مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دوره 15، شماره 12، ص‌ص 387-393

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



# تشخیص موقعیت دوبعدی منبع صدا در صفحه شیشه‌ای با نرخ داده برداری پایین

سید امیر حسینی سبزواری[1]، مجید معاونیان[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
* مشهد، صندوق پستی 48974-91779، moaven@um.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 مرداد 1394
پذیرش: 15 آبان 1394
ارائه در سایت: 14 آذر 1394

*کلید واژگان:*
تشخیص موقعیت صدا
حس‌گر ارزان قیمت
استخراج ویژگی

**چکیده**

در این پژوهش موقعیت مکانی صدای ایجاد شده به روی یک صفحه شیشه‌ای با استفاده از حسگرهای صوتی تشخیص داده شده است. برای این منظور در بخش آزمایشی این تحقیق از صدای اصابت توپ پینگ‌پنگ به صفحه شیشه‌ای، استفاده شده است. پیش از این اکثر پژوهش‌های منتشر شده متکی به تعداد بالای حسگرها با نرخ داده برداری بالا بوده‌اند. در پژوهش حاضر روش نوینی برای تعیین موقعیت منبع صدا ارائه شده است. در این روش با کاهش تعداد حسگرها به دو عدد از یک الگوی مشخص در استفاده از نقاط کمکی استفاده شده است. در الگوی پیشنهادی موقعیت قرارگیری نقاط با توجه به مشخصات فرکانسی سیگنال دریافتی از دو حسگر، بر روی خطوطی مشخص محدود می‌گردد. برای سنجش درستی و کارایی روش، سیگنال دریافتی ناشی از برخورد توپ به روی یک صفحه شیشه‌ای ذخیره شد. به‌منظور تشخیص موقعیت ضربات، یک بردار ویژگی مبتنی بر آنتروپی سیگنال تقریب و جزئیات تبدیل موجک فضای فرکانسی ضربات و مشخصات هندسی توسعه یافت. در نهایت با پردازش سیگنال‌ها موقعیت منبع صدا تعیین گردید و میانگین مقادیر خطا در تشخیص موقعیت منبع صدا و انحراف معیار به ترتیب 17 سانتی‌متر و 34.1 حاصل شده‌اند.

# Sound localization in glass plate using low sampling rate

**Seyed Amir Hoseini Sabzevari, Majid Moavenian***

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.O.B. 4897491779 Mashhad, moaven@um.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 19 August 2015
Accepted 06 November 2015
Available Online 05 December 2015

*Keywords:*
Sound Localization
Low cost sensor
Feature extraction

**ABSTRACT**

In this study the sound localization is implemented to find the impact position on the surface of a glass plate using acoustical sensors. As an experimental example, the sound caused by ping pong ball impact on the glass plate is used. Most of the published paper algorithms are based on using large number of sensor with high sampling rates. In this study a new method is extended due to sound localization. In the proposed method, by reducing the number of sensors into two, a pattern for secondary points is extended. In the specified pattern, locations of points are restricted according to the sensors signal frequency specification. To achieve this goal, a database is gathered from sound caused by ball impact on the glass plate. Furthermore, in order to specify sound localization, space feature based on entropy of wavelet transform coefficient signals from frequency domain of impacts and geometrical specification was extracted. Finally, by implementing signal processing into the data the location of impacts is specified. The results show average values of error and Standard deviation 17 cm and 1.34 cm, respectively.

## 1- مقدمه

همگام با رشد روزافزون نیازهای صنعتی، روش‌های جدیدی به‌منظور تشخیص موقعیت منبع صدا ارائه شده است. پیچیدگی‌های موجود در این حوزه اعم از مشکلات سخت‌افزاری و بهبود دقت الگوریتم‌های موجود، پژوهشگران و محققان را به کاهش تعداد حس‌گرهای مورد نیاز و استفاده از روش‌های نوین تحلیل داده‌ها سوق داده است.

تشخیص موقعیت منبع صدا به‌عنوان یکی از روش‌های بررسی سنجش سلامت سازه‌ها به‌ویژه در صفحات از اهمیت بالایی برخوردار است. آزمون‌های صوتی به علت دقت بالا و هزینه پایین در مقایسه با دیگر آزمون‌های غیر مخرب مانند ذرات نافذ، جریان گردابی و غیره مورد استقبال بیشتر محققان قرار گرفته‌اند [1]. به‌منظور بررسی و تعیین عوامل خرابی به‌وسیله آزمون‌های صوتی از مبدل‌های مافوق صوت[1] در دو شکل فعال[2] و غیرفعال[3] استفاده می‌گردد [2]. در شکل فعال عملگرهای صوتی امواج فراصوت تولید و منتشر می‌کنند درصورتی‌که در شکل غیرفعال آن، از برخورد یک جسم خارجی و یا شروع ترک به‌عنوان منبع تولید کننده امواج استفاده می‌شود [3]. شکل غیرفعال به علت هزینه پایین‌تر نسبت به شکل فعال، امکان پایش دائمی را ایجاد می‌نماید که خود باعث اهمیت دوچندان پژوهش در این حوزه می‌شود. امواج در شکل غیرفعال می‌تواند به علت: ضربه ناشی از برخورد، تشکیل ترک

1- Ultrasonic transducers
2- Active
3- Passive

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
S. A. H. Sabzevari, M. Moavenian, Sound localization in glass plate using low sampling rate, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 12, pp. 387-393, 2015 (in Persian)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.31.9 ]

و یا عیب‌های سازه‌ای در اجزای یک سیستم، ایجاد شوند [4]. به فرآیند ضبط و تحلیل امواج منتشر شده به شکل سیگنال‌های صوتی، به‌وسیله حس‌گرهای مختلف، تشخیص موقعیت منبع صوتی[1] می‌گویند. تاکنون پژوهش‌های متفاوتی در حوزه شناسایی موقعیت منبع صوتی در صفحات صورت پذیرفته است. به‌طور مثال توبایس با استفاده از چیدمان مثلثی شکل حس‌گرها و بهره‌گیری از روابط هندسی حاکم توانست موقعیت منبع صدا را مشخص نماید [5]. کوندو و همکارانش با ارائه توابع بهینه‌سازی مختلف موفق به تشخیص موقعیت ضربه خارجی بدون دانستن ویژگی‌های مکانیکی محیط مورد آزمایش شدند [6, 7]. مک لاسکی و همکارانش با ارائه روش شکل دهی پرتو به‌وسیله یک چیدمان تیری شکل از حسگرها موفق به تشخیص موقعیت منبع صدا گردیدند [8]. بتز و همکاران سه حس‌گر را به فرم چیدمان روزت بر روی صفحات اصلی تنش صفحات نصب نمودند و نشان دادند روش پیشنهادی آنان از مقاومت بالاتری نسبت به نویزهای محیطی در مقایسه با دیگر روش‌ها، برخوردار است [9]. مصطفی‌پور و همکاران [10] با تجزیه و تحلیل اختلاف زمانی میان دو مود ایجاد شده به علت نشت سیال از یک لوله موقعیت نشتی ایجاد شده در لوله‌های انتقال سیال را تشخیص دادند. با توجه به اهمیت تشخیص موقعیت منبع صدا متناسب و با رشد نیازهای صنعتی ابزار و لوازم مختلفی مبتنی بر روش‌های غیرفعال تولید و روانه بازار شده‌اند، که از آن جمله می‌توان به دستگاه تشخیص موقعیت نشتی در لوله‌ها که در پژوهش مصطفی پور استفاده شده است، اشاره نمود.

به‌طورکلی تمامی روش‌های ارائه شده به اختلاف زمانی سیگنال‌های دریافتی در حسگرها وابسته می‌باشند. تعداد این حس‌گرها ارتباط مستقیمی با دقت روش ارائه شده و همچنین اطلاع یا عدم اطلاع از ویژگی‌های مکانیکی صفحه مورد بررسی دارد [4]. حداقل تعداد حس‌گرهای مورد نیاز می‌تواند تا هشت عدد حس‌گر افزایش یابد [3].

در این مقاله با استفاده از دو حس‌گر صوتی ارزان قیمت که بر روی سطح یک صفحه شیشه‌ای به ضخامت 10 میلی‌متر (دهنه‌ی ورودی دیافراگم حسگر چسبیده به سطح میز می‌باشد) نصب شده است، داده‌های مربوط به ضربات خارجی وارد بر صفحه ذخیره می‌شود. در گام نخست با استفاده یک از الگوی هندسی مشخص مبتنی بر ویژگی‌های مکانیکی امواج منتشر شده، نقاط کمکی انتخاب می‌شود. در گام بعدی با بررسی و پردازش همزمان داده-های مربوط به هر برخورد و اطلاعات مربوط به نقاط کمکی موقعیت مکانی محل ضربه تعیین می‌گردد.

## 2- روش پیشنهادی

### 2-1- محیط آزمایش

مطابق شکل 1 یک صفحه شیشه‌ای به ضخامت 10 میلی‌متر در ابعاد 1.25 در 1.85 متر در نظر گرفته شده است.همانگونه که در شکل 2 دیده می‌شود، دو میکروفون خازنی آنالوگ (بیشینه‌ی فرکانس 30 کیلوهرتز) که به‌وسیله یک جریان 5 آمپری تقویت شده‌اند، به فاصله 45 سانتی‌متر از یکدیگر بر روی سطح صفحه نصب می‌شوند به طوری که دهنه‌ی ورودی دیافراگم حسگر چسبیده به سطح میز می‌باشد.( شکل 3). داده‌های دریافتی توسط این حسگرها به‌وسیله‌ی یک دستگاه اسیلوسکوپ دو کانال DS 1052E با بیشینه‌ی نرخ نمونه برداری 1 گیگا داده در ثانیه ذخیره می‌شود. همچنین مجموعه‌ی تجهیزات و لوازم مورد استفاده در جدول 1 معرفی شده‌اند. در شکل 4 شماتیک موقعیت قرارگیری حسگرها نسبت به ابعاد صفحه نشان داده شده است. ضربات به‌وسیله یک توپ پینگ‌پنگ که از فاصله‌ی 10 سانتی‌متری بالای صفحه رها می‌شود، اعمال می‌گردد. بنا بر قانون تابش و بازتابش در امواج، موج منتشر شده به علت برخورد با مرزها با همان زاویه تابش نسبت به خط عمود به مرز در آن نقطه بازتاب می‌کند. لذا به‌منظور کاهش اثر امواج بازتاب شده از مرزها، ابعاد صفحه نسبت به محدوده‌ی آزمایش می‌بایست به قدر کافی بزرگ‌تر باشد [11].

### 2-2- ماهیت امواج منتشرشده

همانطور که پیش‌تر توسط نویسندگان بیان شده است [4]، اصابت توپ رها شده به صفحه باعث ایجاد و انتشار امواج الاستیک در سازه می‌شود. امواج الاستیک حاصل از هر برخورد توسط دو میکروفون دریافت و ذخیره می‌شوند. همچنین مشابه پژوهش‌های گذشته [4, 7] از تأثیر امواج صوتی منتقل شده توسط سیال پیرامون به حسگر در مقایسه با امواج سازه‌ای صرفنظر شده است. به‌منظور بررسی تأثیر امواج صوتی منتقل شده توسط سیال در مقایسه با امواج سازه‌ای، دو حسگر بافاصله یکسان اما در دو صفحه مجزا از محل ضربه قرار گرفتند (شکل 5). امواج دریافتی توسط حسگر اول تنها شامل امواج صوتی می‌باشد(به علت فاصله موجود میان صفحات) در حالی که امواج

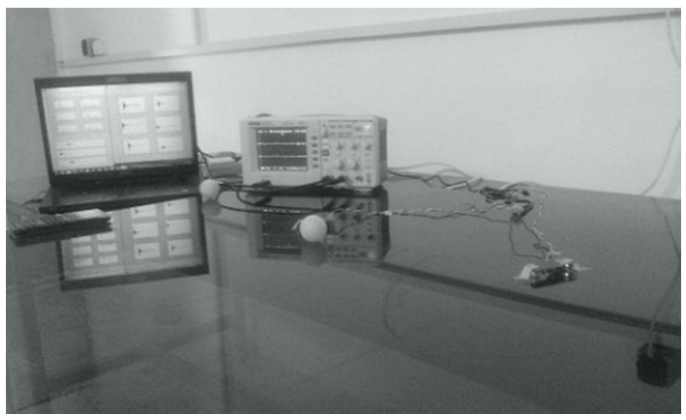


**Fig. 1** Experimental set-up on a glass plate

**شکل 1** تجهیزات آزمایش بر روی صفحه‌ی شیشه‌ای

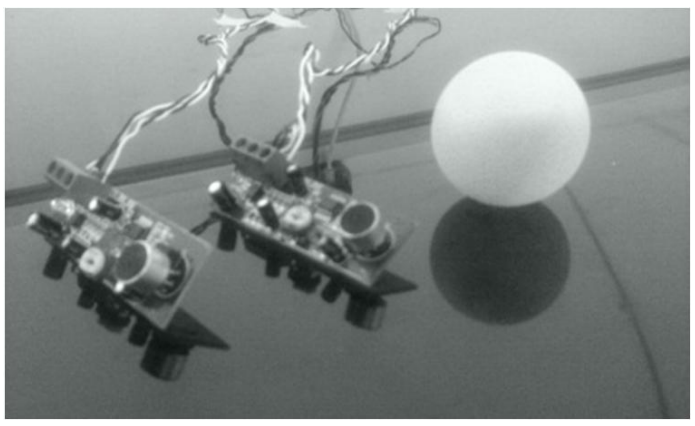


**Fig.2** Two sensors and their amplifier circuit

**شکل 2** دو حسگر مورد استفاده به همراه مدار تقویت کننده

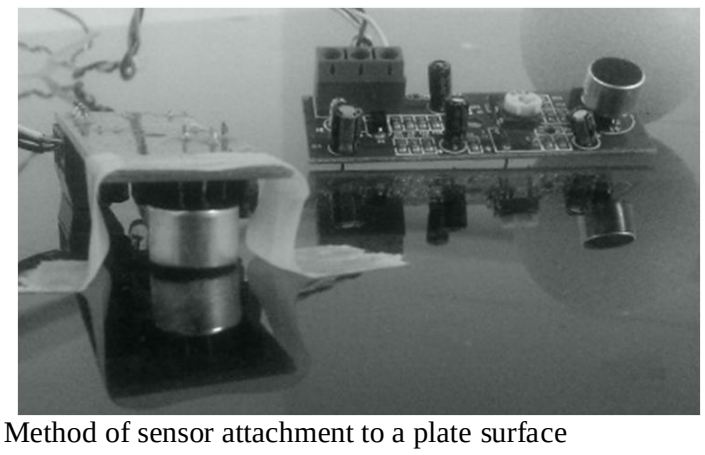


**Fig. 3** Method of sensor attachment to a plate surface

**شکل 3** نحوه اتصال حسگر به سطح صفحه

1- Acoustic Source Localization



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.31.9 ]

دریافتی در حسگر دوم شامل امواج صوتی و امواج سازه‌ای می‌باشد. میانگین سیگنال زمانی ذخیره شده توسط دو حسگر در شش بار تکرار در شکل 6 نمایش داده شده است. مطابق شکل 6 شدت سیگنال دریافتی در حسگر دوم در حدود ده برابر حسگر دیگر است. با توجه به بررسی‌های تجربی صورت گرفته امواج منتقل شده از سیال و کیفیت رعایت شرایط آزمایش از جمله طریقه‌ی نصب حسگر و پایه‌های قرارگیری صفحات، در حدود 5 الی 15 درصد از کل شدت امواج منتقل شده می‌باشد.

با اعمال هر ضربه بر روی صفحه دو موج فشاری و برشی در آن ایجاد می‌شود [12]. حرکت آزادانه این دو موج، برهم‌کنش میان آن‌ها و بازتاب‌های آن‌ها از سطوح بالایی و پایینی صفحه باعث ایجاد امواجی می‌شود که امواج لمب[1] نامیده می‌شوند [11]. به طور کلی این امواج در محیط بین دو مرز موازی که فاصله‌ی آن‌ها از یکدیگر کمتر از طول موج مود منتشره باشد، ایجاد می‌شود [1]. امواج لمب خود از دو مود متقارن و نامتقارن با خواصی مشخص تشکیل می‌شود. امواج منتشر شده به‌وسیله دو میکروفون به صورت سیگنال‌های زمانی ذخیره می‌شود. شکل 7 سیگنال زمانی ذخیره شده توسط دو میکروفون را نشان می‌دهد.

### 3-2- چیدمان حس‌گرها

در روش ارائه شده توسط توبایس [5]، به عنوان رایج‌ترین و شناخته شده‌ترین روش، حداقل از سه حس‌گر استفاده شده است. در این روش با از

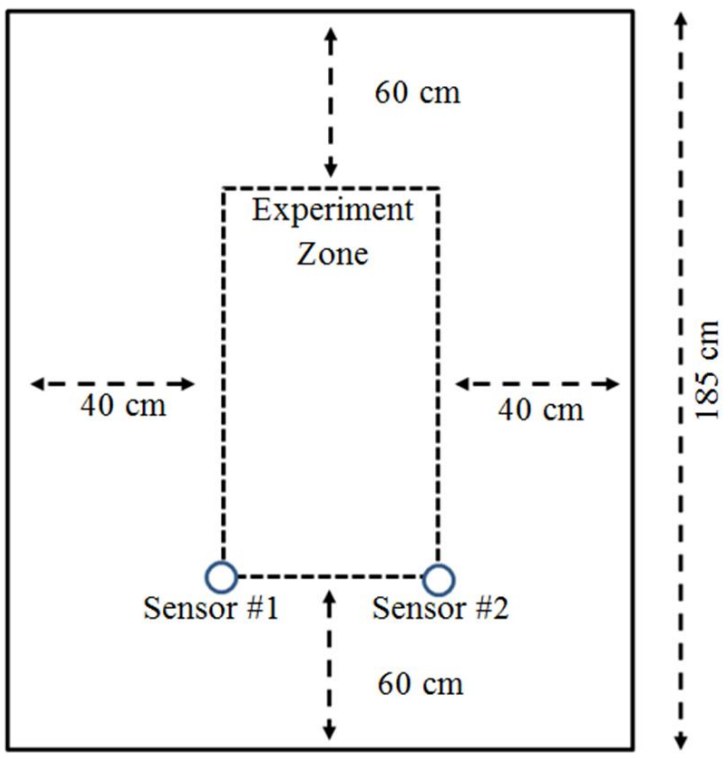



**Fig. 4** Geometrical properties of the experimental zone

**شکل 4** ویژگی‌های هندسی محدوده‌ی آزمایش

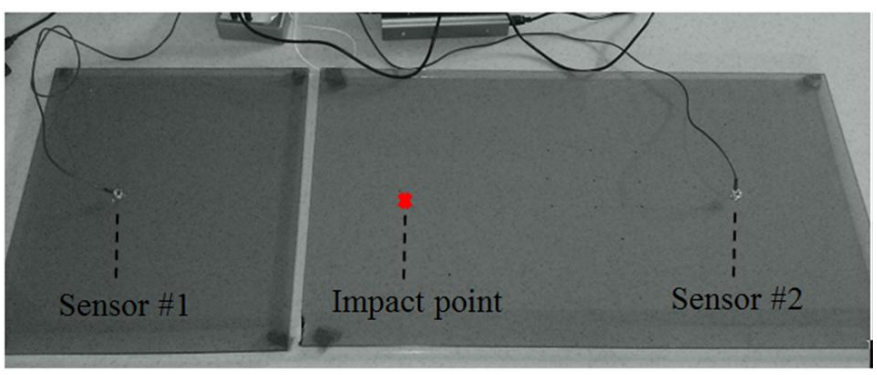



**Fig. 5** Sensor locations with respect to impact point

**شکل 5** موقعیت قرارگیری حسگرها نسبت به محل اصابت ضربه

1- Lamb Waves

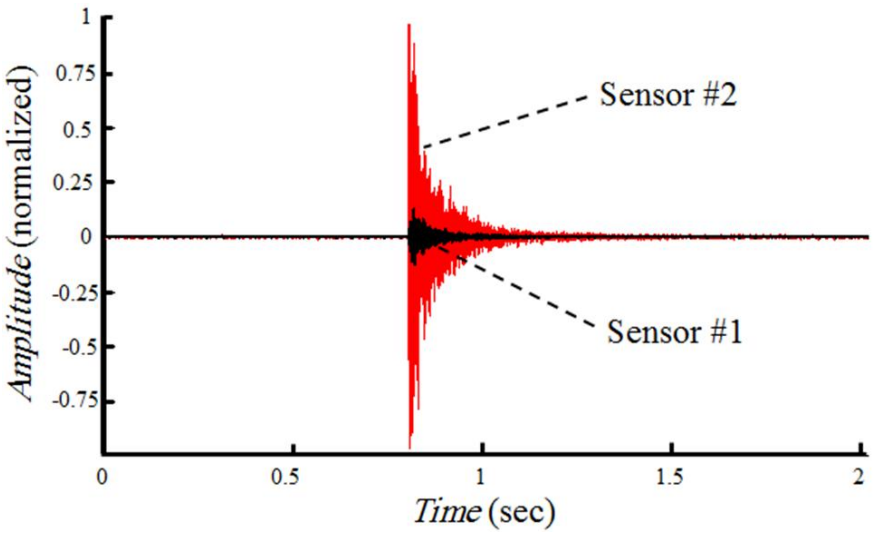



**Fig. 6** Average recorded signals generated by six impacts at 40 centimeters distances from sensors

**شکل 6** میانگین سیگنال‌های ذخیره شده، ایجاد شده به‌وسیله‌ی شش ضربه در فاصله‌ی 40 سانتی‌متری از حسگرها

**جدول 1** شرایط و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش

**Table 1** Set up conditions and equipment used in experiment

| تجهیزات مورد استفاده | توضیحات |
|---|---|
| صفحه‌ی آزمایش | شیشه‌ای در ابعاد 125 در 185 سانتی‌متر به ضخامت 10 میلی‌متر |
| حسگر | دو میکروفن خازنی با بیشینه فرکانسی 30 کیلوهرتز دارای مدار تقویت کننده‌ی 5 آمپری |
| نحوه‌ی اتصال | دهنه‌ی ورودی دیافراگم در دو حسگر چسبیده به سطح میز می‌باشد |
| داده‌برداری | اسیلوسکوپ دو کانال DS 1052E با نرخ نمونه برداری بیشینه‌ی 1 گیگا داده در ثانیه |

پیش دانستن سرعت انتشار امواج در صفحه، اندازه‌گیری اختلاف زمانی رسیدن سیگنال به حس‌گرها و با استفاده از قوانین ساده هندسی موقعیت منبع صدا تخمین زده می‌شود. در این روش سه حس‌گر $S_1$، $S_2$ و $S_3$ مطابق شکل 8، بر روی صفحه نصب می‌شوند و صدای منتشر شده توسط منبع صوتی واقع شده در نقطه $P$ را در فواصل زمانی متفاوت نسبت به یکدیگر دریافت می‌کنند.

اختلاف زمانی بین انتشار موج از منبع تا حس‌گرها را به ترتیب $t_1$، $t_2$ و $t_3$ می‌نامیم. ازآنجایی که زمان انتشار صدا در منبع $T_0$، را نداریم لذا نمی‌توانیم اختلاف زمان‌های $t_1$ ، $t_2$ و $t_3$ را به‌وسیله‌ی زمان رسیدن سیگنال‌ها به حس‌گرها ($T_1$، $T_2$ و $T_3$) محاسبه کنیم. مطابق رابطه (1):

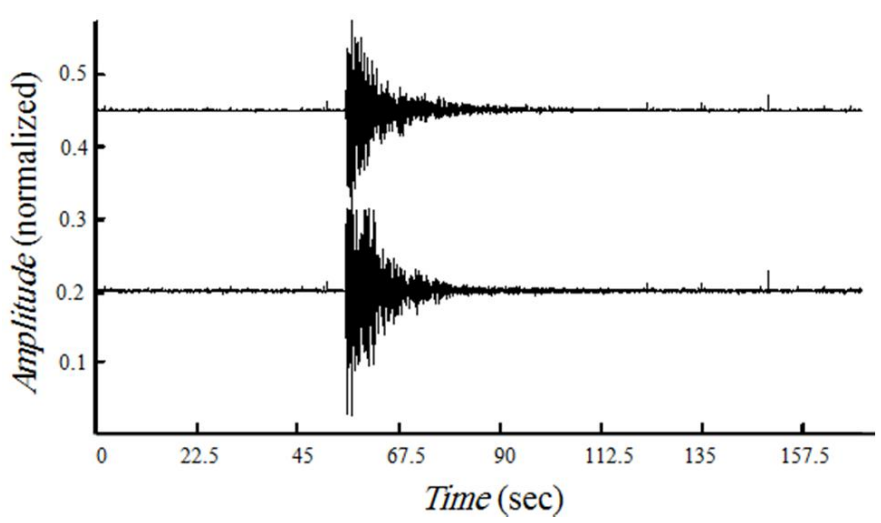



**Fig. 7** Recorded signals generated by ball impact at 20 and 40 centimeters distances from sensors

**شکل 7** سیگنال‌های ذخیره شده، ایجاد شده به‌وسیله ضربه توپ، در فاصله‌های 20 و 40 سانتیمتری از میکروفون‌ها

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.31.9 ]

$$t_{ij} = t_i - t_j = (T_i - T_0) - (T_j - T_0) = T_{ij} \quad (1)$$

به روشنی مشخص است که $T_i$ و $T_j$ با $t_i$ و $t_j$ برابر نیستند اما اختلاف آن‌ها با یکدیگر برابر می‌باشد. اگر سرعت انتشار امواج در صفحه $C$ باشد، فاصله مکانی بین منبع صوت و هر کدام از سه حس‌گر از رابطه (2) قابل محاسبه می‌باشد.

$$d_i = C \times t_i \quad (2)$$

که در رابطه (2)، $C$ سرعت انتشار موج در محیط مورد بررسی می‌باشد. از آنجایی که مقدار $t_i$ نامشخص است، لذا نمی‌توان از رابطه (2) مقدار فاصله منبع صوتی از حس‌گرها را به دست آورد. با معلوم بودن $t_{ij}$ می‌توان اختلاف مقدار فاصله منبع صوتی از حس‌گرها را مطابق رابطه (3) به دست آورد.

$$d_{ij} = d_i - d_j = C \times t_{ij} \quad (3)$$

برای مثال اگر فرض کنیم که مقدار $T_1$ از $T_2$ و $T_3$ کوچک‌تر باشد، به بیان دیگر موقعیت منبع صوتی به این حس‌گر نزدیک‌تر بوده است، آنگاه مقدار $d_{31}$ نشان دهنده‌ی اختلاف فاصله حس‌گر سوم از حس‌گر اول می‌باشد. حال با مشخص بودن این اختلاف می‌توان با استفاده از قواعد ساده هندسی مطابق شکل 9، نقطه $P$ که مشخص کننده‌ی محل قرار گرفتن منبع صوتی می‌باشد را به دست آورد.

این روش توسط لیانگ و همکاران [13] برای استفاده در صفحاتی که خواص مکانیکی آن از پیش مشخص نمی‌باشد، گسترش یافت. لیانگ با افزودن یک دستگاه معادلات غیرخطی، رابطه (4)، نبود اطلاعات مربوط به سرعت انتشار موج در صفحه را جبران کرد.

$$\begin{aligned} &C \times t_{12} = d_1 - d_2 \\ &C \times t_{23} = d_2 - d_3 \\ &d_1 \times \sin\theta_1 = d_2 \times \sin\theta_2 \\ &d_1 \times \cos\theta_1 + d_2 \times \cos\theta_2 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ &\qquad = D_{12} \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن، $d_1$، $d_2$ و $d_3$ مشابه حالت قبلی به ترتیب بیانگر فاصله منبع صوتی $P$، از حس‌گرهای $S_1$، $S_2$ و $S_3$ می‌باشند. زوایای $\theta_1$، $\theta_2$ و $\theta_3$ در شکل 9 نشان داده شده‌اند. $D_{12}$ نشان دهنده‌ی فاصله مکانی بین حس‌گرهای $S_1$ و $S_2$ می‌باشد و $t_{12}$ و $t_{23}$ مطابق رابطه (1) محاسبه می‌شود. با مشخص بودن موقعیت قرارگیری تمامی حس‌گرها پارامترهای نامشخص $\theta_1$، $\theta_2$، $d_1$، $d_2$، $d_3$ و $C$ را می‌توان در قالب تنها سه پارامتر مجهول $C$ و موقعیت مکانی محل ضربه $(x_p, y_p)$، بیان نمود.

در روش پیشنهادی این پژوهش با کاهش تعداد حس‌گرها به دو عدد و اطلاع از خواص مکانیکی صفحه، با کمک گرفتن از نقاط کمکی روابط (1-4) به فرم رابطه (5) حاصل می‌شود.

$$C \times t_{12} = \sqrt{(y_p - y_1)^2 + (x_p - x_1)^2} - \sqrt{(y_p - y_2)^2 + (x_p - x_2)^2} \quad (5)$$

که در آن، $(x_p, y_p)$ مختصات موقعیت مکانی محل ضربه می‌باشد. با دانستن اطلاعات مربوط به یک نقطه کمکی سرعت انتشار موج به دست خواهد آمد. لذا در رابطه (5) مجهولات به $(x_p, y_p)$ محدود می‌شود. در روش پیشنهادی با ارائه یک الگوی مشخص هندسی نقاط کمکی انتخاب می‌شوند، نحوه چیدمان این نقاط به‌گونه‌ای سازمان دهی می‌شوند که بازشناسی یک الگوی مشخص میان $x_p$ و $y_p$ را میسر نمایند. با استفاده از الگوی معرفی شده و رابطه (5)، مجهولات که همان $(x_p, y_p)$ می‌باشند، حاصل می‌شوند.

### 2-4- الگوی نقاط کمکی

با کاهش تعداد سنسورها به منظور یافتن موقعیت مکانی منبع صدا، نیازمند یافتن ارتباطی میان مجهولات می‌باشیم. مطابق شکل 10 مجموعه ضرباتی که بر روی خط کمکی قرار می‌گیرند دارای یک فاصله از دو حسگر بوده و از آنجایی که صفحه همسانگرد در نظر گرفته شده است، سیگنال ذخیره شده توسط دو حسگر می‌بایست از تطابق بالایی برخوردار باشد.

اگر نسبت $d_1/d_2$، $k$ نامیده شود. آنگاه خط کمکی ترسیم شده در شکل 10 نشان دهنده‌ی $k = 1$ می‌باشد. خطوط کمکی به ازای تغییرات مقدار $k$ در شکل 11 نشان داده شده است. از آنجایی که نسبت فاصله دو حسگر از این خطوط در طول خطوط ثابت می‌باشد، لذا با معرفی الگویی جهت بازشناسی ارتباط هریک از این خطوط با نقاط اصابت توپ به صفحه شیشه‌ای می‌توان با بیان ارتباط بین $x_p$ و $y_p$، رابطه (5) را حل نمود.

با توجه به ماهیت انتشار امواج در صفحات با افزایش فاصله نقاط برخورد از حسگرها، انتظار پراکندگی بیشتر در حوزه زمانی سیگنال به خصوص در فرکانس‌های بالا را داریم [4]. همچنین با افزایش فاصله به ویژه در فرکانس‌های بالا میرایی افزایش می‌یابد. در روش پیشنهادی سیگنال حوزه فرکانس ضربات بوسیله تبدیل موجک مرتبه 3 تجزیه می‌شود [14] و نشان داده می‌شود که نسبت میرایی در ضرایب جزئیات تبدیل موجک با مقدار $k$

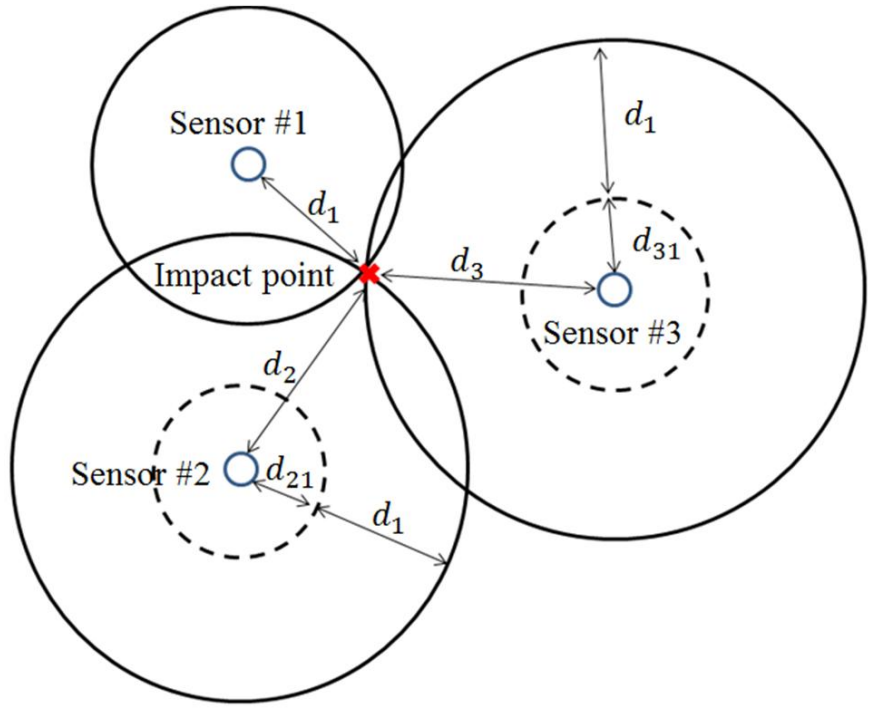



**Fig. 8** Location of sensors in Tobias method

**شکل 8** نحوه قرارگیری حسگرها در روش توبایس

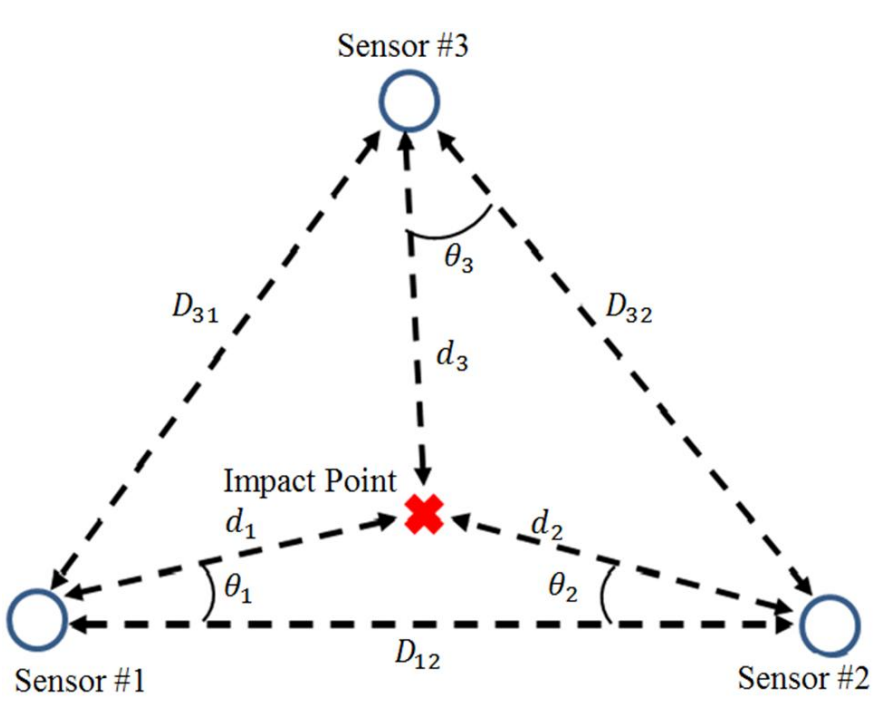



**Fig. 9** Location of sensors in Liang method

**شکل 9** نحوه قرارگیری حسگرها در روش لیانگ

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.31.9 ]

مربوط به هر خط کمکی در ارتباط است.

برای این منظور سیگنال ذخیره شده ناشی از اصابت توپ به صفحه‌ی شیشه‌ای برای 10 نقطه، برروی سه خط $k = 0.8$ ، $k = 1$ و $k = 1.25$ ذخیره شده است. در قدم اول ضربات بوسیله‌ی روش ارائه شده توسط نویسندگان [15] از سیگنال ذخیره شده تشخیص و جداسازی می‌شوند. سیگنال حوزه فرکانسی ضربات به‌وسیله تبدیل موجک تجزیه می‌شود. با بررسی توابع تبدیل مختلف، تابع تبدیل دابیچز مرتبه 2 تا مرحله سوم برای این منظور انتخاب گردید ضرایب جزئیات این تبدیل برای یک نقطه دلخواه در شکل 12 ترسیم شده است. هر مرحله از جزئیات مقدار آنتروپی

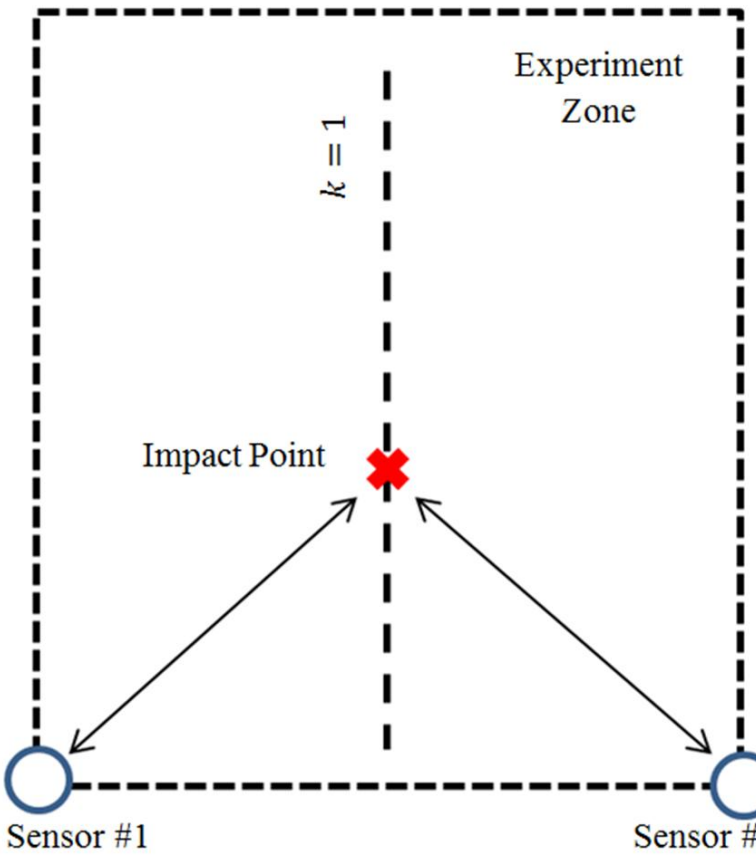



**Fig. 10** Auxiliary line and sensors location

**شکل 10** مکان خط کمکی نسبت به موقعیت قرارگیری حسگرها

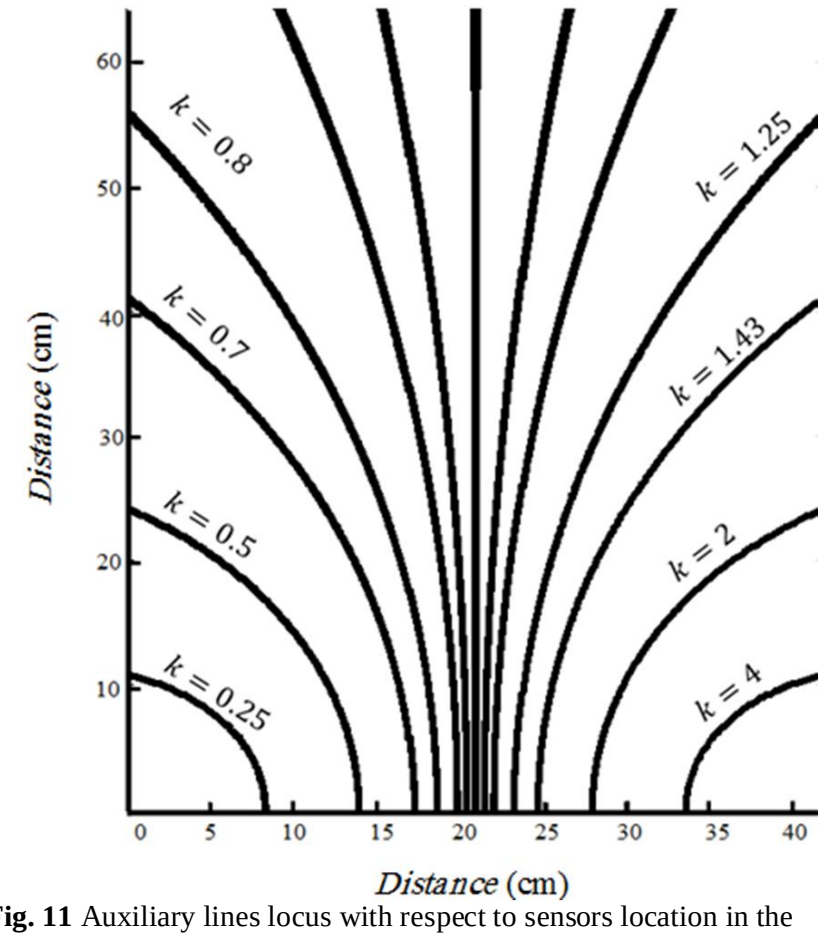



**Fig. 11** Auxiliary lines locus with respect to sensors location in the experiment zone

**شکل 11** مکان خطوط کمکی نسبت به موقعیت قرارگیری حسگرها در محدوده‌ی انجام آزمایش

شانون[1] مطابق رابطه (6) محاسبه می‌شود. هر چه مقدار این کمیت بیشتر باشد، سیگنال مورد نظر دارای پراکندگی بیشتری بوده و درنتیجه حاوی اطلاعات کمتری از پدیده مورد بررسی می‌باشد [16].

$$\mathrm{H}(X_j) = -\sum_d P_d \ln P_d$$
$$P_d = \frac{|x_{j,d}|^2}{\|X_j\|^2}$$
$$\|X_j\|^2 = \sum_d {x_{j,d}}^2 \qquad (6)$$

که در رابطه (6)، $x_{j,d}$ بیانگر داده‌ی $d$ام از سیگنال جزئیات مرتبه‌ی $j$ام می‌باشد. در هر مرحله مقدار آنتروپی شانون سیگنال ضرایب تبدیل موجک محاسبه می‌گردد. لذا هر ضربه به‌وسیله‌ی یک بردار ویژگی 4 عضوی، که هر عضو آن معرف مقدار آنتروپی شانون سیگنال ضرایب تبدیل موجک است، بیان می‌شود (شکل 12). با افزایش فاصله و به طبع آن افزایش میرایی به ویژه در فرکانس‌های بالا انتظار داریم که آنتروپی شانون نیز کاهش یابد. بدین منظور تابع هزینه‌ای مطابق رابطه (7)، برمبنای این آنتروپی پیشنهاد شده است.

$$\mathrm{Mic}(g) = \frac{\mathrm{H}(X_{2g}) + \mathrm{H}(X_{3g})}{\sum_{j=1}^{4} \mathrm{H}(X_{jg})}$$
$$\mathrm{Cost}(k, g) = \frac{\mathrm{Mic}(1)}{\mathrm{Mic}(2)} \qquad (7)$$

که در آن $X_{1g}$، $X_{2g}$، $X_{3g}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی سیگنال جزئیات مرتبه اول تا سوم تابع تبدیل موجک متناظر با حسگر $g$ام می‌باشد. نقاطی که بروی یک خط کمکی قرار می‌گیرند به علت برابر بودن نسبت فاصله از دوحسگر، مقدار تابع هزینه پیشنهادی برای آن‌ها یکسان می‌باشد. نتیجه بررسی رابطه (7) برای نقاط مختلف بر روی خطوط کمکی مختلف در جدول 1 نشان داده شده است. مطابق داده‌های جدول 2، مقدار تابع هزینه برای

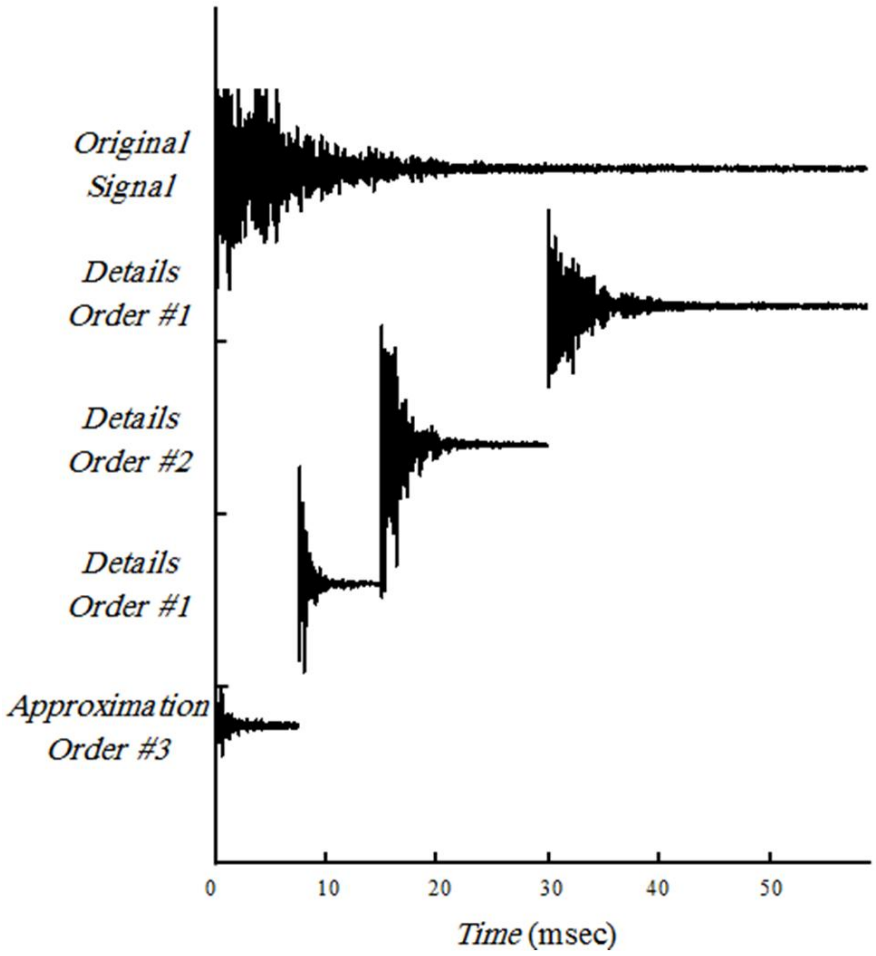



**Fig. 12** Decomposition of recorded ball impact signal by wavelet transforms - details and approximation

**شکل 12** تجزیه صدای حاصل از برخورد به‌وسیله تبدیل موجک به جزئیات و تقریب

1- Shannon entropy



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.31.9 ]

نقاط واقع بر یک خط کمکی از تطابق بالایی برخوردار می‌باشد.

### 2-5- آزمایش

در روش پیشنهادی با استفاده همزمان از روابط (5) و (7) موقعیت ضربات تشخیص داده می‌شود. هر چه تعداد نقاط کمکی افزایش داشته باشد دقت پاسخ نهایی نیز افزایش خواهد یافت. نتایج آزمایش روش پیشنهادی در جدول 3 نشان داده شده است. مطابق شکل 11 با افزایش فاصله از حسگرها، فاصله خطوط کمکی با مقدار $k$ یکسان افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله با توجه به نرخ پایین نمونه برداری، انتظار می‌رود خطای تشخیص موقعیت کاهش یابد.

به منظور بررسی این اثر در آزمایشی مجزا محیط مورد بررسی به سه قسمت یکسان، شکل 13، تقسیم گردید. نتایج تأثیر فاصله از حسگرها در در دقت روش پیشنهادی در جدول 3 نشان داده شده است.

مطابق انتظار با افزایش فاصله دقت تشخیص افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با افزایش فاصله و بازترشدن خطوط کمکی شبکه بندی محیط برای تشخیص نیز بزرگ می‌شود که خود دارای تأثیر منفی در دقت نهایی خواهد شد.

## 3- بحث و نتیجه‌گیری

در روش پیشنهادی با استفاده از روابط کمکی و استفاده از دو حسگر موقعیت ضربات تشخیص داده شد. ویژگی بیان شده با استفاده از فضای هندسی خطوط کمکی توانست کمبود در معادلات را که به علت کاهش حسگرها به دو عدد ایجاد شده بود برطرف نماید.

مطابق داده‌های جدول 4، با افزایش فاصله از حسگرها و انجام داده برداری در ناحیه دوم و سوم دقت تفکیک خطوط کمکی و به تبع آن دقت تشخیص موقعیت مکانی افزایش یافته است. با توجه به نرخ پایین داده برداری این امر دور از انتظار نبوده است.

جهت بررسی و مقایسه دقت الگوریتم پیشنهادی در تشخیص موقعیت، اختلاف محل اصابت ضربه با مکان تشخیص داده شده به عنوان خطای تشخیص محاسبه شده است. در جدول 4 میانگین این خطاها برای هر یک از نواحی سه‌گانه آزمایش گزارش شده است.

به منظور امکان بررسی هر چه بهتر نتایج، انحراف معیار خطا مربوط به هر سری از آزمایش‌ها گزارش شده است. هر چه این مقدار کمتر باشد نشان دهنده‌ی مناسب‌تر و ثابت بودن شرایط آزمایشگاهی می‌باشد.

با دورتر شدن از حسگرها و ورود به ناحیه دوم و سوم خطوط کمکی بازتر می‌شوند که این افزایش فاصله باوجود آنکه باعث افزایش دقت تفکیک این خطوط کمکی خواهد شد، اما در مقابل باعث بزرگ‌تر شدن شبکه‌بندی محیط برای تشخیص می‌شود که خود دارای تأثیر منفی در دقت نهایی با حفظ بار محاسباتی در شرایط یکسان خواهد بود. لذا افزایش فاصله از

**جدول 2** ارزیابی عملکرد خطوط کمکی

**Table 2** Auxiliary lines performance evaluation

| تعداد نقاط | خط کمکی $k$ = | میانگین مقادیر تابع هزینه |
|---|---|---|
| 6 | 0.5 | 0.985 |
| 10 | 0.9 | 0.994 |
| 10 | 1 | 1.01 |
| 10 | 1.11 | 1.03 |
| 6 | 2 | 1.11 |

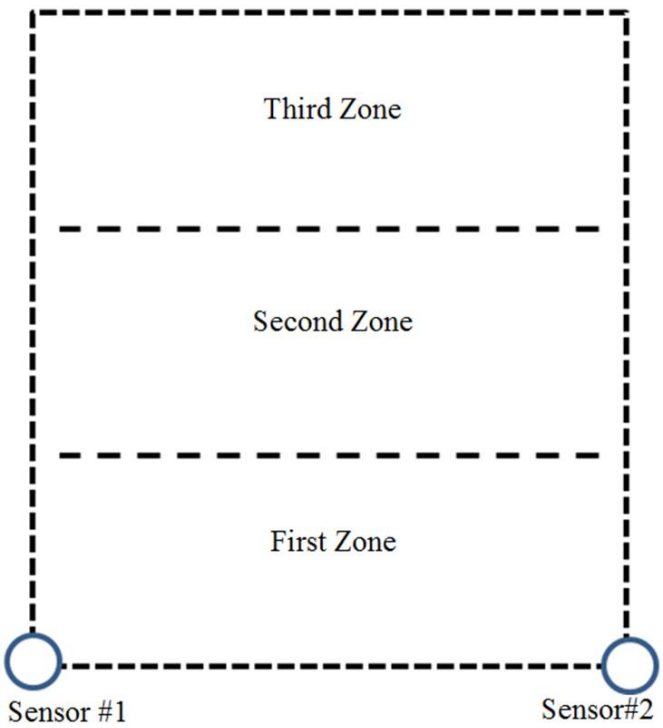



**Fig. 13** Relative location of each zone in respect to sensors position

**شکل 13** موقعیت نواحی سه‌گانه مورد آزمایش نسبت به حسگرها

**جدول 3** ارزیابی عملکرد الگوریتم تشخیص موقعیت با استفاده از خطوط کمکی

**Table 3** Evolution of sound localization algorithm using auxiliary lines

| تعداد خطوط کمکی | تعداد ضربات کمکی | تعداد ضربات جهت آزمایش | میانگین خطا (سانتی‌متر) | انحراف معیار در خطای تشخیص فاصله |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 9 | 10 | 16 | 1.43 |
| 5 | 15 | 10 | 20 | 0.85 |
| 7 | 21 | 10 | 18 | 1.87 |
| 9 | 27 | 10 | 14 | 1.22 |

حسگرها استفاده از خطوط کمکی را توجیه پذیرتر می‌کند و در مقابل باعث افزایش بار محاسباتی خواهد شد.

در روش پیشنهادی میزان خطا لزوما دارای مقداری پیوسته نمی‌باشد. میزان خطا رابطه مستقیمی با تعداد خطوط کمکی و همچنین ناحیه مورد آزمایش دارد. محدوده‌ی رؤیت پذیر از دید الگوریتم به خطوط کمکی وابسته است و لذا هر چه فاصله‌ی این خطوط از یکدیگر بیشتر باشد محیط رؤیت پذیر از دید الگوریتم را به تکه‌های بزرگ‌تری تقسیم بندی می‌نماید که باعث افزایش خطا می‌شود.

## 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تشخیص موقعیت مکانی اصابت توپ به یک صفحه‌ی شیشه‌ای با استفاده از دو میکروفون با نرخ داده‌برداری پایین پرداخته شد. با کاهش تعداد حسگرها نسبت به پژوهش‌های موجود به دوعدد، فضای هندسی کمکی پیشنهاد گردید. در روش نوین پیشنهادی با استفاده از خطوط کمکی کمبود داده‌های مورد نیاز به علت کاهش حسگر جبران گردید. بررسی نتایج به دست آمده از نقاط مختلف نشان می‌دهد با افزایش تعداد خطوط کمکی مقدار خطای نهایی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله از حسگرها نتایج الگوریتم پیشنهادی در تشخیص موقعیت بهبود می‌یابد که با توجه به ثابت بودن نرخ داده برداری در هر سه ناحیه، این مهم دور از انتظار نبوده است. مقایسه توانایی الگوریتم ارائه شده به دلیل در دسترس نبودن کار مشابه صورت نگرفته است. با توجه به آزمایش‌های تکمیلی در دست اقدام، امید است در آینده موفق به ارائه تحلیلی جامع‌تر برای تنوع بیشتری از صفحات گردیم.



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.31.9 ]

**جدول 4** ارزیابی عملکرد الگوریتم تشخیص موقعیت در نواحی سه‌گانه

**Table 4** Evaluation of sound localization algorithm in each of triple zones

| تعداد خطوط کمکی | تعداد ضربات کمکی | تعداد ضربات آزمایش | میانگین خطا (سانتی‌متر) | انحراف معیار در خطای تشخیص فاصله |
|---|---|---|---|---|
| ناحیه اول | | | | |
| 3 | 12 | 5 | 18 | 1.26 |
| 5 | 15 | 5 | 22 | 1.05 |
| 7 | 21 | 5 | 17 | 1.83 |
| 9 | 27 | 5 | 16 | 1.24 |
| ناحیه دوم | | | | |
| 3 | 12 | 5 | 21 | 1.72 |
| 5 | 15 | 5 | 16 | 0.76 |
| 7 | 21 | 5 | 15 | 2.31 |
| 9 | 27 | 5 | 25 | 1.24 |
| ناحیه سوم | | | | |
| 3 | 12 | 5 | 17 | 1.41 |
| 5 | 15 | 5 | 18 | 1.03 |
| 7 | 21 | 5 | 14 | 0.83 |
| 9 | 27 | 5 | 15 | 1.11 |

## 5- فهرست علائم

| | |
|---|---|
| $C$ | سرعت انتشار امواج $(ms^{-1})$ |
| $D$ | اختلاف جابجایی (m) |
| $d$ | جابجایی (m) |
| $t$ | زمان $(s)$ |

**زیرنویس‌ها**

| | |
|---|---|
| g | مرتبه جزئیات تبدیل موجک |
| p | ضربه‌ی اعمال شده |

## 6- تقدیر و تشکر

نویسندگان از جناب آقای محسن حقگو و دکتر عبدالرحمان جامی‌الاحمدی به سبب هماهنگی‌های صورت داده شده جهت انجام آزمایش‌های فوق، کمال تشکر را دارند.

## 7- مراجع

[1] H. Ziaiefar, M. Amiryan, M. Ghodsi, F. Honarvar, Y. Hojjat, Ultrasonic Damage Classification in Pipes and Plates using Wavelet Transform and SVM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 41-48, 2015. (in Persianفارسی)

[2] T. Kundu, S. Das, K. V. Jata, Detection of the point of impact on a stiffened plate by the acoustic emission technique, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 3, pp. 15-24, 2009.

[3] T. Kundu, Acoustic source localization, *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 1, pp. 25-38, 2014.

[4] S. A. M. Hoseini Sabzevari, M., Sound Localization in Plates Using Low Cost Acoustical Sensors, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 190-196, 2015. (in Persianفارسی)

[5] A. Tobias, Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors, *Non-destructive testing*, Vol. 9, No. 1, pp. 9-12, 1976.

[6] T. Kundu, S. Das, S. A. Martin, K. V. Jata, Locating point of impact in anisotropic fiber reinforced composite plates, *Ultrasonics*, Vol. 48, No. 3, pp. 193-201, 2008.

[7] M. Koabaz, T. Hajzargarbashi, T. Kundu, M. Deschamps, Locating the acoustic source in an anisotropic plate, *Structural Health Monitoring*, Vol. 11, No. 3, pp. 315-323, 2011.

[8] G. C. McLaskey, S. D. Glaser, C. U. Grosse, Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 12, pp. 2384-2394, 2010.

[9] D. C. Betz, G. Thursby, B. Culshaw, W. J. Staszewski, Structural damage location with fiber Bragg grating rosettes and Lamb waves, *Structural health monitoring*, Vol. 6, No. 4, pp. 299-308, 2007.

[10] A. Mostafapour, S. Davoodi, A theoretical and experimental study on acoustic signals caused by leakage in buried gas-filled pipe, *Applied Acoustics*, Vol. 87, No. 1, pp. 1-8, 2015.

[11] A. A. Mokhtari, A. Ohadi, H. Amindavar, Reconstructing the damage shape in aluminum plate using guided Lamb wave and polygon reconstruction technique in tomography, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 239-246, 2015. (in Persianفارسی)

[12] K. F. Graff, *Wave motion in elastic solids*, pp. 281-294, New York: Courier Dover Publications, 1975.

[13] D. Liang, S.-f. Yuan, M.-l. Liu, Distributed coordination algorithm for impact location of preciseness and real-time on composite structures, *Measurement*, Vol. 46, No. 1, pp. 527-536, 2013.

[14] M. Pazhoohiyani, M. Moavenian, M. E. Momeni Heravi, Identification of broken needle in single jersey circular knitting machine using neural network on yarn fluctuations signals *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 339-348, 2015. (in Persianفارسی)

[15] S. A. M. Hoseini Sabzevari, M., Application of a simple robust 2-D pictorial-geometrical feature on QRS complex detection *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 117-121, 2014. (in Persianفارسی)

[16] D. Bianchi, E. Mayrhofer, M. Gröschl, G. Betz, A. Vernes, Wavelet packet transform for detection of single events in acoustic emission signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 65, No. 64, pp. 441-451, 2015.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.31.9 ]