعه به ضخامت، فرکانس و زاویه تابش امواج نیز بستگی دارد. در حالت کلی، موج ورق را می‌توان به دو گروه متقارن و نامتقارن تقسیم کرد که سرعت‌های آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. انتشار موج ورق در سازه می‌تواند با استفاده از سرعت فاز و سرعت گروه مشخص گردد. سرعت فاز، سرعت انتشار فاز موج در یک فرکانس واحد است که در تمامی سیگنال‌های موج وجود دارد و با استفاده از رابطه (۲) می‌توان آن را به صورت تابعی از طول موج نوشت.

$$C_p = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \lambda_{wave} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، C_p سرعت فاز، ω فرکانس انتشار موج و λ_{wave} طول موج می‌باشند. سرعت گروه یک موج سرعتی است که در آن، شکل کلی دامنه‌های موج به عنوان مدولاسیون یا پوشی از موج شناخته می‌شود که در کل فضا منتشر می‌گردد. سرعت گروه در حقیقت همان سرعت واقعی موج (سرعت انتقال انرژی موج) است که در آزمایش‌ها مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. سرعت گروه، وابسته به فرکانس و ضخامت سازه است و رابطه آن با سرعت فاز مطابق با معادله (۳) است.

$$C_g(f \cdot d_{th}) = C_p^2 \left[C_p - (f \cdot d_{th}) \frac{dC_p}{d(f \cdot d_{th})} \right]^{-1} \quad (۳)$$

در این رابطه C_g سرعت گروه، f فرکانس مرکزی موج و d_{th} ضخامت سازه می‌باشند.

یکی از خاصیت‌های مهم امواج ورق، دیسپرسیو بودن آن‌ها است. دیسپرسیو بودن به این معنی است که مؤلفه‌های فرکانسی مختلف با سرعت‌های مختلف در جامد منتشر می‌شوند؛ یا به بیان ساده‌تر سرعت انتشار موج ورق در ماده جامد، تابعی از فرکانس انتشار آن است. با توجه به اهمیت این خاصیت امواج ورق در فرآیند پایش سلامت، مطالعات بسیاری در این زمینه صورت پذیرفته است. وارلتون به عنوان نخستین محقق در زمینه کاربرد امواج ورق، در سال ۱۹۶۱ به صورت تحلیلی به بررسی منحنی دیسپرز آلومینیوم و زیرکونیوم و اهمیت مودهای مختلف در استفاده از امواج ورق

شبیه‌سازی عددی

به دلیل پیچیده بودن رفتار امواج ورقه در برخورد با انواع عیوب و نیز پدیده تغییر مود، استفاده از روش‌های عددی برای تحلیل مسائل امواج ورقه از سال ۲۰۰۲ به بعد روند رو به رشدی داشته است. اوستاکوویچ و کودلا به ارائه روشی عددی بر مبنای روش المان‌های طیفی در حوزه زمان برای تحلیل انتشار موج در سازه‌های خمیده پرداختند. نوآوری آن‌ها در این روش، ارائه المان‌های خمیده پوسته‌ای برای شبیه‌سازی انتشار موج در سازه‌های ورقه‌ای است [۲۱]. ژو و ایچو بر اساس روش اجزاء محدود موجی، به تحلیل انتشار امواج ورقه در محیط با المان‌های خمیده پرداختند و نشان دادند برای بازرسی سازه با محیط هدایت کننده موج خمیده می‌توان بر اساس تحلیل مقدار ویژه به این روش، به انتخاب مود و فرکانس مناسب پرداخت [۲۲]. در یکی دیگر از کارهای انجام شده در این زمینه، احمد و گابرت از این روش برای شبیه‌سازی انعکاس موج از لبه آزاد ورق در حالتی که لبه آزاد به صورت مورب برش خورده است، استفاده کردند [۲۳].

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی انتشار امواج ورقه و عموماً امواج فراصوتی و همچنین برخورد و تقابل اثر آن‌ها با ناپیوستگی‌ها و مرزهای جسم وجود دارد. از جمله این روش‌ها استفاده از روش اجزاء محدود است که در دو رهیافت ضمنی^۷ و صریح^۸ میسر است. در این مقاله، ضمن مقایسه نتایج حاصل از هر یک از دو رهیافت مذکور، به منظور استخراج منحنی دیسپرز و مقایسه با نتایج حاصل از روابط تحلیلی و اعتبارسنجی روش انجام تحلیل عددی، از شبیه‌سازی در دو بعد و برای بررسی فرآیند عیب‌یابی، شبیه‌سازی در سه بعد صورت گرفته است. در نرم‌افزار آباکوس^۹ در روش ضمنی معادلات حرکت به طور ضمنی در طول زمان انتگرال‌گیری می‌شوند که این امر موجب وجود ماتریس سختی کلی برای سازه خواهد شد. در روش صریح، انتگرال‌گیری به صورت صریح است و در نتیجه تعداد زیادی یک معادله - یک مجهول حل می‌شوند. در صورت استفاده از روش ضمنی، المان‌های پیزوالکتریک قابل استفاده می‌باشند، اما در خانواده المان‌های صریح، المان‌های پیزوالکتریک موجود نیستند و باید یک جایگزین مناسب برای اثر پیزوالکتریک در روش صریح یافت. مدل در نظر گرفته شده برای بررسی روش‌های ضمنی و صریح در شکل ۲ نشان داده شده است.

بنابراین روابط مربوط به تنش برای این مسئله به شکل زیر

خواهد بود:

$$\sigma_{31} = \mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1 \partial x_3} - \frac{\partial^2 H}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial x_3^2} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_{33} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 H}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \quad (13)$$

با توجه به این که متغیرهای میدانی شامل جملات سینوسی و کسینوسی نسبت به x_3 می‌باشند و این توابع نسبت به $x_3 = 0$ به صورت زوج و فرد می‌باشند، می‌توان حل معادله را به دو گروه مود متقارن و مود نامتقارن تقسیم کرد. برای مودهای متقارن خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} u_1 &= ikA_2 \cos(px_3) + qB_1 \cos(qx_3) \\ u_3 &= -pA_2 \sin(px_3) - ikB_1 \sin(qx_3) \\ \sigma_{31} &= \mu[-2ikpA_2 \sin(px_3) + (k^2 - q^2)B_1 \sin(qx_3)] \\ \sigma_{33} &= -\lambda(k^2 + p^2)A_2 \cos(px_3) - 2\mu[p^2A_2 \cos(px_3) + ikqB_1 \cos(qx_3)] \end{aligned} \quad (14)$$

برای مودهای نامتقارن نیز خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} u_1 &= ikA_1 \sin(px_3) - qB_2 \sin(qx_3) \\ u_3 &= pA_1 \cos(px_3) - ikB_2 \cos(qx_3) \\ \sigma_{31} &= \mu[2ikpA_1 \cos(px_3) + (k^2 - q^2)B_2 \cos(qx_3)] \\ \sigma_{33} &= -\lambda(k^2 + p^2)A_1 \sin(px_3) - 2\mu[p^2A_1 \sin(px_3) - ikqB_2 \sin(qx_3)] \end{aligned} \quad (15)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود برای مود متقارن، ساختار موج در ضخامت ورق برای u_1 متقارن و برای u_3 نامتقارن است. از طرف دیگر برای مود نامتقارن، ساختار موج در ضخامت ورق برای u_1 نامتقارن و برای u_3 متقارن است. با اعمال شرایط مرزی ذکر شده، معادله مشخصه انتشار موج ورقه در صفحه نازک به شکل زیر استخراج می‌گردد.

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{مودهای متقارن} \quad (16)$$

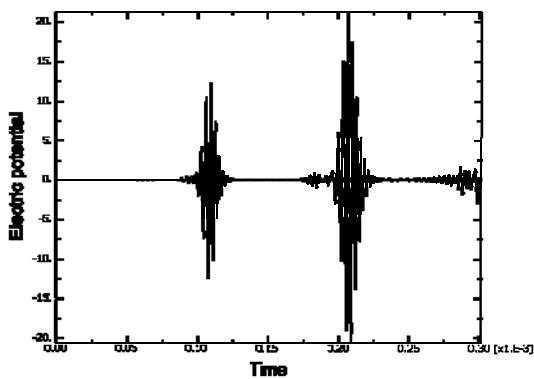
$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2pq} \quad \text{مودهای نامتقارن} \quad (17)$$

معادلات (۱۶) و (۱۷) روابط ریلی- لمب نام دارند. با توجه به این که امواج ورقه معمولاً در یک گروه منتشر می‌شوند (مودهای زیادی با هم ترکیب شده و منتشر می‌شوند)، بنابراین سرعت فاز نمی‌تواند رفتار انتشار موج ورقه را توصیف کند؛ مگر این که یک مود تنها در یک صفحه ایجاد شده باشد [۲۰]. از این رو پارامتر سرعت گروه تعریف شده و در منحنی دیسپرز به منظور شناسایی مودهای امواج منتشر شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از معادلات فوق می‌توان منحنی دیسپرز صفحات مورد نظر را به صورت تحلیلی استخراج نمود. منحنی دیسپرز به دست آمده برای سازه مورد بررسی در این مقاله در ادامه ارائه شده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده است.

7. Implicit
8. Explicit
9. ABAQUS

از آنجا که حسگر نیز توسط المان‌های متعددی مش‌بندی شده است، برای گرفتن پاسخ حسگر، از میانگین ولتاژ المان‌های سطح بالایی آن استفاده می‌گردد. شکل ۴ پاسخ حسگر را نشان می‌دهد.

بر اساس زمان رسیدن موج به حسگر، موج با سرعت ۳۵۷۱ متر بر ثانیه منتشر شده است. حال آن که سرعت تئوری انتشار مود A_0 در فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز و ضخامت ورق ۲ میلی‌متر برابر با ۳۰۴۷ و برای مود S_0 برابر با ۴۸۹۴/۹ متر بر ثانیه است. قله دیگر مشاهده شده در سیگنال، ناشی از انعکاس موج از مرز سمت راست است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد استفاده از روش ضمنی به منظور شبیه‌سازی ارسال و دریافت امواج ورقی، نتایج دقیقی به همراه خواهد داشت.



شکل ۴- پاسخ حسگر به ازای تحریک ولتاژ در مدل ضمنی

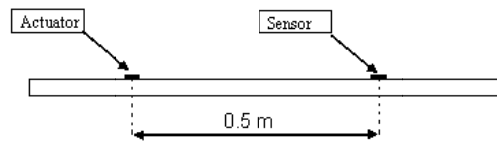
مدل صریح

همان‌گونه که ذکر گردید، علاوه بر روش ضمنی برای مدل‌سازی پدیده انتشار موج، روش صریح نیز در نرم‌افزار آباکوس قابل استفاده است. در این روش معادلات حرکت به صورت صریح در زمان انتگرال‌گیری می‌شوند. برخلاف روش ضمنی که در هر نمو زمانی، دستگاه یک معادله- یک مجهول حل می‌گردد، در روش صریح برای به دست آوردن جابجایی، ابتدا شتاب یک گره در یک نیم نمو زمانی به دست می‌آید و سپس با انتگرال‌گیری روی زمان، سرعت و نهایتاً جابجایی به دست خواهد آمد.

مشکلی که استفاده از روش صریح در مدل‌سازی انتشار موج ورقی ایجاد می‌کند این است که در خانواده المان‌هایی که در روش صریح در آباکوس قابل استفاده هستند، المان پیزوالکتریک وجود ندارد. لذا می‌بایست برای حسگر و عملگر، جایگزین مناسبی قرار داد. برای عملگر پیزوالکتریک یک نیروی افقی به جای عملگر پیزوالکتریک قرار داده می‌شود. در این مدل نیروی معادل از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۴]:

$$F_a = (E_a w a t_a) \frac{\gamma}{\gamma+6} \Lambda \quad , \quad \Lambda = \frac{d_{31a}}{t_a} V \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{E_a w a t_a}{E_p w p t_p}$$



شکل ۲- مدل در نظر گرفته شده برای مقایسه روش‌های ضمنی و صریح

در این مدل، یک صفحه آلومینیومی به طول ۱ متر و ضخامت ۲ میلی‌متر مدل‌سازی شده است. فاصله عملگر تا حسگر برابر با ۰/۵ متر تنظیم شده و اندازه عملگر و حسگر پیزوالکتریک هر کدام ۸ × ۰/۵ میلی‌متر است. خواص آلومینیوم و ماده پیزوالکتریک به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلومینیوم مورد استفاده در شبیه‌سازی

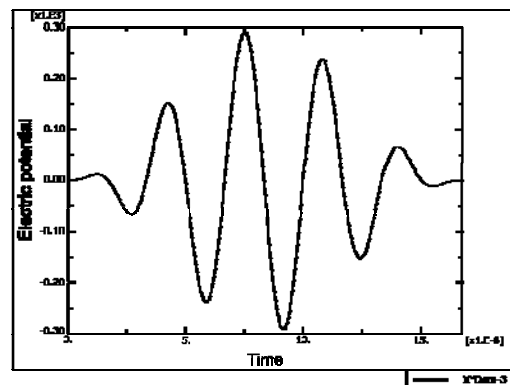
پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته	۶۹ GPa
نسبت پواسون	۰/۳
چگالی	۲۷۰۰ kg/m ³

جدول ۲- خواص مکانیکی و الکتریکی ماده پیزوالکتریک مورد استفاده در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته	۷۱/۴ GPa
نسبت پواسون	۰/۳
چگالی	۷۳۵۰ kg/m ³
دی‌الکتریک	۱/۵ × ۱۰ ^{-۸} F
e_{311}	۱۹۲۲۳ N/V·m ²
e_{322}	۸/۲۳۸۴ N/V·m ²
e_{333}	۸/۲۳۸۴ N/V·m ²

مدل ضمنی

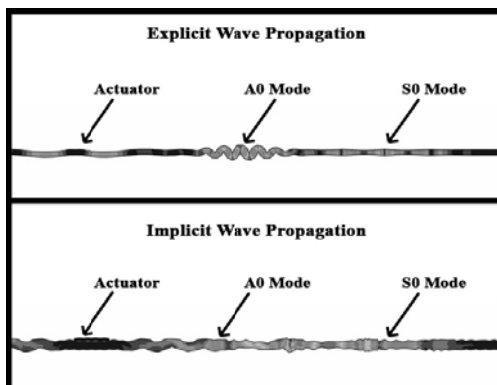
سیگنال تحریک عملگر که دارای فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز است در شکل ۳ نشان داده شده است. این سیگنال به دلیل داشتن چگالی انرژی زیاد، برای انجام شبیه‌سازی‌ها مناسب است.



شکل ۳- سیگنال تحریک مورد استفاده در شبیه‌سازی و تست‌های تجربی

شبیه‌سازی، آنالیز حساسیتی انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۳ ذکر شده است.

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، با توجه به هزینه محاسباتی به مراتب کمتر در روش صریح و دقت بالاتر نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج معادلات تحلیلی، می‌توان ادعا نمود که این روش به صورت قابل توجهی نسبت به رویکرد ضمنی برتری دارد. از این رو در انجام شبیه‌سازی‌های نهایی به منظور استخراج منحنی دیسپرز و همچنین سیگنال‌های مورد نیاز جهت تشخیص موقعیت عیب به روش توموگرافی، از رویکرد صریح استفاده می‌گردد.



شکل ۶- اختلاف رویکردهای صریح و ضمنی در شبیه‌سازی انتشار موج ورقی

جدول ۳- آنالیز حساسیت روش‌های ضمنی و صریح به گام زمانی مورد استفاده در شبیه‌سازی

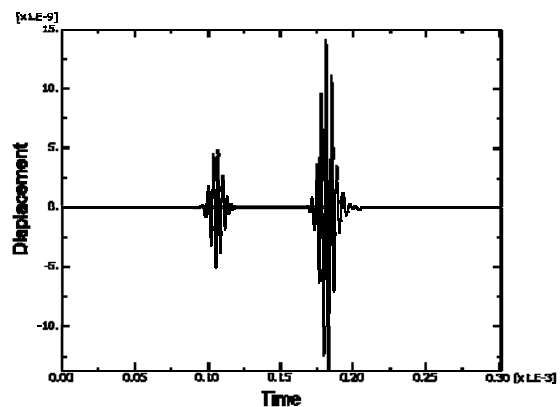
نوع حل	گام زمانی (μs)	زمان حل (min)	سرعت S ₀ مود (m/s)	سرعت A ₀ مود (m/s)	سرعت S ₀ مود (%)	خطای سرعت S ₀ مود (%)	خطای سرعت A ₀ مود (%)
ضمنی	۱۰	<۱	۵۴۴۳	۳۵۹۸	۱۱/۱۹	۱۸/۰۸	
ضمنی	۱	۳/۵	۵۴۲۱	۳۵۸۳	۱۰/۷۴	۱۷/۵۹	
ضمنی	۰/۱	۲۴	۵۴۰۲	۳۵۷۱	۱۰/۳۵	۱۷/۱۹	
ضمنی	۰/۰۱	۱۸۴	۵۳۸۴	۳۵۶۱	۹/۹۹	۱۶/۸۶	
صریح	۱۰	<۱	۴۹۶۱	۳۱۱۶	۱/۳۵	۲/۳۶	
صریح	۱	<۱	۴۹۴۳	۳۱۰۴	۰/۹۸	۱/۸۷	
صریح	۰/۱	<۱	۴۹۲۱	۳۰۹۴	۰/۵۳	۱/۵۴	
صریح	۰/۰۱	<۱	۴۹۱۴	۳۰۸۳	۰/۳۹	۱/۱۸	

استخراج منحنی دیسپرز

قدم بعدی در بررسی پدیده جدایش امواج، استخراج منحنی دیسپرز است. این منحنی براساس شبیه‌سازی‌های به عمل آمده با روش صریح استخراج می‌گردد. اما همان‌گونه که در قسمت قبل اشاره گردید، محدودیت استفاده از حلگر صریح در نرم‌افزار آباکوس، عدم وجود المان‌های پیژوالکتریک است. در نتیجه از اعمال جابجایی برای تحریک مودها استفاده می‌شود. نکته قابل توجه این است که از اعمال نیرو استفاده نمی‌شود؛ زیرا اعمال نیرو هر دو مود

در رابطه (۱۸)، اندیس a مربوط به عملگر و اندیس p نمایانگر صفحه می‌باشند. همچنین E, F, W, t و V به ترتیب مدول الاستیسیته، نیروی معادل، عرض، ضخامت و ولتاژ اعمالی می‌باشند. همچنین از آن‌جا که در مدل صریح از روش اجزای محدود مبتنی بر جابجایی استفاده می‌شود، میانگین جابجایی گره‌های متناظر با موقعیت حسگر، در جهت y به عنوان پاسخ دریافت می‌گردد.

اعمال نیروی افقی به عنوان تحریک در عملگر موجب تحریک هر دو مود A_0 و S_0 می‌گردد. شکل ۵ پاسخ حسگر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد پاسخ حسگر دارای دو قله است. قله اول ناشی از مود S_0 و قله دوم ناشی از مود A_0 است. سرعت به دست آمده برای مود S_0 برابر با ۴۹۱۴ متر بر ثانیه و برای مود A_0 برابر با ۳۰۸۳ متر بر ثانیه است. سرعت به دست آمده از رابطه تئوری برای این دو مود به ترتیب ۴۸۹۴/۹ و ۳۰۴۷ متر بر ثانیه است که در نتیجه می‌توان نتایج حاصل از تحریک نیروی افقی را مناسب ارزیابی کرد.



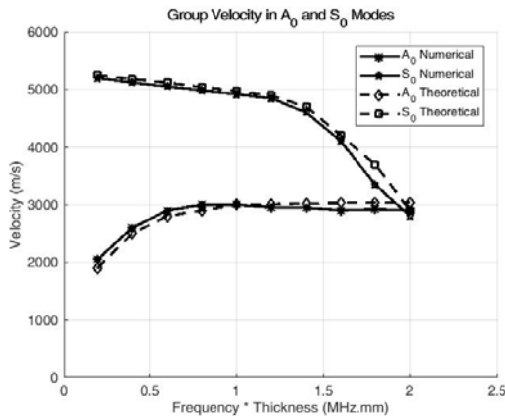
شکل ۵- پاسخ حسگر به ازای تحریک نیرو در مدل صریح

نکته‌ای که در تحریک با نیروی افقی وجود دارد، این است که این نوع تحریک سبب ایجاد دو مود در صفحه می‌گردد که در صورت استفاده از این نوع تحریک برای مقاصد عیب‌یابی، در صورت وجود عیب در سازه با رخ دادن پدیده تغییر مود در ناپیوستگی، هر مود منجر به ایجاد دو مود دیگر می‌شود که این امر بر پیچیدگی انتشار موج می‌افزاید.

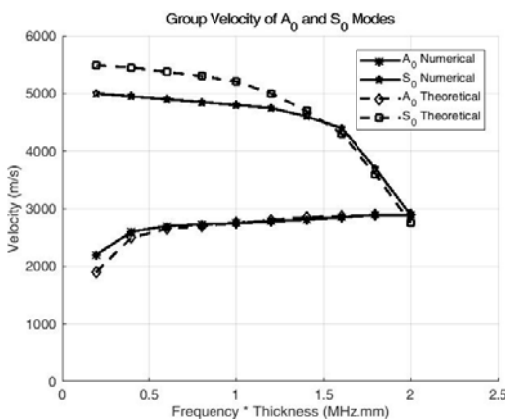
علاوه بر دقت بالاتر روش صریح نسبت به روش ضمنی در سرعت انتشار امواج، اختلاف این دو رویکرد در نحوه انتشار موج را همان‌گونه که در شکل ۶ نمایش داده شده است، نیز می‌توان بررسی نمود.

برای مقایسه بیشتر رویکردهای ضمنی و صریح در مدل‌سازی انتشار موج و اطمینان از استقلال نتایج از گام زمانی مورد استفاده در

است. نکته قابل توجه این است که با توجه به غلبه موج طولی بر موج عرضی در مود S_0 ، جابجایی افقی به عنوان سیگنال حسگر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ منحنی دیسپرز به دست آمده از تحریک گسترده نشان داده شده است.



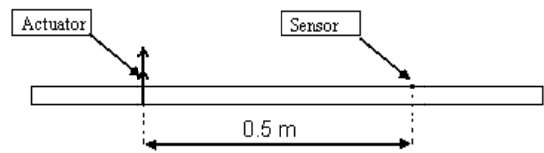
شکل ۹- منحنی دیسپرز به دست آمده برای صفحه آلومینیومی با تحریک تک نقطه‌ای



شکل ۱۰- منحنی دیسپرز به دست آمده برای صفحه آلومینیومی با تحریک گسترده

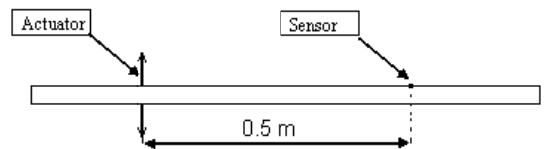
نتایج حاصل نشان می‌دهد که در تحریک گسترده، خطای منحنی دیسپرز بیشتر است و گاه تا حدود ۱۰٪ خطا وجود دارد. گام نهایی در فرآیند عیب‌یابی با استفاده از سیگنال‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی، شبیه‌سازی انتشار موج در حالت سه‌بعدی در هر دو سازه سالم و معیوب و ذخیره‌سازی سیگنال‌ها است. با توجه به تعداد زیاد عملگرها و حسگرها و همچنین با در نظرگیری فرآیند تعیین شده به منظور جایگزینی المان‌های پیزوالکتریک در حالت صریح، از یک کد پایتون^{۱۰} به منظور افزایش سرعت شبیه‌سازی‌ها استفاده گردیده است. نمونه‌ای از موج منتشر شده در شبیه‌سازی سه‌بعدی در حالت معیوب، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

مقارن و نامقارن را تحریک می‌کند. شکل ۷ اعمال جابجایی را برای تحریک مود A_0 در یک نقطه نشان می‌دهد.



شکل ۷- اعمال دو جابجایی هم‌جهت برای تحریک مود A_0

شبیه‌سازی به ازای فرکانس‌های ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز انجام شده است. با افزایش فرکانس، زمان رسیدن موج به حسگر کاهش می‌یابد و این به معنای بستگی سرعت به فرکانس است. روش اعمال جابجایی برای ایجاد مود S_0 نیز به کار گرفته شده است. بدین منظور دو جابجایی عمود بر صفحه در جهت مخالف هم به بالا و پایین محل عملگر اعمال می‌شوند. شکل ۸، اعمال جابجایی به عنوان تحریک کننده مود را نشان می‌دهد.



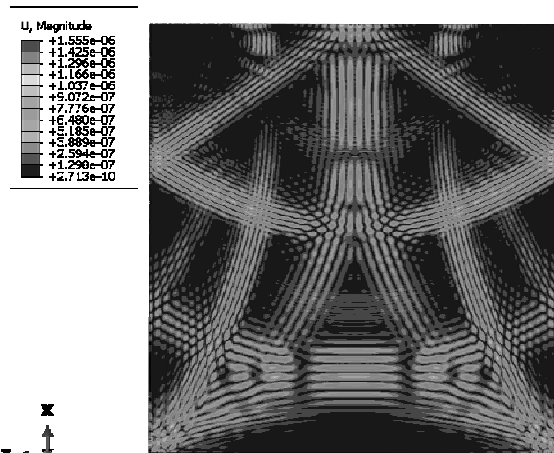
شکل ۸- اعمال دو جابجایی به صورت مقارن برای تحریک مود S_0

در خصوص مود S_0 با افزایش فرکانس، زمان رسیدن موج به حسگر افزایش می‌یابد که این امر به معنای این است که سرعت انتشار موج در مود S_0 با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. پس از انجام تحلیل‌هایی که در آن‌ها از جابجایی در یک نقطه به عنوان سیگنال تحریک در عملگر استفاده می‌شود، می‌توان منحنی دیسپرز را برای صفحه آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر به دست آورد. این منحنی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، استفاده از روش صریح برای مدل‌سازی انتشار موج، نتایج قابل قبولی را منتج می‌شود و تطابق خوبی بین یافته‌های حاصل از مدل‌سازی عددی و حل تحلیلی وجود دارد.

در عمل هیچ‌گونه تراگذاری نمی‌توان یافت که به صورت نقطه‌ای موج را در سازه ایجاد کند و حتما تراگذر دارای عرض محدودی است. برای در نظر گرفتن عرض عملگر، تحریک در نرم‌افزار بر روی مجموعه‌ای از گره‌ها انجام شده است. فاصله مرکز به مرکز حسگر و عملگر در مدل تحریک گسترده برابر با ۳۰ سانتی‌متر بوده و زمان قله سیگنال تحریک برابر با ۵۰ میکروثانیه

آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر و ابعاد ۷۰۰ در ۷۰۰ میلی‌متر استفاده گردیده است. سپس طبق شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، ۲۰ عدد پیزوالکتریک با چیدمان دایره‌ای به قطر ۲۵۰ میلی‌متر بر روی ورق نصب شده‌اند. برای تحریک پیزوالکتریک‌ها از دستگاه فانکشن ژنراتور استفاده می‌گردد. این دستگاه قابلیت تولید سیگنال‌های با توابع مختلف از قبیل سینوسی، پله‌ای، دندانه‌ای، نویز و ... با حداکثر ولتاژ ۲۰ ولت (قله به قله^{۱۴}) را دارا است. همچنین با استفاده از کد لب‌ویو می‌توان توابع دلخواه مختلف نیز ایجاد نمود. دستگاه دیگر موردنیاز برای انجام تست‌های تجربی، اسیلوسکوپ است. کاربرد این دستگاه، ثبت سیگنال‌های خروجی از پیزوالکتریک‌های حسگر و همچنین دریافت سیگنال تحریک است. بدین صورت که سیگنال ایجاد شده توسط دستگاه فانکشن ژنراتور توسط یک سه راهی به پیزوالکتریک و یکی از کانال‌های اسیلوسکوپ ارسال می‌گردد و همچنین سیم مربوط به دریافت پاسخ از سایر پیزوالکتریک‌ها به کانال دیگر آن متصل می‌شود. برای تغییر پیزوالکتریک‌های تحریک‌کننده و حسگر، از ۲ سطر و ۲۰ ستون یک ماتریس که دارای ۴ سطر و ۳۲ ستون است، استفاده گردیده است. بدین صورت که هر یک از دستگاه‌های فانکشن ژنراتور و اسیلوسکوپ به سطرها ماتریس و پیزوالکتریک‌ها به ستون‌های آن متصل می‌گردد. سپس با استفاده از نرم‌افزار توسعه داده شده، با اتصال سطر و ستون‌های موردنظر به یکدیگر در ابتدا تراگذر شماره ۱ تحریک‌شده و به کمک سایر پیزوالکتریک‌ها، سیگنال خروجی دریافت می‌گردد. سپس این فرایند برای تمامی پیزوالکتریک‌ها انجام شده و داده‌ها ذخیره می‌شوند. مجموعه ایجاد شده جهت انجام تست‌های تجربی توموگرافی، در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

همان‌گونه که اشاره شد، باید در ابتدا از سازه در حالت بدون عیب داده‌برداری نمود. برای این منظور پس از تهیه ورق آلومینیومی و اتصال پیزوالکتریک‌ها مطابق با چیدمان موردنظر و اتصال همه آن‌ها به ماتریس، فرآیند داده‌برداری آغاز می‌گردد. برای این منظور، تمام پیزوالکتریک‌ها یک مرتبه به عنوان محرک و سایر پیزوالکتریک‌ها به عنوان حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از داده‌برداری از حالت سالم، باید ترک‌های راه به در با طول‌های ۴، ۷ و ۱۰ میلی‌متر در سازه ایجاد گردد. این ترک‌ها همان‌گونه که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است، باید در محل‌های مشابه با ترک ایجاد شده در شبیه‌سازی (محل تقاطع خطوط با فاصله ۲۵ میلی‌متر از خطوط واصل پیزوالکتریک‌های ۱ و ۱۱ و همچنین ۶ و ۱۶) ایجاد گردد.



شکل ۱۱- موج منتشر شده در شبیه‌سازی سه‌بعدی سازه معیوب

پس از ثبت سیگنال‌ها در تمامی مسیرهای بین هر دو جفت پیزوالکتریک در هر دو حالت سالم و معیوب، با اعمال پردازش سیگنال که در ادامه توضیح داده خواهد شد می‌توان موقعیت عیب را شناسایی نمود.

تست تجربی

اجزای بستر تست تجربی در سه دسته کلی قرار می‌گیرند:

• زیرسیستم تولید سیگنال

• زیرسیستم داده‌برداری

• واحد پردازش و کنترل مرکزی

روند کلی برای طراحی و آماده‌سازی بستر تست آزمایشگاهی بدین صورت است که ابتدا صفحه مشخص شده با ابعاد و جنس مورد نظر فراهم می‌گردد. سپس تراگذارهای پیزوالکتریک با توجه به نتایج بدست آمده برای چیدمان آن‌ها، چسبانده می‌شوند. با توجه به تعداد زیاد المان‌های پیزوالکتریک و پیچیدگی تغییر عملگرها و حسگرها، از یک ماتریس به منظور خودکارسازی این فرآیند استفاده می‌گردد. بدین ترتیب پیزوالکتریک‌ها به ستون‌های ماتریس وصل می‌شوند. در مرحله بعد، دستگاه‌های اسیلوسکوپ^{۱۱} و فانکشن ژنراتور^{۱۲} به سطرها ماتریس متصل می‌گردند. برای افزایش سرعت انجام تست‌ها نیاز است که تنظیمات مورد نظر برای هر یک از این دستگاه‌ها به کمک کامپیوتر به آن‌ها اعمال گردد. از این رو برای برقراری ارتباط بین تجهیزات و کامپیوتر، از نرم‌افزار لب‌ویو^{۱۳} استفاده شده است.

مرحله اول در انجام تست‌های توموگرافی، آماده‌سازی بستر تست است. برای این منظور، همان‌طور که ذکر گردید از ورق

11. Oscilloscope
12. Function Generator
13. LabVIEW

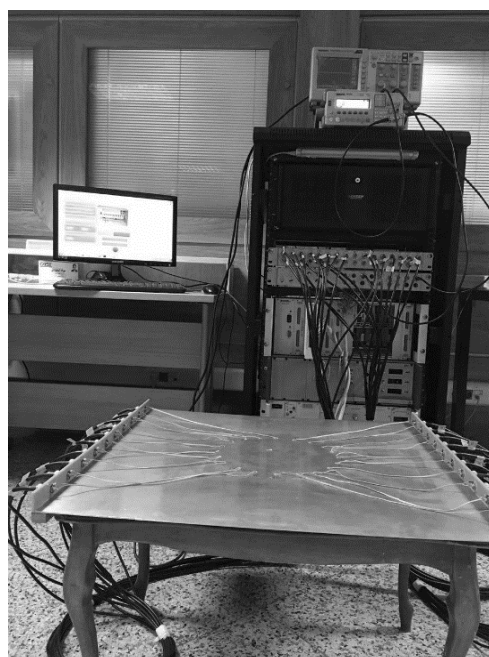
14. Peak-to-peak

سه دسته روش‌های حوزه زمان، روش‌های حوزه فرکانس و روش‌های حوزه زمان- فرکانس تقسیم‌بندی کرد. از میان این روش‌ها، می‌توان به تبدیل موجک، تبدیل هیلبرت- هوآنگ (HHT)، تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) و توزیع وینگر ویل (WVD) اشاره نمود [۱۹]. گروندل و همکارانش، مطالعه تجربی بر روی تشخیص مود موج ورقی براساس پردازش سیگنال دوگانه انجام دادند. به گفته وی، شناسایی تغییرات دامنه مود موج ورقی بر حسب میزان گسترش و ابعاد عیب در سازه، همچنان مشکل‌ترین گام در فرآیند عیب‌یابی به کمک امواج ورقی است [۲۵]. در یکی از کارهای انجام شده در حوزه پردازش سیگنال‌های دریافتی از کاوشگرهای^{۱۵} بازرسی غیرمخرب، هنرور و همکارانش روش جدیدی مبتنی بر ترکیبی از فیلتر وینر و برون‌یابی طیفی خود رگرسیون برای افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) ارائه نمودند. فیلتر وینر حوزه فرکانس از جمله ابزارهای پیشرفته‌ای است که برای تجزیه سیگنال دریافتی از سیستم NDE و بدست آوردن سهم موج منعکس شده از عیب در سیگنال دریافتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶].

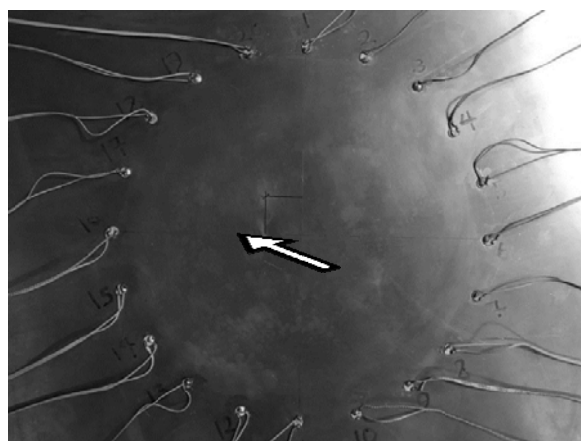
به‌طور کلی اساسی‌ترین پدیده‌هایی که در برخورد موج با ترک رخ می‌دهند عبارتند از عبور موج، انعکاس موج و تغییر مود موج که تغییر مود هم در عبور و هم در انعکاس رخ می‌دهد. دقت و صحت روش‌های عیب‌یابی به کمک امواج ورقی، به شدت متأثر از روش‌های پردازش و تفسیر سیگنال‌های دریافتی از حسگرها و شبکه حسگرها است. براساس نتایج تحلیلی بدست آمده، در صورت وجود عیب در سازه، همواره تغییراتی در سیگنال ثبت شده مشاهده می‌شود. نکته مهم، شناسایی این تغییرات و استخراج ارتباط آن‌ها با پارامترهای مهم خرابی (مانند وجود عیب، مکان، اندازه و شدت) می‌باشد. با این حال، وجود چالش‌هایی نظیر حضور چندین مود مختلف موج، دیسپرژن، تبدیل مود، برهم‌نهی امواج منتشر شده از مرزها و نامنظمی‌ها، نویزهای باند پهن و دیگر ویژگی‌ها این فرآیند را مشکل می‌سازد.

به‌طور کلی به روش‌هایی که با استفاده از پردازش سیگنال‌های حاصل از به‌کارگیری ارائه‌های منظم یا به طور دقیق‌تر بهره‌گیری از چیدمان المان‌های پیزوالکتریک به صورت یکی از اشکال هندسی مانند دایره یا مربع، تصویر سازه و عیوب موجود در آن را بازسازی می‌نمایند، توموگرافی گفته می‌شود.

مبنای اصلی هر روش عیب‌یابی، تفاوت در سیگنال دریافتی از حالت سالم و حالت معیوب است. این تفاوت ناشی از رفتار موج در برخورد با عیب است که پدیده‌هایی چون انعکاس، عبور و پراش را



شکل ۱۲- بستر تست مورد استفاده جهت انجام تست‌های تجربی



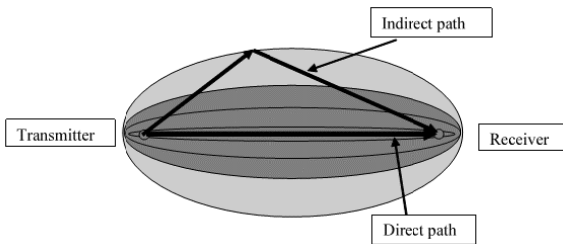
شکل ۱۳- محل ایجاد ترک در بستر تست تجربی

پس از ایجاد هر یک از ترک‌ها، داده‌برداری برای تمام مسیرهای موجود انجام و سیگنال‌های دریافت شده، ذخیره می‌گردند. با انجام پردازش سیگنالی که در ادامه معرفی می‌گردد، می‌توان موقعیت عیب را شناسایی نمود که حاصل آن در بخش نتایج ارائه شده است.

توسعه کد الگوریتم پردازش سیگنال‌های دریافتی از شبیه‌سازی و ایجاد توموگرام

از دیگر حوزه‌های مرتبط با عیب‌یابی توسط امواج ورقی، مبحث سیگنال‌های دریافتی از حسگرها، پردازش آن‌ها و استخراج شاخص مناسب است. به طور کلی روش‌های پردازش سیگنال را می‌توان به

ارسال کننده- دریافت کننده که هر یک به صورت جداگانه دارای یک توزیع احتمالی رخداد عیب در همسایگی خود می‌باشند، در نظر گرفته شود. در این جا، همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، توزیع احتمال رخداد عیب برای هر جفت المان ارسال کننده- دریافت کننده به صورت یک احتمال کاهشی بیضوی با کانون‌هایی که بر روی حسگرها قرار دارند، محاسبه می‌گردد.



شکل ۱۴- تابع توزیع بیضوی برای عیب‌یابی [۲۷]

با در نظر گرفتن تعداد N المان پیزوالکتریک در ارائه شبکه حسگرها، تخمین احتمال وجود عیب در نقطه (x, y) در ناحیه مورد بازرسی، با $P(x, y)$ نشان داده می‌شود و عبارت است از:

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N P_{ij}(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N A_{ij} \left(\frac{\beta - R_{ij}(x, y)}{\beta - 1} \right) \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، $P_{ij}(x, y)$ به معنی تخمین توزیع احتمال وجود عیب در سیگنال ثبت شده توسط المان فرستنده i و دریافت شده توسط المان j است. همچنین نماد ضریب تغییرات سیگنال SDC برای جفت حسگر S_{ij} است.

$$A_{ij} = 1 - \rho_{ij} \quad (23)$$

توجه شود که براساس اثر متقابل ارسال امواج، سیگنالی که از جفت حسگر S_{ij} ثبت می‌گردد با سیگنال ثبت شده از S_{ij} یکسان است. بنابراین تعداد $\frac{N(N-1)}{2}$ مجموعه داده مورد نیاز است. عبارت $\left(\frac{\beta - R_{ij}(x, y)}{\beta - 1} \right)$ توزیع کاهشی خطی نامفی است که همان شکل کانتورهای بیضی‌گون را دارد و در آن $R_{ij}(x, y)$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R_{ij}(x, y) = \begin{cases} R D_{ij}(x, y) & R D_{ij}(x, y) < \beta \\ \beta & R D_{ij}(x, y) \geq \beta \end{cases} \quad (24)$$

$$R D_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{\sqrt{(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2}} \quad (25)$$

در فرمول‌بندی ارائه شده، $R D_{ij}(x, y)$ بیانگر نسبت مجموع فواصل نقطه (x, y) از المان ارسال کننده موج i و المان

به همراه دارد. مقایسه دو سیگنال سالم و معیوب نیازمند تعریف یک شاخص مناسب جهت بیان اختلاف سیگنال بین این دو حالت است که در ادامه به تعریف آن پرداخته می‌شود. سیگنالی که در حالت سالم ثبت می‌شود، سیگنال مرجع یا سیگنال پایه نامیده می‌شود. سیگنال‌های جدیدی که پس از آن جمع‌آوری می‌شوند برای مقایسه با سیگنال‌های مرجع و یافتن ویژگی‌هایی از سیگنال که دچار تغییر عمده شده‌اند به کار می‌روند. تغییرات مشاهده شده در سیگنال‌ها، به شرطی که در شرایط یکسان محیطی و کاری و با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری همسان ثبت شده باشند، نشان از ایجاد عیبی در سازه دارد. با پیگیری متناوب اطلاعات بدست آمده از افزایش تغییرات سیگنال‌ها در شرایط یکسان، می‌توان به نتایج کاربردی در خصوص رشد ترک و عیوب موجود در سازه دست یافت.

به بیان ساده ریاضی، تغییرات ایجاد شده در سیگنال‌ها نسبت به حالت پایه، با استفاده از بررسی ضریب همبستگی قابل ارائه است:

$$\rho = \frac{C_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (19)$$

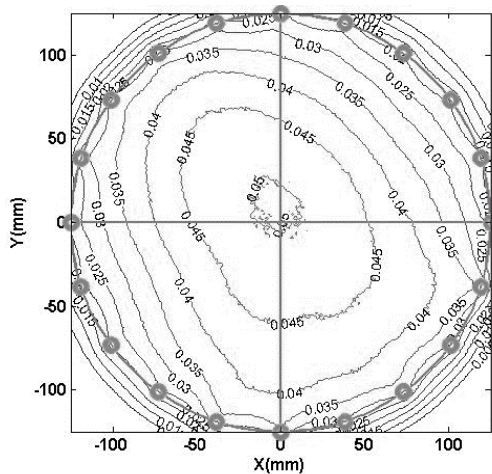
در رابطه (۱۹)، C_{XY} همان کواریانس X و Y است و عبارت است از:

$$C_{XY} = \sum_{k=1}^K (X_k - \mu_X)(Y_k - \mu_Y) \quad (20)$$

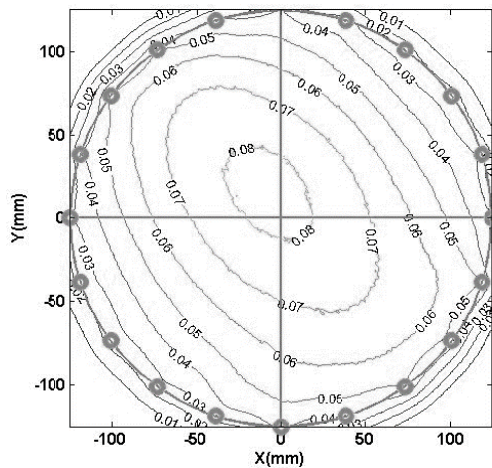
در رابطه (۲۰)، μ میانگین هر یک از مجموعه داده‌ها است و K برابر با طول مجموعه داده‌ها در سیگنال است. در این حالت، X سیگنال حالت سالم یا سیگنالی است که پس از راه‌اندازی اولیه سامانه ثبت می‌گردد و Y مربوط به مجموعه سیگنال‌های جدیدی است که پس از مدت مشخصی سرویس‌دهی سازه ثبت می‌شود. σ_X و σ_Y انحراف استاندارد متناظر با سیگنال‌های X و Y می‌باشند و حاصل ضرب آن‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_X \sigma_Y = \sqrt{\sum_{k=1}^K (X_k - \mu_X)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^K (Y_k - \mu_Y)^2} \quad (21)$$

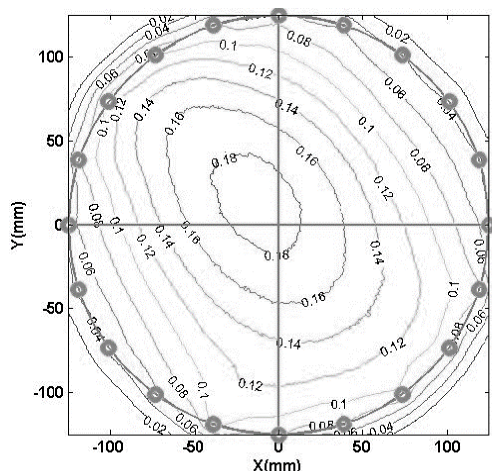
برای این که بتوان موقعیت ترک یا عیب ایجاد شده در سازه را شناسایی نمود، فرض می‌شود که احتمال رخداد عیب در هر نقطه از سازه، تابعی از شدت تغییرات سیگنال‌های دریافتی از هر جفت حسگر و موقعیت نسبی این نقطه نسبت به حسگرها باشد. این موضوع از دیدگاه فیزیکی نیز مشهود است؛ چنان که عیبی بیشترین تغییر را در سیگنال‌ها ایجاد می‌کند که در مسیر مستقیم المان فرستنده موج و دریافت‌کننده آن سیگنال قرار گرفته باشد. از سوی دیگر هر چه از مسیر مستقیم میان عملگر- حسگر فاصله گرفته شود، تأثیر عیب بر روی سیگنال کم می‌شود؛ بنابراین، توزیع احتمالی وجود عیب در چنین شبکه حسگری، می‌تواند به صورت مجموع خطی اثر تغییرات ایجاد شده در سیگنال هر جفت



شکل ۱۵- توموگرام توزیع احتمال حضور ترک ۴ میلی متری در صفحه آلومینیومی حاصل از تست‌های تجربی



شکل ۱۶- توموگرام توزیع احتمال حضور ترک ۷ میلی متری در صفحه آلومینیومی حاصل از تست‌های تجربی



شکل ۱۷- توموگرام توزیع احتمال حضور ترک ۱۰ میلی متری در صفحه آلومینیومی حاصل از تست‌های تجربی

دریافت‌کننده پاسخ z ، نسبت به فاصله میان جفت حسگر S_{ij} است. توجه شود که حسگرها در واقع بر روی کانون‌های بیضی قرار دارند. β پارامتر تنظیم سائز مؤثر توزیع بیضی‌گون و همواره بزرگ‌تر از یک است. اگر $R_{ij}(x,y) = 1$ ، آنگاه نقطه (x,y) در مسیر مستقیم میان دو حسگر قرار گرفته است که نتیجه آن $P_{ij}(x,y) = A_{ij}(x,y)$ خواهد بود. وقتی که $R_{ij}(x,y) = \beta$ باشد، آنگاه نقطه (x,y) بر روی مرز مؤثر توزیع احتمالی بیضی‌گون قرار گرفته است و $P_{ij}(x,y) = 0$ است. اگر β کوچک باشد اشکالاتی در تصاویر بازسازی شده به وجود می‌آید و در صورتی که این عدد بزرگ باشد، تصویر به دست آمده کیفیت مناسبی نخواهد داشت. با بررسی‌های صورت گرفته به ازای مقادیر مختلف β ، در پردازش‌های انجام شده، مقدار این پارامتر برابر با $1/0.2$ در نظر گرفته شده است.

نتایج

همان‌گونه که بیان شد روش توموگرافی بر اساس احتمال حضور ترک در نقاط مختلف صفحه ترسیم می‌گردد. برای تخمین محل ترک تشخیص داده شده توسط نرم‌افزار، میانگین مختصات نقاطی که احتمال وجود عیب در آن‌ها بیش از ۹۵ درصد حداقل مقدار احتمال تعیین شده می‌باشد، در هر راستا به عنوان مرکز ترک در نظر گرفته می‌شود.

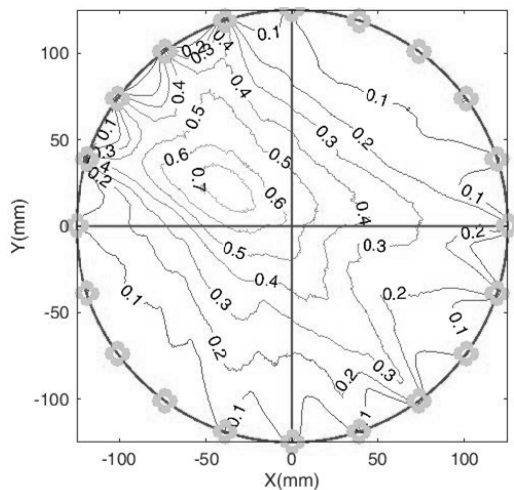
پارامتر دیگری که معیار مناسبی برای ارزیابی نتایج می‌باشد، محاسبه خطا در تشخیص محل عیب است. برای این منظور خطا به صورت درصد اختلاف بین محل عیب تشخیص داده شده توسط نرم‌افزار با محل واقعی عیب نسبت به قطر دایره چیدمان پیزوالکتریک‌ها که همان ناحیه مورد بررسی است، تعریف می‌شود. این تعریف به صورت فرمول در رابطه (۲۶) آورده شده است.

$$(26) \quad \text{خطا}(\%) = \frac{\text{فاصله مرکز ترک در حالت واقعی و تخمین زده شده}}{\text{قطر دایره چیدمان پیزوالکتریک‌ها}} \times 100$$

توموگرام‌های حاصل از سیگنال‌های دریافتی در تست‌های تجربی برای هر یک از ترک‌های با طول ۴، ۷ و ۱۰ میلی‌متر در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ نمایش داده شده است.

محل ترک شناسایی شده با طول ۴ میلی‌متر در تست‌های تجربی دارای مختصات (۹/۵۵۵۹ و -۴/۰۵۸) می‌باشد که با محل اصلی عیب تقریباً ۲۶ میلی‌متر فاصله دارد.

محل عیب با طول ۷ میلی‌متر در تست‌های تجربی در مختصات (۱۵/۲۸۹۱ و -۷/۲۳۹۳) تخمین زده شده است که با نقطه اصلی عیب در حدود ۲۰ میلی‌متر فاصله دارد.



شکل ۲۰- توموگرام توزیع احتمال حضور ترک ۱۰ میلی‌متری در صفحه آلومینیومی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی

در این حالت نیز محل عیب با طول ۱۰ میلی‌متر در شبیه‌سازی‌های عددی در مختصات (۳۶/۹۳۵۶ و -۲۱/۳۷۶۱) تخمین زده شده است که با محل واقعی عیب ۱۲ میلی‌متر فاصله دارد.

با توجه به رابطه تعریف شده برای تعیین خطای محل عیب (رابطه ۲۶) و با توجه به این که قطر دایره چیدمان پیزوالکتریک‌ها برابر با ۲۵۰ میلی‌متر است، مقادیر خطا برای هر یک از طول‌های ترک ایجاد شده مطابق با جدول ۴ خواهد بود.

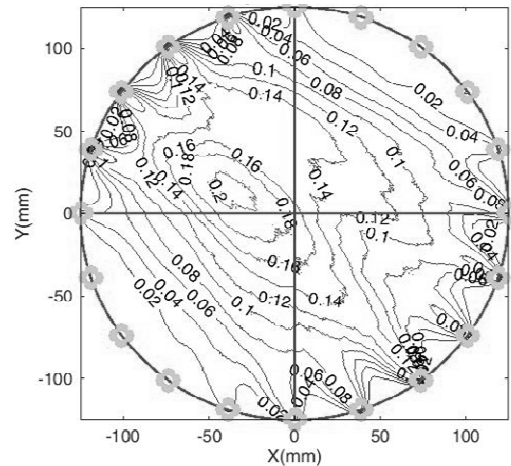
جدول ۴- خطای تعیین موقعیت عیب در تست‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی

طول ترک (میلی‌متر)	خطای تست تجربی (%)	خطای شبیه‌سازی (%)
۴	۱۰/۴	۲/۸۵۴
۷	۸	۲/۵۴۳
۱۰	۶/۸	۲/۲۰۵

بررسی نتایج

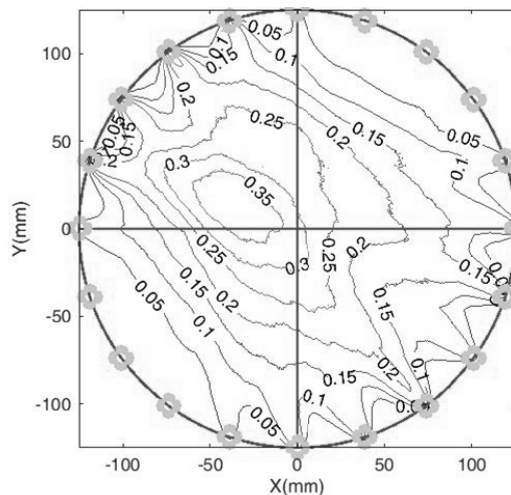
مقادیر عددی نمایش داده شده در توموگرام‌های ارائه شده در قسمت قبل، بیانگر احتمال وجود عیب در هر ناحیه است که با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه گردیده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ مشاهده می‌شود، بیشترین مقادیر احتمال وجود عیب در حالت تجربی به ترتیب برای ترک‌های با طول ۷، ۴ و ۱۰ میلی‌متر برابر با ۵، ۸ و ۱۸ درصد است. در حالی که در توموگرام‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده (شکل‌های ۱۸ الی ۲۰)، میزان احتمال وجود عیب برای هر یک از ترک‌ها به ترتیب برابر ۲۰، ۳۵ و ۷۰ درصد می‌باشد که از دلایل عمده این اختلاف

در این حالت نیز محل عیب با طول ۱۰ میلی‌متر در تست‌های تجربی در مختصات (۱۳/۲۴۹۷ و -۱۲/۶۸۳۰) تخمین زده شده است که با محل واقعی عیب ۱۷ میلی‌متر فاصله دارد. توموگرام‌های حاصل از سیگنال‌های دریافتی در شبیه‌سازی‌های عددی برای هر یک از ترک‌های با طول ۷، ۴ و ۱۰ میلی‌متر در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸- توموگرام توزیع احتمال حضور ترک ۴ میلی‌متری در صفحه آلومینیومی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی

محل ترک شناسایی شده با طول ۴ میلی‌متر در شبیه‌سازی‌های عددی دارای مختصات (۳۵/۴۶۹۹ و -۱۲/۷۱۰۳) می‌باشد که با محل اصلی عیب تقریباً ۱۶ میلی‌متر فاصله دارد.



شکل ۱۹- توموگرام توزیع احتمال حضور ترک ۷ میلی‌متری در صفحه آلومینیومی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی

محل عیب با طول ۷ میلی‌متر در شبیه‌سازی‌های عددی در مختصات (۳۳/۳۴۳۸ و -۱۳/۲۷۸۶) تخمین زده شده است که با نقطه اصلی عیب در حدود ۱۴ میلی‌متر فاصله دارد.

خارج دایره بازرسی، انتشار موج بیشتر به سمت داخل دایره است و لذا کانتورهای یکنواختی حاصل شده است.

در این مقاله با توجه به در دسترس بودن پیزوالکتریک ۳۰۰ کیلوهرتز، شبیه‌سازی‌ها براساس این فرکانس انجام گرفته است و نشان داده شده است که با استفاده از پیزوالکتریک با فرکانس رزونانس ۳۰۰ کیلوهرتز می‌توان عیب به‌صورت ترک ۴ میلی‌متری را در دایره ۲۵۰ میلی‌متری تشخیص داد.

به عنوان مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات پیشین، می‌توان به مقاله لو و همکاران اشاره نمود که با استفاده از ۴ پیزوالکتریک و با به‌کارگیری تبدیل موجک، تابع همبستگی و الگوریتم بهینه‌سازی حداقل مربعات غیرخطی به تعیین موقعیت ترک‌های ۵ و ۲۰ میلی‌متری در یک صفحه آلومینیومی پرداختند. در این پژوهش، لو و همکاران در ناحیه بررسی مستطیلی شکل به ابعاد ۲۰۰ میلی‌متر در ۲۶۰ میلی‌متری، اختلاف‌های ۲۳ و ۱۵ میلی‌متری بین موقعیت دقیق ترک و موقعیت شناسایی شده گزارش نمودند [۲۸]. این در حالی است که با روش مورد استفاده در مقاله حاضر، برای ترک‌های ۴ و ۱۰ میلی‌متری اختلاف‌های موقعیت‌های شناسایی شده با موقعیت دقیق ترک به ترتیب برابر با ۲۶ و ۱۷ میلی‌متر حاصل شد. لذا هر دو روش مورد استفاده در طول ترک‌های پایین عملکرد مشابه داشته و با افزایش طول ترک، دقت روش توموگرافی به مراتب بهتر خواهد بود.

در پژوهشی دیگر نیز پاسکو و همکاران، موقعیت ترک ۵۰ میلی‌متری در یک ناحیه مستطیلی به ابعاد ۱۰۵۰ میلی‌متر در ۷۵۰ میلی‌متر را به روش معکوس زمانی، با اختلاف ۲۰ میلی‌متر تعیین نمودند [۲۹].

بنابراین با توجه به طول کمتر ترک بررسی شده در این پژوهش و همچنین محدودیت‌های سخت‌افزاری موجود در انجام تست‌های تجربی، می‌توان گفت روش ارائه شده در این مقاله از دقت بالاتری در تشخیص موقعیت ترک در صفحه نسبت به سایر روش‌های معرفی شده برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارائه روشی برای شناسایی موقعیت عیوب با طول‌های مختلف و بررسی عملکرد آن به‌صورت عددی و تجربی پرداخته شد. روش معرفی شده، یک الگوریتم بر پایه داده‌های دریافت شده در بازه‌های زمانی مختلف و مقایسه آن با داده‌های اولیه در سازه سالم است. اولین گام در این فرآیند، تعیین روابط حاکم بر انتشار امواج ورقی و استخراج منحنی‌های دیسپرژن بود. در ادامه، با توجه به روش‌های مختلف موجود به منظور شبیه‌سازی‌های

می‌توان به وجود نویز در سیگنال‌های دریافتی در تست تجربی اشاره کرد. از آن‌جا که نویز یک سیگنال تصادفی بوده و در تعیین نسبت بین دامنه سیگنال حالت سالم به حالت معیوب خطا ایجاد می‌کند، بر مقادیر معیار اختلاف سیگنال‌های محاسبه شده و در نتیجه در احتمال وجود عیب تعیین‌شده توسط نرم‌افزار تأثیر می‌گذارد؛ در حالی که در شبیه‌سازی‌ها چنین مشکلی وجود نداشته و عیب شناسایی شده با احتمال بیشتری تعیین گردیده است.

راهکار افزایش احتمال تعیین‌شده توسط نرم‌افزار توموگرافی در تست‌های تجربی، بهبود نسبت سیگنال به نویز در سیگنال‌های دریافتی می‌باشد که این امر با افزایش ولتاژ تحریک و بهبود تجهیزات مورد استفاده میسر می‌گردد و فرایند تست تفاوت چندانی نخواهد داشت. از این رو می‌توان گفت تست‌های تجربی به روش توموگرافی با دقت قابل قبولی محل ترک ایجاد شده در سازه را پیش‌بینی نموده است و با استفاده از تجهیزات پیشرفته‌تر مانند دستگاه مولد سیگنال با ولتاژ بالا و دستگاه تقویت‌کننده می‌توان نتایج دقیق‌تری به‌دست آورد.

مشاهده می‌گردد که در خصوص تشخیص وجود عیب، هر دو روش قابلیت تشخیص را دارند و کانتوری که نشان‌دهنده یک ناحیه دارای عیب باشد، را ارائه می‌کنند. این مسئله از این حیث دارای اهمیت است که تشخیص عیب در مرحله اول باید صورت گیرد تا در مراحل بعدی بتوان آن را ارزیابی نمود و مشخصات هندسی آن را استخراج کرد. با تشخیص عیب در یک ناحیه، هزینه بازرسی کل سازه به هزینه بازرسی آن ناحیه محدود می‌شود و چه‌بسا حتی با روش‌های دیگر بتوان مشخصات دقیق عیب را استخراج نمود.

در خصوص تخمین موقعیت عیب، به دلیل وجود نویز، عدم یکنواختی ترک ایجاد شده در تست و در نتیجه، پراکندگی نامنظم میدان منعکس‌شده و عبوری، خطای تخمین موقعیت در روش تجربی بیشتر است.

همان‌گونه که ذکر گردید، در صورت برخورد موج به عیب، میدان‌های موج عبوری، انعکاسی و پراش یافته تشکیل می‌گردند که مخصوصاً میدان پراش یافته با جبهه کروی، نقش به‌سزایی در سیگنال دریافتی در پیزوهای مجاور دارد. میدان پراش یافته تابعی از هندسه نوک ترک است و با توجه به تفاوت هندسه نوک ترک در بستر تست و مدل عددی، طبیعی است که نتایج این دو روش با هم متفاوت باشد. نکته مثبت در این تست تجربی این است که با وجود این که نوک ترک (شیار) ایجاد شده تیز نیست و میدان پراش یافته نامنظمی ایجاد می‌نماید، باز هم تشخیص عیب انجام گرفته است که نشان‌دهنده مقاوم بودن روش به تغییرات اندک عیب است.

نکته قابل توجه این که میدان موج منتشره در روش تجربی به دلیل هندسه پیزوالکتریک‌ها و قرار داشتن الکترود منفی در سمت

- عدم قابلیت تشخیص عیوب اولیه ناشی از فرآیندهای ساخت و مونتاژ
 - نیاز به پیش‌بینی نواحی بحرانی سازه
 - نیاز به تجهیزات سوئیچینگ تراگذرهای عملگر و حسگر به صورت اتوماتیک
- در نهایت با پردازش سیگنال‌های دریافتی از تحلیل‌های عددی و تست‌های تجربی، مشخص شد که الگوریتم معرفی شده در این مقاله، با ماکزیمم خطای حدود ۳ درصد در تحلیل‌های عددی و خطای حدود ۱۰ درصد در تست‌های تجربی، موقعیت کوچک‌ترین عیب بررسی شده (با طول ۴ میلی‌متر) را شناسایی کرده است.

مراجع

- [1] Rose, J.L., *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge University Press, 2014.
- [2] Lamb, H., On waves in an elastic plate, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, Vol. 93, No. 648, pp. 114-128, 1917.
- [3] Rose, J.L., A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential, *Journal of pressure vessel technology*, Vol. 124, No. 3, pp. 273-282, 2002.
- [4] Xiang, L., Wei, G., Xunbo, L., Zhiyong, Z. and Yeji, L., "Ultrasonic Guided Wave Scattering Matrices and Tomography Using Sparse Arrays for Defect Characterization," in *Proceeding of, IEEE*, pp. 688-693, 2017.
- [5] Xu, C.-b., Yang, Z.-b., Zhai, Z., Qiao, B.-j., Tian, S.-h. and Chen, X.-f., "A weighted sparse reconstruction-based ultrasonic guided wave anomaly imaging method for composite laminates," *Composite Structures*, Vol. 209, 2018, pp. 233-241.
- [6] Golato, A., Santhanam, S., Ahmad, F., Amin, M.G., "Multifrequency and multimodal sparse reconstruction in Lamb wave based structural health monitoring," in *Proceeding of, International Society for Optics and Photonics*, pp. 94371U.
- [7] Mokhtari, A., Ohadi, A. and Amindavar, H., "Reconstructing the damage shape in aluminum plate using guided Lamb wave and polygon reconstruction technique in Tomography," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, 2015, pp. 239-246
- [8] Benmeddour, F., Grondel, S., Assaad, J. and Moulin, E., "Study of the fundamental Lamb modes interaction with symmetrical notches," *Ndt & E International*, Vol. 41, No. 1, 2008, pp. 1-9.
- [9] Benmeddour, F., Grondel, S., Assaad, J. and Moulin, E., "Experimental study of the A0 and S0 Lamb waves interaction with symmetrical notches," *Ultrasonics*, Vol. 49, No. 2, 2009, pp. 202-205.
- [10] Deng, Q.-t. and Yang, Z.-c., "Scattering of S0 Lamb mode in plate with multiple damage," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35, No. 1, 2011, pp. 550-562.

عددی، رویکردهای مختلف تشریح شده و با انجام شبیه‌سازی‌های دو بعدی و مقایسه منحنی دیسپرز استخراچ شده به صورت عددی با نتایج حاصل از روابط تحلیلی، روش مناسب برای انجام مدل‌سازی عددی انتخاب گردید. در ادامه با توجه به مشخصات سازه هدف و منحنی دیسپرز مربوطه، فرکانس مناسب برای تحریک مودهای مورد نظر انتخاب گردیده و شبیه‌سازی‌های سه بعدی به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی انجام گرفته است. لازم به ذکر است، در کاربردهای صنعتی نیز برای تعیین مشخصات پیزوالکتریک مناسب و همچنین اطمینان از نتایج حاصل، انجام تحلیل‌های عددی توصیه می‌گردد. در ادامه با پیاده‌سازی فرآیند به صورت تجربی، عملکرد روش معرفی شده در این مقاله بررسی گردیده است.

از مزایای روش پیشنهادی در این مقاله می‌توان به موارد زیر

اشاره نمود:

- عدم تأثیر زیاد کیفیت اتصال تراگذرها به ورق به علت مقایسه سیگنال‌های هر مسیر با خودش (به عنوان مثال در صورتی که به علت عدم اتصال کاملاً مناسب یکی از تراگذرها به سازه، ۹۰٪ از انرژی موجود توسط این پیزوالکتریک دریافت شود، به علت این که در هر دو حالت سالم و معیوب همین ضریب در انرژی اصلی ضرب شده و برای محاسبه احتمال وجود عیب، مطابق با رابطه (۱۹) انرژی سیگنال‌های حالت معیوب و سالم تقسیم می‌شوند، اثر ضریب ناشی از عدم اتصال کاملاً مناسب تراگذر حذف می‌گردد)
 - عدم نیاز به انجام تست‌های اولیه در حضور عیب‌های مختلف و گردآوری مجموعه مرجع (با توجه به ماهیت روش که یک الگوریتم زمانی می‌باشد، نیازی به کالیبراسیون و ایجاد مجموعه مرجع نمی‌باشد)
 - عدم نیاز به مهارت اپراتور در انجام تست و تحلیل نتایج (با توجه به نرم‌افزارهای اتوماسیون توسعه داده شده با رابط کاربری ساده، نیازی به اپراتور با دانش فنی زیاد در حوزه عیب‌یابی با امواج ورق نمی‌باشد)
 - قابلیت یکپارچه شدن تراگذرها با سازه (قابلیت نصب تراگذرهای پیزوالکتریک بر روی سازه در حین ساخت)
 - عدم تأثیر موج‌های بازتاب شده از لبه‌های ورق بر نتایج به علت وجود در هر دو تست سازه سالم و معیوب (این پارامتر نیز اثری مشابه به حالت عدم اتصال کاملاً ایده‌آل تراگذرها با سازه دارد و به علت مقایسه مسیرهای مشابه در سازه‌های سالم و معیوب، تأثیر چندانی بر نتایج نخواهد داشت)
- از معایب و نقاط ضعف الگوریتم پیشنهادی نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: