مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1397، دوره 18، شماره 05، صص 154-162

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

الگوریتم مکان‌یابی سه بعدی عیب در وضعیت تراگذارهای گیرنده هم سطح در آزمون فراصوتی تافد

علی حبیب‌پور لداری[1]، فرهنگ هنرور[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1999143344، honarvar@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 24 دی 1396
پذیرش: 14 اسفند 1396
ارائه در سایت: 24 فروردین 1397

کلید واژگان:
مکان‌یابی منبع موج
روش فراصوتی تافد
مکان‌یابی و اندازه‌گذاری عیب

چکیده

روش فراصوتی تافد (TOFD) قادر به اندازه‌گیری موقعیت عیب به‌صورت دوبعدی و طول آن فقط در راستای عمق است. در این مقاله، با استفاده از روش‌های موقعیت‌یابی در تعیین موقعیت یک بازتابنده موج در سامانه‌های مختلفی از جمله رادار غیرفعال، اکوستیک و سونار، الگوریتمی برای مکان‌یابی سه عیب در روش فراصوتی تافد ارائه شده است. کمیت اصلی مورد استفاده در این روش‌ها "تاخیر زمان رسیدن موج" به تراگذارهای گیرنده است. روش تحلیلی مورد استفاده در این تحقیق با وجود برخورداری از مزیت سرعت در محاسبه، به خطای تاخیر زمان حساس است. این حساسیت برای هنگامی که فاصله تراگذارهای گیرنده از صفحه میانگین (صفحه‌ای با حداقل فاصله از تراگذارها) کم باشد، به شدت افزایش می‌یابد. علاوه‌بر آن در مواردی که تراگذارهای گیرنده کاملا هم سطح باشند، برای مسئله جوابی به‌دست نمی‌آید. در این مقاله الگوریتمی مبتنی بر حل بسته در شرایط تراگذارهای گیرندهِ هم سطح پیشنهاد شده است. در این الگوریتم با در نظر گرفتن مکان‌هایی فرضی برای تراگذارهای گیرنده، به‌صورت همزمان موقعیت هدف و مکان تراگذارهای گیرنده به‌دست می‌آیند. این موقعیت‌های فرضی به گونه‌ای به‌دست می‌آیند که فاصله آن‌ها از صفحه میانگین اندازه قابل قبولی داشته باشد. برای تایید صحت عملکرد، از این الگوریتم در تعیین موقعیت یک عیب مصنوعی درون قطعه فولادی استفاده شد و نتایج قابل قبولی در کاهش حساسیت به خطا و عدم رسیدن به بن بست در حل مسئله در وضعیت هم سطح بودن تراگذارهای گیرنده به‌دست آمد.

An Algorithm for 3D Defect Positioning in the Case of Coplanar Transducers in Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction Technique

Ali Habibpour Ledari, Farhang Honarvar*

Faculty of Aerospace Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran
*P.O.B. 1999143344, Tehran, Iran, honarvar@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 January 2018
Accepted 05 March 2018
Available Online 13 April 2018

Keywords:
Wave Source positioning
Ultrasonic Time of Flight diffraction (TOFD)
Defect positioning and sizing

ABSTRACT

The 2D position of a defect as well as its through-thickness length can be measured by ultrasonic time-of-flight diffraction technique (TOFD). By considering the methods used for detecting and positioning a target in radar, acoustic and sonar systems, an algorithm was developed for 3D positioning of defects in TOFD measurements. In this algorithm, the unknown parameter to be determined is the time difference of arrival (TDOA). While the developed algorithm is sufficiently fast, it suffers from various errors affecting the TDOA. The sensitivity of TDOA to errors is more noticeable when the distance between the receivers and the midplane (a plane with a minimum distance from the receivers) is small. This problem cannot be easily resolved when the receivers are coplanar. In this paper, using a closed form solution, a new algorithm is proposed for solving this problem. In this algorithm, by considering hypothetical locations for receivers, both the target (defect) and the positions of receivers are simultaneously verified. These hypothetical positions are obtained in such a way that their distances from the midplane is within acceptable limits. To validate the algorithm, it is used for determining the position of an artificial defect in a carbon steel block. The results prove that the algorithm is accurate and can be used in case of 3D TOFD measurements in which the receivers are usually coplanar.

1- مقدمه

آزمون غیرمخرب فراصوتی تافد[1] یک روش نسبتا جدید است که نسبت به سایر روش‌های فراصوتی دقیق‌تر است. این روش براساس پدیده پراش[2] عمل می‌کند و به همین دلیل وابسته به راستای قرارگیری عیب نیست. علاوه بر مکان‌یابی[3]، اندازه‌گذاری[4] عیب نیز براساس زمان دریافت موج انجام می‌شود. اندازه‌گیری زمان را می‌توان با دقت بالایی انجام داد و به همین دلیل دقت

[1] Time-of-Flight Diffraction (TOFD)
[2] Diffraction
[3] Positioning
[4] Sizing

تافد در اندازه‌گذاری عیب نیز بالا است [1].

در روش فراصوتی تافد، عمق و موقعیت طولی عیب به‌دست می‌آید و برای موقعیت عرضی باید یک روبش اضافی در راستایی غیر از روبش اولی (معمولا عمود بر آن) انجام داد [2]. همچنین، عیب به‌صورت عمودی و در امتداد عمق فرض می‌شود و اندازه آن تنها در راستای عمق به‌دست می‌آید [3]. بهبود دقت و ارائه روش‌های جدید در مکان‌یابی و اندازه‌گذاری دوبعدی توسط تافد، به‌صورت گسترده‌ای انجام شده است [4-10]. در جستجوی انجام شده، تاکنون تحقیقی در مورد مکان‌یابی سه‌بعدی تافد (تافد سه‌بعدی) یافت نشد. برای توسعه چنین کاربردی می‌توان از تئوری‌ها و روابط موجود در مکان‌یابی سه‌بعدی در سامانه‌هایی مانند رادار استفاده کرد.

مسئله تعیین خودکار موقعیت منبع انتشار دهنده یا بازتابنده موج (که از این به بعد آن را نقطه هدف می‌نامیم) با تحلیل سیگنال دریافت شده از آن، یک موضوع پایه‌ای در ناوبری، اکوستیک و رادار غیرفعال است [11-13]. مکان‌یابی نقطه هدف با دو روش فعال و غیرفعال قابل انجام است. در روش فعال، موج توسط تراگذار[1] فرستنده به داخل محیط ارسال شده و از موج بازگشتی برای تعیین مکان نقطه هدف استفاده می‌شود. منبع انرژی در این روش تراگذار فرستنده است که دانستن موقعیت آن علاوه بر تراگذار گیرنده لازم است [14,15]. در مقابل در روش غیرفعال؛ تراگذار گیرنده، موج‌های بازگشتی از هدف را بدون این‌که موقعیت منبع تامین انرژی (تراگذار فرستنده) مشخص باشد دریافت کرده و برای تعیین موقعیت نقطه هدف از آن‌ها استفاده می‌کند [16-18]. انرژی لازم می‌تواند از بیرون تامین شود و یا اینکه همانند روش نشرآوایی[2] در درون محیط ایجاد شود. در هر صورت مکان منشاء انرژی مهم نیست.

برای روش غیرفعال چندین الگوریتم برای مکان یابی ارائه شده است [17,18,20]. در رادار غیرفعال از این روش برای تعیین موقعیت و دنبال کردن هدف استفاده می‌شود. "تاخیر زمان رسیدن[3]" موج به تراگذارهای گیرنده کمیت اصلی در تعیین موقعیت هدف است. این روش موسوم به روش هذلولی است، چون مکان هندسی نقاطی که اختلاف فاصله آن‌ها از دو نقطه یکسان باشد، در صفحه یک هذلولی و در فضا یک هذلولی‌گون است. الگوریتم مکان‌یابی در واقع الگوریتم تعیین محل برخورد هذلولی‌ها یا هذلولی‌گون‌ها است.

مکان‌یابی یک مساله بالقوه چالشی است. میان مکان نقطه هدف و تاخیر زمانی به‌دست آمده یک ارتباط غیرخطی وجود دارد. تحقیقات متعددی در زمینه به‌دست آوردن یک جواب تحلیلی به‌صورت حل بسته[4] برای مکان‌یابی نقاط منبع موج با روش غیر فعال انجام شده است [18].

در مسئله مکان‌یابی، چینش تراگذارهای گیرنده باید به گونه‌ای باشد که هم سطح نباشند. در کاربردهایی که تاکنون وجود داشته این مسئله بررسی نشده است. شاید بخاطر این‌که تاکنون محدودیتی برای قرارگیری تراگذارهای گیرنده در شرایط غیر هم سطح وجود نداشته است.

در این پژوهش امکان استفاده از روش فراصوتی تافد برای مکان‌یابی سه‌بعدی- با توسعه روش‌هایی که در ناوبری، اکوستیک و رادار به‌کار می‌روند- مورد بررسی قرار گرفته است. در مکان‌یابی سه‌بعدی با تافد شرایطی همانند جوش سربه‌سر صفحات فلزی تخت وجود دارد که تراگذارها ناگزیر در یک صفحه قرار می‌گیرند. با ارائه الگوریتمی سعی شده است تا برای هنگامی که تراگذارهای گیرنده هم سطح هستند، مکان‌یابی انجام گیرد. این الگوریتم با تعریف نقاط فرضی برای تراگذارهای گیرنده از متوقف شدن محاسبه جلوگیری می‌کند. درستی عملکرد این الگوریتم در آزمون تجربی برای عیب مصنوعی با موقعیت معلوم نشان داده شده است.

2- مکان‌یابی و اندازه‌گذاری در روش فراصوتی تافد

در روش تافد، دریافت موج‌های بازتابیده یا پراش یافته از یک عیب یا ناپیوستگی ما را قادر می‌سازد که اندازه و موقعیت عیب را محاسبه کنیم. مطابق "شکل 1" امواج فراصوتی توسط تراگذار فرستنده به داخل قطعه مورد آزمایش ارسال شده و پس از برخورد به عیب به تراگذار گیرنده می‌رسند. در این روش تنها معیار اندازه‌گیری موقعیت و اندازه عیب، زمان است [19].

موج پراش یافته توسط تراگذار گیرنده به‌صورت سیگنال روبش A (شکل 2) دریافت می‌شود. معمولاً چهار اکو حاصل از موج زیرپوستی، موج پراشیده از لبه بالایی ترک، موج پراشیده از لبه پایینی ترک و موج بازتابیده از دیواره پشتی در سیگنال وجود دارند. زمان پرواز[5] (زمانی که موج از فرستنده به گیرنده می‌رسد) از روی سیگنال روبش A به‌دست می‌آید. از این زمان برای تعیین مشخصات عیب استفاده می‌شود.

روش فراصوتی تافد در دسته روش‌های پرتاب-دریافت[6] قرار می‌گیرد که تراگذارهای زاویه‌ای فرستنده و گیرنده به‌صورت متقارن در دو سمت منطقه آزمون (به‌عنوان مثال خط جوش) قرار می‌گیرند. تراگذارها دارای فرکانس بالا و طول موج کم هستند که برای شناسایی عیوب بسیار ریز مناست هستند. از موج طولی در این روش استفاده می‌شود زیرا دارای سرعت بیشتری نسبت به موج عرضی است.

فرض اساسی در تافد این است که عیوب (نقاط منتشر کننده موج) و تراگذارهای فرستنده و گیرنده با توجه به "شکل 3" در یک صفحه قرار دارند.

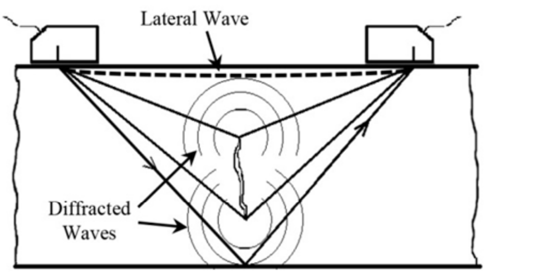

Fig. 1 TOFD configuration [19]

شکل 1 پیکربندی روش فراصوتی تافد [19]

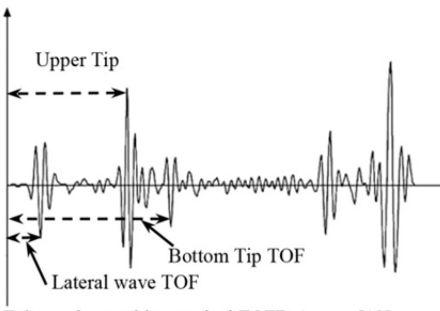

Fig. 2 Echoes observed in a typical TOFD A-scan [19]

شکل 2 اکوهای موجود در روبش A [19]

[1] Transducer
[2] Acoustic Emission
[3] Time difference of arrival (TDOA)
[4] Closed form solution
[5] Time of flight (TOF)
[6] Pitch-catch

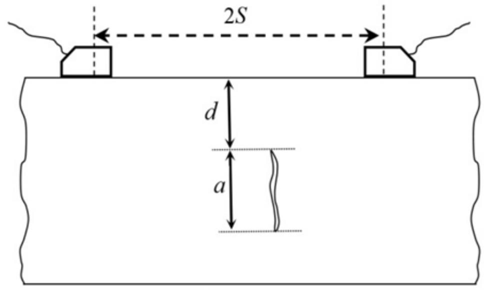

Fig. 3 General assumption of flaw shape in TOFD technique

شکل 3 موقعیت فرض شده عیب در روش فراصوتی تافد

با اندازه‌گیری زمان پرواز و فاصله بین دو تراگذار ($2S$)، عمق و اندازه عیب با کمک معادلات زیر به‌دست می‌آید:

$$d = \sqrt{\frac{(C_L\ \Delta T_{U}-2S)^2}{4} - S^2} \tag{1}$$

$$a = \sqrt{\frac{(C_L\ \Delta T_{B}-2S)^2}{4} - S^2} - d \tag{2}$$

در معادلات (1) و (2)، C_L سرعت طولی و ΔT_U و ΔT_Bبه ترتیب اختلاف زمان پرواز بین موج زیرپوستی و موج پراش یافته از لبه بالا و پایین عیب هستند.

هنگامی که تراگذارها در وضعیت ثابتی هستند، همه عیوبی که مطابق "شکل 4" روی یک بیضی قرار دارند، دارای زمان پرواز یکسانی هستند. بعبارت دیگر مکان هندسی لبه عیوبی که دارای زمان پرواز یکسان هستند بر روی یک بیضی قرار دارد. بنابراین بسیار واضح است که محاسبه عمق و اندازه نمی‌تواند صحیح باشد.

این یک نقص برای این روش است که فقط عیبی را به‌درستی اندازه می‌گیرد که به‌صورت عمودی بوده و دقیقا در وسط دو تراگذار قرار داشته باشد. در آزمون جوش از آن‌جا که محدوده عیب چندان وسیع نیست (ناحیه هاشور زده در شکل 4) این روش با دقت قابل قبولی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پیدا کردن راه‌کاری که بتوان این نقص را برطرف کرد نویسندگان مقاله را بر آن داشت تا روش محاسبه مکان سه‌بعدی عیب را در این مقاله بررسی کنند.

3- توصیف ریاضی مسئله

برمبنای الگوریتم غیرفعال، چندین تراگذار گیرنده موج ارسالی از نقطه هدف را دریافت می‌کنند. اختلاف زمانی سیگنال‌های دریافتی که تاخیر زمان رسیدن نامیده می‌شود کمیت کلیدی در محاسبه موقعیت هدف است. با در

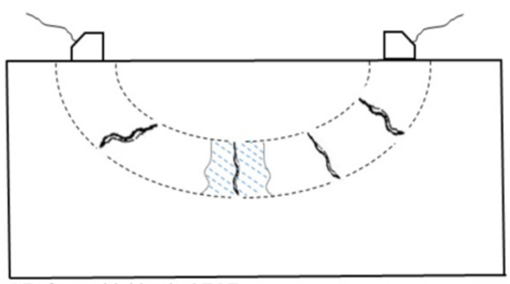

Fig. 4 Defects with identical TOF

شکل 4 عیوب دارای زمان پرواز مساوی

دست بودن سرعت موج در محیط، از روی تاخیر زمانی، اختلاف فاصله به‌دست می‌آید.

"شکل 5" نشان‌دهنده هدف (منبع تولید موج) و تراگذارهای گیرنده در فضای سه‌بعدی است. مطابق شکل، $\vec{X}_i$ و $\vec{X}_T$ به ترتیب بردار مختصات فضایی تراگذار گیرنده iام و هدف هستند. $D_i = \|\vec{X}_i - \vec{X}_T\|$ فاصله هدف و iامین تراگذار گیرنده است و فاصله مبداء مختصات و iامین دریافت‌کننده با R_i نشان داده شده است. همچنین R_T فاصله هدف از مبداء مختصات می‌باشد.

با تعریف D_{ij} به‌عنوان "اختلاف فاصله[1]" تراگذار گیرنده‌ی iام و jام از هدف می‌توان نوشت:

$$D_{ij} = \|D_i - D_j\| \quad ; \quad i,j = 1,\dots,N \tag{3}$$

که در آن N تعداد تراگذارهای گیرنده است. مسئله مکان‌یابی عبارتست از محاسبه $\vec{X}_T$ با داشتن مقادیر $\vec{X}_i$ و D_{ij}. در ابتدا برای کمک به ساده‌سازی، مبداء مختصات را بر روی یکی از تراگذارهای گیرنده، برای مثال تراگذار گیرنده jام، قرار می‌دهیم. این جایگذاری روابط زیر را به‌دست می‌دهد.

$$\vec{X}_j = 0 \rightarrow \begin{cases} R_j = 0 \\ D_j = R_T \end{cases} \tag{4}$$

با توجه به "شکل 6"، از رابطه فیثاغورث داریم:

$$(R_T + D_{ij})^2 = {R_i}^2 - 2\,{\vec{X}_i}^{\mathrm{T}}\vec{X}_T + {R_T}^2 \tag{5}$$

و

$$0 = {R_i}^2 - {D_{ij}}^2 - 2R_T D_{ij} - 2\,{\vec{X}_i}^{\mathrm{T}}\vec{X}_T \tag{6}$$

معادله (6) یک سری از N-1 معادله با سه مجهولِ مولفه‌های بردار $\vec{X}_T$ است. با توجه به این‌که تاخیر زمانی با خطا محاسبه می‌شود، یک میزان خطا برای سمت چپ معادله (6) تعریف کرده و آن را با روش حداقل مربعات کمینه می‌کنیم تا بتوانیم یک تقریب از مقدار واقعی به‌دست آوریم. فرض

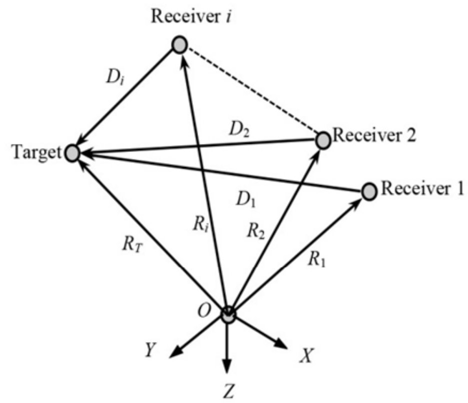

Fig. 5 Layout of the target and receivers

شکل 5 موقعیت تراگذارهای گیرنده و هدف

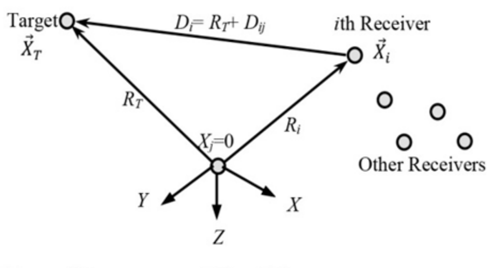

Fig. 6 Range distance representation (D_{ij})

شکل 6 تعریف اختلاف فاصله (D_{ij})

[1] Range distance

می‌کنیم $j=1$ باشد، بنابراین معادله (6) به معادله زیر تبدیل می‌شود.

$$\epsilon_i = {R_i}^2 - {D_{i1}}^2 - 2R_T D_{i1} - 2\,\vec{X}_i^{\,\mathrm{T}}\vec{X}_T \quad (7)$$

که در آن خطا باید حداقل شود. N-1 معادله در رابطه (7) به شکل ماتریسی زیر قابل بیان است:

$$\vec{\epsilon} = \Delta - 2R_T D - 2\,A\vec{X}_T \quad (8)$$

که در آن

$$\Delta=\begin{bmatrix} {R_2}^2 - {D_{21}}^2 \\ {R_3}^2 - {D_{31}}^2 \\ \vdots \\ {R_N}^2 - {D_{N1}}^2 \end{bmatrix};\ D=\begin{bmatrix} D_{21} \\ D_{31} \\ \vdots \\ D_{N1} \end{bmatrix};\ A=\begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

بوده و $\vec{\epsilon}$ بردار معادله خطا می‌باشد. قابل ذکر است که $\vec{\epsilon}$ با معلوم بودن R_T، برحسب $\vec{X}_T$ خطی است و از طرف دیگر با معلوم بودن $\vec{X}_T$ برحسب R_T خطی است [17].

4- حل بسته تحلیلی

بردار خطا که برحسب مجهولات خطی است منجر به حل با حداقل مربعات به‌صورت بسته می‌شود. حل با روش حداقل مربعات برای $\vec{X}_T$ با معلوم بودن R_T به‌صورت زیر خواهد بود [20].

$$\vec{X}_T = \frac{1}{2}A_W^*(\Delta - 2R_T D) \quad (10)$$

که مربع خطای $\epsilon^T\epsilon$ را کمینه می‌کند. در معادله فوق A_W^* عبارتست از:

$$A_W^* = (A^TA)^{-1}A^{\mathrm{T}} \quad (11)$$

برای دقت بیشتر، اگر مربع خطا به‌صورت وزن‌دار $\epsilon^{\mathrm{T}}W\epsilon$ تعریف شود A_W^* تعریف جدیدی پیدا می‌کند:

$$A_W^* = (A^{\mathrm{T}}WA)^{-1}A^{\mathrm{T}}W \quad (12)$$

که در آن W یک ماتریس مثبت و متقارن قطری است. فاصله منشاء انتشار موج (R_T) نامعلوم است و برای به‌دست آوردن $\vec{X}_T$ به‌طوری‌که $\epsilon^{\mathrm{T}}W\epsilon$ را کمینه کند لازم است تا اجازه دهیم R_T در حالی‌که از رابطه (13) تبعیت می‌کند، تغییر کند.

$$R_T = \|\vec{X}_T\| \quad (13)$$

در این‌جا ما با یک مساله کمینه‌سازی غیرخطی پیچیده مواجه هستیم. با این‌حال با کمک روش‌هایی که در ادامه خواهد آمد، می‌توان این خاصیت غیرخطی را به‌صورت تقریبی حذف کرد.

4-1-روش میان‌یابی کروی[1]

روش حل بسته میان‌یابی کروی (SI) در واقع جای‌گذاری معادله (10) در معادله (8) و کمینه کردن دوباره معادله خطا، این بار برحسب R_T، است. نتیجه یک مساله حداقل مربعات برای پیدا کردن R_T است و این روش زحمت محاسباتی کمتری در مقایسه با روش‌های تکراری[2] دارد. این تکنیک با این حقیقت ممکن شده که تخمین $\vec{X}_T$ برحسب R_T مبتنی بر حداقل مربعات در معادله (8) خود برحسب R_T، خطی است. وقتی که مقدار حداقل کننده R_T در این معادله جدید - که خطی است - به‌دست آمد، مقدار $\vec{X}_T$ متناظر با آن (که از معادله (10) به‌دست می‌آید) به‌صورت خودکار نُرم مربع خطا را کمینه می‌کند.

با حذف $\vec{X}_T$ از طریق جایگزینی مقدار معادله (10) در معادله (8) یک معادله خطای جدید ϵ' که برحسب R_T خطی است به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned}\epsilon' &= \Delta - 2R_T D - AA_W^*(\Delta - 2R_T D) \\ &= (I - AA_W^*)(\Delta - 2R_T D)\end{aligned} \quad (14)$$

[1] Spherical-Interpolation Method (SI)
[2] Iteration method

که در آن I یک ماتریس واحد است. با تعریف ماتریس متقارن $P_D^{\perp}$ با ابعاد [(N-1)× (N-1)]:

$$P_D^{\perp} = I - \frac{DD^{\mathrm{T}}}{D^{\mathrm{T}}D} \quad (15)$$

مقدار تخمینی مکان منشاء انتشار به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [20].

$$\hat{X}_T = \frac{1}{2}(A^{\mathrm{T}}P_D^{\perp}WP_D^{\perp}A)^{-1}A^{\mathrm{T}}P_D^{\perp}WP_D^{\perp}\Delta \quad (16)$$

حل به‌دست آمده در معادله (16) بسیار ساده‌تر از روش‌های کمینه‌سازی مبتنی بر تکرار است. البته معادله (16) می‌تواند یک مقدار اولیه خوب نیز برای محاسبه با روش تکرار فراهم کند.

4-2-روش تقاطع کروی[3]

روش تقاطع کروی (SX) برای حل معادله (8) از جایگذاری $\vec{X}_T$ در معادله درجه دوم زیر استفاده می‌کند. که $\vec{X}_T$ خود از حل حداقل مربعات با R_S معلوم به‌دست آمده است (معادله 12).

$$R_T^2 = \vec{X}_T^{\mathrm{T}}\vec{X}_T \quad (17)$$

با قرار دادن $\vec{X}_T$ از معادله (10) در معادله (17)، معادله زیر به‌دست می‌آید.

$$R_T^2 = \left[\frac{1}{2}A_W^*(\Delta - 2R_T D)\right]^{\mathrm{T}}\left[\frac{1}{2}A_W^*(\Delta - 2R_T D)\right] \quad (18)$$

با بسط معادله (18) معادله زیر حاصل می‌شود:

$$aR_T^2 + bR_T + c = 0 \quad (19)$$

که در آن

$$\begin{aligned} a &= 4 - 4D^{\mathrm{T}}{A_W^*}^{\mathrm{T}}A_W^*D \\ b &= 4D^{\mathrm{T}}{A_W^*}^{\mathrm{T}}A_W^*\Delta \\ c &= -\Delta^T{A_W^*}^{\mathrm{T}}A_W^*\Delta \end{aligned} \quad (20)$$

معادله (20) یک معادله جبری درجه دوم است که به‌صورت زیر حل می‌شود:

$$\hat{R}_T = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (21)$$

ریشه مثبت معادله (21) به‌عنوان یک تقریب از فاصله هدف $\hat{R}_T$ در نظر گرفته می‌شود. با جایگذاری $\hat{R}_T$ در معادله (10) مکان تقریبی هدف ($\hat{X}_T$) به‌دست می‌آید.

5- الگوریتم مکان‌یابی در وضعیت تراگذارهای هم سطح

در ادامه الگوریتم مذکور بر روی آزمون غیرمخرب فراصوتی تافد اعمال می‌شود. تعداد و نحوه قرارگفتن تراگذارها نشان داده شده در "شکل 1" تغییر یافته و با قراردادن تراگذار گیرنده در چندین موقعیت مختلف مطابق "شکل 7" شرایط برای مکان‌یابی عیب در سه بعد فراهم شده است.

صفحه میانگین را به‌عنوان صفحه‌ای که حداقل فاصله از تراگذارها را دارد تعریف کنیم. در آزمون فراصوتی تافد در موارد زیادی همانند جوش سر به سر صفحات فلزی تخت یا جوش محیطی در لوله‌ها و مخازن، اجباراً فاصله تراگذارها از صفحه میانگین[4] کم و یا این‌که صفر است که به معنی هم سطح بودن آن‌ها است.

در وضعیت تراگذارهای هم سطح با استفاده از روابط مکان‌یابی هیچ جوابی به‌دست نمی‌آید. زیرا مولفه‌های یکی از ستون‌های ماتریس A در معادله (9) و در نتیجه A_W^* در معادله (11) برابر هم شده و دترمینان ماتریس صفر می‌شود. در حالت دیگر وقتی که فاصله تراگذارها از صفحه میانگین کم

[3] Spherical-Intersection Method (SX)
[4] Deviation from average plane

باشد، حساسیت جواب به‌دست آمده نسبت به خطا افزایش می‌یابد. در این تحقیق برای فائق آمدن بر این مساله روشی مبتنی بر تکرار ارائه شده و به روابط محاسبه مکان اضافه می‌شود. در این روش نقاطی فرضی برای تراگذارها در نظر گرفته می‌شود و با الگوریتم تکرار؛ به‌صورت همزمان محاسبات مکان‌یابی انجام می‌شود. نقاط فرضی برای مراکز تراگذارها بگونه‌ای محاسبه می‌شوند که هم سطح نبوده و از صفحه میانگین فاصله قابل قبولی داشته باشند.

پرتو صوتی در درون قطعه پس از برخورد به هدف به داخل کفشک حاوی تراگذار گیرنده انتقال یافته و سپس به مرکز تراگذار می‌رسد (شکل 8).

در مسیر موج در هنگام انتقال از قطعه به مرکز تراگذار شکست رخ می‌دهد. براساس الگوریتم مکان‌یابی، مسیر حرکت موج در فاصله نقطه هدف تا تراگذار گیرنده باید مستقیم باشد. بنابراین اگر مرکز دریافت موج روی تراگذار در نظر گرفته شود با توجه به "شکل 8" این مسیر شکسته است و منجر به خطا خواهد شد. سه نقطهٔ مرکز تراگذار، شاخص تراگذار[1] و نقطه هدف باید در یک راستا باشند.

در عمل با توجه به عدم اطلاع ما از آنچه که در داخل کفشک اتفاق می‌افتد نقطه شاخص تراگذار بعنوان نقطه دریافت موج در تراگذار گیرنده، در نظر گرفته می‌شود. نقطه شاخص بر روی تراگذار نقطه‌ای است که قوی‌ترین موج پرتو صوتی از آن می‌گذرد.

براساس "شکل 9"، مقادیر "فاصله تاخیر[2]" به صورت تصادفی با حفظ قید فاصله قابل قبول از صفحه میانگین، پیشنهاد می‌شود و در الگوریتم مکان‌یابی همزمان با تعیین مختصات نقطه هدف، مختصات نهاییِ سه‌بعدی مکان فرضی تراگذارها به‌دست می‌آید. در طول محاسبه، فواصل تاخیر ثابت

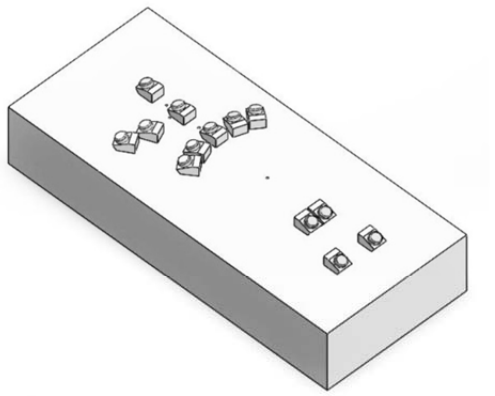

Fig. 7 Using several receivers for target positioning

شکل 7 استفاده از چند تراگذار گیرنده برای مکانیابی سه‌بعدی

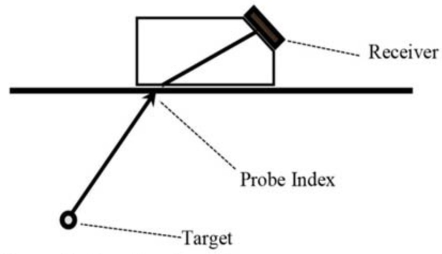

Fig. 8 Wave refraction from target to receiver

شکل 8 شکست موج در رسیدن از هدف به تراگذار گیرنده

[1] Probe Index
[2] Delay distance

می‌مانند و فقط مختصات نقاط دریافت موج (مرکز تراگذارها) تغییر می‌کنند. محاسبه آنقدر تکرار می‌شود تا اختلاف مکان هدف به‌دست آمده در یک مرحله و مقدار محاسبه شده در مرحله قبلی، از یک مقدار خطای از پیش تعیین شده کمتر شود. مختصات نقاط فرضی مرکز تراگذارها کاربردی ندارند و خروجی مفید این محاسبه فقط مکان هدف است.

مراحل محاسبات به ترتیب زیر است:

5-1- دریافت ورودی‌ها

الف- تاخیر زمانی موج رسیده به هر جفت از تراگذارهای گیرنده در نقاط شاخص (D_{ij0})

ب- موقعیت نقطه شاخص تراگذارهای گیرنده نسبت به مبدا مختصات ($\vec{X}_{i0}$)

ج- سرعت صوت در قطعه (C_L)

د- فاصله پیشنهادی تاخیر برای هر تراگذار گیرنده (DS_i)

با تعریف فاصله تاخیر مختصات مرکز تراگذارها تغییر می‌کند. برای هر تراگذار گیرنده، مقادیر فرضی اضافه شونده به هر یک از سه مختصات (a_{i0} , b_{i0} ,c_{i0}) به‌گونه‌ای تعریف می‌شوند که رابطه زیر را با فاصله تاخیر پیشنهادی داشته باشند.

$$DS_i = \sqrt{{a_{i0}}^2 + {b_{i0}}^2 + {c_{i0}}^2} \quad (22)$$

فواصل تاخیر DS_i مقدار ثابتی دارند که تا پایان محاسبه بدون تغییر می‌مانند اما مختصات تراگذارهای گیرنده (a_i , b_i, c_i) تغییر یافته و مقدار نهایی آن‌ها در انتهای محاسبات به همراه مختصات هدف به‌دست می‌آید. با توجه به این‌که فواصل تاخیر تراگذارها متفاوت هستند بنابراین آن‌ها به‌صورت همزمان در یک صفحه قرار نمی‌گیرند و بدین ترتیب حلقه محاسبه هیچ وقت به بن بست نمی‌رسد.

5-2- محاسبه تاخیر زمانی رسیدن امواج و مختصات تراگذارها با توجه به DS_i و (a_{i0}, b_{i0}, c_{i0})

$$\begin{aligned} D_{ij1} &= D_{ij0} + \left|DS_i - DS_j\right| \\ \vec{X}_{i1} &= \vec{X}_{i0} + (a_{i0}, b_{i0}, c_{i0}) \end{aligned} \quad (23)$$

DS_i و DS_j به ترتیب فاصله تاخیر تراگذار گیرنده iام و jام می‌باشند. در طول محاسبات DS_i ثابت است و در مقابل (a_i , b_i ,c_i) متغیر است و در نتیجه $\vec{X}_i$ تغییر می‌کند.

5-3- محاسبه موقعیت هدف $\vec{X}_{T1}$ با استفاده از روابط مکان‌یابی (معادله 10)

5-4- محاسبه بردار یکه هدف-شاخص[3]

$$\hat{u}_{T-i1} = \frac{\vec{X}_{i1} - \vec{X}_{T1}}{\left|\vec{X}_{i1} - \vec{X}_{T1}\right|} \quad (24)$$

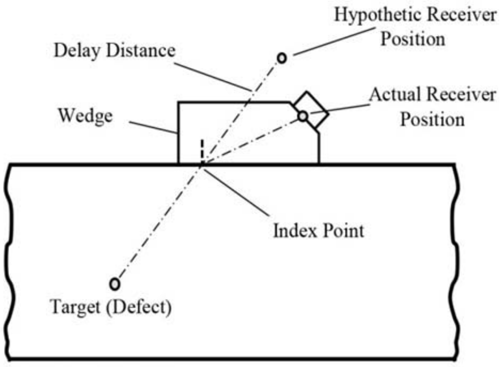

Fig. 9 Defining delay distance

شکل 9 تعریف فاصله تاخیر

[3] Target-Index

5-5- محاسبه موقعیت جدید تراگذارها با کمک بردارهای یکه به‌دست آمده در مرحله قبل

$$\vec{X}_{i2} = DS_i\ \hat{u}_{T-i2} \tag{25}$$

6-5- محاسبه موقعیت هدف $\vec{X}_{T2}$ با استفاده از الگوریتم مکان‌یابی و موقعیت جدید تراگذارها

7-5- مقایسه اختلاف دو موقعیت به‌دست آمده برای هدف. اگر این اختلاف از مقدار تعیین شده خطا کمتر باشد محاسبه متوقف می‌شود.

$$|\vec{X}_{T2} - \vec{X}_{T1}| < \text{خطا} \tag{26}$$

8-5- اگر اختلاف از مقدار تعیین شده بیشتر باشد با بازگشت به مرحله 4، بردار یکه و مختصات فرضی جدید تراگذارها براساس آخرین نقطه هدف به‌دست آمده و نقطه هدف جدید محاسبه می‌شود. مقدار محاسبه شده با مقدار مرحله قبلی مقایسه می‌شود.

9-5- این محاسبات آنقدر تکرار می‌شود تا اختلاف مکان نقطه هدف به‌دست آمده در دو مرحله پشت سرهم از میزان خطای تعریف شده کمتر شود. محاسبه در این وضعیت متوقف می‌شود.

نمایش ترسیمی الگوریتم، در "شکل 10" و روند نمای آن در "شکل11" نشان داده شده است. مطابق "شکل 10" اولین نقطه پیشنهادی برای مرکز تراگذار گیرنده $\vec{X}_{i1}$ است.

این نقطه روی دایره‌ای قرار دارد که شعاع آن فاصله تاخیر و مرکز آن شاخص تراگذار است.

"شکل 10" نشان‌دهنده برای یک تراگذار ترسیم شده است و برای سایر تراگذارها نیز به همین ترتیب $\vec{X}_{i1}$ تعیین خواهد شد. با مقدار پیشنهادی $\vec{X}_{i1}$ مکان هدف $\vec{X}_{T1}$ به‌دست می‌آید. از نقطه $\vec{X}_{T1}$ خطی رسم می‌شود تا از نقطه شاخص گذشته و دایره را قطع کند. نقطه تقاطع $(\vec{X}_{i2})$ مکان جدید مرکز تراگذار است. این عمل برای همه تراگذارها انجام می‌شود. با نقطه جدید مکان مرکز تراگذار، نقطه هدف جدید $\vec{X}_{T2}$به‌دست می‌آید. فاصله دو مکان به‌دست آمده برای هدف از مراحل قبل $|\vec{X}_{T2} - \vec{X}_{T1}|$، با میزان خطای در نظر گرفته شده مقایسه می‌شود. در صورت کمتر شدن از میزان خطا، همین نقطه جواب نهایی است. در غیر این‌صورت همانند مراحل قبل از نقطه $\vec{X}_{T2}$ خطی رسم می‌شود که با گذشتن از نقطه شاخص دایره را قطع کند و نقطه جدیدی برای مرکز تراگذار به‌دست آید. این روند تا برآورده شدن شرایط معادله (26) ادامه می‌یابد.

6- انجام آزمایش

الگوریتم پیشنهادی در تئوری بدون اشکال است اما درستی عملی آن باید به‌وسیله آزمایشات تجربی اثبات شود. به همین دلیل آزمایش زیر انجام شده است. قطعه موردنظر ما برای انجام آزمون یک مکعب از جنس فولاد به ابعاد 50×200×38 mm^3 است که یک سوراخ از سطح زیرین آن با انتهای تیز ایجاد شده است (شکل 12). انتهای تیز سوراخ یک عیب مصنوعی است که به عنوان یک نقطه هدف در نظر گرفته می‌شود.

بر روی سطح قطعه با دستگاه فرز سی ان سی[1] نقاط قرارگیری تراگذارهای گیرنده علامت گذاری شده است. قبل از انجام آزمایش، برای اطمینان از عدم وجود عیوب دیگر در قطعه، از روش‌های دیگر آزمون

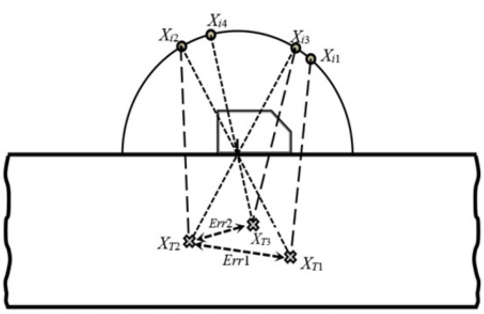

Fig. 10 Positioning algorithm for coplanar receivers

شکل 10 نمایش الگوریتم مکان‌یابی در وضعیت تراگذارهای هم سطح

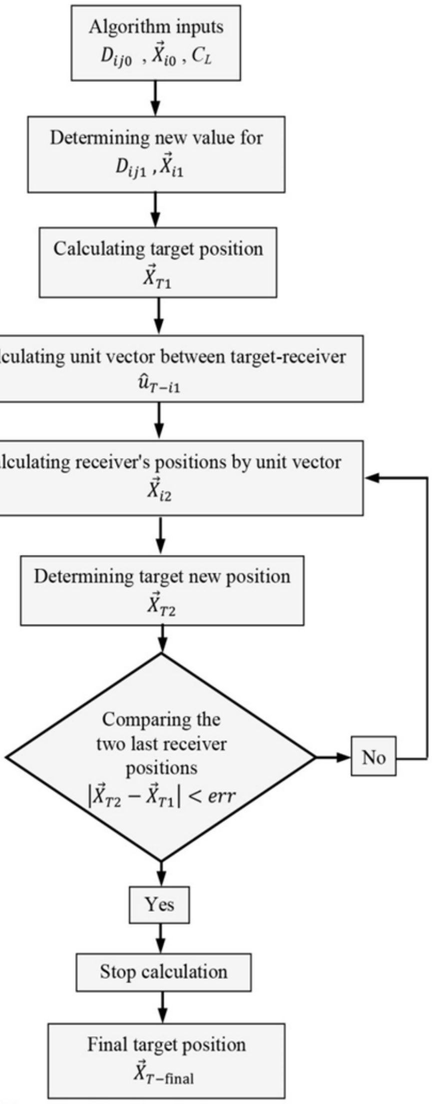

Fig. 11 Positiong algorithm flowchart

شکل 11 روندنمای الگوریتم مکان‌یابی

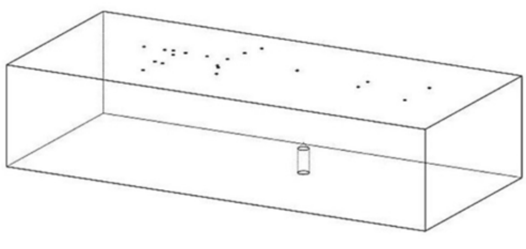

Fig. 12 Test piece

شکل 12 قطعه آزمون

[1] CNC

فراصوتی استفاده شد. مختصات نقطه هدف با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده عبارتست از:

$$(x_T, y_T, z_T) = (45.5, -0.93, -13) \qquad (27)$$

چون موج به‌صورت خودکار از محیط و از نقطه هدف منتشر نمی‌شود، باید نقطه هدف را برای تراگذارهای گیرنده اصطلاحاً روشن[1] کرد. به همین دلیل از یک تراگذار فرستنده برای اعمال انرژی و ایجاد موج در محیط استفاده می‌شود که مکان قرارگیری آن در محاسبات اهمیتی نخواهد داشت. تنها نکته‌ای که باید رعایت شود این است که تراگذار فرستنده منطقه مورد نظر برای آزمون[2] را از موج صوتی اشباع[3] کند.

در طرف مقابل تراگذار فرستنده، می‌توان چند تراگذار گیرنده به صورت همزمان قرار داد اما به‌علت صرفه جویی در استفاده از تجهیزات از یک جفت تراگذار فرستنده و گیرنده استفاده شده است (شکل 7). در این آزمایش با ثابت نگه‌داشتن تراگذار فرستنده در یک نقطه، تراگذار گیرنده را در مکآن‌های علامت گذاری شده، قرار داده و سیگنال بازگشتی از نقطه هدف را در نقاط مختلف ذخیره می‌کنیم. "شکل 7" نشان‌دهنده مکان تراگذار فرستنده و موقعیت‌های مختلف تراگذار گیرنده بر روی سطح قطعه است.

دو تراگذار همسان با فرکانس 15 مگاهرتز به همراه کفشک با زاویه 60 درجه به‌عنوان تراگذار فرستنده و گیرنده مورد استفاده قرار گرفت. تراگذارها دایره ای و به قطر 6 میلی‌متر هستند. درهمه آزمایشات دستگاه تولید کننده پالس به‌صورت متناوب پالس الکتریکی را به تراگذار فرستنده ارسال و سیگنال دریافت شده توسط تراگذار گیرنده به کارت آنالوگ به دیجیتال که روی کامپیوتر نصب شده است ارسال می‌شود. فرکانس داده برداری 100 مگاهرتز است. این وضوح در داده برداری دقت قابل قبولی را برای استفاده در محاسبات ایجاد می‌کند.

در هر موقعیت تراگذار گیرنده یک سیگنال فراصوتی به‌دست آمده (شکل 13) و ذخیره می‌شود. محور عمودی این سیگنال دامنه موج برحسب ولت و محور افقی زمان برحسب میکروثانیه است. با مقایسه سیگنال‌ها تاخیر زمان رسیدن موج به دو تراگذار به‌دست می‌آید. علاوه بر ذخیره کردن سیگنال، در هر نقطه از آزمون موقعیت تراگذارهای گیرنده نیز ثبت می‌شود.

آزمون‌ها در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول آزمون‌های مربوط به اندازه‌گیری سرعت صوت در محیط قطعه، تعیین نقطه شاخص و همچنین اندازه‌گیری زمان تاخیر داخل کفشک انجام گرفت.

در دومین مرحله از آزمون، که بخش اصلی آزمایشات را شامل می‌شود، تراگذارها با دقت در مکآن‌های علامت گذاری شده قرار گرفته و سیگنال

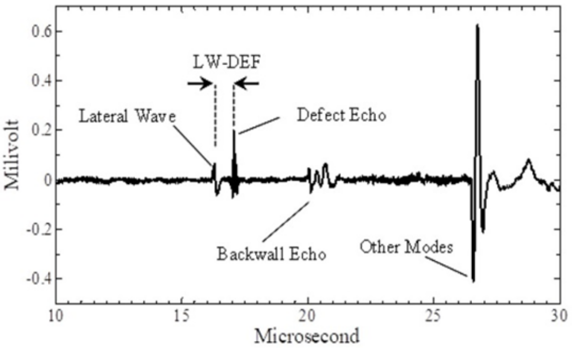

Fig. 13 Ultrasonic signal for a receiver

شکل 13 سیگنال فراصوتی برای یک تراگذار گیرنده

[1] Illuminate
[2] Region of interest (RoI)
[3] Insonified

فراصوتی برای هر یک به‌صورت جداگانه ذخیره شد. برای افزایش دقت، این آزمایش برای یک موقعیت تراگذار فرستنده چندین بار تکرار شد. تراگذار گیرنده در 14 موقعیت قرار گرفت و سیگنال فراصوتی مربوط به هر موقعیت با نام همان موقعیت ذخیره شد. سیگنال‌های مربوط به وضعیت‌های نامناسب که داده‌ها در آن کیفیت خوبی نداشتند حذف شدند.

7- تحلیل نتایج

با استفاده از سیگنال‌های فراصوتی به‌دست آمده در آزمایش، تاخیر زمان رسیدن موج به جفت‌های مختلف تراگذار گیرنده به‌دست آمد که در جدول 1 آورده شده است.

این اعداد با قرار گرفتن تراگذارهای گیرنده در 14 نقطه به‌دست آمده است. در بعضی از موقعیت‌ها که زاویه بین راستای تراگذار گیرنده و فرستنده و یا فاصله این دو از هم زیاد است، سیگنال به‌دست آمده واضح نبود و اکوی مشخصی در آن تشخیص داده نشد. برای این موقعیت‌ها جدول خالی از عدد است. نکته دیگر این‌که منبع ایجاد موج یک تراگذار فرستنده است که موقعیت آن مهم نیست.

دو الگوریتم SI و SX که در بخش قبل به تئوری آن‌ها پرداخته شد اعمال و نتایج به‌دست آمده از آن‌ها باهم مقایسه شدند. مکانِ هدفِ محاسبه شده توسط این دو روش در جدول 2 نمایش داده شده است. اختلاف مطلق میان مقدار واقعی مکان هدف و مقدار محاسبه شده، به‌صورت ریشه میانگین مربعات[4] در ستون آخر جدول 2 آمده است.

$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ مختصات محاسبه شده با دو روش SI و SX و (x_T, y_T, z_T) مختصات واقعی هدف است که در رابطه (25) ارائه شده است. با مقایسه دو روش می‌توان مشاهد کرد که روش SI تخمین بهتری نسبت به SX به‌دست

Table 1 TDOA for each pair of receivers (microsecond)

جدول 1 تاخیر زمانی جفت‌های مختلف تراگذار گیرنده (میکروثانیه)

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}
T_2	0.32												
T_3	0.19	0.13											
T_4	0.26	0.06	0.07										
T_5	0.26	0.06	0.07	0.00									
T_6	-	-	0.09	0.16	0.16								
T_7	1.04	1.36	1.23	1.30	1.30	1.14							
T_8	2.32	2.64	2.51	2.58	2.58	2.42	1.28						
T_9	2.73	3.05	2.92	2.99	2.99	2.83	1.69	0.41					
T_{10}	3.16	3.48	3.35	3.42	3.42	3.26	2.12	0.84	0.43				
T_{11}	3.50	3.82	3.69	3.76	3.76	3.60	2.46	1.18	0.77	0.34			
T_{12}	4.78	5.10	4.97	5.04	5.04	4.88	3.74	2.46	2.05	1.62	1.28		
T_{13}	-	-	3.49	3.56	3.56	3.40	2.26	0.98	0.57	0.14	0.20	1.48	
T_{14}	-	-	3.09	3.16	3.16	3.00	1.86	0.58	0.17	0.26	0.60	1.88	0.40

Table 2 Estimated target position for *SI* and *SX* methods [mm]

جدول 2 نتایج محاسبه موقعیت هدف با دو روش SI و SX

روش	موقعیت هدف (میلی‌متر)	ریشه میانگین مربعات (میلی‌متر) $\sqrt{(\hat{x}-x_T)^2+(\hat{y}-y_T)^2+(\hat{z}-z_T)^2}$
میان‌یابی کروی	$\hat{x}$ = 45.55 $\hat{y}$ = 0.48 $\hat{z}$ = -10.37	2.7
تقاطع کروی	$\hat{x}$ = 45.79 $\hat{y}$ = 0.56 $\hat{z}$ = -9.63	3.5

[4] Root mean square (RMS)

می‌دهد. در این محاسبه فاصله به‌دست آمده برای مرکز تراگذارهای گیرنده تا صفحه میانگین 0.22 میلی‌متر است. در واقع این دو روش در شرایط فاصله یکسان از صفحه میانگین، مقایسه شده‌اند. در ادامه بیان خواهد شد که چگونه فاصله تا صفحه میانگین در دقت محاسبه اثر خواهد داشت.

برای آزمودن تاثیر تعداد تراگذار گیرنده بر دقت مکان‌یابی، آزمون با تعداد کمی از تراگذارهای گیرنده (4 عدد) آغاز و به تدریج تا 14 تراگذار گیرنده افزایش یافت. خطای این اندازه‌گیری به‌صورت ریشه میانگین مربعات در "شکل 14" نمایش داده شده است.

همان‌طوری‌که در "شکل 14" نمایش داده شده است با افزایش تعداد تراگذارهای گیرنده، خطا کاهش می‌یابد. اما باید توجه داشت که افزایش تعداد تراگذار گیرنده با این محدودیت همراه است که در موقعیت‌هایی که زاویه بین راستای تراگذار گیرنده و تراگذار فرستنده و یا فاصله این دو از هم زیاد باشد، سیگنال مطلوبی به‌دست نمی‌آید و نمی‌توان داده مناسبی از آن استخراج کرد. خطا به‌عنوان درصدی از فاصله هدف تا مرکز مختصات (47.33 میلی‌متر) در نظر گرفته می‌شود. درصد خطای حداقل برای روش *SX*، 7.3 و برای روش *SI*، 5.6 است.

فاصله تراگذارهای گیرنده تا صفحه میانگین نقش اساسی در کیفیت نتایج مکان‌یابی دارد. اگر این فاصله صفر باشد به این معنی است که تمامی گیرنده‌ها در یک صفحه قرار دارند و هیچ جوابی به‌دست نمی‌آید و حل با بن بست روبه‌رو می‌شود. در حالت دیگر، اگر فاصله مذکور کم باشد حساسیت به خطا در اندازه‌گیری مکان هدف زیاد خواهد بود. همان‌طورکه قبلا بیان شد در الگوریتم پیشنهادی در وضعیتی که تراگذارهای گیرنده هم سطح هستند، یک پیش فرض برای موقعیت آن‌ها پیشنهاد شده و در انتهای محاسبات این موقعیت‌ها به همراه مکان هدف به‌دست آورده شده‌اند. با توجه به این‌که مکان تراگذارهای گیرنده در انتهای محاسبات به‌دست آمده است، می‌توان صفحه میانگین (صفحه‌ای که حداقل فاصله را از این تراگذارهای گیرنده دارد) را محاسبه کرد. در "شکل 15" فرایند محاسبه فاصله تراگذارهای گیرنده از صفحه میانگین آمده است. برای این محاسبه از دستور اپتیم سِت[1] نرم‌افزار متلب استفاده شده است. با اجرای این دستور، به همراه فاصله، معادله صفحه میانگین نیز به‌دست می‌آید. با توجه به "شکل15"، پس از 45 بار تکرار فاصله

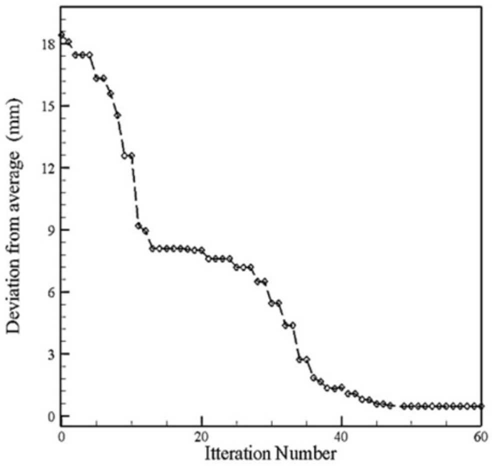

Fig. 15 Iteration for deviation from average plane

شکل 15 فرایند تکرار برای محاسبه فاصله تراگذارهای گیرنده از صفحه میانگین

موردنظر به‌دست می‌آید.

در اعمال الگوریتم مکان‌یابی، کنترل ما بر روی فواصل تاخیر هریک از تراگذارها می‌باشد. اما فاصله از صفحه میانگین پس از انجام محاسبه مشخص خواهد شد. در واقع ما بر روی این فاصله کنترلی نداریم. کم بودن فاصله از صفحه میانگین مطلوب نیست اما حداکثر این مقدار چقدر است؟ در ابتدا به نظر می‌رسد که هر چه این مقدار بزرگتر باشد دقت بیشتر است. برای بررسی درستی این نظریه برنامه با روش *SI* برای ترکیب‌های متعددی از فواصل تاخیر برای تراگذارها اجرا شد. نتیجه بررسی در "شکل 16" نشان داده شده است. این شکل نشان دهنده اثر فاصله تراگذار گیرنده از صفحه میانگین در دقت مکان‌یابی است. بهترین نتیجه در فاصله 2.3 میلی‌متر از صفحه میانگین و با 0.9 میلی‌متر خطا در مکان‌یابی به‌دست می‌آید. در ادامه افزایش فاصله از صفحه میانگین سبب می‌شود تا خطا به‌صورت تدریجی و با شیب بسیار کم افزایش یابد. به‌عبارت دیگر زمان تاخیر تراگذارها باید بگونه‌ای انتخاب شوند تا فاصله آن‌ها از صفحه میانگین 2.3 میلی‌متر باشد. کم و زیاد شدن این مقدار منجر به افزایش خطای مکان‌یابی خواهد شد. هرچند میزان خطا با افزایش فاصله از صفحه میانگین خیلی کم افزایش می‌یابد.

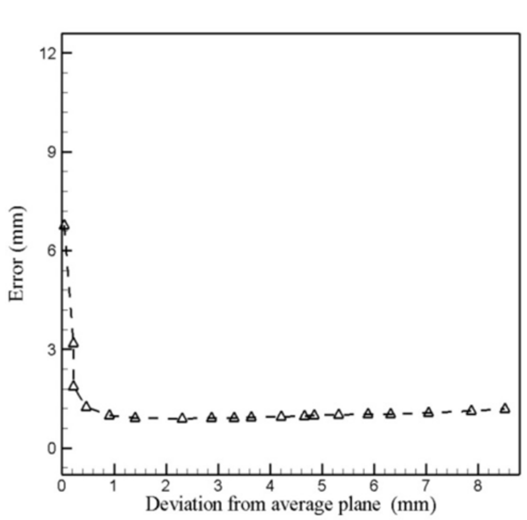

Fig. 16 Effect of receivers deviation from average plane on positioning error (mm)

شکل 16 اثر فاصله‌ی تراگذار گیرنده از صفحه میانگین در دقت مکان‌یابی (میلی‌متر)

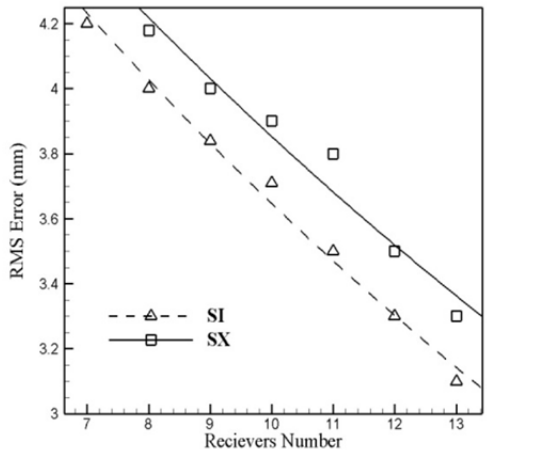

Fig. 14 Accuracy of measurements as a function of number of receiving transducers

شکل 14 دقت اندازه‌گیری برحسب تعداد تراگذارهای گیرنده

[1] Optimset

8- نتیجه‌گیری

روش آزمون غیرمخرب فراصوتی تافد دقت بالایی در مکان‌یابی و اندازه‌گذاری عیب دارد. روبش با این روش تنها در یک جهت است و نتیجه آن محاسبه مکان عیب در طول و عمق (دو بعد) و اندازه عیب در راستای عمق است. برای بعد سوم نیاز به روبش در جهت عمود بر جهت اول خواهد بود. در این مقاله روشی پیشنهاد شده است تا در یک روبش بتوان با کمک چندین تراگذار موقعیت و اندازه عیب را در سه‌بعد محاسبه کرد. این روش مبتنی بر تئوری‌های مکان‌یابی است. این تئوری‌ها قبلاً در مکان‌یابی هدف در سامانه‌های رادار، اکوستیک و سونار مورد استفاده قرار گرفته است.

روابط حل بسته (تحلیلی) مکان‌یابی اهداف برای هنگامی که تراگذارهای گیرنده در یک سطح قرار دارند ناکارآمد است. همچنین اگر فاصله تراگذارهای گیرنده از صفحه میانگین دارای مقدار کمی باشد خطای محاسبه مکان هدف زیاد خواهد بود. مواردی در روش تافد وجود دارد که تراگذارهای گیرنده در یک صفحه و یا نزدیک به یک صفحه قرار دارند. در این مقاله الگوریتمی پیشنهاد شد تا بتوان حل مساله را از این بن‌بست خارج کرد. براساس این الگوریتم مختصات جدید فرضی برای تراگذارهای گیرنده پیشنهاد می‌شود که فاصله قابل قبولی از صفحه میانگین دارند. خروجی الگوریتم پس از فرایند تکرار، مکان هدف به‌علاوه آخرین اندازه موقعیت تراگذارهای گیرنده خواهد بود. الگوریتم مذکور در یک آزمون تجربی برای تعیین مکان یک عیب مصنوعی با مختصات معلوم به‌کار گرفته شد. محاسبه با دو روش حل بسته SI و SX انجام و با هم مقایسه شدند. درمجموع روش SI دقت بهتری داشت و در یک مقایسه در شرایط برابر مقدار خطا در تعیین موقعیت با این روش 2.7 میلی‌متر در مقابل 3.5 میلی‌متر برای روش SX به‌دست آمد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که به ازای افزایش تعداد تراگذار گیرنده، دقت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. حساسیت خطا به فاصله تراگذارهای گیرنده از صفحه میانگین بررسی و نشان داده شد که تا یک مقدار معینی این خطا با کاهش فاصله کم و از آن به بعد به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد.

9- مراجع

[1] M. G. 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.

[2] A. Al-Ataby, W. Al-Nuaimy, O. Zahran, Towards automatic flaw sizing using ultrasonic time-of-flight diffraction, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring,* Vol. 52, No. 7, pp. 366-371, 2010.

[3] 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.

[4] E. Dehghan, F. Honarvar, *Design and Construction of an Ultrasonic Scanner to Inspect of but Weld of Steel Plates*, Accessed on 2008; https://www.civilica.com/Paper-ICTINDT02-ICTINDT02_041.html. (in Persian فارسی)

[5] S. M. Tabatabaeipour, F. Honarvar. *Austenite Welding Inspection with TOFD*, Accessed on 2008; https://www.civilica.com/Paper-ICTINDT02-ICTINDT02_035.html. (in Persian فارسی)

[6] A. Kermani, M. Ahmadi, N. Rastkhah, A. Movafeghi. *Sizing of the Surface Opening Cracks by Diffraction of Ultrasonic Waves at Crack's End Using Contact and Immersion Techniques*, Accessed on 2007; https://www.civilica.com/Paper-ICTINDT01-ICTINDT01_088.html. (in Persian فارسی)

[7] S. Sadeghzadeh, A. A. Bitarfran. *Non-Destructive Inspection of Compressed Natural Gas Pressure Vessels (CNG) of All-Steel Type (First-Generation Type) Using the Ultrasonic Test Using the TOFD Method*, Accessed on 2008; https://www.civilica.com/Paper-CNGCONF01-CNGCONF01_054.html. (in Persian فارسی)

[8] M. G. Silk, Estimates of the probability of detection of flaws in TOFD data with varying levels of noise, *Insight,* Vol. 38, No. 1, pp. 31-36, 1996.

[9] S. Nath, K. Balasubramaniam, C. Krishnamurthy, B. Narayana, Sizing of surface-breaking cracks in complex geometry components by ultrasonic Time-of-Flight Diffraction (TOFD), *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring,* Vol. 49, No. 4, pp. 200-206, 2007.

[10] A. Sinclair, J. Fortin, B. Shakibi, F. Honarvar, M. Jastrzebski, M. Moles, Enhancement of ultrasonic images for sizing of defects by time-of-flight diffraction, *NDT & E International,* Vol. 43, No. 3, pp. 258-264, 2010.

[11] F. Adib, Z. Kabelac, D. Katabi, R.C Miller, 3D tracking via body radio reflections, *11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 14),* pp. 317-329, 2014.

[12] F. Stevens, D. T. Murphy, Acoustic source localization in an urban environment using early reflection information, *Proceedings of the Euronoise Conference,* Maastricht, the Netherlands, 2015.

[13] H. Akbarally, L. Kleeman, A sonar sensor for accurate 3D target localisation and classification, *Proceedings of The Robotics and Automation, IEEE International Conference,* Nagoya: IEEE, Vol. 3, 1995.

[14] M. Malanowski, An algorithm for 3D target localization from passive radar measurements, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, International Society for Optics and Photonics, pp. 75021B-75021B6, 2009.

[15] M. Malanowski, K. Kulpa, Two methods for target localization in multistatic passive radar, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,* Vol. 48, No. 1, pp. 572-580, 2012.

[16] G. Mellen, M. Pachter, J. Raquet, Closed-form solution for determining emitter location using time difference of arrival measurements, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 39, No. 3, pp. 1056-1058, 2003.

[17] R. Schmidt, A new approach to geometry of range difference location, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.8, No. 6, pp. 821-835, 1972.

[18] B. Friedlander, A passive localization algorithm and its accuracy analysis, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 234-245, 1987.

[19] J. P., Charlesworth, J. A. G. Temple, *Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction*, Second Edittion, pp. 21-24, Research Studies Press Ltd, 2001.

[20] J. Smith, J. Abel, Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements, *Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing,* Vol. 35, No. 12, pp. 1661-1669, 1987.