



بررسی انتشار امواج فراصوتی در اندازه‌گیری عیوب صفحه‌ای با استفاده از المان‌های نامحدود

بشیر سید حیات غیب¹، سینا سوداگر^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی بازرسی فنی و ایمنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان
2- استادیار، مهندسی بازرسی فنی و ایمنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان
* آبدان، صندوق پستی 619، sodagar@put.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 مرداد 1395
پذیرش: 06 مهر 1395
ارائه در سایت: 09 آبان 1395

کلید واژگان:

امواج فراصوتی
پراش امواج
روش المان محدود
المان نامحدود

چکیده

روش زمان پرواز پراش، تافد (ToFD)، یکی از تکنیک‌های آزمون‌های غیرمخرب فراصوتی است که برای اندازه‌گیری و ارزیابی ناپیوستگی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش به دلیل استفاده از اختلاف زمانی دریافت امواج، اندازه‌گیری عیوب در مقایسه با سایر روش‌های اندازه‌گیری فراصوتی از دقت بالایی برخوردار است. با این وجود در روش‌های مرسوم این آزمون امکان اندازه‌گیری طول ناپیوستگی‌های مایل و افقی وجود نداشته و فقط طول تصویر عمودی عیوب قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در این مقاله با ارائه یک روش جدید، به تحلیل و مطالعه استفاده از پراش امواج فراصوتی برای اندازه‌گیری عیوب افقی با استفاده از نرم‌افزار تجاری المان محدود اباکوس پرداخته شده است. بدین منظور پروب-کفشک فراصوتی موجود در سیستم اندازه‌گیری با به کارگیری المان‌های نامحدود CINPE4 و اعمال میرایی جرمی و سختی به منظور کاهش بازتابش امواج و پژواک‌های نامطلوب در درون کفشک مدل‌سازی گردیده است. همچنین رفتار پارامترهای مختلف این سیستم اندازه‌گیری و رفتار امواج پراش در برخورد با عیوب جاسازی شده در درون قطعه شبیه‌سازی شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. سپس این روش، در عمق‌های مختلف، برای ترک‌های با طول‌های متفاوت اعمال شده و خطای اندازه‌گیری در ارزیابی طول عیوب مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، در مقایسه با روش‌های سنتی آزمون تافد، نتایج به‌دست آمده از این روش دارای دقت مناسبی می‌باشند.

Ultrasonic Evaluation of Planar Defects Using Infinite Elements

Bashir Seyed Hayat Gheib, Sina Sodagar*

Department of Technical Inspection Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran
* P.O.B. 619, Abadan, Iran, sodagar@put.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 August 2016
Accepted 27 September 2016
Available Online 30 October 2016

Keywords:

Ultrasonic Waves
Wave Diffraction
Finite Element Method
Infinite Element

ABSTRACT

Time-of-Flight Diffraction (ToFD) technique is a well-known inspection method used in ultrasonic nondestructive evaluation. This inspection technique is based on the time of arrival of the diffracted echoes from the tips of planar discontinuity. This is in contrast with the conventional ultrasonics which rely on the amplitude of specular reflections received from discontinuities. Like any other technique, ToFD has its limitations. In this paper, the finite element method is employed to evaluate the planar defects using ultrasonic time-of-flight diffraction method. The commercially available software ABAQUS/Explicit is used to simulate the ultrasonic wave behavior in the wedge transducers, specimen and wave interaction with the embedded planar defect. The CPE4R plane strain element is employed for discretization of the steel specimen and wedge transducers. The CINPE4 infinite element is also used on the wedge side walls for reducing unwanted echoes and noise reduction inside the ultrasonic wedge. The wave attenuation of the Plexi-glass wedge is simulated as the mass and stiffness proportional damping model. Evaluation and sizing of various defects show that, the accuracy of the proposed method is within acceptable range compared to the conventional ToFD method.

1- مقدمه

می‌دهند. مزیت اصلی این روش قابلیت تشخیص بالاتر آن نسبت به روش پرتونگاری برای عیوب خطی و صفحه‌ای قرار گرفته در ضخامت قطعه و زمان کمتر روبش قطعه و انجام آزمون است [4]. همچنین در بازرسی سطوح با دمای بالا با استفاده از این روش، روبش سریع‌تر به دلیل کاهش زمان مواجه ترنسدیوسر² با دمای بالا امکان بهره‌برداری از آن را نسبت به سایر روش‌ها فراهم می‌کند [5]. در سال 2003، بیبی و همکارانش [6] با استفاده از این

روش زمان پرواز پراش، تافد (ToFD¹)، یکی از روش‌های اندازه‌گیری شناخته شده در آزمون‌های فراصوتی است که قابلیت اندازه‌گیری دقیق عیوب در قطعات با ضخامت بالا را دارا می‌باشد [1-3]. امروزه کدها و استانداردها استفاده از روش تافد جهت انجام بازرسی‌های متداول، به‌عنوان جایگزین روش پرتونگاری، برای مقاطع با ضخامت بیش از 12 mm را مورد تایید قرار

² Transducer

¹ Time-of-Flight Diffraction

سطحی⁶ (A)، که از زیر سطح قطعه از پروب فرستنده به پروب گیرنده ارسال می‌شود، به همراه موج دریافتی از دیواره پشتی⁷ (D)، جهت تعیین ناحیه مورد بازرسی (ضخامت قطعه) استفاده می‌شوند. سایر اکوهای⁸ دریافتی میان این دو اکو مربوط به پراش⁹ امواج فراصوتی از دو انتهای بالایی (B) و پایینی (C) ناپیوستگی موجود در قطعه می‌باشند. با اندازه‌گیری زمان دریافت اکوهای پراش از دو انتهای ناپیوستگی، عمق و اندازه آن را می‌توان با از یک فرمولاسیون ساده مثلثاتی محاسبه نمود [17]. در قطعات با ضخامت پایین، فاصله میان اکوهای ناشی از موج زیر سطحی (A) و دیواره پشتی (D) کاهش یافته که منجر به تداخل در اکوهای پراش از دو انتهای عیب در سیگنال دریافتی خواهد گردید. همچنین در این قطعات به دلیل اندازه پروب‌های مرسوم در آزمون تافد، فاصله مورد نیاز جهت قرارگیری دو پروب قابل اعمال نخواهد بود. همان‌گونه که بیان گردید، تعیین اندازه ناپیوستگی در روش فوق با اندازه‌گیری اختلاف زمانی اکوهای پراش طولی دریافتی از دو انتهای ناپیوستگی با استفاده از یک پروب دریافت کننده انجام می‌شود. در عیوب افقی با توجه به این‌که اکوهای پراش ناشی از دو سر عیب به صورت همزمان به پروب گیرنده می‌رسند، امکان اندازه‌گیری عیب با استفاده از یک پروب گیرنده وجود ندارد. "شکل 2" را ببینید. در روشی که توسط باقری و همکارانش [16] پیشنهاد گردید، به منظور اندازه‌گیری عیوب افقی از یک پروب فرستنده-گیرنده (پروب A) و یک پروب گیرنده (پروب B)، که در دو طرف ناپیوستگی قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود. با تابش زاویه‌ای موج از پروب A به درون قطعه و دریافت امواج پراش از دو انتهای ناپیوستگی توسط دو پروب گیرنده A و B، مطابق "شکل 2"، و اندازه‌گیری اختلاف زمانی دریافت امواج L_1 و L_2 از دو انتهای عیب، طول عیب افقی را با استفاده از معادله زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$L_H = ((L_2 - L_1/2)^2 - (L_1/2)^2)/2S \quad (1)$$

به طوری که،

$$L_1 = t_1 C_L ; L_2 = t_2 C_L \quad (2)$$

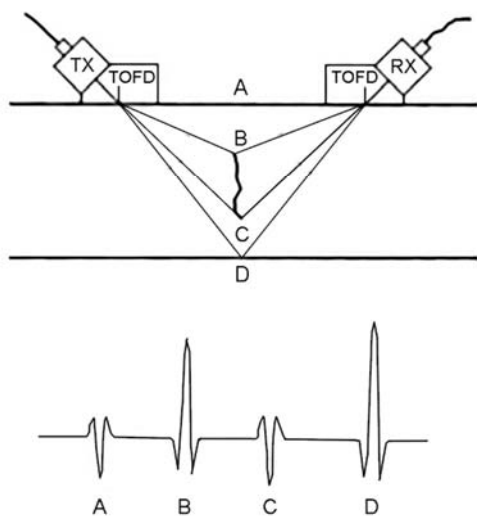


Fig. 1 Schematic of the conventional ToFD technique [17]

شکل 1 شماتیک قرارگیری پروب‌ها در آزمون تافد [15]

روش اندازه‌گیری ترک‌های سطحی با طول بزرگتر از 2 mm را بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. باسکاران و همکارانش تلاش نمودند تا با استفاده هم‌زمان از پروب‌های مینیاتوری¹ با فرکانس بالا و پردازش سیگنال با روشی به نام تکنیک تشخیص سیگنال جاسازی شده [7] و استفاده از امواج برشی (S-ToFD) [8] این محدودیت را کاهش دهند که با اعمال این دو روش کمترین ضخامت قابل بازرسی به 7mm کاهش یافت. در سال 2011، ساباراتام و همکارانش [9] از ترکیب دو روش تافد و آزمون غوطه‌وری (I-ToFD) برای رفع محدودیت فاصله پروب‌ها استفاده نمودند و کمترین ضخامت بازرسی 3mm را گزارش نمود. مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های عددی جهت توسعه روش تافد و کاهش محدودیت‌های این روش انجام گرفته است. باسکاران و همکارانش [10] از روش پرتو² جهت شبیه‌سازی آزمون تافد در بازرسی سازه‌های با ضخامت کم استفاده نمودند. فراند و همکارانش [11] با ارائه یک الگوریتم جدید در این روش به کمک نقاط واسط، به ارزیابی عیوب با سطوح نامنظم پرداختند. روش تقریب کرشهوف [12]، روش‌های صریح و ضمنی امان محدود [13,8] نیز به منظور شبیه‌سازی دوبعدی پدیده پراش امواج طولی و برشی در اندازه‌گیری عیوب مورد استفاده قرار گرفته است.

از محدودیت‌های دیگر روش‌های سنتی زمان پرواز پراش اندازه‌گیری طول تصویر عمودی ناپیوستگی نسبت به سطح قطعه است. بنابراین ناپیوستگی‌هایی که به صورت افقی نسبت به سطح قطعه قرار گرفته باشند، اندازه‌گیری طول عیب با استفاده فرمولاسیون و روش متداول امکان‌پذیر نیست. در سال 1992، هارومی و همکارانش [14] ترک‌های سطحی مورب را با استفاده از شبیه‌سازی عددی و تست‌های آزمایشگاهی براساس پدیده پراش امواج مورد مطالعه قرار دادند. فلیس و همکارانش [15] با به کارگیری روش تمرکز کل، تعیین عمق، زاویه و شکل عیوب را با استفاده از پردازش امواج دریافتی توسط آرایه‌ای از ترانسدوسرها جهت افزایش دقت اندازه‌گیری مورد مطالعه قرار دادند.

در سال 2014، باقری و همکارانش [16] با ارائه یک فرمول مثلثاتی جدید، استفاده از این روش برای ارزیابی عیوب افقی را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. با این وجود در آن تحقیق تاثیر کشک و پروب‌های استفاده شده در اندازه‌گیری طول عیب بررسی نشده و از انتشار موج در کشک پروب فرستنده و گیرنده و تاثیر آن بر نتایج به دست آمده صرف نظر شده است. در این مقاله با توسعه و بسط این مدل جدید، استفاده از آن جهت اندازه‌گیری ناپیوستگی‌های افقی در آزمون تافد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور با بهره‌گیری از امان‌های بی‌نهایت و مدل امان محدود ارائه شده، رفتار انتشار امواج فراصوتی در برخورد با ناپیوستگی‌های افقی موجود در قطعه و پراش امواج از دو انتهای ناپیوستگی جهت اندازه‌گیری این ناپیوستگی‌ها در آزمون تافد شناسایی و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- اندازه‌گیری عیوب با استفاده از پدیده پراش

در "شکل 1" شماتیک روش تافد و قرارگیری پروب‌ها³ بر روی قطعه در این روش و سیگنال دریافتی نشان داده شده است. همان‌گونه که در "شکل 1" نشان داده شده است، در این روش دو پروب موج طولی با زاویه مشابه به عنوان فرستنده⁴ و گیرنده⁵ بر روی سطح قطعه قرار می‌گیرند. موج طولی زیر

¹ Miniature Probe

² Ray method

³ Probe

⁴ Transmitter

⁵ Receiver

⁶ Lateral Wave

⁷ Back-wall

⁸ Echo

⁹ Diffraction

به‌طوری‌که در این معادله f فرکانس ترانسدیوسر و N تعداد سیکل‌های پالس اعمالی است. در جدول 1 مشخصات و ثوابت الاستیک و صوتی مواد ارائه شده است.

4- نتایج عددی

همگرایی نتایج حاصل از مدل المان محدود در مدل ارائه شده برای آزمون تافد، با استفاده از نسبت دامنه سیگنال به نویز، SNR^7 ، با کاهش اندازه المان‌ها (افزایش تعداد المان‌ها) مورد بررسی قرار گرفته شده است. در "شکل 4" نسبت SNR برای یک مدل بازتابی ارسال- دریافت⁸ یک موج فراصوتی با فرکانس 5MHz برای اندازه‌های مختلف المان ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود SNR با کاهش اندازه المان به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در المان‌های با اندازه کوچکتر از 35 μm همگرا می‌گردد. این اندازه المان برابر $\lambda/33$ است.

4-1- تاثیر المان نامحدود در رفتار امواج بازتابش در کفشک

همان‌گونه که در بخش قبل بیان گردید، دو پارامتر نوع ماده و شکل هندسی کفشک در پروب‌های فراصوتی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در سیگنال دریافتی

جدول 1 مشخصات و ثوابت الاستیک مواد

Table 1 Elastic and acoustic properties

نام ماده	E (GPa)	ν	C_L (m/s)	C_T (m/s)
فولاد	210	0.29	5939	3230
پلکسی گلاس	9	0.35	3445	1870

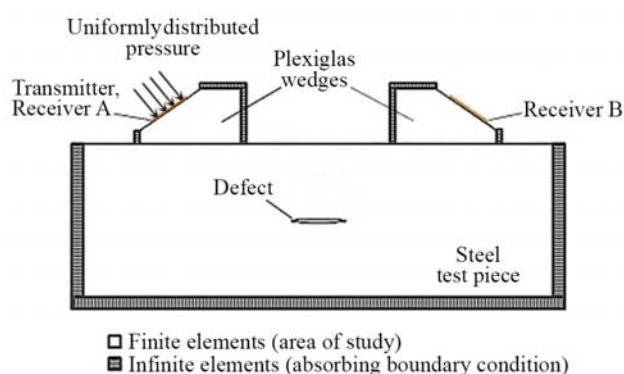


Fig. 3 Schematic of the FE modeling of the inspection system

شکل 3 شماتیک مدل المان محدود سیستم اندازه‌گیری

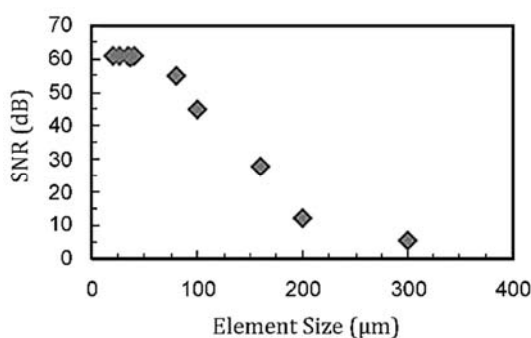


Fig. 4 Convergence diagram of the SNR parameter

شکل 4 نمودار همگرایی نسبت سیگنال به نویز

⁷ Signal to noise ratio

⁸ Pulse-echo

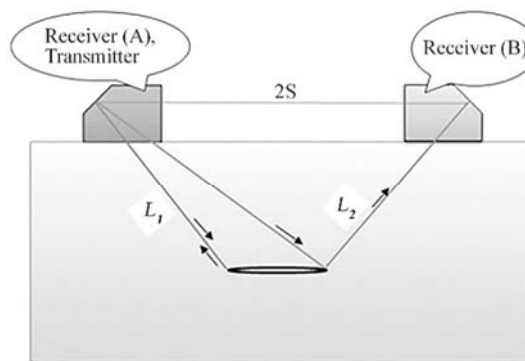


Fig. 2 Schematic configuration of the proposed method.

شکل 2 شماتیک قرارگیری پروب‌ها و امواج تابش و پراش در روش پیشنهادی

3- مدل‌سازی آزمون تافد

برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف آزمون بر رفتار انتشار موج و نتایج اندازه‌گیری، از روش المان محدود در محیط نرم‌افزار آباکوس¹ 6.11 جهت مدل‌سازی آزمون تافد در اندازه‌گیری عیوب افقی (H-ToFD) استفاده شده است. بدین منظور ساختار آزمون در سه بخش مدل‌سازی گردیده است. ابتدا قطعه مورد آزمون به‌صورت یک مستطیل فولادی با ابعاد 50×80 mm و با استفاده از المان کرنش صفحه‌ای چهار گره‌ای CPE4R المان‌بندی شده است. سپس پروب‌های فراصوتی فرستنده و گیرنده به‌منظور مدل‌سازی رفتار انتشار موج و فاصله طی شده توسط موج در کفشک، به‌صورت دو گوه دوزنقه‌ای از جنس پلکسی-گلاس² و با استفاده از المان‌های CPE4R فوق مدل‌سازی شده است. در طراحی و ساخت پروب‌های زاویه‌ای فراصوتی، میرایی ماده کفشک به‌گونه‌ای انتخاب گردیده است که علاوه بر جلوگیری از تضعیف بیش از اندازه موج عبوری از صفحه پیزوالکتریک³ به درون قطعه به دلیل استهلاک موج در درون کفشک، موجب جذب امواج بازتابش در کفشک با صفحه پیزوالکتریک شده و نویز⁴ ایجاد شده در سیگنال دریافتی را تا حد امکان کاهش دهد. همچنین شکل هندسی جداره کفشک نیز به‌گونه‌ای ساخته شده است تا با انحراف جهت امواج بازتابشی درون کفشک، از برخورد آن‌ها با صفحه پیزوالکتریک نیز جلوگیری گردد. به‌منظور مدل‌سازی این دو مشخصه کفشک و حذف تاثیر نویز ناشی از بازتابش و تبدیل مود امواج در کفشک از المان‌های نامحدود CINPE4R در جداره‌های کفشک و همچنین اعمال میرایی جرمی و سختی به مدل ماده پلکسی-گلاس استفاده شده در کفشک استفاده گردیده است که تاثیر مشخصات این دو پارامتر در بخش نتایج عددی به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت. چگونگی استفاده از المان‌های محدود و المان‌های نامحدود در سیستم اندازه‌گیری در "شکل 3" نشان داده شده است. همچنین تحریک صفحات پیزوالکتریک پروب (المان فعال⁵) به‌صورت فشار اعمالی بر سطح مورب کفشک در محل قرارگیری صفحه پیزوالکتریک و با استفاده از تابع هنینگ⁶ به‌صورت معادله زیر در فاصله زمانی اعمال پالس تحریک به صفحه پیزوالکتریک شبیه‌سازی شده است [16]:

$$P(t) = \begin{cases} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{N}\right)\right) (\cos(2\pi ft)), & 0 < t < N/f \\ 0, & t \geq N/f \end{cases} \quad (3)$$

¹ ABAQUS

² Plexi-glass

³ Piezoelectric

⁴ Noise

⁵ Active element

⁶ Hanning

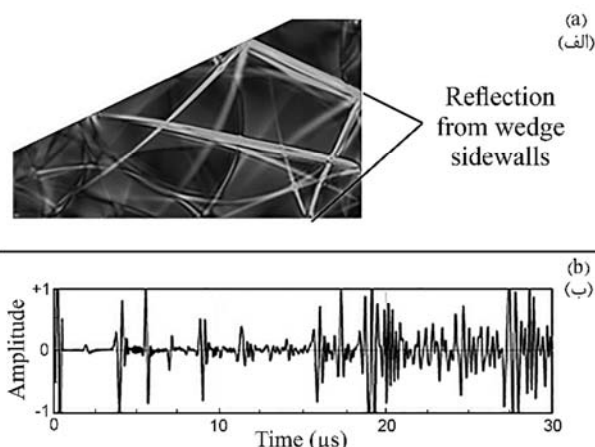


Fig. 6 (a) Wave propagation in the wedge using infinite elements, (b) The received signal

شکل 6 الف) انتشار امواج در کفشک بدون استفاده از امان نامحدود، ب) سیگنال دریافتی توسط پروب

میرایی جرمی و سختی به‌صورت معادله زیر در مدل امان محدود اعمال می‌گردد:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4)$$

به‌طوری‌که در این معادله α ضریب میرایی جرمی، β ضریب میرایی سختی، $[M]$ ماتریس جرمی و $[K]$ ماتریس سختی، $[C]$ ماتریس میرایی در مدل امان محدود است. برای بررسی تاثیر اعمال میرایی جرمی و سختی در مدل امان محدود انتشار امواج در کفشک، در "شکل 7" سیگنال دریافتی پروب برای سه ضریب میرایی جرمی متفاوت و در "شکل 8" سیگنال دریافتی برای سه ضریب میرایی سختی متفاوت ترسیم شده است. مقایسه سیگنال‌های دریافتی در "شکل 7" نشان می‌دهد ضریب میرایی جرمی که بر روی فرکانس‌های پایین‌تر طیف فرکانسی موج اثرگذار است، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی SNR و کاهش نویز ندارد و کل دامنه سیگنال دریافتی به‌صورت همزمان کاهش می‌دهد. همچنین مقایسه سیگنال‌های دریافتی نشان داده شده در "شکل 8" نشان می‌دهد که ضریب میرایی سختی که بیشتر بر روی فرکانس‌های بالاتر طیف فرکانسی موج اثرگذار است، موجب کاهش SNR و نویز سیگنال دریافتی می‌گردد. با این وجود مقایسه زمان تحلیل در اعمال این دو میرایی نشان می‌دهد اعمال میرایی سختی موجب افزایش قابل ملاحظه زمان تحلیل شده درحالی‌که اعمال میرایی جرمی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی زمان تحلیل مسئله نخواهد داشت. بررسی نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های فوق نشان می‌دهد برای کاهش بهینه SNR در سیگنال دریافتی، اثرات نامطلوب امواج بازتابش در سیگنال و همچنین جلوگیری از افزایش بسیار زیاد زمان تحلیل، باید از ترکیب امان نامحدود، میرایی جرمی $\alpha = 1 \times 10^5$ و میرایی سختی $\beta = 1 \times 10^{-9}$ در مدل‌سازی کفشک در آزمون تافد استفاده نمود.

در "شکل 9" انتشار امواج در کفشک و انتقال امواج به درون قطعه مورد آزمون با استفاده از پارامترهای فوق نشان داده شده است. همان‌گونه که در "شکل 9(a) و 9(b)" ملاحظه می‌شود اعمال همزمان این پارامترها، موجب افزایش قابل ملاحظه کیفیت امواج بازتابش شده در کفشک شده است. همچنین ملاحظه می‌شود که برخورد موج طولی به سطح مشترک کفشک و قطعه موجب تبدیل مود امواج گشته و دو نوع موج طولی و عرضی با زاویه و شدت متفاوت در قطعه فولادی منتشر می‌گردد.

توسط ترنسیدیوسر و SNR آن دارد. در استفاده از پراش امواج فراصوتی در اندازه‌گیری ناپیوستگی، به‌دلیل ماهیت ضعیف امواج پراش از نوک عیب و ضعیف بودن دامنه امواج دریافتی، افزایش SNR سیگنال دریافتی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در انجام آزمون خواهد داشت، لذا تاثیر طراحی و اعمال مناسب خاصیت میرایی ماده در کفشک و همچنین شکل هندسی دیواره‌های کفشک و امواج بازتابشی از آن‌ها در کیفیت آزمون به‌صورت مستقیم تاثیرگذار خواهد بود. به‌منظور اعمال تاثیر شکل هندسی دیواره کفشک از امان نامحدود در CINPE4R در دیواره کفشک استفاده شده است. همچنین سطح تماس میان کفشک و قطعه با فرض اتصال کامل مدل شده است. در "شکل‌های 5 و 6" انتشار امواج تولید شده توسط صفحه پیزوالکتریک و امواج بازتابش در کفشک بدون اعمال امان نامحدود و با اعمال امان نامحدود به دیواره نشان داده شده است.

همان‌گونه که در "شکل 5(a)" مشاهده می‌شود امواج تولید شده توسط صفحه ترنسیدیوسر پس از برخورد با دیواره پایینی کفشک به درون کفشک بازتابش شده و با هر بار برخورد به هر دیواره علاوه بر بازتابش به امواج طولی و عرضی نیز تبدیل مود خواهد نمود. این امواج بازتابش و تبدیل مود یافته در بازه زمانی کوتاهی توسط صفحه پیزوالکتریک دریافت و موجب افزایش اکوهای نامطلوب و کاهش SNR سیگنال دریافتی می‌گردد که عملاً تشخیص اکوهای پراش دریافتی از دو انتهای عیب را ناممکن می‌نماید. در "شکل 5(b)" سیگنال دریافتی توسط پروب A در قسمت میانی دیواره مورب کفشک در محل قرارگیری صفحه پیزوالکتریک نشان داده شده است. در "شکل 6(a)" انتشار امواج و سیگنال دریافتی برای پروب و کفشک مشابه و با اعمال امان نامحدود به دیواره‌های کفشک نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود استفاده از امان نامحدود موجب تضعیف قابل ملاحظه بازتابش امواج برخوردی به دیواره کفشک و کاهش SNR و افزایش قابل ملاحظه کیفیت سیگنال دریافتی توسط ترنسیدیوسر شده است. "شکل 6(b)" را ببینید.

2-4- تاثیر میرایی کفشک در افزایش SNR

استهلاک امواج در کفشک بصورت استهلاک ناشی از پدیده جذب در ماده مدلسازی شده است. بدین منظور خاصیت میرایی ریلی¹ با استفاده از ضرایب

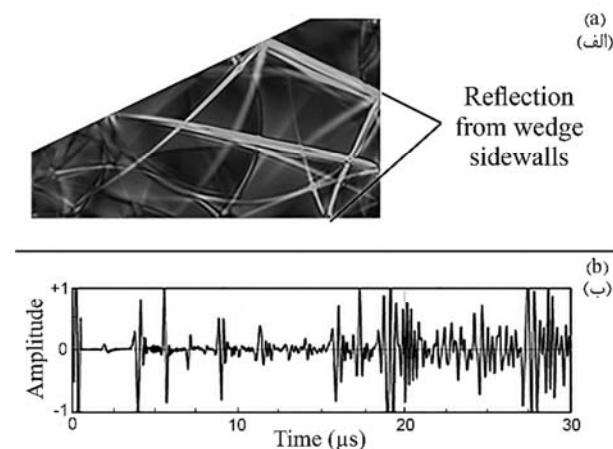


Fig. 5 (a) Wave propagation in the wedge using free boundary conditions, (b) The received signal

شکل 5 الف) انتشار امواج در کفشک بدون استفاده از امان نامحدود، ب) سیگنال دریافتی توسط پروب

¹ Rayleigh

4-3- اندازه‌گیری ناپیوستگی افقی با استفاده از امواج پراش

به‌منظور بررسی روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری عیوب افقی با استفاده از مدل تشریح شده در بخش‌های پیشین یک قطعه فولادی با طول 105 mm و عرض 30 mm حاوی یک ترک افقی صفحه‌ای در عمق 25 mm از سطح قطعه مدل‌سازی شده است. پروب-کفشک فرستنده و گیرنده به‌صورت یک پروب تک المانه با طول صفحه پیزوالکتریک 13 mm و فاصله بین دو ترانسیدوسر فرستنده و گیرنده 85 mm در دو طرف ترک در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادله (2) یک پالس فراصوتی صفحه‌ای شبیه‌سازی شده با فرکانس میانی 5 MHz و تعداد سیکل $N = 5$ از طریق پروب-کفشک A به‌گونه‌ای به درون قطعه ارسال می‌گردد که موج با زاویه 55° در قطعه منتشر شده و پس از برخورد با عیب جاسازی شده درون قطعه اکوهای مربوطه توسط دو پروب A و B دریافت گردد. برای کاهش تاثیر اکوهای مربوطه به بازتابش‌های نامطلوب از دیواره‌های جانبی و پشتی قطعه، از امان‌های نامحدود استفاده شده است. در "شکل 10"، امواج منتشر شده در قطعه پس از برخورد موج طولی تابشی با انتهای سمت چپ عیب نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اثر برخورد موج طولی صفحه‌ای تابشی با لبه عیب دو موج پراش استوانه‌ای طولی و عرضی از این لبه در قطعه منتشر می‌شود. در "شکل 11"، امواج منتشر شده پس از برخورد با لبه سمت راست عیب نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود پس از برخورد موج با لبه انتهایی سمت راست عیب نیز دو موج پراش استوانه‌ای طولی و عرضی و با اختلاف زمانی متناسب با طولی عیب از این لبه در قطعه منتشر می‌گردد.

سیگنال دریافتی توسط دو پروب A و B در "شکل 12" نشان داده شده است. در سیگنال دریافتی توسط پروب A اکوی موج طولی از لبه سمت چپ عیب مشاهده می‌شود. "شکل 12(a)" را ببینید. در سیگنال دریافتی توسط پروب B، نشان داده شده در "شکل 12(b)"، نیز اولین اکو مربوط به موج زیر سطحی طولی، اکوی دوم ناشی مربوط به موج پراش از لبه سمت راست ترک آخرین اکو مربوط به بازتابش طولی از سطح ترک است. مقایسه نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی امواج منتشر شده در قطعه پس از برخورد با عیب با تصاویر فوتوالاستیک پراش امواج در آزمون تافد [18] و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده [13]، بیانگر تطابق کامل رفتار انتشار امواج شبیه‌سازی شده با این نتایج می‌باشد.

بررسی روش پیشنهادی برای هفت ترک افقی با طول‌های 20 mm تا 32 mm در عمق‌های 20 mm و 25 mm ترک از سطح با شرایط یکسان انجام شده است. در جدول 2 طول ترک به‌دست آمده برای ترک‌های در عمق 20 mm و در جدول 3 نتایج به‌دست آمده برای ترک‌های در عمق 25 mm با فاصله پروب 75 mm نشان داده است. در "شکل 13" خطای نسبی نتایج به‌دست آمده برحسب اندازه ترک ترسیم شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود در عمق 20 mm با افزایش طول ترک خطای نسبی اندازه‌گیری از 13% برای طول ترک 20 mm تا 6.6% برای طول ترک 28 mm کاهش یافته و سپس با افزایش طول ترک تا 15% برای طول 32 mm افزایش می‌یابد. همچنین در "شکل 13" مشاهده می‌شود که با افزایش عمق ترک تا 25 mm خطای نسبی از 13% برای طول ترک 20 mm تا 5% برای طول ترک 30 mm کاهش یافته و سپس با افزایش طول ترک تا 8.2% برای طول 32 mm افزایش می‌یابد. بررسی و مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که استفاده برای انجام آزمون کمتر از 15% است که با خطای نسبی مرسوم

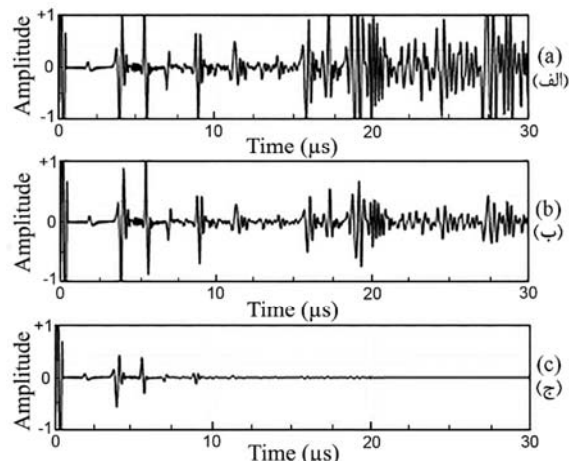


Fig. 7 The effect of mass proportional damping on the received signal; (a) $\alpha = 1 \times 10^5$, (b) $\alpha = 1 \times 10^6$, (c) $\alpha = 1 \times 10^7$

شکل 7 سیگنال دریافتی با اعمال میرایی جرمی به کفشک؛ الف) $\alpha = 1 \times 10^5$ ب) $\alpha = 1 \times 10^6$ ج) $\alpha = 1 \times 10^7$

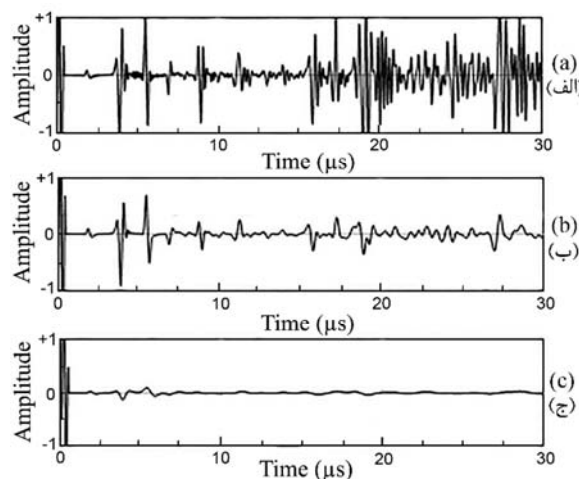


Fig. 8 The effect of stiffness damping on the received signal; (a) $\beta = 0$, (b) $\beta = 1 \times 10^{-9}$, (c) $\beta = 1 \times 10^{-8}$

شکل 8 سیگنال دریافتی با اعمال میرایی سختی به کفشک؛ الف) $\beta = 0$ ب) $\beta = 1 \times 10^{-9}$ ج) $\beta = 1 \times 10^{-8}$

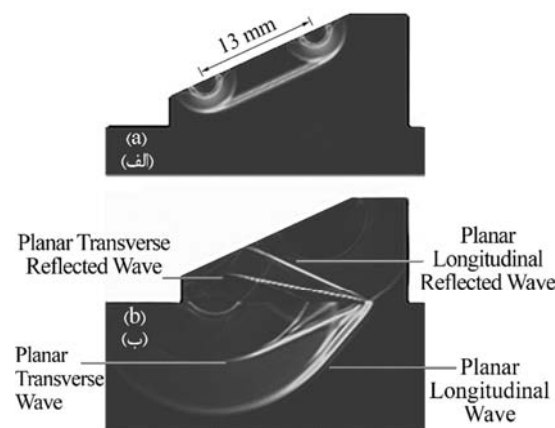


Fig. 9 (a) Longitudinal wave excitation inside the wedge, (b) Refraction and reflection of the incident wave inside the specimen and wedge

شکل 9 الف) تابش امواج طولی در کفشک، ب) بازتابش و شکست امواج در قطعه و کفشک

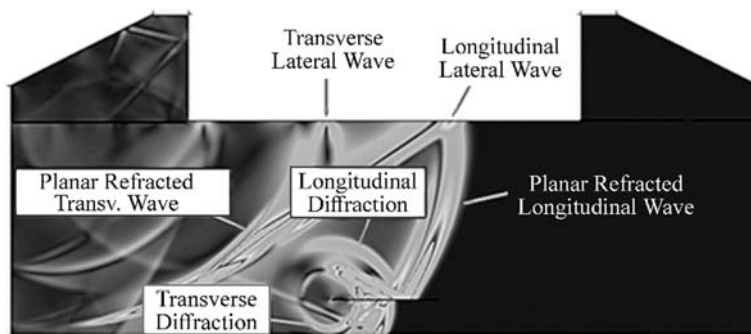


Fig. 10 Wave diffraction from the defect left tip at 11.4 μ s.

شکل 10 انتشار امواج پس از برخورد موج تابیده به لبه سمت چپ ترک در زمان 11.4 μ s

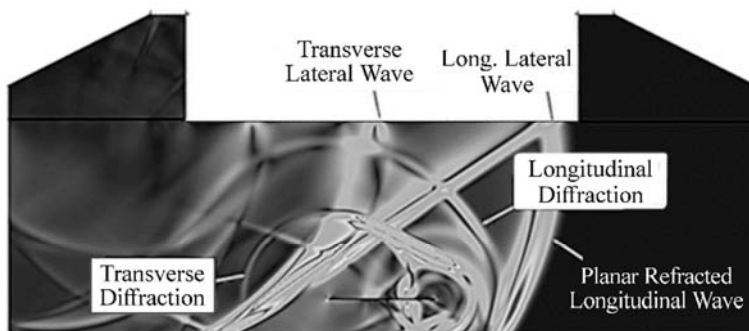


Fig. 11 Wave diffraction from the defect right tip at 13.8 μ s

شکل 11 انتشار امواج پس از برخورد امواج به لبه سمت راست ترک در زمان 13.8 μ s

امواج فراصوتی توسط پروب گیرنده با استفاده از المان‌های نامحدود و اعمال میرایی جرمی و سختی و بررسی تاثیر آن بر روی رفتار سیگنال دریافتی توسط پروب مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین با شبیه‌سازی رفتار انتشار امواج در کفشک و قطعه دارای عیوب افقی، پراش امواج فراصوتی از دو لبه انتهایی عیب و تبدیل مود امواج طولی و عرضی صفحه‌ای و استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از روش معرفی شده توسط نویسندگان ترک افقی برای طول‌های مختلف در دو عمق ترک مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

حاصل از روش‌های متداول آزمون نافذ برای عیوب قائم مطابقت مناسبی دارد [13, 19]. همچنین نتایج به‌دست آمده بیانگر کاهش خطای کمینه اندازه‌گیری حاصل از این روش با افزایش عمق عیب در محدوده اندازه و زاویه پروب آزمون است که چنین رفتاری با توجه به نتایج حاصل از آزمون مرسوم نافذ مورد انتظار می‌باشد [20].

5- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله آزمون نافذ برای اندازه‌گیری عیوب افقی صفحه‌ای با استفاده از روش المان محدود مورد تحلیل قرار گرفته شده است. بدین منظور با مدل‌سازی پروب و کفشک مورد استفاده در آزمون نافذ، رفتار امواج بازتابش در پروب- کفشک و مشخصات فراصوتی آن‌ها جهت دریافت بهینه پراش

جدول 2 اندازه‌گیری طول ترک در عمق 20 mm

طول واقعی ترک (mm)	t_1 (μ sec)	t_2 (μ sec)	روش پیشنهادی (mm)	خطای نسبی (%)
20	17.91	20.54	17.42	12.91
22	17.35	20.34	19.48	11.46
24	16.89	20.22	21.45	10.62
26	16.52	20.20	23.71	8.77
28	16.14	20.18	26.27	6.64
30	16.01	20.16	26.71	10.98
32	15.93	20.15	27.10	15.31

جدول 3 اندازه‌گیری طول ترک در عمق 25 mm

طول واقعی ترک (mm)	t_1 (μ sec)	t_2 (μ sec)	روش پیشنهادی (mm)	خطای نسبی (%)
20	18.25	21.09	17.24	13.70
22	18.00	21.09	18.74	14.17
24	17.61	21.07	20.95	12.71
26	17.22	21.06	23.16	10.90
28	16.83	21.04	25.51	8.90
30	16.33	21.04	28.45	5.16
32	16.18	21.04	29.37	8.20

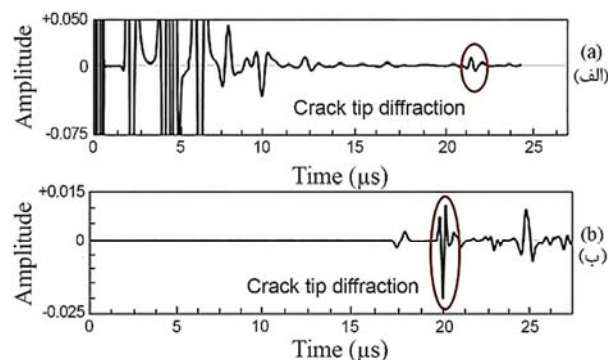


Fig. 12 (a) The crack tip diffracted echo received by the transducer A, (b) The crack tip diffracted echo received by the transducer B

شکل 12 الف) دریافت پراش از نوک ترک توسط گیرنده A ب) دریافت پراش از نوک ترک توسط گیرنده B

- Vol. 21, No. 1, pp. 12-15, 1979.
- [2] J. Temple, Time-of-flight inspection: theory, *Nuclear Energy*, Vol. 22, No. 5, pp. 335-348, 1983.
- [3] M. Silk, The use of diffraction-based time-of-flight measurements to locate and size defects, *British Journal of Non-destructive Testing*, Vol. 26, No. 4, pp. 208-213, 1984.
- [4] J. Verkooijen, TOFD used to replace radiography, *Insight*, Vol. 37, No. 6, pp. 433-435, 1995.
- [5] R. Subbaratnam, S. T. Abraham, M. Menaka, B. Venkatraman, B. Raj, Time of flight diffraction testing of austenitic stainless steel weldments at elevated temperatures, *Materials Evaluation*, Vol. 66, No. 3, pp. 332-338, 2008.
- [6] S. Baby, T. Balasubramanian, R. J. Pardikar, M. Palaniappan, R. Subbaratnam, 'Time-of-flight diffraction (ToFD) technique for accurate sizing of surface-breaking cracks', *Insight*, Vol. 45, No. 6, pp. 426-430, 2003.
- [7] G. Baskaran, K. Balasubramaniam, C. Krishnamurthy, C. Lakshmana Rao, TOFD imaging: Ultrasonic TOFD flaw sizing and imaging in thin plates using embedded signal identification technique (ESIT), *Insight*, Vol. 46, No. 9, pp. 537-542, 2004.
- [8] G. Baskaran, K. Balasubramaniam, C. L. Rao, Shear-wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique, *NDT & E International*, Vol. 39, No. 6, pp. 458-467, 2006.
- [9] R. Subbaratnam, S. T. Abraham, B. Venkatraman, B. Raj, Immersion and TOFD (I-TOFD): a novel combination for examination of lower thicknesses, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 30, No. 3, pp. 137-142, 2011.
- [10] G. Baskaran, K. Balasubramaniam, C. V. Krishnamurthy, C. Lakshmana Rao, 'A ray based model for the ultrasonic time-of-flight diffraction simulation of thin walled structure inspection', *ASME Trans. Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 127, No. 3, pp. 262-268, 2005.
- [11] A. Ferrand, M. Darmon, S. Chatillon, M. Deschamps, Modeling of ray paths of head waves on irregular interfaces in ToFD inspection for NDE, *Ultrasonics*, Vol. 54, Vol. 7, pp. 1851-1860, 2014.
- [12] M. Darmon, V. Dorvala, A. Kamta Djakoua, L. Fradkinc, S. Chatillon, A system model for ultrasonic NDT based on the Physical Theory of Diffraction (PTD), *Ultrasonics*, Vol. 64, pp. 115-127, 2016.
- [13] M. Riahi, M. R. Khademikhaledi, A. Valipour, 2D finite element modeling of ultrasonic time of flight diffraction technique, *Materials Evaluation*, Vol. 72, No. 5, pp. 597-60, 2014.
- [14] K. Harumi, M. Uchida, T. Miyajima, Y. Ogura, Defect sizing of small inclined cracks on a free surface using multi-tip waves, *NDT & E International*, Vol. 25, No. 3, pp. 135-144, 1992.
- [15] M. V. Felice, A. Velichko, P.D. Wilcox, Accurate depth measurement of small-surface breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique, *NDT & E International*, Vol. 68, pp. 105-112, 2014.
- [16] P. Bagheri, S. Sodagar, G. Rashed, A. Yaghootian, A Novel Method for Ultrasonic Evaluation of Horizontal Defects Using Time-of-Flight Diffraction, *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 16-25, 2014.
- [17] C. Hellier, *Handbook of Non-destructive testing*, Second Edition, pp. 7.100, New York: McGraw-Hill, 2001.
- [18] E. Ginzel, F. Honarvar, A. Yaghootian, A Study of Time-of-Flight Diffraction Technique Using Photoelastic Visualisation, *Second International Conference on Technical Inspection and Nondestructive Testing*, Tehran, 2008.
- [19] W. J. Zippel, J. A. Pincheira, G. A. Washer, Crack measurement in steel plates using TOFD method, *Journal of performance of constructed facilities*, Vol. 14, No. 2, pp. 75-82, 2000.
- [20] J. P. Charlesworth, J. A. G. Temple, *Engineering applications of ultrasonic time-of-flight diffraction*, Second Edition, pp. 192-193, Research Studies Press, New York : Wiley, 2001.

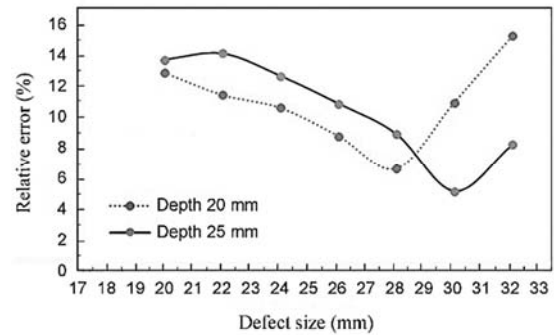


Fig. 13 Variation of relative errors versus defect size in the depth of 20 mm and 25 mm.

شکل 13 تغییرات خطای نسبی اندازه‌گیری برحسب طول ترک در عمق‌های 20 mm و 25 mm

نتایج به‌دست آمده نشان داد که در محدوده اندازه پروب و زاویه ارسال امواج، خطای اندازه‌گیری طول ترک با استفاده از این روش برای طول‌های 20 mm تا 30 mm در دو عمق 20 mm و 25 mm از سطح قطعه، کمتر از 15% است که با نتایج متداول حاصل از آزمون‌های مرسوم تافد مطابقت خوبی دارد.

6- فهرست علائم

c	سرعت (mms^{-1})
E	مدول الاستیسیته (m^2)
f	فرکانس (MHz)
N	تعداد سیکل
t	زمان (s)
L	طول (m)

علائم یونانی

θ	زاویه (درجه)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ν	نسبت پواسن

7- مراجع

- [1] M. Silk, Defect sizing using ultrasonic diffraction, *British Journal of NDT*,