



ساخت و آزمایش یک تراگذار پیزو کامپوزیتی جهت بازرسی سازه های ورقی در تماس با سیال به کمک امواج لمب

محمد حسین سورگی^{*}, کلیفورد ژس لیسندن²

۱- استیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- استاد، علوم مهندسی و مکانیک، دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا، استیت کالج، آمریکا

* تهران، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۱۷۱۹ mh_soorgee@sbu.ac.ir

چکیده

در این مقاله طراحی، ساخت و آزمایش یک تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک جهت استفاده در بازرسی سازه های ورقی در تماس با سیال، به کمک امواج لمب، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا تحلیل دیسپرزن و ساختار موج برای انتخاب مُد و فرکانس مناسب جهت بازرسی صفحه در تماس با سیال انجام شده است. مُد S₁ با تغییر مکان خارج از صفحه صفر در سطوح آزاد ورق فولادی با ضخامت مشخص، استخراج گشته، سپس یک تراگذار شانه ای پیزوالکتریک برای تحریک این مُد طراحی و ساخته شده است. پس از ساخت تراگذار، ابتدا آزمون های لازم برای اثبات عدم تأثیر پذیری موج لمب در مُد و فرکانس انتخابی از وجود سیال بر روی ورق به دو روش ارسال - دریافت و ارسال - بازتاب با موقیت انجام شده است. سپس ترک یابی در صفحه در تماس با سیال به دو روش فوق نیز صورت گرفته است و نشان داده شده است که در آزمون انجام شده است. سیس ترک یابی در صفحه در تماس با سیال به دو روش فوق نیز صورت گرفته است و نشان داده شده است که در آزمون ارسال - دریافت با وجود ترک با بایان علوم، دامنه مُد S₁ دریافتی در حسگر پیزوالکتریک کاهش می یابد. همچنین در آزمون ارسال - بازتاب، بدليل تداخل پاسخ رزونانسی تراگذار و امواج ناشی از موج مشتره در سیگنال دریافتی، از تبدیل موجک پیوسته به عنوان یکی از روش های پردازش سیگنال حوزه زمان - فرکانس استفاده گشته و وجود ترک در ورق با موقیت تشخیص داده شده است. در نتیجه تراگذار ساخته شده برای عیوب یابی در سازه های ورقی در تماس با سیال به کمک امواج لمب دارایی کارایی مناسب بیاشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: ۱۰ آبان ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۱ دی ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۲۹ دی ۱۳۹۵

کلید واژگان:

امواج لمب

ورق در تماس با سیال

تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک

Fabrication and test of a piezo-composite transducer for inspection of plate structures in contact with fluid using Lamb waves

Mohammad Hossein Soorhee^{1*}, Clifford Jesse Lissenden²

1- Department of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Department of Engineering Science and Mechanics, Pennsylvania State University, State College, PA, USA

* P.O.B. 16576-1719, Tehran, Iran, mh_soorgee@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 31 October 2016

Accepted 31 December 2016

Available Online 18 January 2017

Keywords:

Lamb waves

plate in contact with fluid

piezoelectric fiber composite transducer

ABSTRACT

In this paper, design, fabrication and test of piezoelectric fiber composite transducer for Lamb wave inspection of fluid loaded plates has been investigated. First, dispersion and wave structure analysis has been performed in order to select proper mode and frequency for fluid loaded plate inspection. The S₁ mode with zero out of plane displacement in free boundaries of a plate with predefined thickness has been extracted; afterwards a piezoelectric fiber composite comb transducer has been designed and fabricated. Having manufactured the transducer, necessary tests have been done in order to prove that the transducer generated Lamb mode at selected mode and frequency is not affected by the fluid loading, in both pitch-catch and pulse-echo techniques. The tests have been done successfully and then crack detection in fluid loaded plate by means of fabricated transducers has been examined again in both pulse-echo and pitch-catch arrangements. It has been shown that in pitch-catch test, the presence of a predefined crack leads to decrease in S₁ mode related peak in receiver. Moreover, in pulse-echo test, due to the interference of crack reflected wave signal with the transducer resonance response, continuous wavelet transform, as one of time-frequency signal processing methods, has been employed successfully for crack detection. Consequently, the fabricated signal has necessary efficiency for damage detection in fluid loaded plates using lamb waves.

پایش سازه های استفاده از امواج هدایت شده فرآصوتی برای بازرسی سازه های

ساخته شده از ورق مانند مخازن تحت فشار، بال هواییما، خطوط لوله و سایر سازه های ساخته شده از ورق، رو به گسترش است. این امواج نخستین بار توسط هوراس لمب [1] معرفی گردیده است. همچنین مبانی تئوری و مفاهیم اصلی مرتبط با این امواج نظیر دیسپرزن و ساختار موج در [2] ارائه شده

پایش سلامت سازه، امروزه به عنوان یکی از مراحل مهم در بهره برداری و

تمیرات و نگهداری هر سیستم صنعتی مطرح است زیرا به کمک پایش به موقع و تشخیص به هنگام عیوب در سیستم می توان از بروز سدمات و خسارات مالی و جانی جلوگیری کرد. از میان روش های متعدد بازرسی و

-۱- مقدمه

Please cite this article using:

M. H. Soorhee, C. J. Lissenden, Fabrication and test of a piezo-composite transducer for inspection of plate structures in contact with fluid using Lamb waves, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 375-382, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. H. Soorhee, C. J. Lissenden, Fabrication and test of a piezo-composite transducer for inspection of plate structures in contact with fluid using Lamb waves, *Modares Mechanical*

تراگذارها نظیر درصد اختلاط الیاف پیزو و ماتریس زمینه و نیز اثرات جهت قطبیت و قرارگیری الکترودها به صورت عددی و با شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود بررسی شده است. این تراگذارها در [13] به صورت نواری ساخته شده و برای بازرسی صفحات همگن با مُد S_0 در فرکانس 370 kHz به صورت تجربی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج موقوفیت‌آمیزی به همراه داشته‌اند.

هدف این پژوهش، طراحی، ساخت و آزمایش یک تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک^۱ (PFC) برای تحریک مُد مناسب جهت بازرسی صفحات در تماس با سیال می‌باشد. تحقیق تحریک‌پذیری مُد مناسب مهم‌ترین هدف این پژوهش است. بدین منظور ابتدا با تحلیل دیسپرژن و ساختار موج، مُد مناسب برای سازه هدف انتخاب گشته، و سپس براساس مبانی تراگذارهای شانه‌ای، تراگذار مربوطه طراحی گشته، پس از ساخت، به صورت تجربی مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

۲- انتخاب مُد و فرکانس مناسب

برای بازرسی به روش امواج هدایت شده فراصوتی، می‌بایست ابتدا مُد و فرکانس مناسب انتخاب شود. این امر با استخراج منحنی‌های دیسپرژن و ساختار موج مربوط به هر مُد در هر فرکانس انجام می‌گیرد. تئوری‌های مربوطه در [2] در دسترس است. با حل معادله مشخصه ریلی-لمب منحنی‌های دیسپرژن استخراج می‌گردد. معادله مشخصه ریلی-لمب برای مدهای متقاضان در رابطه (1) و برای مدهای نامتقاضان در رابطه (2) داده شده است [2].

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (1)$$

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

در این روابط $q^2 = \omega^2/C_T^2 - k^2$ و $p^2 = \omega^2/C_L^2 - k^2$. همچنین در رابطه فوق ω فرکانس، C_L و C_T به ترتیب سرعت موج طولی و عرضی، k عدد موج و h ضخامت صفحه است.

از آن جایی که در این پژوهش بازرسی صفحات در تماس با سیال مدنظر است، مُد انتخاب می‌بایست ویژگی مناسب برای انتشار در صفحه در تماس با سیال داشته باشد. بدین منظور می‌بایست دارای تغییر مکان خارج از صفحه (u3) مینیمم باشد زیرا وجود سیال ویسکوز، امواج دارای جزء تغییر مکان خارج از صفحه را میرا می‌کند. لذا می‌بایست سرعت فاز ذرات روی صفحه با سرعت موج طولی یکسان شود. این امر بدان دلیل است که اگر بنا باشد ذرات روی سطح تنها دارای جابجایی داخل صفحه باشند، به این معناست که حرکت آن‌ها مانند حرکت ذرات در موج طولی، در راستای انتشار موج خواهد بود و لذا سرعت فاز آن‌ها با سرعت موج طولی یکسان خواهد بود. منحنی‌های دیسپرژن سرعت فاز ورق فولادی با ضخامت ۶.25 mm در "شکل ۱" نشان داده شده است.

در مُد S_1 و در فرکانس 620 kHz سرعت فاز با سرعت موج طولی یکسان می‌شود و مُد لمب S_1 متناظر با این فرکانس دارای تغییر مکان خارج از صفحه برابر با صفر خواهد بود. این موضوع در "شکل ۲-d" که نشان‌دهنده منحنی ساختار موج مُد S_1 می‌باشد، قابل مشاهده است. در "شکل ۲" منحنی‌های ساختار موج برای تمامی مدهای موجود در فرکانس 620 kHz به صفحه فولادی به ضخامت ۶.25 mm نشان داده شده است. برخلاف رویه مرسم رسم نمودار، در این نمودارها محور افقی بیانگر متغیر وابسته و محور

است. هر فرآیند عیب‌یابی شامل چهار گام اساسی به قرار ذیل است: (الف) امکان‌سنجی عملیاتی، (ب) انتخاب تراگذار^۲، ارسال موج و دریافت سیگنال، (ج) پردازش سیگنال و استخراج ساختار، (د) تصمیم‌گیری براساس شاخص‌های استخراجی و تعیین مشخصات عیب [3]. در بازرسی به کمک امواج هدایت شده فراصوتی، چهار گام اشاره شده به صورت (الف) انتخاب مُد و فرکانس مناسب، (ب) انتخاب نوع، تعداد و چیدمان تراگذارها، ارسال موج و دریافت سیگنال، (ج) پردازش سیگنال و استخراج ساختار مناسب و (د) تصمیم‌گیری در خصوص مشخصات عیب انجام می‌گیرد [4]. خلاصه ای از مقالات منتشر شده در حوزه بازرسی به کمک امواج هدایت شده فراصوتی نیز در [4] به تفکیک گام‌های چهارگانه ذکر شده ارائه شده است. در [5] مدهای انتشار امواج لمب در یک ورق آلومینیوم چسبیده شده به یک ورق کامپوزیت با دو روش اجزاء محدود و آزمون تجربی استخراج گشته است. همچنین در [6] منحنی‌های دیسپرژن امواج لمب در یک میکرو ورق آلومینیوم نیتیرید با استفاده از تئوری تنش کوپلی سازگار استخراج گشته است. علاوه بر پژوهش در حوزه مبانی اساسی نظیر مدهای انتشار و منحنی‌های دیسپرژن، پژوهش‌ها در حوزه بازرسی اتصالات و نیز روش‌های بازسازی تصویر برای تعیین اندازه عیب انجام شده است. در [7] مدهای قابل انتشار در یک اتصال چسبی سه لایه هم بدون در نظر گرفتن تأثیر منبع تولید موج و هم با در نظر گرفتن تأثیر منبع مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده است که کدام یک از مدهای قابل انتشار دارای اتفاق کمتری هستند. در [8] یک روش برای دسته‌بندی عیوب در صفحه و لوله توسط امواج لمب به کمک تبدیل موجک و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است و نشان داده شده است به کمک این روش می‌توان عیوب ترک و خوردگی را از هم تمیز داد. در [9] توسط الگوریتم توموگرافی، بازسازی شکل یک عیوب متشابه در صفحه با استفاده از امواج لمب انجام شده است.

سازه‌های واقعی صنعتی اغلب دارای پیچیدگی‌هایی نظیر تقویت‌کننده‌ها، سوراخ پیچ و پرج، تماس با سیال، خمکاری و سایر ویژگی‌هایی هستند که موج منتشره فراصوتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا ضروری است تا در توسعه روش بازرسی به کمک امواج هدایت شده، به این ویژگی‌های سازه‌های صنعتی نیز توجه شود. از جمله این پیچیدگی‌ها، وجود سیال درون سازه‌هایی چون مخازن تحت فشار و خطوط لوله است که باعث نشت انرژی موج فراصوتی به سیال شده و انرژی آن را کاهش می‌دهد. در [10] یک مدل ریاضی برای انتشار امواج لمب در صفحات ناهمسانگرد در تماس با سیال ارائه شده است. در این پژوهش نشان داده شده است که سرعت فاز در صفحه در تماس با سیال به میزان اندازی کا صفحه بدون تماس با سیال متفاوت است. همچنین در [11] استفاده از امواج برشی افقی با جبهه صفحه‌ای برای بازرسی صفحات معرفی شده است که به دلیل استفاده از مد برشی افقی، گزینه مناسبی برای بازرسی صفحات در تماس با سیال می‌باشد.

یکی از مهمترین بخش‌های بازرسی سطوح در تماس با سیال، انتخاب مُد و فرکانس مناسب و طراحی و ساخت تراگذار مناسب برای تحریک مُد مربوطه در فرکانس انتخاب شده است. تراگذارهای کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک که در [12] معرفی شده‌اند، با توجه به قابلیت طراحی برای تحریک مُد مناسب از طریق تعیین درصد اختلاط و جهت قرارگیری الیاف پیزوالکتریک، گزینه مناسبی برای به کارگیری در تحریک مُد مطلوب برای بازرسی صفحات در تماس با سیال می‌باشند. در [12] ملاحظات طراحی این

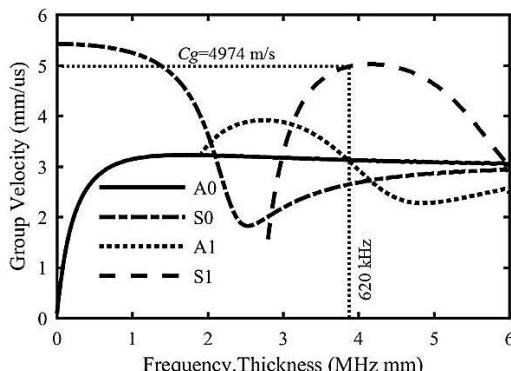
¹ Transducer

² Piezoelectric Fiber Composite transducer

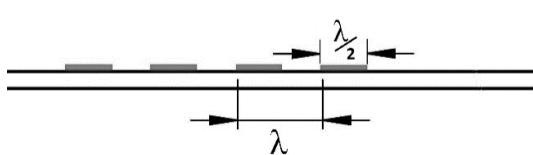
پایین ورق می‌باشد و لذا این امر موج می‌گردد در اثر وجود سیال، موج به سرعت میرا گردد زیرا تغییر مکان خارج از صفحه با همان u_3 در آب روی ورق طولی ایجاد کرده و باعث افت انرژی موج در ورق می‌گردد. حال آن که براساس منحنی "شکل ۲-۲" مقدار تغییر مکان خارج از صفحه m_1 (u_3) در فرکانس مربوطه بر روی سطوح بالا و پایین ورق صفر می‌باشد و این بدان معناست که ذرات روی سطح در این m_1 و فرکانس تنها دارای مولفه جابجایی افقی هستند و کمتر از وجود سیال تاثیر می‌پذیرند. لذا m_1 با حاصل ضرب فرکانس در ضخامت ۳.۸۸ MHz mm برای بازرسی ورق در تماس با سیال، انتخاب می‌شود که برای صفحه به ضخامت m_1 فرکانس ۶.۲۵ mm با سیال، انتخاب می‌شود که برای صفحه به ضخامت m_1 فرکانس ۹.۵ mm مناسب برابر با ۶۲۰ kHz بود. طول موج متناظر برابر با ۹.۵ mm می‌باشد. در این فرکانس، سرعت گروه m_1 سیال ۴۹۷۴ m/sec برابر با ۴۹۷۴ m/sec بود که در "شکل ۳" مشخص شده است. همچنین براساس "شکل ۳" سرعت گروه سایر m_1 ها در این فرکانس، حدود ۲۰۰۰ m/sec از m_1 کمتر است و لذا در سیگنال‌های دریافتی جدایش مناسبی بین پیک‌های m_1 و سایر m_1 ها رخ خواهد داد.

۳- طراحی تراگذار شانه‌ای برای تحریک m_1 منفرد

پس از انتخاب m_1 و فرکانس مناسب، می‌بایست تراگذار مناسب برای تحریک این m_1 در این فرکانس طراحی و ساخته شود. با توجه به این که در فرکانس انتخابی ۶۲۰ kHz در صفحه به ضخامت ۶.۲۵ میلی‌متر، m_1 های چهارگانه A_0 ، A_1 ، S_0 و S_1 وجود دارند، استفاده از یک تراگذار کلاسیک تک کریستاله برای تحریک، منجر به تحریک هر چهار m_1 خواهد شد. لذا ضروری است تا به نحوی، تنها بتوان m_1 خالص S_1 را تحریک نمود. یکی از روش‌های ممکن برای تحریک m_1 خالص، استفاده از تراگذار شانه‌ای می‌باشد. مبانی طراحی و عملکرد این نوع تراگذار در [۱۴] ارائه شده است. در حالتی که قرار باشد تاخیر فازی در تحریک کریستال‌ها نباشد، باید فاصله کریستال‌ها برابر با طول موج بوده و عرض آن‌ها نصف طول موج باشد. این موضوع در "شکل ۴" نشان داده شده است.

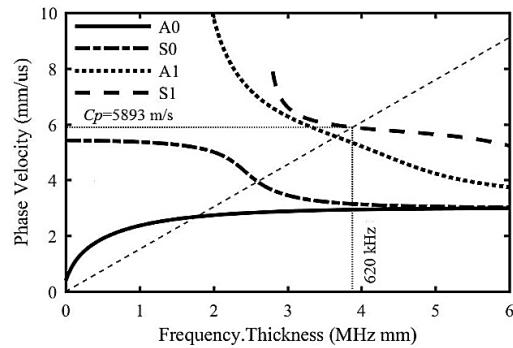


شکل ۳ منحنی‌های دیسپرژن مربوط به سرعت گروه، برای فولاد با $C_L=5893$ و $C_T=3247$ m/sec برای ورق با ضخامت ۶.۲۵ میلی‌متر

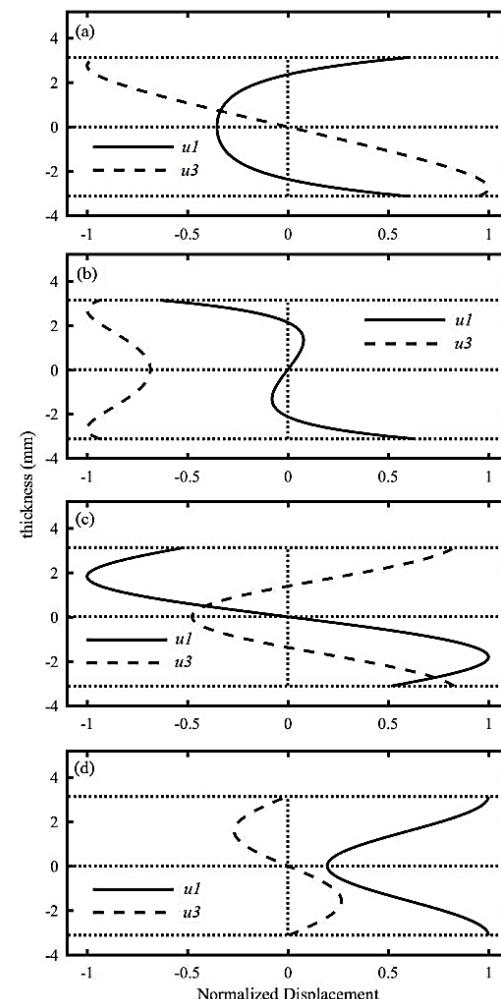


شکل ۴ نمای کلی آرایش یک تراگذار شانه‌ای

شکل ۴ نمای کلی آرایش یک تراگذار شانه‌ای



شکل ۱ منحنی‌های دیسپرژن مربوط به سرعت فاز، برای فولاد با $C_L=5893$ و $C_T=3247$ m/sec



شکل ۲ منحنی‌های ساختار موج برای m_1 های (a) A_0 ، (b) S_0 ، (c) A_1 و (d) S_1 در ۶۲۰ kHz برای ورق فولادی به ضخامت ۶.۲۵ mm

قائم به دلیل هم راستا بودن با ضخامت ورق - بیانگر متغیر مستقل است. خطوط نقطه چین افقی بالا و پایین معرف سطوح بالا و پایین ورق است.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در m_1 های A_0 ، S_0 و A_1 ساختار موج منتشره دارای مقدار غیر صفر تغییر مکان خارج از صفحه بر روی سطوح بالا و

برگزیده شده است. دو عدد تراگذار روی بستر آزمون توسط چسب مرسوم به چسب فوری چسبانده شده است. تصویری شماتیکی از بستر آزمون تجربی به همراه ابعاد آن و محل نصب تراگذارها در "شکل 7" نشان داده شده است. بدلیل این که آزمون بر روی بستر در حالات سالم و ترکدار صورت می‌گیرد، در شکل شماتیک ارائه شده محل ترک و شکل آن نیز نشان داده شده است حال آن که در آزمایش‌های مربوط به حالت سالم، ترک وجود ندارد. خواص فولاد مورد استفاده به گونه‌ایست که سرعت‌های موج طولی و عرضی به ترتیب $C_L = 5893 \text{ m/sec}$ و $C_T = 3247 \text{ m/sec}$ می‌باشد.

تصاویر بستر آزمایش به کار رفته برای حالات خشک و در تماس با سیال در "شکل 8" نشان داده شده است.

برای تماس سیال با صفحه از یک دستمال آغشته به آب استفاده شده است. از یک کامپیوتر صنعتی مجهز به کارت برداری با فرکانس نمونه برداری 100MHz و کارت ارسال- دریافت فرماحتی با بیشینه ولتاژ قله به قله 300 Volts . مجهز به نرم‌افزار LB ویو برای انجام آزمایش استفاده شده است. همچنین یک سیگنال تحریک تون برست¹ هشت سیکله برای با فرکانس 620kHz برای تحریک PFC1، پراسس "شکل 7"، به عنوان عملگر به کار رفته است. در خصوص سیگنال تون- برست اطلاعات بیشتر در [4] موجود است.

4- صفحه خشک

سیگنال دیجیتی از PFC2 در این آزمایش در "شکل 9-a" ملاحظه می‌گردد. اولین پیک در زمان $t=137 \mu\text{sec}$ به حسگر رسیده است که با توجه به زمان

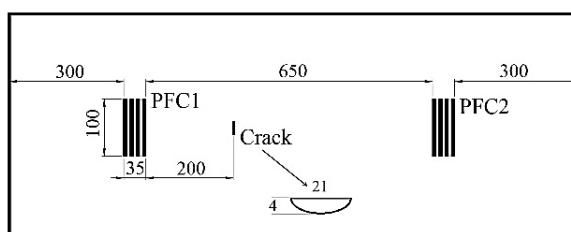
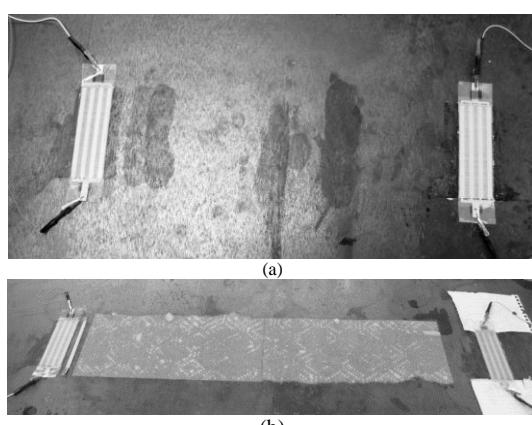


Fig. 7 Geometry and arrangement of experimental setup (dimensions are in mm)

شکل 7 هندسه و چیدمان بستر آزمون تجربی (ابعاد به mm)



شکل 8 تصویر بستر آزمون تجربی برای حالت صفحه سالم (a) خشک و (b) در تماس با سیال

¹ Tone-burst

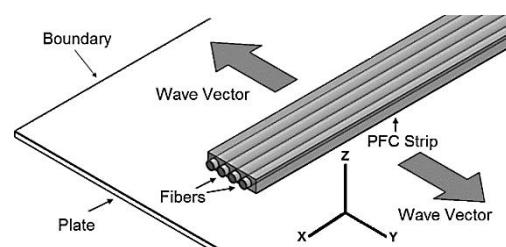
برای ساختن چنین تراگذاری در این پیوهش از الیاف پیزوالکتریک در ماتریس اپوکسی استفاده شده است. جهت درک بهتر مساله، نمای شماتیکی از یک تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک در "شکل 5" نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، به طور مثال اگر الیاف در راستای x بوده و الکترودها میدان الکتریکی را در راستای z اعمال کنند، این امر موجب انتشار موج در جهت y می‌گردد.

تراگذار ساخته شده در "شکل 6" نشان داده شده است. درصد حجمی الیاف در کامپوزیت برابر 0.85 بوده و جهت قطبیت الیاف پیزو عمود بر جهت خود الیاف می‌باشد. برای ساخت تراگذار شانه‌ای بدین صورت عمل شده است که یک قطعه مستطیلی کامپوزیت با الیاف پیزوالکتریک ارائه شده است و سپس الکترودهای آن به صورت شانه‌ای با فاصله مناسب با طول موج مطلوب، 9.5 mm ، روی آن قرار داده شده است. این امر بدان دلیل است که ساخت تک نوارهای باریک به عرض 4.75 mm و سپس تعبیه آنها بر روی ورق در فواصل 9.5 mm کار دشواری بوده و نیز محدودیت در ساخت نوار به عرض 4.75 mm وجود داشته است. در [15] توضیحات بیشتر در خصوص نحوه تولید الیاف پیزوالکتریک ارائه شده است.

براساس محورهای نشان داده در "شکل 6"، الیاف در جهت y بوده و قطبیت پیوهها در راستای z صورت گرفته است. قطبیت دهی به پیوهها با همان الکترودهای نصب شده به صورت شانه‌ای انجام گرفته است. در [12] در خصوص ملاحظات طراحی تراگذارهای پیزوکامپوزیتی به تفصیل مطالبی ارائه شده است. تراگذار ساخته شده ابتدا بر روی صفحه سالم بدون ترک آزمایش می‌گردد و پس از تایید کارایی در ارسال و دریافت مُد s، برای ترکیابی نیز استفاده خواهد گردید.

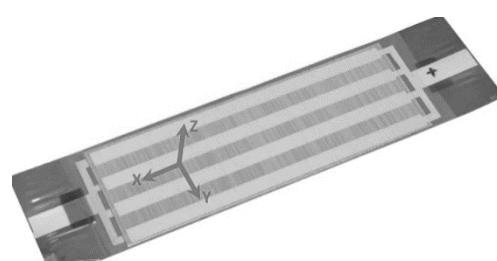
4-آزمون تجربی تراگذار روی صفحه سالم به روش ارسال- دریافت

پس از ساخت تراگذار مناسب، ابتدا آزمایش آن بر روی صفحه خشک سالم انجام گرفته است. بدین منظور یک بستر آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. یک صفحه فولادی به ضخامت 6.25 mm به عنوان محیط انتشار موج



شکل 5 نمای شماتیکی از یک تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزو روی صفحه [13]

شکل 5 نمای شماتیکی از یک تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزو روی صفحه [13]



شکل 6 نمونه تراگذار PFC شانه‌ای ساخته شده

شکل 6 نمونه تراگذار PFC شانه‌ای ساخته شده

هر سیگنال حاصل شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد پیک مربوط به مُد S_1 که در بازه زمانی 120 تا 160 μsec قرار دارد، در حالات صفحه خشک و در تماس با سیال تغییری نکرده است اما دامنه پیک‌های سایر مُدها که در بازه زمانی 160 تا 210 μsec هستند کاهش چشمگیر داشته و میرا شده است و لذا تأثیر ناپذیری دامنه مُد S_1 در فرکانس مشخص شده از وجود سیال بر روی صفحه اثبات می‌گردد.

5-آزمون تجربی تراگذار روی صفحه سالم به روش ارسال-بازتاب
با توجه به این که ممکن است در کابردی‌های عیوب‌یابی، نیاز باشد تا آزمون به روش ارسال-بازتاب نیز انجام گیرد، قابلیت انجام این آزمون نیز باید توسط تراگذار ساخته شده بررسی گردد. لذا در آزمایش بعدی بر روی بستر نشان داده شده در "شکل 7" از PFC1 همزمان به عنوان عملگر و حسگر استفاده می‌شود. سیگنال‌های دریافتی در حالت صفحه خشک و همچنین در تماس با سیال در "شکل 10" نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که برای آزمایش حالت در تماس با سیال در روش ارسال-بازتاب، هر دو طرف PFC1 دستمال آغشته به آب قرار داده شده است.

در سیگنال حالت خشک و در تماس با سیال، قبل از پیک مربوط به انعکاس از دیواره سمت چپ، یک پیک مشاهده می‌گردد که در "شکل 10-a" و "شکل 10-b" تحت عنوان پاسخ دینامیکی تراگذار از آن یاد شده است. در واقع با

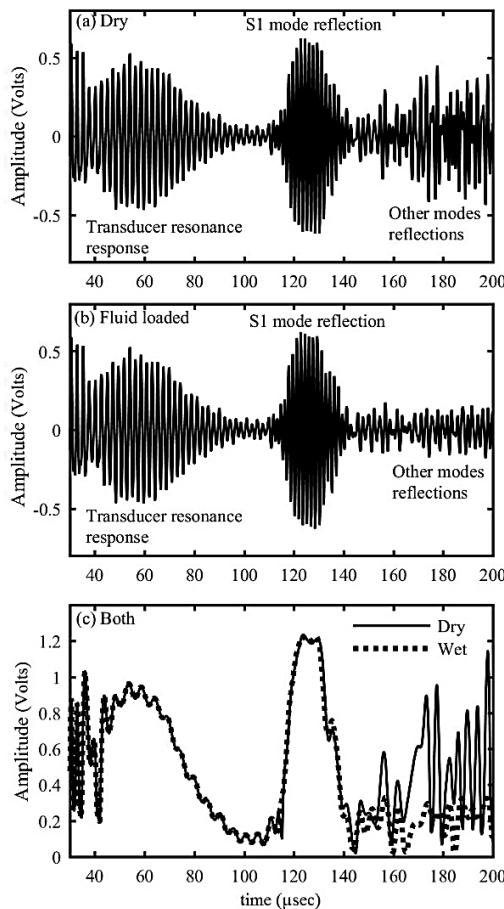


Fig. 10 Signals got from PFC1 as actuator and receiver for healthy plate, (a) dry plate, (b) fluid loaded plate, (c) peak to peak amplitude of a and b

شکل 10 سیگنال دریافتی از PFC1 به عنوان حسگر و عملگر در آزمایش صفحه سالم در حالات (a) خشک، (b) در تماس با سیال. (c) مقدار قله قله حالات a و b

مرکزی تحریک تون برست هشت سیکله با فرکانس 620kHz، که $6.4 \mu\text{sec}$ است، این موج حدود 130.6 μsec در حرکت بوده که با توجه به فاصله 650 mm بین حسگر و عملگر، سرعت گروه آن حدود 4977 m/sec می‌گردد که تطابق بسیار مناسبی با سرعت محاسبه شده از منحنی دیسپرژن نشان داده شده در "شکل 3" دارد. لذا پیک اول متعلق به مُد S_1 است. این پیک دارای تعداد سیکل نوسان بیشتری نسبت به تون برست با هشت سیکل نوسان است که به دلیل پهنای باید S_1 در فرکانس 144kHz سیگنال تحریک و دیسپرس بودن منحنی سرعت گروه مُد S_1 در فرکانس 620 kHz است که براساس "شکل 3" قابل درک است. همچنین سایر پیک‌ها مربوط به سایر مُدها، یعنی A_{00} و S_0 و A_1 هستند که سرعت گروه تقریباً نزدیک به همی دارند. لذا تحریک‌پذیری مُد S_1 توسط تراگذار ساخته شده تایید می‌گردد. در مرحله بعد یک دستمال آغشته به آب و اشباع شده بین دو تراگذار قرار داده می‌شود تا تأثیر وجود سیال بر مُدهای منتشره بررسی گردد.

4-صفحه در تماس با سیال

سیگنال دریافتی از PFC2 به عنوان حسگر در حالتی که بین دو تراگذار دستمال آغشته به آب قرار داده است، در "شکل 9" نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در پیک مرتبط با مُد S_1 تغییر حاصل نشده است اما دامنه پیک‌های ثانویه مربوط به سایر مُدها کاهش یافته است. برای درک بهتر، مقدار قله به قله دو سیگنال حالات خشک و در تماس با سیال در "شکل 9-c" ارائه شده است. این مقدار از قدر مطلق تبدیل هیلبرت

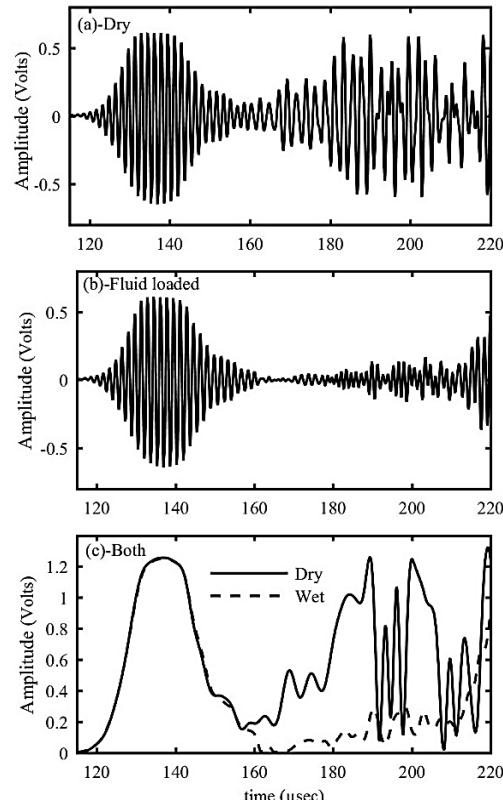


Fig. 9 Signals got from PFC2 as receiver while PFC1 acts as actuator for healthy plate, (a) dry plate, (b) fluid loaded plate, (c) peak to peak amplitude of a and b

شکل 9 سیگنال دریافتی از PFC2 به عنوان حسگر با تحریک PFC1 به عنوان عملگر در آزمایش صفحه سالم در حالات (a) خشک، (b) در تماس با سیال. (c) مقدار قله به قله حالات a و b

عیوب‌یابی در صفحه در تماس با سیال پرداخته می‌شود.

6- ترک‌یابی در صفحه در تماس با سیال

پس از صحه‌گذاری قابلیت تحریک مُد S₁ در فرکانس 620 kHz توسط تراگذار ساخته شده و عدم تاثیرپذیری آن از وجود سیال بر روی صفحه، در دو آرایش ارسال-دریافت و ارسال-بازتاب، این که می‌توان به ترک‌یابی در صفحه توسط این تراگذار پرداخت، هندسه پسترن تست برای ترک‌یابی همان هندسه نشان داده شده در "شکل 7" می‌باشد. یک شیار ناخنی با ابعاد نشان داده شده توسط ابزار برنده دوار روی صفحه در محل نشان داده شده ایجاد می‌گردد. آزمایش ترک‌یابی در دو حالت صورت می‌پذیرد، یکی در حالت ارسال-دریافت که PFC1 به عنوان عملگر و PFC2 به عنوان حسگر عمل می‌کند و دوم حالت ارسال-بازتاب که در آن PFC1 هم به عنوان عملگر و هم به عنوان حسگر به کار می‌رود. مجدداً از سیگنال تون برست هشت سیکله در فرکانس 620 kHz استفاده می‌گردد. همچنین آزمون ترک‌یابی در حالت صفحه در تماس با سیال انجام می‌گیرد.

6-1- آرایش ارسال-دریافت

توزیع زمانی مقادیر قله به قله سیگنال دریافتی از PFC2 در دو حالت صفحه ترک دار و بدون ترک در "شکل 12" نشان داده شده است.

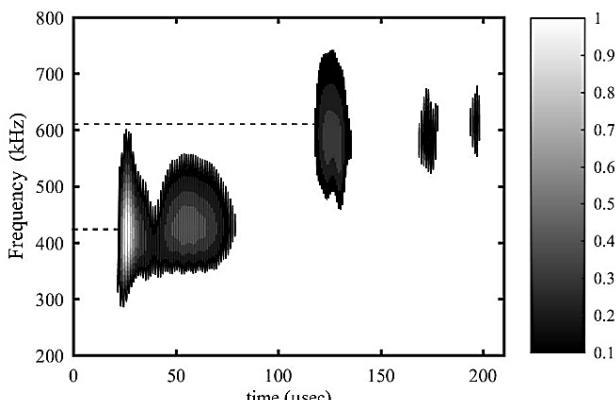


Fig. 11 Continues wavelet transform coefficients for healthy and dry plate in pulse echo test

شکل 11 ضرایب نرمال شده تبدیل موجک پیوسته سیگنال حالت سالم خشک در حالت ارسال-بازتاب

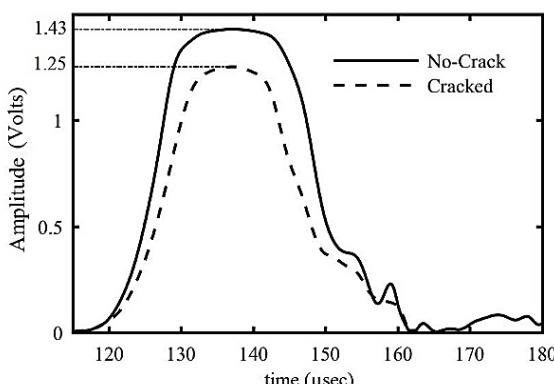


Fig. 12 Peak to peak amplitude of PFC2 signal got from pitch-catch test of cracked plate

شکل 12 مقادیر قله به قله سیگنال‌های دریافتی از PFC2 به عنوان حسگر در صفحه ترک دار در آرایش ارسال-دریافت با تحریک PFC1

توجه به این که در تحلیل سرعت گروه مُدهای موجود در فرکانس 620 kHz که براساس نمودار نشان داده شده در "شکل 3" انجام گرفت، هج مُدی با سرعت گروه بزرگتر از مُد S₁ وجود ندارد و این مُد نیز باید فاصله 635 mm را در رفت و برگشت از مرز سمت چپ پیماید، و پیک مربوط به مرکز PFC1 را در رفت و برگشت از مرز حدود 130 μsec آن است، پیک‌های قبل از این آن همان پیک موجود در زمان حدود 130 μsec هستند. دلیل دیگر این تفسیر، عدم تاثیرپذیری این پیک‌ها از وجود سیال بر روی سطح ورق است بهطوری که با وجود دستمال آغشته به آب، اندازه دامنه آن ها تغییری نمی‌کند و لذا مربوط به سایر مُدها نیستند.

برای اطمینان، تحلیل حوزه فرکانس-زمان رهیافت خوبی برای تفسیر این پیک‌های است. از تبدیل موجک پیوسته برای بررسی سیگنال در حوزه زمان-فرکانس استفاده شده است. هدف از این کار استخراج فرکانس پیک‌های مربوط به دینامیک تراگذار است. "شکل 11" ضرایب نرمال شده تبدیل موجک پیوسته با استفاده از موجک مورلت¹ را برای سیگنال حالت سالم صفحه خشک در آرایش ارسال-بازتاب توسط PFC1 نشان می‌دهد.

سیگنال تحریک همانند آزمایش قبل تون برست هشت سیکله می‌باشد. برای سادگی در تفسیر نتایج، تبدیل مقیاس به فرکانس در تبدیل موجک انجام گرفته است و روی محور قائم فرکانس نمایش داده شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، پیک‌های موجود در زمان کمتر از 100 μsec دارای فرکانس حدود 425 kHz هستند و ناشی از رسیدن موج با فرکانس 620 kHz نمی‌باشند. لذا این پیک‌ها را می‌توان پاسخ رزونانسی عملگر به تحریک دانست، زیرا در آرایش ارسال-بازتاب، ابتدا عملگر تحریک شده و بلافضله پس از قطع سیگنال تحریک، به عنوان حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا این امکان وجود دارد که کماکان در اثر تحریک صورت گرفته دارای نوسان باشد و آثار آن در سیگنال دریافتی ظاهر شود. لازم به ذکر است که تراگذار ساخته شده مجهز به ماده پشتی و میرا کننده که در ساختار تراگذارهای استاندارد مرسوم است، ساخته نشده است. اطلاعات بیشتر در خصوص ساختار تراگذارهای کلاسیک و استاندارد در [16] موجود است.

پیک‌های مشخص شده در "شکل 10-a و b-10" برای مُد S₁ و سایر مُدها که بعد از زمان 120 μsec ظاهر شده اند براساس تحلیل حوزه زمان-فرکانس نشان داده شده در "شکل 11" دارای فرکانس در محدوده 620 kHz هستند و لذا مشخص است که ناشی از انتشار موج و رسیدن سیگنال به حسگر هستند. بر این اساس در استفاده از تراگذار PFC ساخته شده باید به دینامیک تراگذار و فرکانس رزونانس آن توجه داشت و لزوماً فرکانس مطلوب طراح برای تحریک مُد S₁ با فرکانس طبیعی و رزونانس تراگذار یکسان نمی‌شود. به عبارت دیگر طراحی تراگذار با معیار تحریک بدی نیست و اتفاقاً امر مطلوبیست، زیرا اگر فرکانس رزونانس تراگذار هم 620 kHz بود، تفکیک پیک‌های ابتدایی ناشی از رزونانس تراگذار در روش ارسال-بازتاب از پیک‌های ناشی از انتشار موج میسر نمی‌بود.

حال که کارایی تراگذار در روش‌های ارسال-دریافت و ارسال-بازتاب برای صفحات خشک و در تماس با سیال بدون حضور عیوب تحقیق گشت، به

¹ Morlet

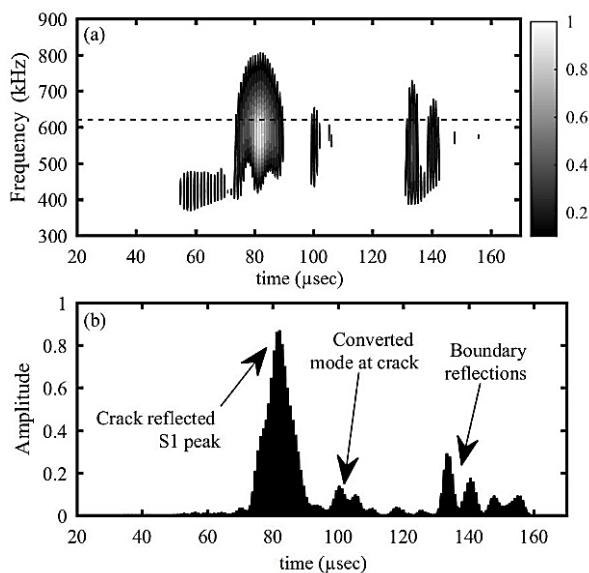


Fig. 14 (a) CWT coefficients for healthy and cracked plate signals got from PFC1 in pulse-echo test, (b) Time distribution of coefficients at excitation frequency equals to 620 kHz

شکل ۱۴ (a) ضرایب تبدیل موجک پیوسته برای تفاضل دو سیگنال مربوط به صفحه سالم و ترکدار در آرایش ارسال-بازتاب توسط PFC1. (b) توزیع زمانی ضرایب در فرکانس تحریک 620 kHz

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد فرکانس مرکزی پیک موجود در لحظه 80 μsec برابر با 620 kHz است که نشانگر این است که پیک حاصله، ناشی از وجود موج لمب در مُد S_1 است که از ترک منعکس شده است. توزیع زمانی ضرایب تبدیل موجک پیوسته در فرکانس 620 kHz که با خط چین در "شکل ۱۴-a" مشخص شده است، در "شکل ۱۴-b" رسم شده است. تفکیک پیک‌ها در این نمودار به سادگی میسر است و پیک‌های انعکاسی از ترک، مُد تغییر یافته در ترک و باقیمانده پیک‌های مرز در این نمودار مشخص شده اند. پیک اول در "شکل ۱۴-b" معرف مُد S_1 منعکس شده از ترک است زیرا با سرعت گروه 4974 m/s فاصله 435 mm (مجموع مسیر رفت و برگشت موج تا مرکز تراگذار) در زمانی حدود 87 μsec طی می‌شود که تطابق خوبی با زمان پیک اول دارد. پس از پیک اول، در بازه زمانی 100 تا 110 μsec تعداد دو پیک قابل مشاهده است که در شکل به عنوان پیک‌های ناشی از تغییر مُد نام‌گذاری شده‌اند. براساس منحنی سرعت گروه در "شکل ۳" در فرکانس تحریک 620 kHz، علاوه‌بر مُد S_1 مُدهای A_1 و A_0 با سرعت گروه حدود 3100 m/s و S_0 با سرعت گروه حدود 2650 m/s نیز وجود دارند. موج تحریک شده در PFC1، مسیر رفت از تراگذار تا ترک را با سرعت 4974 m/s پیموده و پس از تغییر مُد در ترک، برای هر مُد با سرعت گروه مخصوص به خود به تراگذار باز می‌گردد. لذا ابتدا پیک برگشتی S_1 در زمان حدود 87 μsec پیک مربوط به A_0 و A_1 به صورت همزمان در زمان تقریبی 103 μsec و در نهایت پیک مربوط به مُد S_0 در زمان 108 μsec به تراگذار می‌رسند. مقدار تئوریک این زمان‌ها به ترتیب 107 و 114 μsec است که شش تا هفت میکروثانیه اختلاف آزمایش با نتایج تئوری، حدود 5% خطأ نشان می‌دهد که مقدار قابل قبولی است.

در نتیجه با استفاده از تراگذار ساخته شده قابلیت تشخیص ترک در آرایش‌های ارسال-دربافت و ارسال-بازتاب وجود دارد. در آرایش ارسال-دربافت، بهدلیل این که از تراگذارهای عملگر و حسگر متفاوتند، پاسخ رزونانسی خود تراگذار در سیگنال دریافتی مشاهده نمی‌گردد، اما در آرایش

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، با اضافه شدن ترک به صفحه، مقدار دامنه سیگنال مربوط به مُد S_1 حدود 12.6% کاهش داشته است. نکته قابل توجه این است که ابعاد تراگذار PFC از ابعاد انواع کلاسیک تراگذارهای فراصوتی بزرگتر بوده و در عملکرد حسگری از حساسیت کمتری بروخوردار است زیرا بخش وسیع‌تری از میدان پراکنده شده از ترک توسط حسگر ثبت می‌گردد. با وجود این نتایج آزمایش نشان می‌دهد تراگذار PFC بر روی صفحه در تماس با سیال می‌توان وجود ترک با ابعاد نشان داده شده را تشخیص دهد.

6- آرایش ارسال-بازتاب

آزمایش بعدی، آزمایش ارسال-بازتاب است که همانند بخش قبلی اما این بار با وجود ترک انجام می‌گیرد. نکته قابل توجه این است که محل ترک به گونه‌ای انتخاب شده است که براساس سرعت گروه مُد S_1 ، زمان رسیدن موج انعکاسی از ترک حدود 80 μsec می‌باشد که این زمان براساس سیگنال‌های نشان داده شده در "شکل ۱۰-b" در بازه زمانی وجود پاسخ دینامیکی حسگر است و لذا بین پاسخ دینامیکی و موج انعکاسی از ترک تداخل بوجود می‌آید. این حالت تعتمدا برای پیچیده‌تر کردن مساله ترک یابی در حالت ارسال-بازتاب انتخاب شده زیرا اگر ترک به اندازه کافی دور باشد و موج انعکاسی مربوطه در زمان‌های پس از اتمام نوسانات پاسخ دینامیکی حسگر به آن برسد، تشخیص ترک کار دشواری نخواهد بود. "شکل ۱۳" سیگنال‌های حالات سالم و ترک دار را در آزمون ارسال-بازتاب نشان می‌دهد.

ناحیه احتمالی وجود انعکاس ترک در سیگنال بزرگنمایی شده است. سیگنال دریافتی از صفحه ترکدار در بازه زمانی 70 تا 90 μsec از تداخل سیگنال 620 kHz و سیگنال 425 kHz حاصل شده است و لذا تشخیص پیک مربوط به ترک ممکن نیست. لذا می‌باشد از روش‌های پردازش سیگنال حوزه زمان-فرکانس استفاده کرد تا بتوان تفکیک امواج را در حوزه فرکانس انجام داد. جهت تفکیک اثر موج دریافتی از ترک، سیگنال حالت سالم و معیوب پس از انجام هم‌زمان‌سازی^۱ از یکدیگر تفربیق شده‌اند تا فقط سیگنال ترک موجود باشد. سپس تبدیل موجک پیوسته به سیگنال اعمال شده است که نتیجه در "شکل ۱۴-a" نشان داده شده است.

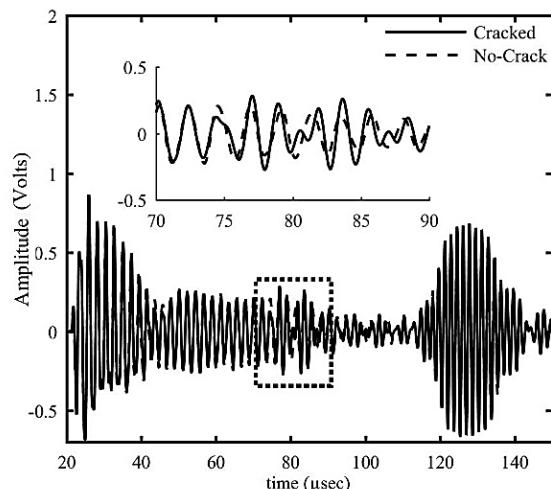


Fig. 13 Signals got from PFC1 in pulse echo test of cracked plate with magnified view

شکل ۱۳ سیگنال‌های دریافتی از PFC در آزمون ارسال-بازتاب صفحه ترک دار و نمای بزرگنمایی شده

¹ Correlation

- [3] C. R. Farrar, K. Worden, An introduction to structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 365, No. 1851, pp. 303-315, 2007.
- [4] Z. Su, L. Ye, Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications, pp. 3-12, Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.
- [5] P. Daryabari, M. Farzin, F. Honarvar, Calculating the Lamb wave modes in an aluminum sheet bonded to a composite layer with FEM and experiment, *Modares Mechanical Engineering Scientific Research Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 95-106, 2013. (in Persian)
- [6] B. Godrati, A. Yaghootian, A. Ghanbarzadeh, H. M. Sedighi, Extraction of dispersion curves for Lamb waves in an aluminium nitride (AlN)micro plate using consistent couple stress theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 248-256, 2016. (in Persian)
- [7] P. T. Birgani, K. N. Tahan, S. Sodagar, M. Shishesaz, Suitable parameters determination of lamb wave generation source with low-attenuation for three-layer adhesive joints inspection, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 63-74, 2015. (in Persian)
- [8] H. Ziaieefar, M. Amiryani, M. Ghodsi, F. Honarvar, Y. Hojjat, Ultrasonic Damage Classification in Pipes and Plates using Wavelet Transform and SVM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 41-48, 2015. (in Persian)
- [9] A. A. Mokhtari, A. Ohadi, H. Amindavar, Reconstructing the damage shape in aluminum plate using guided Lamb wave and polygon reconstruction technique in Tomography, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 239-246, 2015. (in Persian)
- [10] A. Khan, S. Islam, S. Iqbal, M. Elahi, Guided Waves in a Fluid-loaded Orthotropic Plate, *World Applied Sciences Journal*, Vol. 8, No. 7, pp. 804-808, 2010.
- [11] M. Soorjee, C. Lissenden, J. Rose, A. Yousefi-Koma, Planar shear horizontal guided wave inspection of a plate using piezoelectric fiber transducers, *Review of progress in quantitative Nondestructive evaluation VOLUME 32*, Vol. 1511, No. 1, pp. 223-229, 2013
- [12] S. Li, C. J. Lissenden, Piezoelectric fiber composite strip transducer design considerations for generating Lamb waves, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 12, pp. 1345-1357, 2011.
- [13] M. H. Soorjee, C. J. Lissenden, J. L. Rose, A. Yousefi-Koma, Defect sensitivity of piezoelectric strip transducers based on planar Lamb waves, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 4, pp. 472-483, 2013.
- [14] J. Rose, S. Pelts, M. Quarry, A comb transducer model for guided wave NDE, *Ultrasonics*, Vol. 36, No. 1, pp. 163-169, 1998.
- [15] R. B. Cass, A. Khan, F. Mohammadi, Innovative ceramic-fiber technology energizes advanced cerametrics, *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 82, No. 11, pp. 14-15, 2003.
- [16] D. E. Bray, R. K. Stanley, Nondestructive evaluation: a tool in design, manufacturing and service, pp. 70-102, New York: CRC press, 1996.

ارسال - بازتاب، بهدلیل این که خود تراگذار ابتدا تحریک شده و سپس با قطع تحریک، به عنوان حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، پاسخ رزونانسی آن باعث وجود آمدن پیک‌های با فرکانس مرکزی 425 kHz می‌گردد که برای تفکیک پیک‌های ناشی از پاسخ رزونانسی و پیک‌های ناشی از امواج لمب، می‌بایست از روش‌های پردازش سیگنال حوزه زمان فرکانس استفاده کرد.

7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله ساخت و آزمایش یک تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک برای عیب‌یابی در صفحات در تماس با سیال توسط امواج لمب موردن بررسی قرار گرفت. چالش اصلی بازرسی صفحات در تماس با سیال، میرایی موج لمب در اثر وجود سیال است. نشان داده شد که با انتخاب مُد مناسب، می‌توان حساسیت به وجود سیال را از بین برد. بدین منظور با انجام تحلیل دیسپرژن و ساختار موج، مُد S₁ در فرکانس 620 kHz برای صفحه فولادی به ضخامت 6.25 mm، به جهت داشتن تغییر مکان خارج از صفحه صفر بر روی مزهای آزاد، مناسب تشخیص داده شد و سپس براساس عملکرد عملگر شانه‌ای، یک تراگذار شانه‌ای کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک ساخته شد. این تراگذار ابتدا برای اثبات عدم تاثیر پذیری از وجود سیال بر روی صفحه آزمایش گردید و نشان داده شده در آزمون‌های ارسال - دریافت و ارسال بازتاب مُد مناسب تولیدی توسعه آن در اثر وجود سیال بر روی صفحه تغییری نمی‌کند. سپس ترک یا به دو روش ارسال - دریافت و ارسال بازتاب موردن آزمایش قرار گرفت و نشان داده شد در آرایش ارسال - دریافت به ازای ترک به طول 21 mm و عمق 4mm دامنه سیگنال دریافتی در حسگر حدود 12.6% کاهش می‌یابد. در آرایش ارسال - بازتاب، با توجه به تداخل امواج انعکاسی از ترک با پاسخ رزونانسی تراگذار، با استفاده از تبدیل موجک بیوسته، به عنوان نمونه‌ای از ابزارهای پردازش سیگنال حوزه زمان - فرکانس، پیک انعکاسی از ترک از پاسخ رزونانسی تراگذار تفکیک گشت و وجود ترک با موفقیت تشخیص داده شد. نتیجه نهایی پژوهش این است که تراگذار ساخته شده به صورت تجربی و با موفقیت برای مقاصد عیوب‌یابی در صفحات در تماس با سیال آزمایش گردیده است.

8- مراجع

- [1] H. Lamb, On waves in an elastic plate, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 93, No. 648, pp. 114-128, 1917.
- [2] J. L. Rose, Ultrasonic waves in solid media, pp. 101-119, Cambridge: Cambridge university press, 2004.