

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

* بشیر سید حیات غیب^۱, سینا سوداگر^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی بازرسی فنی و ایمنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان

۲- استادیار، مهندسی بازرسی فنی و ایمنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان

* آبادان، صندوق پستی ۶۱۹، sodagar@put.ac.ir

چکیده

روش زمان پرواز پراش، تاfeld (ToFD)، یکی از تکنیک‌های آزمون‌های غیرمخرب فرا صوتی است که برای اندازه‌گیری و ارزیابی نایپوستگی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش به دلیل استفاده از اختلاف زمانی دریافت امواج، اندازه‌گیری عیوب در مقایسه با سایر روش‌های اندازه‌گیری فرا صوتی از دقت بالایی برخوردار است. با این وجود در روش‌های مرسوم این آزمون امکان اندازه‌گیری طول نایپوستگی‌های 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 فرا صوتی برای اندازه‌گیری عیوب افقی با استفاده از نرم‌افزار تجاری المان محدود اباقوس پرداخته شده است. بدین منظور پروپ-کفشد فرا صوتی موجود در سیستم اندازه‌گیری با به کارگیری المان‌های نامحدود CINPE4 و اعمال میرایی جرمی و سختی بهمنظر کاهش بازتابش امواج و پژواک‌های ناطم‌لوب در درون کفشد 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 بدست آمده نشان می‌دهد، در مقایسه با روش‌های سنتی آزمون تاfeld، نتایج به دست آمده از این روش دارای دقت مناسبی می‌باشند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۲ مرداد ۱۳۹۵

پذیرش: ۰۶ مهر ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۰۹ آبان ۱۳۹۵

کلید واژگان:

امواج فرا صوتی

پراش امواج

روشن المان محدود

المان نامحدود

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.

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 روش قطعه و انجام آزمون است [۴]. همچنین در بازرسی سطوح با دمای بالا با استفاده از این روش، روش سریع‌تر به دلیل کاهش زمان موجه ترنسن‌دیوسر^۲ با دمای بالا امکان بهره‌برداری از آن را نسبت به سایر روش‌ها فراهم می‌کند [۵]. در سال ۲۰۰۳، بیبی و همکارانش [۶] با استفاده از این

روش زمان پرواز پراش، تاfeld (ToFD^۱)، یکی از روش‌های اندازه‌گیری شناخته شده در آزمون‌های فرما صوتی است که قابلیت اندازه‌گیری دقیق عیوب در قطعات با ضخامت بالا را دارد می‌باشد [۳-۱]. امروزه کدها و استانداردها استفاده از روش تاfeld جهت انجام بازرسی‌های متداول، به عنوان جایگزین روش پرتونگاری، برای مقاطع با ضخامت بیش از ۱۲ mm را مورد تایید قرار

^۱ Transducer

^۲ Time-of-Flight Diffraction

Please cite this article using:

B. Seyed Hayat Gheib, S. Sodagar, Ultrasonic Evaluation of Planar Defects Using Infinite Elements, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 210-216, 2016
(in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B. Seyed Hayat Gheib, S. Sodagar, Ultrasonic Evaluation of Planar Defects Using Infinite Elements, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 210-216, 2016

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 بازرگانی (ضخامت قطعه) استفاده می‌شوند. سایر اکوهای⁸ دریافتی میان این دو اکو مربوط به پراش⁹ امواج فراصوتی از دو انتهای بالای (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 مثلاً 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 عیوب در سیگنال دریافتی خواهد گردید. همچنین در این قطعات بهدلیل اندازه پروب‌های مرسم در آزمون تاfeld، فاصله مردنیاز قرارگیری دو پروب قبل 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 این که اکوهای پراش ناشی از دو سر عیوب بهصورت همزمان به پروب گیرنده می‌رسند، امکان اندازه‌گیری عیوب با استفاده از یک پروب گیرنده وجود ندارد. "شکل 2" را بینید. در روشی که توسط باقری و همکارانش [16] پیشنهاد گردید، بهمنظور 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 L₁ و L₂ از دو انتهای عیوب، طول عیوب افقی را با استفاده از معادله زیر می‌توان محاسبه نمود:

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

بهطوری که،

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

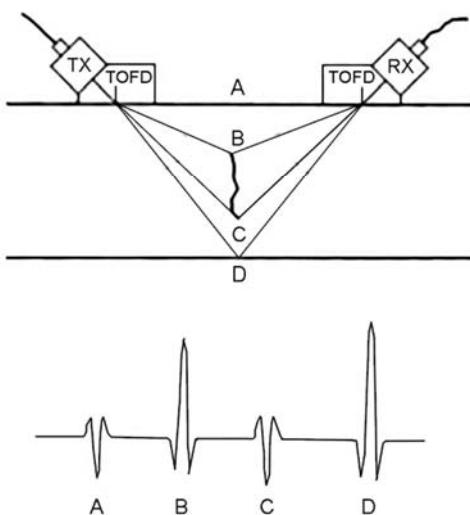


Fig. 1 Schematic of the conventional ToFD technique [17]

شکل 1 شماتیک قرارگیری پروب‌ها در آزمون تاfeld [15]

⁶Lateral Wave
⁷Back-wall
⁸Echo
⁹Diffraction

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 روشنی بینان 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 بازنگری به 7mm کاهش یافت. در سال 2011، سباراتنم و همکارانش [9] از ترکیب دو روش تاfeld و آزمون غوطه‌وری (I-ToFD) برای رفع محدودیت فاصله پروب‌ها استفاده نمودند و کمترین ضخامت بازنگری 3 mm را گزارش نمود. مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های عددی جهت توسعه روش تاfeld و کاهش محدودیت‌های این روش انجام گرفته است. باسکاران و همکارانش [10] از روش پرتو² جهت شبیه‌سازی آزمون تاfeld در بازنگری سازه‌های با ضخامت کم استفاده نمودند. فراند و همکارانش [11] با ارائه یک الگوریتم جدید در این روش به کمک نقاط واسطه، به ارزیابی عیوب با سطوح نامنظم پرداختند. روش تقریب کرشوف [12]، روش‌های صریح و ضمنی المان محدود [13,8] نیز بهمنظور 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 بهصورت افقی نسبت به سطح قطعه قرار گرفته باشند، اندازه‌گیری طول عیوب 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 بهکارگیری روش تمرکز کل، تعیین عمق، زاویه و شکل عیوب را با استفاده از پردازش امواج دریافتی توسعه آرایه‌ای از ترنسدیوسرها 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 تأثیر کفشد و پروب‌های استفاده شده در اندازه‌گیری طول عیوب بررسی نشده و از انتشار موج در کفشک پروب فرستنده و گیرنده و تأثیر آن بر نتایج بدست آمده صرف‌نظر شده است. در این مقاله با توسعه و بسط این مدل جدید، استفاده از آن جهت اندازه‌گیری ناپیوستگی‌های افقی در آزمون تاfeld مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور با بهره‌گیری از المان‌های بینهایت و مدل المان محدود راهه 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 تاfeld شناسایی و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- اندازه‌گیری عیوب با استفاده از پدیده پراش

در "شکل 1" شماتیک روش تاfeld و قرارگیری پروب‌ها³ بر روی قطعه در این روش و سیگنال دریافتی نشان داده شده است. همان‌گونه که در "شکل 1" نشان داده 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

¹Miniature Probe

²Ray method

³Probe

⁴Transmitter

⁵Receiver

به طوری که در این معادله f فرکانس ترنسدیوسر و N تعداد سیکل‌های پالس اعمالی است. در جدول ۱ مشخصات و ثوابت الاستیک و صوتی مواد ارائه شده است.

۴- نتایج عددی

همگرایی نتایج حاصل از مدل المان محدود در مدل ارائه شده برای آزمون تأثیر، با استفاده از نسبت دامنه سیگنال به نویز^۷، SNR، با کاهش اندازه المان‌ها (افزایش تعداد المان‌ها) مورد بررسی قرار گرفته شده است. در "شکل ۴" نسبت SNR برای یک مدل بازتابشی ارسال- دریافت^۸ یک موج فرماحتوی با فرکانس ۵MHz 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 ۳۵ μm می‌گردد. این اندازه المان برابر $\lambda/33$ است.

۱-۴- تاثیر المان نامحدود در رفتار امواج بازتابش در کفشك
همان‌گونه که در بخش قبل بیان گردید، دو پارامتر نوع ماده و شکل هندسی کفشك در پروب‌های فرماحتوی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در سیگنال دریافتی

جدول ۱ مشخصات و ثوابت الاستیک مواد

Table 1 Elastic and acoustic properties

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

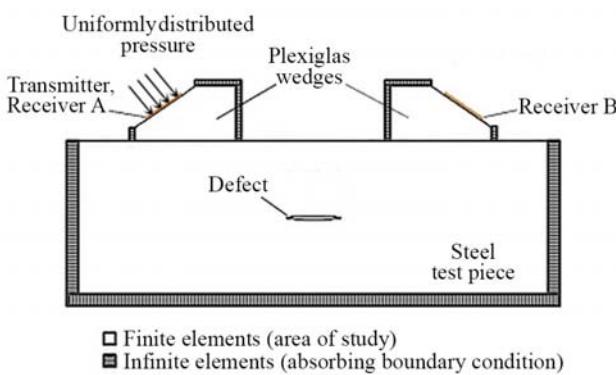


Fig. 3 Schematic of the FE modeling of the inspection system
شکل ۳ شماتیک مدل المان محدود سیستم اندازه‌گیری

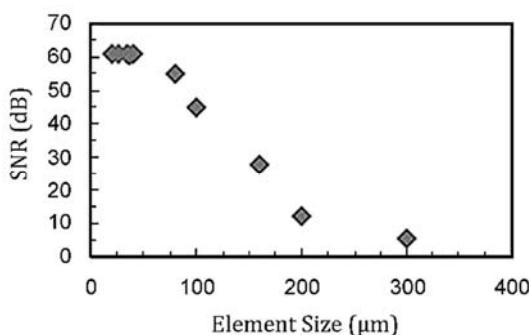
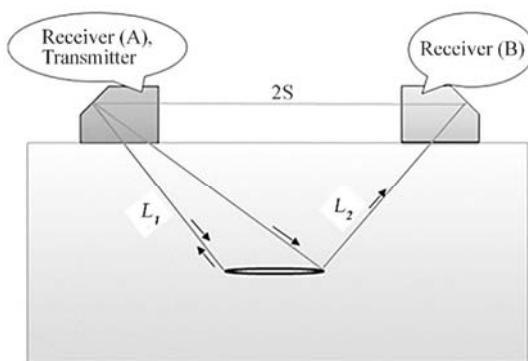


Fig. 4 Convergence diagram of the SNR parameter
شکل ۴ نمودار همگرایی نسبت سیگنال به نویز

⁷ Signal to noise ratio
⁸ Pulse-echo



شکل ۲ شماتیک قرارگیری پروب‌ها و امواج تابش و پراش در روش پیشنهادی

۳- مدل سازی آزمون تأثیر

برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف آزمون بر رفتار انتشار امواج و نتایج اندازه‌گیری، از روش المان محدود در محیط نرم‌افزار اباکوس^۱ ۶.11 جهت مدل سازی آزمون تأثیر در اندازه‌گیری عیوب صفحه‌ای (H-ToFD) استفاده شده است. بدین منظور ساختار آزمون در سه بخش مدل سازی گردیده است. ابتدا قطعه مورد آزمون بهصورت یک مستطیل فولادی با ابعاد ۵۰×۸۰ mm و با استفاده از المان کرنش صفحه‌ای چهار گره‌ای CPE4R المان‌بندی شده است. سپس پروب‌های فرماحتوی فرستنده و گیرنده بهمنظور مدل سازی رفتار انتشار امواج و فاصله طی شده توسط امواج در کفشك، بهصورت دو گوه ذوزنقه‌ای از جنس پلکسی- گلاس² و با استفاده از المان‌های CPE4R فوق مدل سازی شده است. در طراحی و ساخت پروب‌های زاویه‌ای فرماحتوی، میرایی ماده کفشك به‌گونه‌ای انتخاب گردیده است که علاوه بر جلوگیری از تضعیف بیش از اندازه امواج عموری از صفحه پیزوالکتریک³ به درون قطعه به دلیل استهلاک امواج در درون کفشك، موجب جذب امواج بازتابش در کفشك با صفحه پیزوالکتریک شده و نویز⁴ ایجاد شده در سیگنال دریافتی را تا حد امکان کاهش دهد. همچنین شکل هندسی جداره کفشك نیز به‌گونه‌ای ساخته شده است تا با انحراف جهت امواج بازتابشی درون کفشك، از برخورد آن‌ها با صفحه پیزوالکتریک نیز جلوگیری گردد. بهمنظور مدل سازی این دو مشخصه کفشك و حذف تأثیر نویز ناشی از بازتابش و تبدیل مود امواج در کفشك از المان‌های نامحدود CINPE4R در جداره‌های کفشك و همچنین اعمال میرایی جرمی و سختی به مدل ماده پلکسی- گلاس استفاده شده در کفشك استفاده گردیده است که تأثیر 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 ۳" نشان داده شده است. همچنین تحریک صفحات پیزوالکتریک پروب (المان فعال⁵) بهصورت فشار اعمالی بر سطح مورب کفشك در محل قرارگیری صفحه پیزوالکتریک و با استفاده ازتابع هنینگ⁶ بهصورت معادله زیر در فاصله زمانی اعمال پالس نسبت سیگنال به نویز⁷ شبه‌سازی شده است [16]:

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

¹ ABAQUS

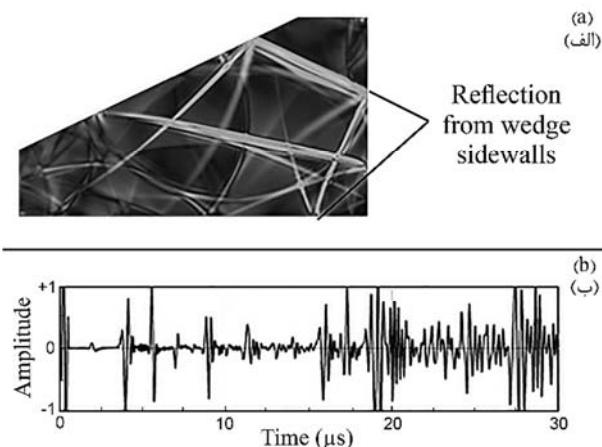
² Plexi-glass

³ Piezoelectric

⁴ Noise

⁵ Active element

⁶ Hanning



شکل ۶ (الف) انتشار امواج در کفشهک بدون استفاده از المان نامحدود، (ب) سیگنال دریافتی توسط پروب

میرایی جرمی و سختی به صورت معادله زیر در مدل المان محدود اعمال می‌گردد:

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

به طوری که در این معادله α ضریب میرایی جرمی، β ضریب میرایی سختی، $[M]$ ماتریس جرمی و $[K]$ ماتریس سختی، $[C]$ ماتریس میرایی در مدل المان محدود است. برای بررسی تاثیر اعمال میرایی جرمی و سختی در مدل المان محدود انتشار امواج در کفشهک، 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 را به صورت همزمان کاهش می‌دهد. همچنین مقایسه سیگنال‌های دریافتی نشان داده شده در "شکل 8" نشان می‌دهد که ضریب میرایی سختی 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 درحالی که اعمال میرایی جرمی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی زمان تحلیل مسئله نخواهد داشت. بررسی نتایج بدست 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 المان نامحدود، میرایی جرمی $\alpha = 1 \times 10^5$ و میرایی سختی $\beta = 1 \times 10^{-9}$ در مدل‌سازی کفشهک در آزمون تأثیر استفاده نمود.

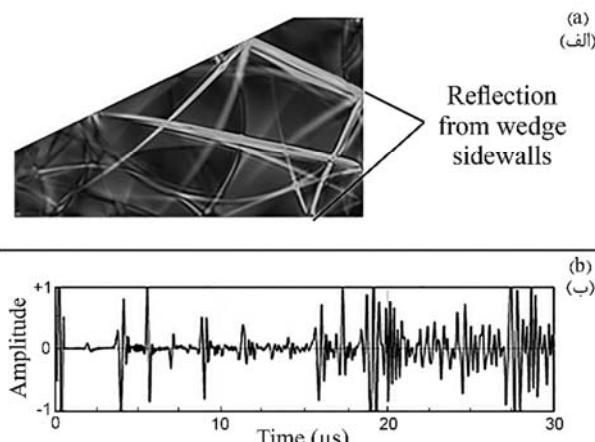
در "شکل 9" انتشار امواج در کفشهک و انتقال امواج به درون قطعه مورد آزمون با استفاده از پارامترهای فوق نشان داده شده است. همان‌گونه که در "شکل 9(a)" و "شکل 9(b)" ملاحظه می‌شود اعمال همزمان این پارامترها، موجب افزایش قابل ملاحظه کیفیت امواج بازتابش شده در کفشهک شده است. همچنین ملاحظه می‌شود که برخورد موج طولی به سطح مشترک کفشهک 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 ترنسدیوسر و SNR آن دارد. در استفاده از پراش امواج فرماحتوی 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 کفشهک و همچنین شکل هندسی دیواره‌های کفشهک و امواج بازتابشی از آن‌ها در کیفیت آزمون به صورت مستقیم تاثیرگذار خواهد بود. بهمنظور اعمال تاثیر شکل هندسی دیواره کفشهک از المان نامحدود CINPE4R در دیواره کفشهک استفاده شده است. همچنین سطح تماس میان کفشهک 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 کفشهک بدون اعمال المان نامحدود و با اعمال المان نامحدود به دیواره نشان داده شده است.

همان‌گونه که در "شکل 5(a)" مشاهده می‌شود امواج تولید شده توسط صفحه ترنسدیوسر پس از برخورد با دیواره پایینی کفشهک به درون کفشهک بازتابش شده و با هر بار برخورد به 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 عمل 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 کفشهک در محل قرارگیری صفحه پیزوالکتریک نشان داده شده است. در "شکل 6(a)" انتشار امواج و سیگنال دریافتی برای پروب و کفشهک مشابه و با اعمال المان نامحدود به دیواره‌های کفشهک نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود استفاده از المان نامحدود موجب تضعیف قابل ملاحظه بازتابش امواج برخوردی به دیواره کفشهک و کاهش SNR و افزایش قابل ملاحظه کیفیت سیگنال دریافتی توسط ترنسدیوسر شده است. "شکل 6(b)" را ببینید.

4-2- تاثیر میرایی کفشهک در افزایش SNR

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



شکل ۵ (الف) انتشار امواج در کفشهک بدون استفاده از المان نامحدود، (ب) سیگنال دریافتی توسط پروب

¹ Rayleigh

4-3- اندازه‌گیری ناپیوستگی افقی یا استفاده از امواج پر اش

به منظور 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 مدل سازی شده است. پروب- کفسک فرستنده و گیرنده به صورت یک پروب تک المانه با طول صفحه پیزوالکتریک 13 mm و فاصله بین دو ترنسدیوسر فرستنده و گیرنده 85 mm در دو طرف ترک در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادله (2) یک پالس فرماحتی صفحه‌ای شبیه‌سازی شده است. با فرکانس میانی MHz 5 و تعداد سیکل N = 5 از طریق پروب- کفسک A به گونه‌ای به درون قطعه ارسال می‌گردد که موج با زاویه^{۵۵} در قطعه منتشر شده و پس از برخورد با عیوب جاسازی شده درون قطعه اکوهای مربوطه توسط دو پروب A و B دریافت گردد. برای کاهش تاثیر اکوهای مربوط به بازتابش‌های نامطلوب از دیوارهای جانی و پشتی قطعه، از المان‌های نامحدود استفاده شده است. در "شکل 10"، امواج منتشر شده در قطعه پس از برخورد موج طولی تابشی با انتهای سمت چپ عیوب نشان داده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اثر برخورد موج طولی صفحه‌ای تابشی با لبه عیوب 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 عیوب نشان داده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود پس از برخورد موج با لبه انتهایی سمت راست عیوب نیز دو موج پراش استوانه‌ای طولی و عرضی و با اختلاف زمانی منتشر با طولی عیوب از این لبه در قطعه منتشر می‌گردند.

سیگنال دریافتی توسط دو پروب A و B در "شکل 12" نشان داده است. در سیگنال دریافتی توسط پروب A اکوی موج طولی از لبه سمت چپ عیوب 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 آخرين اکو مربوط به بازتابش طولی از سطح ترک است. مقایسه نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی امواج منتشر شده در قطعه پس از برخورد با عیوب با تصاویر فتوالاستیک پراش امواج در آزمون تألف [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 طول های 20 mm تا 32 mm در عمق های 20 mm و 25 mm ترک از سطح با شرایط یکسان انجام شده است، در جدول 2 طول ترک به دست آمده برای ترک های در عمق 20 mm و در جدول 3 نتایج به دست آمده برای ترک های در عمق 25 mm با فاصله پروب 75 mm نشان داده است. در "شکل 13" خطای نسبی نتایج به دست آمده بر حسب اندازه ترک ترسیم شده است. همان گونه که در این شکل ملاحظه می شود در عمق 20 mm با افزایش طول ترک خطای نسبی اندازه گیری 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 می یابد. همچنین در "شکل 13" مشاهده می شود 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 می یابد. بررسی و مقایسه این نتایج نشان می دهد که اندازه خطای نسبی حاصل از این روش در محدوده مشخصات پروب مورد استفاده دارد، انجام آزمون کمتر از 15% است که با خطای نسبی مرسوم

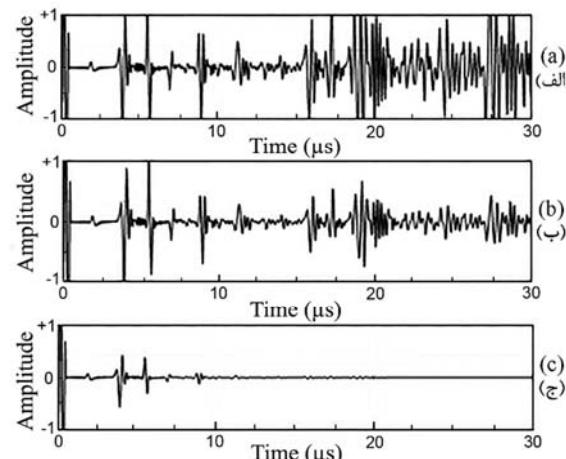


Fig. 7 The effect of mass proportional damping on the received signal;

(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 کفشه؛ (الف) $\alpha = 1 \times 10^5$ ، (ب) $\alpha = 1 \times 10^6$ ، (ج) $\alpha = 1 \times 10^7$

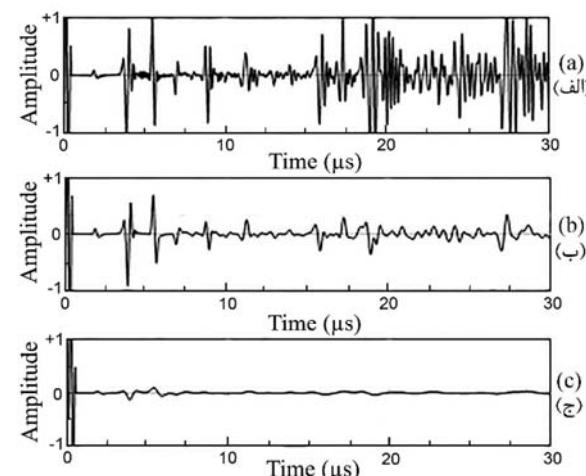


Fig. 8 The effect of stiffness damping on the received signal; (a)

(b) $\beta = 1 \times 10^{-9}$, (c) $\beta = 1 \times 10^{-8}$

شکل 8 سیگنال دریافتی، یا اعمال میرایی، سختی، به کفشک؛ الف) $\beta = 0$ ، ب) $\beta = \beta_0$

$$\beta \equiv 1 \times 10^{-8} \quad (\approx \beta \equiv 1 \times 10^{-9})$$

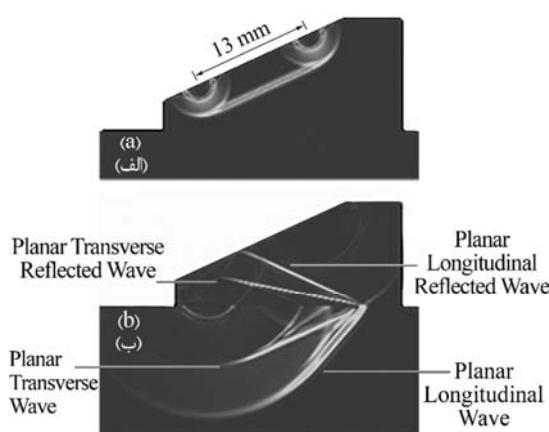
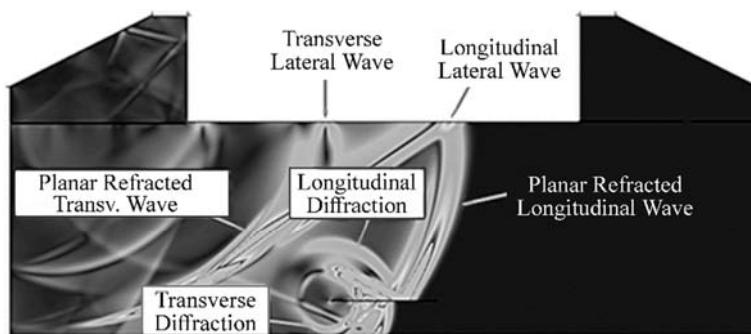
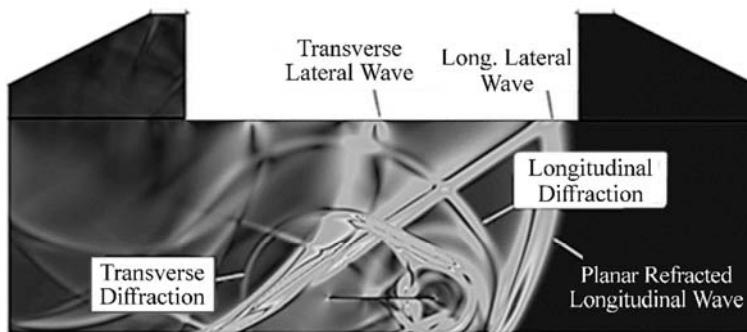


Fig. 9 (a) Longitudinal wave excitation inside the wedge, (b) Refraction and reflection of the incident wave inside the specimen and wedge

شكل 9 (الف) تابش امواج طولی در کفشهک، ب) بازتابش و شکست امواج در قطعه و کفشهک

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 sFig. 11 Wave diffraction from the defect right tip at 13.8 μ sشکل 11 انتشار امواج پس از برخورد امواج به لبه سمت راست ترک در زمان 13.8 μ s

امواج فرماحتوی 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 فرماحتوی از دو لبه انتهایی عیوب و تبدیل مود امواج طولی و عرضی صفحه‌ای و استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از روش معروف شده توسط نویسنده‌گان ترک افقی برای طول‌های مختلف در دو عمق ترک مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

جدول 2 اندازه‌گیری طول ترک در عمق 20 mm

Table 2 Crack length measurement in 20 mm depth

طول واقعی ترک (mm)	t_1 (μsec)	t_2 (μsec)	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

Table 3 Crack length measurement in 25 mm depth

طول واقعی ترک (mm)	t_1 (μsec)	t_2 (μsec)	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

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

5- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله آزمون تاfeld 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 تاfeld، رفتار امواج بازتابش در پروب- کفشک و مشخصات فرماحتوی آن‌ها جهت دریافت بهینه پراش

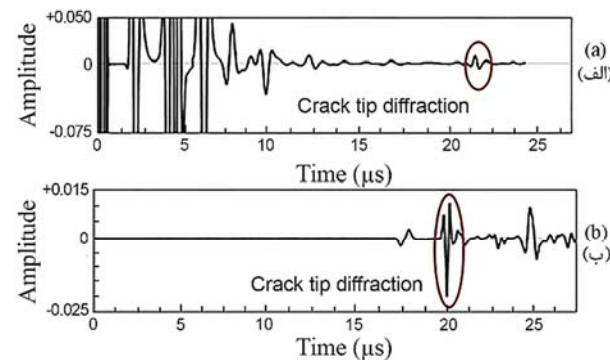


Fig. 12 (a) The crack tip diffracted echo received by the transducer A, (b) The crack tip diffracted echo received by the transducer B

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. Balasubramanian, 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. Balasubramanian, 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. Balasubramanian, 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. Darmona, V. Dorvala, A. Kamta Djakoua, L. Fradkine, 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. Khademkhahedi, 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.

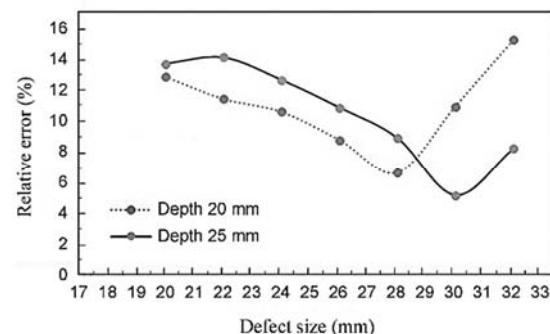


Fig. 13 تغییرات خطای نسبی اندازه‌گیری بر حسب طول ترک در عمق‌های 20 mm و 25 mm

نتایج به دست 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 تا ف مطابقت خوبی دارد.

6- فهرست علایم

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

علایم یونانی

زاویه (درجه)	θ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
نسبت پواسان	v

7- مراجع

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