ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ساخت و آزمایش یک تراگذار پیزوکامپوزیتی جهت بازرسی سازه‌های ورقی در تماس با سیال به کمک امواج لمب

محمد حسین سورگی[1*]، کلیفورد ژسه لیسندن[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

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

* تهران، صندوق پستی 16765-1719، mh_soorgee@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 آبان 1395

پذیرش: 11 دی 1395

ارائه در سایت: 29 دی 1395

کلید واژگان:

امواج لمب

ورق در تماس با سیال

تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک

چکیده

در این مقاله طراحی، ساخت و آزمایش یک تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک جهت استفاده در بازرسی سازه‌های ورقی در تماس با سیال، به کمک امواج لمب، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا تحلیل دیسپرژن و ساختار موج برای انتخاب مُد و فرکانس مناسب جهت بازرسی صفحه در تماس با سیال انجام شده است. مُد S_1 با تغییر مکان خارج از صفحه صفر در سطوح آزاد ورق فولادی با ضخامت مشخص، استخراج گشته، سپس یک تراگذار شانه‌ای پیزوکامپوزیتی برای تحریک این مُد طراحی و ساخته شده است. پس از ساخت تراگذار، ابتدا آزمون‌های لازم برای اثبات عدم تاثیر پذیری موج لمب در مُد و فرکانس انتخابی از وجود سیال بر روی ورق به دو روش ارسال- دریافت و ارسال- بازتاب با موفقیت انجام شده است. سپس ترک‌یابی 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 ابعاد معلوم، دامنه مُد S_1 دریافتی در حسگر پیزوکامپوزیتی کاهش می‌یابد. همچنین در آزمون ارسال- بازتاب، به‌دلیل تداخل پاسخ رزوناسی تراگذار و امواج ناشی از موج منتشره در سیگنال دریافتی، از تبدیل موجک پیوسته به‌عنوان یکی از روش‌های پردازش سیگنال حوزه زمان-فرکانس استفاده گشته و وجود ترک در ورق با موفقیت تشخیص داده شده است. در نتیجه تراگذار ساخته شده برای عیب‌یابی در سازه‌های ورقی در تماس با سیال به کمک امواج لمب دارای کارایی مناسب می‌باشد.

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

Mohammad Hossein Soorgee[1*], Clifford Jesse Lissenden[2]

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 S_1 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.

1- مقدمه

پایش سلامت سازه، امروزه به‌عنوان یکی از مراحل مهم در بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری هر سیستم صنعتی مطرح است زیرا به کمک پایش به موقع و تشخیص به هنگام عیوب در سیستم می‌توان از برزو صدمات و خسارات مالی و جانی جلوگیری کرد. از میان روش‌های متعدد بازرسی و پایش سازه‌ها، استفاده از امواج هدایت شده فراصوتی برای بازرسی سازه‌های ساخته شده از ورق مانند مخازن تحت فشار، بال هواپیما، خطوط لوله و سایر سازه‌های 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 دیسپرژن و ساختار موج در [2] ارائه شده

Please cite this article using: **برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

M. H. Soorgee, 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)

است. هر فرآیند عیب‌یابی شامل چهار گام اساسی به قرار ذیل است: الف) امکان‌سنجی عملیاتی، ب) انتخاب تراگذار[1]، ارسال موج و دریافت سیگنال، ج) پردازش سیگنال و استخراج شاخص، د) تصمیم گیری براساس شاخص‌های استخراجی و تعیین مشخصات عیب [3]. در بازرسی به کمک امواج هدایت شده فراصوتی، چهار گام اشاره شده به‌صورت الف) انتخاب مد و فرکانس مناسب، ب) انتخاب نوع، تعداد و چیدمان تراگذارها، ارسال موج و دریافت سیگنال، ج) پردازش سیگنال و استخراج شاخص 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] مُدهای 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 نیترید با استفاده از تئوری تنش کوپلی سازگار استخراج گشته است. علاوه بر پژوهش در حوزه مبانی اساسی نظیر مُدهای انتشار و منحنی‌های دیسپرژن، پژوهش‌ها در حوزه بازرسی اتصالات و نیز روش‌های بازسازی تصویر برای تعیین اندازه عیب انجام شده است. در [7] مودهای 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 مودهای قابل انتشار دارای اتلاف 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 عیب مثلثی در صفحه با استفاده از امواج لمب انجام شده است.

سازه‌های واقعی صنعتی اغلب دارای پیچیدگی‌هایی نظیر تقویت‌کننده‌ها، سوراخ پیچ و پرچ، تماس با سیال، خم‌کاری و سایر ویژگی‌هایی هستند که موج منتشره فراصوتی را تحت تاثیر 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 اندکی با 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 به‌کارگیری در تحریک مُد مطلوب برای بازرسی صفحات در تماس با سیال می‌باشند. در [12] ملاحظات طراحی این 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] به‌صورت نواری ساخته شده و برای بازرسی صفحات همگن با مُد S_0 در فرکانس 370 kHz به‌صورت تجربی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج موفقیت‌آمیزی به همراه داشته‌اند.

هدف این پژوهش، طراحی، ساخت و آزمایش یک تراگذار کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک (PFC)[2] 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، به‌صورت تجربی مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

2- 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. تئوری های مربوطه در [2] در دسترس است. با حل معادله مشخصه ریلی-لمب منحنی‌های دیسپرژن استخراج می‌گردند. معادله مشخصه ریلی- لمب برای مدهای متقارن در رابطه (1) و برای مدهای نامتقارن 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 $p^2 = \omega^2/C_L^2 - k^2$ و $q^2 = \omega^2/C_T^2 - k^2$. 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 آن‌جایی‌که 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 6.25 mm در "شکل 1" 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 d-2" که نشان‌دهنده منحنی ساختار موج مُد S_1 می‌باشد، قابل مشاهده است. در "شکل 2" منحنی‌های ساختار موج برای تمامی مُدهای موجود در فرکانس 620 kHz برای صفحه فولادی به ضخامت 6.25 mm نشان داده شده است. برخلاف رویه مرسوم رسم نمودار، در این نمودارها محور افقی بیانگر متغیر وابسته و محور

[1] Transducer

[2] Piezoelectric Fiber Composite transducer

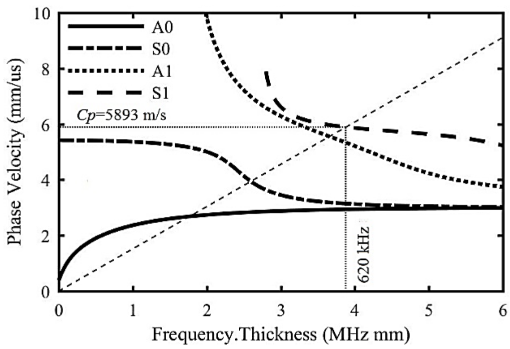


Fig. 1 Phase velocity dispersion curves for 6.25 mm thick steel plate with C_L=5893 and C_T=3247 m/sec

شکل 1 منحنی‌های دیسپرژن مربوط به سرعت فاز، برای فولاد با C_L= 5893 و C_T= 3247 m/sec برای ورق با ضخامت 6.25 میلی‌متر

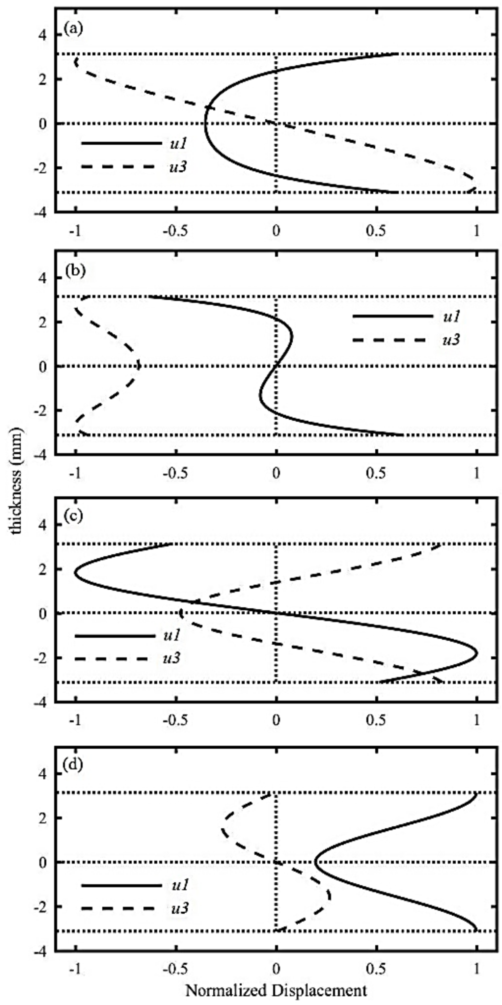


Fig. 2 Wave structures for 6.25 mm thick steel plate at F=620 kHz for (a) A_0, (b) S_0, (c) A_1 and (d) S_1 modes

شکل 2 منحنی های ساختار موج برای مُدهای (a) A_0، (b) S_0، (c) A_1 و (d) S_1 در فرکانس 620 kHz برای ورق فولادی به ضخامت 6.25 mm

قائم به‌دلیل همراستا 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 مُدهای A_0، S_0 و A_1 ساختار موج منتشره دارای مقدار غیر صفر تغییر مکان خارج از صفحه بر روی سطوح بالا و پایین ورق می‌باشد و لذا این امر موجب می‌گردد در اثر وجود سیال، موج به سرعت میرا گردد زیرا تغییر مکان خارج از صفحه یا همان $u3$ در آب روی ورق موج طولی ایجاد کرده و باعث افت انرژی موج در ورق می‌گردد. حال آن‌که براساس منحنی "شکل 2-d" مقدار تغییر مکان خارج از صفحه مُد S_1، ($u3$) در فرکانس مربوطه بر روی سطوح بالا و پایین ورق صفر می‌باشد و این بدان معناست که ذرات روی سطح در این مُد و فرکانس تنها دارای مولفه جابجایی افقی هستند و کمتر از وجود سیال تاثیر می‌پذیرند. لذا مُد S_1 با حاصل‌ضرب فرکانس در ضخامت 3.88 MHz mm برای بازرسی ورق در تماس با سیال، انتخاب می‌شود که برای صفحه به ضخامت 6.25 mm، فرکانس مناسب برابر با 620 kHz خواهد بود. طول موج متناظر برابر با 9.5 mm می‌باشد. در این فرکانس، سرعت گروه مُد S_1 برابر با 4974 m/sec خواهد بود که در "شکل 3" مشخص شده است. همچنین براساس "شکل 3" سرعت گروه سایر مُدها در این فرکانس، حدود 2000 m/sec از مُد S_1 کمتر است و لذا در سیگنال‌های دریافتی جدایش مناسبی بین پیک‌های مُد S_1 و سایر مُدها رخ خواهد داد.

3- طراحی تراگذار شانه‌ای برای تحریک مُد منفرد

پس از انتخاب مُد و فرکانس مناسب، می بایست تراگذار مناسب برای تحریک این مُد در این فرکانس طراحی و ساخته شود. با توجه به این‌که در فرکانس انتخابی 620 kHz در صفحه به ضخامت 6.25 میلی‌متر، مُدهای چهارگانه A_0، S_0، A_1 و S_1 وجود دارند، استفاده از یک تراگذار کلاسیک تک کریستاله برای تحریک، منجر به تحریک هر چهار مُد خواهد شد. لذا ضروری است تا به نحوی، تنها بتوان مُد خالص S_1 را تحریک نمود. یکی از روش‌های ممکن برای تحریک مُد خالص، استفاده از تراگذار شانه‌ای می‌باشد. مبانی طراحی و عملکرد این نوع تراگذار در [14] 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 4" نشان داده شده است.

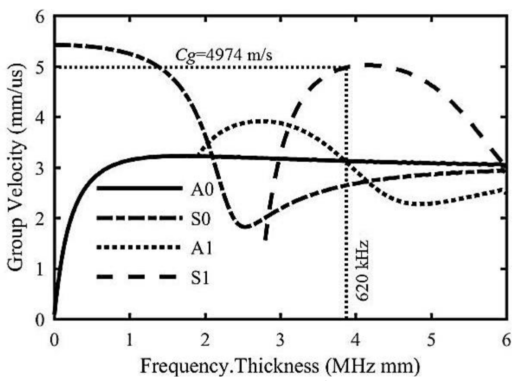


Fig. 3 Group velocity dispersion curves for 6.25 mm thick steel plate with C_L=5893 and C_T=3247 m/sec

شکل 3 منحنی‌های دیسپرژن مربوط به سرعت گروه، برای فولاد با C_L= 5893 و C_T= 3247 m/sec برای ورق با ضخامت 6.25 میلی‌متر

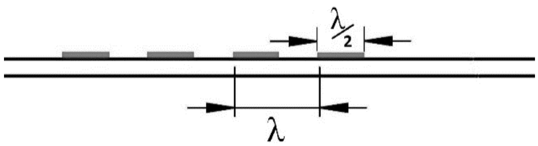


Fig. 4 General view of a comb transducer

شکل 4 نمای کلی آرایش یک تراگذار شانه ای

برای ساختن چنین تراگذاری در این پژوهش 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، به‌طور 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 پیزو ساخته شده است و سپس الکترودهای آن به‌صورت شانه‌ای با فاصله متناسب 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 9.5mm کار دشواری بوده و نیز محدودیت در ساخت نوار به عرض 4.75mm وجود داشته است. در [15] توضیحات بیشتر در خصوص نحوه تولید الیاف پیزوالکتریک ارائه شده است.

براساس محورهای نشان داده شده در "شکل 6"، الیاف در جهت y بوده و قطبیت پیزوها در راستای z صورت گرفته است. قطبیت‌دهی به پیزوها با همان الکترودهای نصب شده به‌صورت 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 می گردد و پس از تایید کارایی در ارسال و دریافت مُد S_1، 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 به‌عنوان محیط انتشار موج

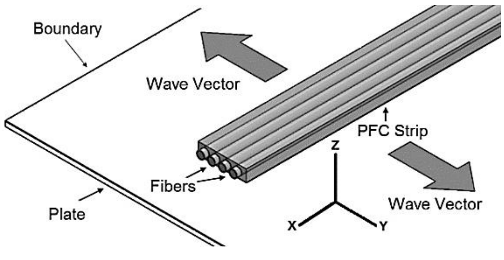


Fig. 5 Schematic view of a sample PFC transducer on a plate [13]

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

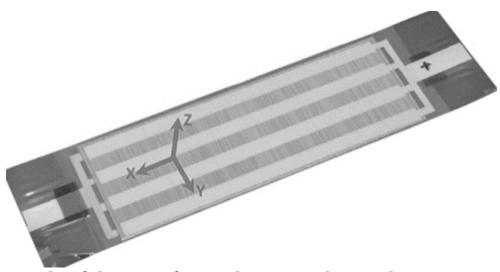


Fig. 6 Sample of the manufactured PFC comb transducer

شکل 6 نمونه تراگذار PFC شانه‌ای ساخته شده

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.

به‌دلیل این‌که 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 آن‌که 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 و C_T= 3247 m/sec می‌باشد.

تصاویر بستر آزمایش به‌کار رفته برای حالات خشک و درتماس 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 داده برداری با فرکانس نمونه‌برداری 100MHz و کارت ارسال- دریافت فراصوتی با بیشینه ولتاژ قله به قله 300 Volts، مجهز به نرم‌افزار لب ویو برای انجام آزمایش استفاده شده است. همچنین یک سیگنال تحریک تون-برست[1] هشت سیکله برای با فرکانس 620kHz برای تحریک PFC1، براساس "شکل 7"، به‌عنوان عملگر به‌کار رفته است. در خصوص سیگنال تون- برست اطلاعات بیشتر در [4] موجود است.

4-1- صفحه خشک

سیگنال دریافتی از PFC2 در این آزمایش در "شکل 9-a" ملاحظه می‌گردد. اولین پیک در زمان t=137 µsec به حسگر رسیده است که با توجه به زمان

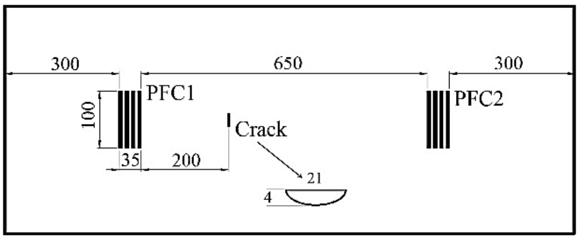
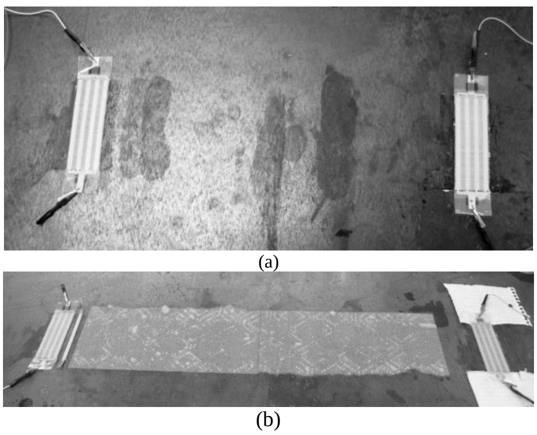


Fig. 7 Geometry and arrangement of experimental setup (dimensions are in mm)

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



(a)

(b)

Fig. 8 The experimental setup for healthy plate, (a) Dry plate, (b) Fluid loaded plate

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

[1] Tone-burst

مرکزی تحریک تون برست هشت سیکله با فرکانس 620kHz، که 6.4 µsec 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 به‌دلیل پهنای باید 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 پیک ها مربوط به سایر مُدها، یعنی A_0، S_0 و A_1 هستند که به سرعت گروه تقریبا 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 می شود تا تاثیر وجود سیال بر مُدهای منتشره بررسی گردد.

4-2- صفحه در تماس با سیال

سیگنال دریافتی از PFC2 به عنوان حسگر در حالتی که بین دو تراگذار دستمال آغشته به آب قرار داده شده است، در "شکل 9-b" 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

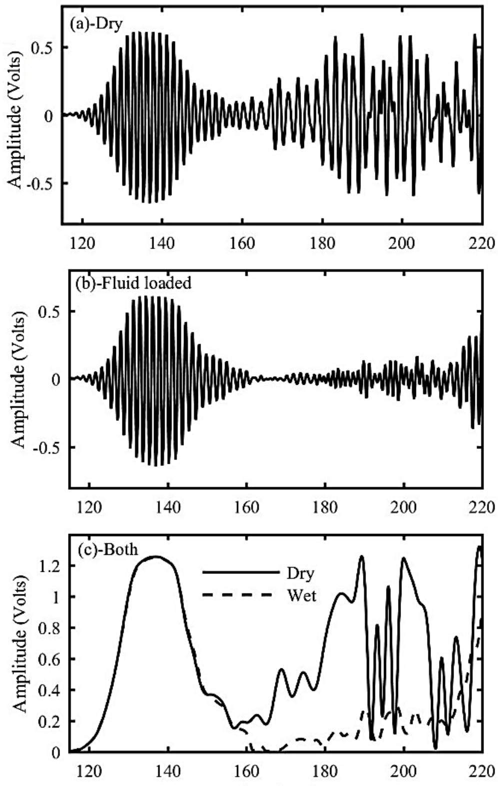


Fig. 9 Signals got from PFC2 as receiver while PFC1 acts as actuator for healthy plate, (a) dry plate, (b) fluid loaded plate, (c) peak to peak amplitude of a and b

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

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 تاثیر 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 این‌که ممکن است در کابردهای عیب‌یابی، 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 10-b" تحت عنوان پاسخ دینامیکی تراگذار از آن یاد شده است. در واقع با

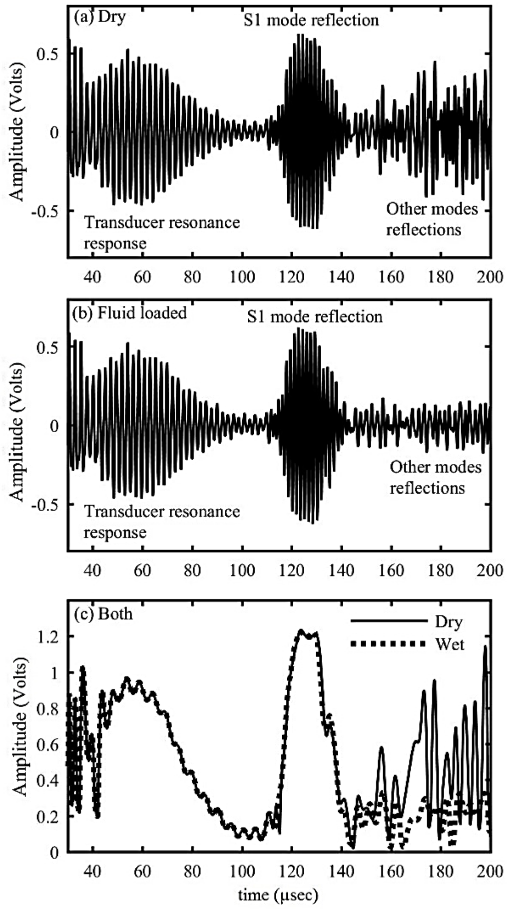


Fig. 10 Signals got from PFC1 as actuator and receiver for healthy plate, (a) dry plate, (b) fluid loaded plate, (c) peak to peak amplitude of a and b

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 به قله حالات a و b

توجه به این‌که در تحلیل سرعت گروه مُدهای موجود در فرکانس 620 kHz که براساس نمودار نشان داده شده در "شکل 3" انجام گرفت، هیچ مُدی با سرعت گروه بزرگتر از مُد S_1 وجود ندارد و این مُد نیز باید فاصله 635 mm تا مرکز PFC1 را در رفت و برگشت از مرز سمت چپ بپیماید، و پیک مربوط به آن همان پیک موجود در زمان حدود 130 µsec است، پیک‌های قبل از این پیک نمی‌توانند ناشی از موج باشند. دلیل دیگر این تفسیر، عدم تاثیرپذیری این پیک‌ها از وجود سیال بر روی سطح ورق است به‌طوری‌که 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 پیک‌هاست. 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 مورلت[1] 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 بلافاصله پس از قطع سیگنال تحریک، به‌عنوان 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 10-b" برای مُد S_1 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 لزوما فرکانس مطلوب طراح برای تحریک مُد S_1 با فرکانس طبیعی و رزونانس تراگذار یکسان نمی‌شود. به‌عبارت دیگر طراحی تراگذار با معیار تحریک مد مطلوب با طول موج مشخص صورت گرفته است حال آن‌که فرکانس رزونانس براساس پارامترهای سختی و جرم خود به خود حاصل شده است و با فرکانس مطلوب تحریک مد متفاوت است. این تفاوت لزوما نتیجه بدی نیست و اتفاقا 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 عیب تحقیق گشت، به عیب‌یابی در صفحه در تماس با سیال پرداخته می‌شود.

6- ترک‌یابی در صفحه در تماس با سیال

پس از صحه‌گذاری قابلیت تحریک مُد S_1 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، این‌ک می‌توان به ترک یابی در صفحه توسط این تراگذار پرداخت. هندسه بستر 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 به‌عنوان عملگر و PFC2 به عنوان حسگر عمل می‌کند و دوم حالت ارسال- بازتاب که در آن PFC1 هم به عنوان عملگر و هم به‌عنوان حسگر به‌کار می‌رود. مجددا 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.

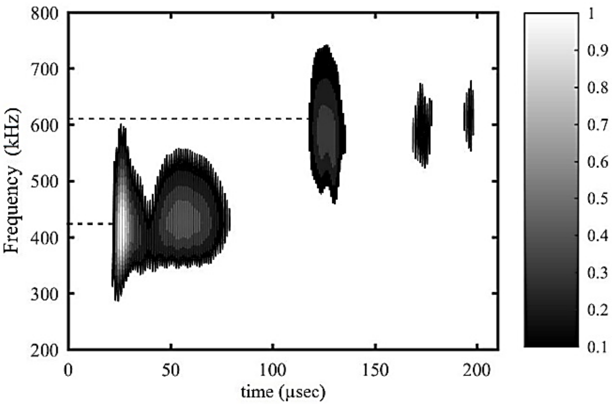


Fig. 11 Continues wavelet transform coefficients for healthy and dry plate in pulse echo test

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

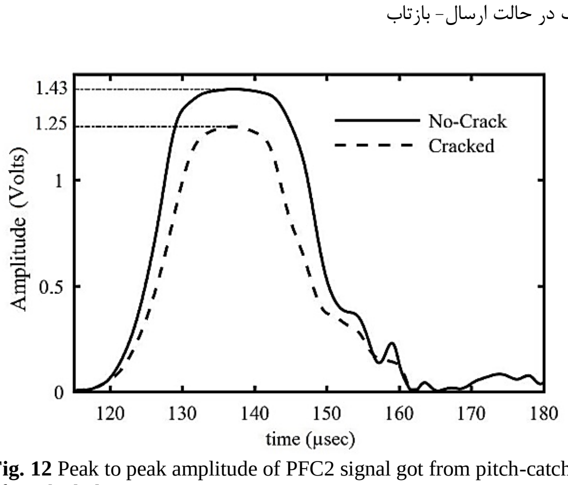


Fig. 12 Peak to peak amplitude of PFC2 signal got from pitch-catch test of cracked plate

شکل 12 مقادیر قله به قله سیگنال های دریافتی از PFC2 به عنوان حس گر در صفحه ترک دار در آرایش ارسال-دریافت با تحریک PFC1

[1] Morlet

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 برخوردار 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.

6-2- 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 سیگنال های نشان داده شده در "شکل b-10" در بازه زمانی وجود پاسخ دینامیکی حسگر است و لذا بین پاسخ دینامیکی و موج انعکاسی از ترک تداخل بوجود می‌آید. این حالت تعمدا برای پیچیده‌تر کردن مساله ترک‌یابی 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 13" 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 می‌بایست 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[1] از یکدیگر تفریق شده‌اند تا فقط سیگنال ترک موجود باشد. سپس تبدیل موجک پیوسته به سیگنال اعمال شده است که نتیجه در "شکل a-14" نشان داده شده است.

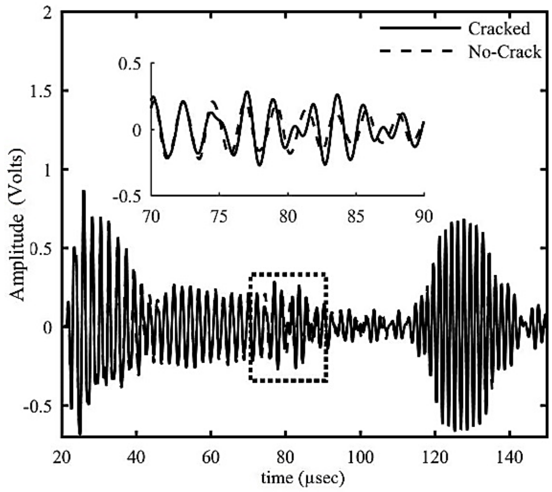


Fig. 13 Signals got from PFC1 in pulse echo test of cracked plate with magnified view

شکل 13 سیگنال‌های دریافتی از PFC1 در آزمون ارسال- بازتاب صفحه ترک دار و نمای بزرگ‌نمایی شده

[1] Correlation

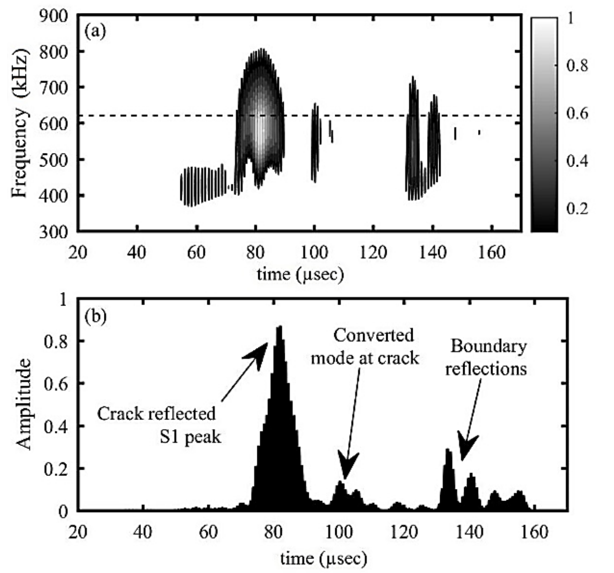


Fig. 14 (a) CWT coefficients for healthy and cracked plate signals got from PFC1 in pulse-echo test, (b) Time distribution of coefficients at excitation frequency equals to 620 kHz

شکل 14 (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 a-14" مشخص شده است، در "شکل b-14" رسم شده است. تفکیک پیک‌ها در این نمودار به‌سادگی 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 b-14" 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 به‌عنوان پیک‌های ناشی از تغییر مُد نام‌گذاری شده‌اند. براساس منحنی سرعت گروه در "شکل 3"، 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 حدود87 µsec، سپس پیک مربوط به A_0 و A_1 به‌صورت 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% خطا نشان می‌دهد که مقدار قابل قبولی است.

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

ارسال- بازتاب، به‌دلیل این‌که خود تراگذار ابتدا تحریک شده و سپس با قطع تحریک، به‌عنوان حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، پاسخ رزونانسی آن باعث بوجود 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 مورد 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 S_1 در فرکانس 620 kHz برای صفحه فولادی به ضخامت 6.25 mm، به جهت داشتن تغییر مکان خارج از صفحه صفر بر روی مرزهای آزاد، مناسب تشخیص داده شد و سپس براساس عملکرد عملگر شانه‌ای، یک تراگذار شانه ای 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 می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و دامنه مُد S_1 تولیدی توسط آن در اثر وجود سیال بر روی صفحه تغییری نمی‌کند. سپس ترک یابی به دو روش ارسال- دریافت و ارسال بازتاب مورد 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 پیوسته، به‌عنوان نمونه‌ای از ابزارهای پزدازش 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 به‌صورت تجربی و با موفقیت برای مقاصد عیب‌یابی 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.

[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. Daryabor, 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 فارسی)

[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 فارسی)

[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 فارسی)

[8] H. Ziaiefar, M. Amiryan, 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 فارسی)

[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 فارسی)

[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. Soorgee, 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. Soorgee, 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.