



## تشخیص موقعیت منبع صدا در صفحات به وسیله حس گرهای صوتی ارزان قیمت

سید امیر حسینی سبزواری<sup>1</sup>، مجید معاونیان<sup>2\*</sup>

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: 01 بهمن 1393

پذیرش: 14 فروردین 1394

ارائه در سایت: 05 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

تشخیص موقعیت صدا

حس گر ارزان قیمت

استخراج ویژگی

### چکیده

ضرورت پاسخ‌گویی به نیازهای صنعتی روز با توجه به رشد مبنای تئوری و تسهیل و فراهم شدن اقتصادی تجهیزات، محققین بسیاری را به پژوهش در کاربرد سامانه‌های پایش وضعیت ترغیب نموده است. در این مقاله هدف شناسایی موقعیت مکانی ضربه در صفحه با کمک صدای حاصل از آن است. برای این منظور در بخش آزمایشی این تحقیق از صدای اصابت توپ به میز پینگ‌پنگ، استفاده شده است. در این راستا یک بانک داده‌ی صدا به وسیله‌ی یک میکروفون ارزان قیمت ایجاد شده است. بانک داده‌ی فوق حاوی صدای ایجاد شده ناشی از 25 بار اصابت توپ به 5 نقطه مختلف در راستای طولی میز می‌باشد. در روش پیشنهادی نخست داده‌های مربوط به صدای برخورد توپ، از سیگنال ضبط شده توسط رایانه مشخص و جداسازی می‌گردد. سپس با استخراج یک فضای ویژگی 4 بعدی با استفاده از گشتاورهای آماری سیگنال، کلیه ضربات بر مبنای نقطه برخورد خوشه‌بندی می‌شوند. در ادامه به منظور تشخیص موقعیت ضربات، یک بردار ویژگی مبتنی بر انرژی سیگنال تقریب و جزئیات تبدیل موجک فضای فرکانسی ضربات، توسعه یافت. در نهایت برای طبقه‌بندی موقعیت نقاط برخورد از شبکه عصبی مصنوعی، استفاده شده است. روش‌های پیشنهادی به بانک اطلاعاتی گردآوری شده اعمال و میانگین مقادیر حساسیت و پیش بینی مثبت در خوشه‌بندی به ترتیب 91/20 و 91/18 درصد و در تشخیص موقعیت به ترتیب 91/97 و 93/45 درصد حاصل شده‌اند.

## Sound Localization in Plates Using Low Cost Acoustical Sensors

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 21 January 2015  
Accepted 03 April 2015  
Available Online 25 April 2015

Keywords:  
Sound Localization  
Low cost sensor  
Feature extraction

### ABSTRACT

The necessity to meet ongoing needs of industry, considering theoretical progress achievements and availability of cost-effective equipment, has encouraged numerous researchers to investigate the application of monitoring systems. In this paper the sound localization is implemented to find the impact position on the surface of a plate. As an experimental example, the sound caused by ball impact on a ping pong table is used. For this purpose, a database is gathered. These sound's signals were recorded 25 times at 5 different points along the length of the table by a low cost microphone, attached to the surface. In the proposed method, first the data related to the ball impacts are detected and isolated from the whole pc recorded signals sent by the microphone. Then, the above 125 impacts are clustered based on the impact point locations using a 4 dimensional space feature extracted from statistical signal moments. Furthermore, in order to specify sound localization, a second space feature based on energy of wavelet transform coefficient signals was extracted. Finally, for clustering the impact point locations, an artificial neural network was designed and applied to the above data. The results show average values of sensitivity  $Se=91.20\%$  and positive predictivity  $P+=91.18\%$ . Also, sensitivity  $Se=91.97\%$  and positive predictivity  $P+=93.45\%$ , correspondingly for impact localization.

### 1- مقدمه

امروزه سازه‌های بسیار حساس و مهمی به وسیله مواد کامپوزیتی ساخته می‌شوند. این قطعات و سازه‌ها نه تنها به دلیل شناسایی مکان ضربه‌های خارجی احتمالی وارد شده به آن‌ها بلکه به علت نیاز به بررسی و تعیین عوامل خرابی داخلی مانند رشد ترک‌ها، لایه‌لایه شدن یا از هم گسیختگی فیبرهای داخلی، نیازمند پایش دائمی می‌باشند [1]. بدین منظور از مبدل‌های مافوق صوت<sup>1</sup> در دو شکل فعال<sup>2</sup> و غیرفعال<sup>3</sup> استفاده می‌گردد [2].

در طول صدهای اخیر محققان و پژوهشگران زیادی در بهبود و گسترش روش‌های جدیدی به منظور تعیین موقعیت صدا به تحقیق و بررسی از جنبه‌های مختلف پرداخته، امکان شناخت بیشتر پیچیدگی‌های این پدیده را فراهم ساخته‌اند. این امر ضمن نزدیک‌سازی مدل‌های مورد بررسی و بستر آزمایش‌های تجربی به نیازهای صنعتی علاوه بر کاهش تعداد حس گرهای مورد استفاده، دقت الگوریتم‌ها را نیز به طرز چشم‌گیری افزایش داده است. نتایج این پژوهش‌ها در منابع متعدد علمی و صنعتی منتشر شده است.

1- Ultrasonic transducers  
2- Active  
3- Passive

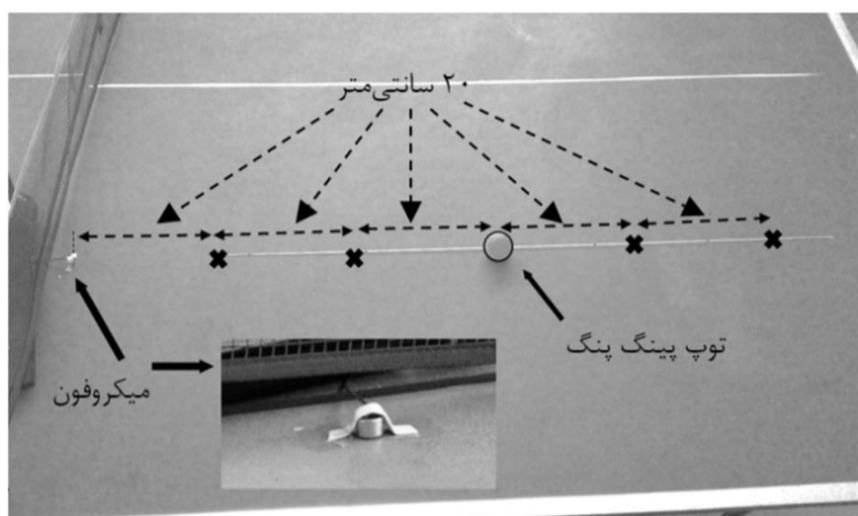
Please cite this article using:

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

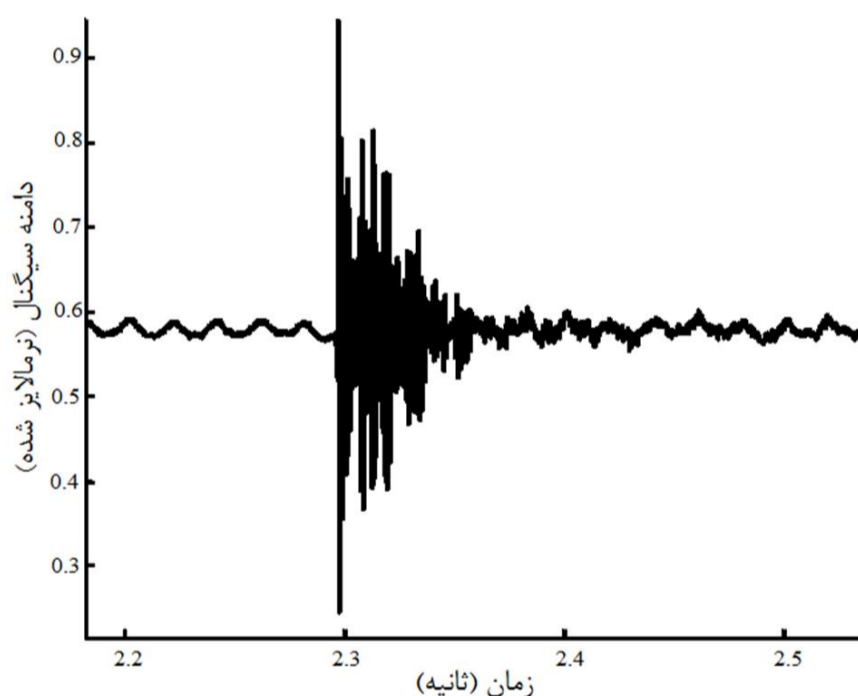
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



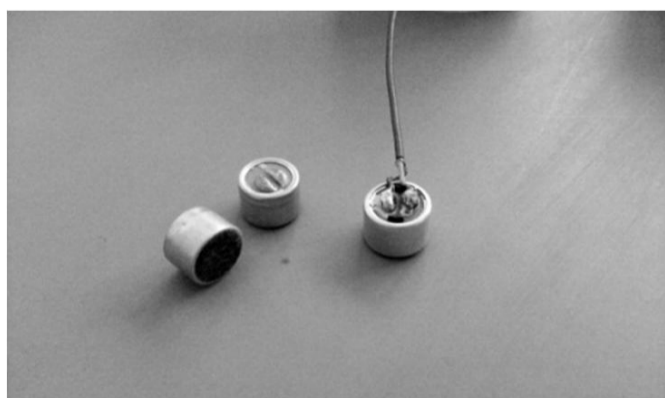
شکل 1 محیط آزمایش بر روی میز پینگ پنگ



شکل 2 موقعیت نقاط برخورد توپ به میز پینگ پنگ



شکل 3 سیگنال ذخیره شده در بازه‌ی زمانی، ایجاد شده به وسیله ضربه توپ به نقطه‌ی دوم، بافاصله‌ی 40 سانتیمتری از میکروفون



شکل 4 میکروفون‌های مورد استفاده در این پژوهش

در پژوهش حاضر از خواص مکانیکی میز پینگ پنگ مانند سرعت انتشار امواج در آن، استفاده نشده است. همچنین میکروفون استفاده شده در این پژوهش یک میکروفون خازنی آنالوگ ارزان قیمت موجود در بازار (بیشینه‌ی فرکانس 30 کیلوهرتز) می‌باشد که در شکل 4 نشان داده شده است. داده‌های ذخیره

در شکل فعال عملگرهای صوتی امواج فراصوت تولید و منتشر می‌کنند در صورتی که در شکل غیرفعال آن، از برخورد یک جسم خارجی و یا شروع ترک به عنوان منبع تولید کننده امواج استفاده می‌شود [3].

منابع تولید امواج در شکل غیرفعال می‌تواند بسیار متنوع باشند از قبیل: 1- ضربه ناشی از برخورد، 2- تشکیل ترک، 3- عیب‌های سازه‌ای در اجزای یک سیستم مانند: پارگی کابل‌های یک پل و یا شکست میلگرد در قطعات بتونی تقویت شده [5,4]. تمامی این رخدادها باعث تولید و انتشار امواج صوتی می‌شوند. فرآیند ضبط و تحلیل سیگنال‌های صوتی منتشر شده، به وسیله حس گرهای مختلف، تشخیص موقعیت منبع صوتی<sup>1</sup> نامیده می‌شود که نقش مهمی در پایش سلامت سازه‌ها<sup>2</sup> بر عهده دارد. در این پژوهش شکل غیرفعال روش‌های پایش به منظور تشخیص موقعیت منبع صدا به دلیل امکان پایش وضعیت دائمی انتخاب گردیده است. تاکنون روش‌های مختلفی جهت شناسایی موقعیت منبع صوتی ارائه شده است که از جمله می‌توان به روش توبایس<sup>3</sup> یا چیدمان مثلثی شکل [6]، استفاده از توابع بهینه‌سازی [8,7]، چیدمان خطی حس گرها [9,10] و بررسی مودهای امواج منتشره [12,11] اشاره نمود. همچنین مصطفی پور و همکاران [13] با بررسی مودهای صدای ایجاد شده به علت نشت سیال موفق به تشخیص موقعیت نشتی ایجاد شده در لوله‌های انتقال سیال شدند. مانیتیک و همکاران [14] با به کارگیری روش چیدمان مثلثی موقعیت پرنده‌گان بر روی درختان را تعیین نمودند. از بومرنگ<sup>4</sup> [15] می‌توان به عنوان شناخته شده‌ترین وسیله تشخیص موقعیت منبع صدا نام برد که در کاربردهای نظامی مورد استفاده قرار گرفته است.

تعداد حس گرهای مورد استفاده در این روش‌ها بسته به مشخصات صفحه و همچنین وابستگی روش به حل معادلات انتشار امواج در آن صفحه می‌تواند بسیار متغیر باشد. هر چه وابستگی روش مورد استفاده به معادلات انتشار امواج بیشتر باشد، تعداد حس گرها تا هشت عدد حس گر می‌تواند افزایش یابد [5].

در این مقاله با استفاده از یک حس گر صوتی ارزان قیمت که بر روی سطح یک میز پینگ پنگ (دهنه‌ی ورودی دیافراگم حسگر چسبیده به سطح میز می‌باشد) نصب شده است، داده‌های مربوط به اصابت توپ پینگ پنگ به میز در نقاط مختلف در راستای طولی میز، ذخیره می‌شود. در ادامه با بررسی و پردازش داده‌های ذخیره شده در گام نخست، ساختار خوشه‌بندی سیگنال ضربات مربوط به نقاط برخورد مختلف مشخص و در گام بعدی موقعیت مکانی این نقاط نسبت به یکدیگر و میکروفون تعیین می‌گردد.

## 2- روش پیشنهادی

### 1-2- محیط آزمایش

مطابق شکل 1 یک میکروفون در موقعیت نشان داده شده بر روی میز پینگ پنگ نصب شده است. پنج نقطه در فواصل مساوی 20 سانتی‌متری از یکدیگر در راستای طولی میز، مطابق شکل 2، در نظر گرفته شده‌اند.

بالای هر نقطه توپ پینگ پنگ از فاصله‌ی 10 سانتی‌متری میز رها و صدای اولین برخورد با نرخ نمونه برداری 44100 داده در ثانیه ذخیره گردیده است. این فرایند 25 بار تکرار یا به بیان دیگر برای هر نقطه 25 سیگنال صوتی ذخیره شده است. نمونه‌ای از صدای ذخیره شده در تکرار دوم در نقطه‌ی سوم در شکل 3 نشان داده شده است.

1- Acoustic Source Localization  
2- Structural Health Monitoring  
3- Tobias  
4- Boomerang

با اعمال شرایط فوق، حل هلمهولتز بیان شده در رابطه (2) به فرم رابطه (7) تبدیل می‌شود.

$$\vec{u} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial H_z}{\partial y}\right)\vec{i} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right)\vec{j} + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right)\vec{k} \quad (7)$$

حال با اعمال شرط کرنش صفحه‌ای یعنی  $u_x \neq 0$ ،  $u_y \neq 0$  و  $u_z = 0$  تنها دو تابع پتانسیل اسکالر  $\varphi$  و  $H_z$  می‌توانند داری مقدار باشند. لذا رابطه (5) به شکل رابطه (8) ساده می‌شود [17].

$$C_p^2 \nabla^2 \varphi = \ddot{\varphi}, C_p = (\lambda + 2\mu) / \rho \quad (8)$$

$$C_s^2 \nabla^2 H_z = \ddot{H}_z, C_s = \mu / \rho$$

که در آن  $C_p$  و  $C_s$  به ترتیب نشان دهنده‌ی سرعت انتشار موج فشاری و برشی در محیط می‌باشد. دو معادله نشان داده شده در رابطه (8) نشان دهنده‌ی موج فشاری و موج برشی در صفحه عمودی می‌باشند. برهم کنش میان این دو موج و بازتاب‌های آن‌ها از سطوح بالایی و پایینی صفحه باعث ایجاد امواجی می‌شود که امواج لمب<sup>7</sup> نامیده می‌شوند [18]. به منظور استخراج معادلات مربوط به انتشار امواج لمب، از حل معادلات رابطه (8) با فرض پاسخ هماهنگ در راستای افقی مطابق رابطه (9) داریم [19].

$$u_x = (A_2 ik \cos(py) + B_1 q \cos(qy)) + (A_1 ik \sin(py) - B_2 q \sin(qy))$$

$$u_y = -(A_2 p \sin(py) + B_1 ik \sin(qy)) + (A_1 p \cos(py) - B_2 ik \cos(qy)) \quad (9)$$

که در آن  $k$ ، عدد موج و ضرایب  $A_1, A_2, B_1, B_2$  ضرایب ثابتی هستند که با اعمال شرایط مرزی حاصل می‌شوند. راستاهای محور مختصات در شکل 5 نشان داده شده است. همچنین  $p$  و  $q$  مطابق رابطه (10) محاسبه می‌شوند.

$$p^2 = \frac{w^2}{C_p^2} - k^2, q^2 = \frac{w^2}{C_s^2} - k^2 \quad (10)$$

که در آن  $w$  نشان دهنده‌ی فرکانس می‌باشد. رابطه (9) را می‌توان به صورت مجموع دو پاسخ متقارن، مطابق رابطه (11)، و نامتقارن، رابطه (12)، در نظر گرفت.

$$\text{متقارن} \begin{cases} u_x = (A_2 ik \cos(py) + B_1 q \cos(qy)) \\ u_y = -(A_2 p \sin(py) + B_1 ik \sin(qy)) \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{نامتقارن} \begin{cases} u_x = (A_1 ik \sin(py) - B_2 q \sin(qy)) \\ u_y = (A_1 p \cos(py) - B_2 ik \cos(qy)) \end{cases} \quad (12)$$

با اعمال شرایط مرزی و حل عددی می‌توان پاسخ قسمت متقارن و قسمت نامتقارن را به صورت مودهای متقارن و نامتقارن به دست آورد.

با توجه روابط نشان داده شده اصابت توپ رها شده به میز باعث ایجاد و انتشار امواج الاستیک از نوع لمب در دو مود متقارن و نامتقارن می‌شود [9,8]. امواج منتشر شده به وسیله میکروفون به صورت یک سیگنال زمانی نشان داده می‌شود. سیگنال ذخیره شده برای هر ضربه شامل اطلاعات هر دو مود منتشر شده در صفحه می‌باشد.

سرعت انتشار امواج در این دو مود با یکدیگر متفاوت بوده به گونه‌ای که با افزایش فاصله منبع صوت از میکروفون انتظار می‌رود این دو مود در سیگنال ذخیره شده قابل تشخیص باشند. در پژوهشی که بر روی لوله فولادی صورت گرفته است، هنگامی که منبع صدا در فاصله‌ی 170 سانتی‌متری از میکروفون قرار دارد، اختلاف زمانی این دو مود حدود 190 میکروثانیه گزارش شده است [20]. با کاهش فاصله منبع صدا از میکروفون، تشخیص موقعیت نیازمند تجهیزات دقیق‌تر، گران قیمت‌تر و حل معادلات انتشار امواج در صفحه می‌باشد. در پژوهش‌های گذشته تشخیص این تغییرات نوعاً در فواصل بیشتر از یک متر و با دانستن خواص مکانیکی محیط مورد آزمایش انجام گرفته است.

با توجه به فاصله طولی موقعیت برخورد توپ از محل نصب میکروفون بر روی میز و همچنین نرخ پایین فرکانس نمونه برداری، امکان تفکیک دو مود

شده توسط این حس گر بوسیله یک کارت صدا با نرخ نمونه برداری 96 کیلوهرتز به نرم‌افزار مطلب ارسال و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## 2-2- ماهیت امواج منتشر شده

اصابت توپ رها شده به میز پینگ‌پنگ علاوه بر ایجاد و انتشار امواج الاستیک در سازه میز باعث تولید امواج صوتی نیز می‌گردد که در هوا منتشر می‌شود. هر دو دسته این امواج به حسگر می‌رسند اما مشابه پژوهش‌های گذشته [8,9] از تاثیر امواج صوتی منتقل شده توسط سیال پیرامون به حسگر در مقایسه با امواج سازه‌ای صرف نظر شده است. امواج الاستیک ایجاد شده در سازه آزادانه به هر سه جهت منتشر می‌شوند. در حالت کلی پاسخ انتشار امواج مطابق رابطه (1) بیان می‌گردد [16].

$$\vec{u} = \vec{u}_p + \vec{u}_{SV} + \vec{u}_{SH} \quad (1)$$

که در آن  $u_p$ ،  $u_{SV}$  و  $u_{SH}$  به ترتیب نشان دهنده‌ی موج فشاری<sup>1</sup>، موج برشی در صفحه‌ی عمودی<sup>2</sup> و موج برشی در صفحه افقی<sup>3</sup> می‌باشد. از طرفی دیگر جابجایی  $\vec{u}$  را می‌توان به صورت مجموعی از دو تابع پتانسیل اسکالر  $\varphi$  و برداری  $\vec{H} = H_x \vec{i} + H_y \vec{j} + H_z \vec{k}$  مطابق رابطه (2) در نظر گرفت.

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \varphi + \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (2)$$

رابطه فوق حل هلمهولتز<sup>4</sup> نامیده می‌شود که در آن،  $\nabla$  نمایانگر اپراتور گرادین و  $\nabla \times$  نشان دهنده‌ی اپراتور کرل می‌باشد. معادلات حاکم بر امواج منتشر شده از جاگذاری رابطه (2) در معادله ناویر<sup>5</sup>، رابطه (3)، مطابق رابطه (4) حاصل می‌شود.

$$(\lambda + \mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \mu \nabla^2 \vec{u} = \rho \ddot{\vec{u}} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \left( (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi - \rho \ddot{\varphi} \right) + \vec{\nabla} \times (\mu \nabla^2 \vec{H} - \rho \ddot{\vec{H}}) = 0 \quad (4)$$

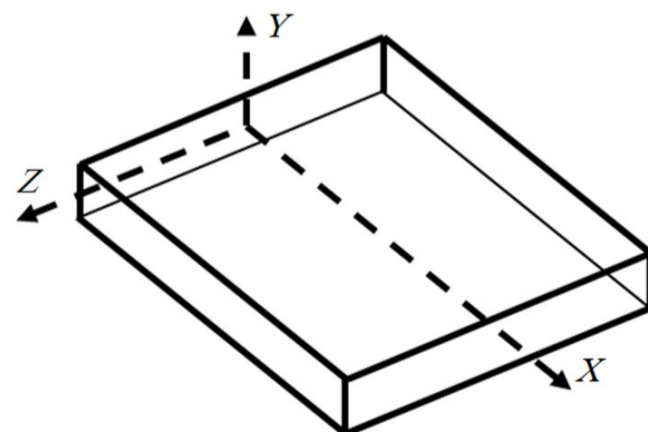
که در آن چگالی،  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه<sup>6</sup> نامیده می‌شوند. از آنجایی که رابطه (4) به ازای تمامی زمان‌ها و مکان‌ها برقرار است لذا می‌بایست هر دو عبارت این رابطه برابر با صفر باشند. از صفر قرار دادن این دو عبارت معادلات حاکم بر امواج منتشر شده مطابق رابطه (5) حاصل می‌شود [16].

$$(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \varphi - \rho \ddot{\varphi} = 0 \rightarrow \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \nabla^2 \varphi = \ddot{\varphi}$$

$$\mu \nabla^2 \vec{H} - \rho \ddot{\vec{H}} = 0 \rightarrow \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{H} = \ddot{\vec{H}} \quad (5)$$

با توجه به محیط آزمایش، می‌توان از ضخامت ناچیز میز پینگ‌پنگ در مقایسه با دو بعد دیگر آن صرف نظر نمود. رابطه (6) نتایج منتج از فرض فوق را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial}{\partial z} \equiv 0, \vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} \quad (6)$$

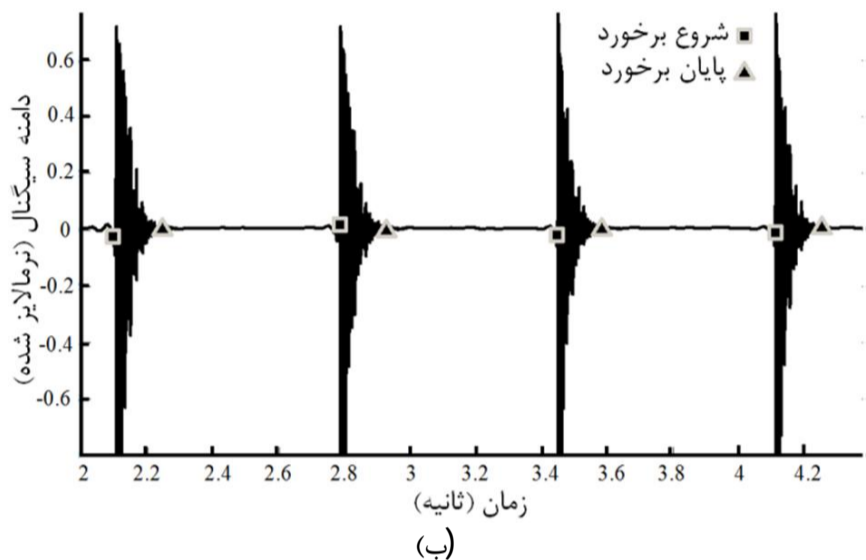
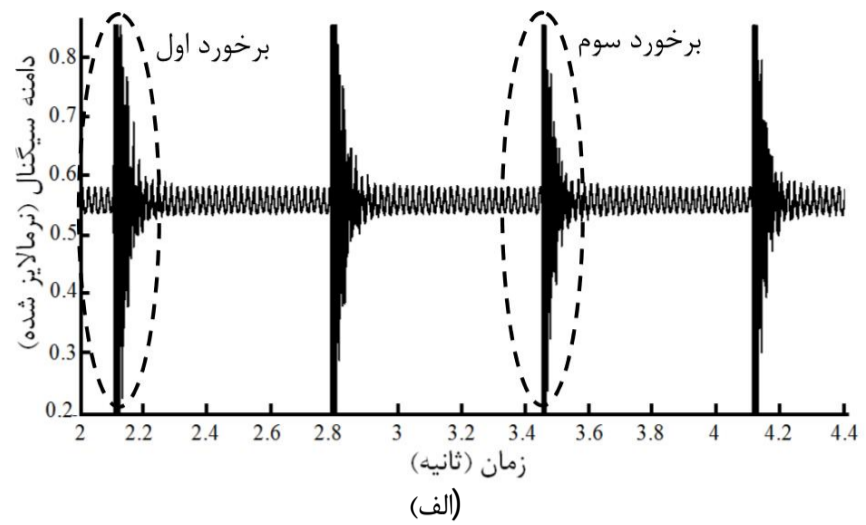


شکل 5 راستای محور مختصات در صفحه مورد بررسی

- 1- P-wave
- 2- Shear-Vertical wave
- 3- Shear-Horizontal wave
- 4- Helmholtz Solution
- 5- Navier
- 6- lame

7- Lamb Waves

متقارن و نامتقارن در سیگنال ذخیره شده وجود ندارد.



شکل 6 سیگنال ذخیره شده چهار مرتبه برخورد توپ به میز (الف) سیگنال خام ارسالی به رایانه، (ب) سیگنال تفکیک و دی نویز شده

این نکته خود بر پیچیدگی پژوهش صورت گرفته می‌افزاید. باید متذکر شد که در فرکانس‌های پایین، دو مود متقارن و نامتقارن امواج لمب به ترتیب به مودهای ارتعاشی طولی و عرضی همگرا می‌شوند [19]، لذا سیگنال ذخیره شده توسط میکروفون در آزمایش‌های صورت گرفته می‌تواند معیاری از ارتعاشات طولی و عرضی میز پینگ‌پنگ باشد. قیود نامبرده فوق در پژوهش‌های گزارش شده تاکنون هیچ‌گاه به صورت همزمان در نظر گرفته نشده‌اند لذا روش‌های موجود در راستای شناسایی موقعیت منبع صدا، در حل این مسئله کارایی کافی را ندارند. بنابراین ضرورت پیشنهاد پژوهش حاضر به‌وضوح مشخص می‌گردد.

تحلیل پیشنهادی صورت گرفته در این پژوهش به دو قسمت تقسیم می‌شود: (الف) خوشه‌بندی ضربات و (ب) تعیین موقعیت مکانی ضربات. در قسمت اول هدف تشکیل خوشه‌هایی مجزا شامل ضربات متعلق به هر نقطه برخورد می‌باشد و در قسمت دوم هدف تعیین موقعیت مکانی نقاط مشخص شده در قسمت قبل، نسبت به یکدیگر می‌باشد.

### 2-3- خوشه‌بندی ضربات

از آنجایی که داده‌های مربوط به تکرار برخورد توپ در یک نقطه به صورت پیوسته، مطابق شکل 6، ذخیره شده‌اند. در ابتدا می‌بایست این ضربات را از داخل سیگنال جداسازی نمود. برای این منظور از روش هندسی-تصویری ارائه شده توسط نویسندگان [21] استفاده شده است. همچنین به منظور کاهش نویز موجود و بالا بردن دقت روش هندسی-تصویری، بعد از بررسی توابع تبدیل مختلف، از تبدیل موجک با تابع تبدیل دابچیز<sup>1</sup> مرتبه 10 استفاده شده است. در شکل 6 سیگنال دی‌نویز شده چهار برخورد و نقاط

اصابت توپ به میز نشان داده شده است.

به منظور خوشه‌بندی [22] سیگنال‌ها بعد از جداسازی کلیه‌ی ضربات و تعیین داده‌های مربوط به هر برخورد در حوزه زمان، داده‌ها به وسیله تبدیل فوریه به حوزه فرکانسی منتقل می‌شود. در حوزه فرکانسی محدوده‌ی فرکانسی که 90 درصد انرژی سیگنال را دارا باشد مشخص می‌شود. سپس برای این قسمت از سیگنال در حوزه فرکانس، چهار مرحله گشتاورهای آماری، مطابق روابط بیان شده، محاسبه شده و به عنوان بردار ویژگی هر ضربه در نظر گرفته می‌شود. گشتاور آماری مرتبه اول، رابطه (13)، نشان دهنده مقدار میانگین ارتفاع داده‌ها نسبت به خط پایه خود می‌باشد.

$$C_{av} = \mu_1 = E\{X\} \quad (13)$$

گشتاور آماری مرتبه دوم نشان دهنده میزان پراکندگی نمونه‌ها حول مقدار میانگین و نماینده‌ای از توان سیگنال می‌باشد. مقدار این کمیت از رابطه (14) به دست می‌آید.

$$C_{vrc} = \sigma^2 = E\{(X - \mu_1)^2\} \quad (14)$$

گشتاور آماری مرتبه سوم میزان عدم تقارن تابع چگالی احتمال داده‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد، این کمیت برای آشکارسازی قطعاتی از سیگنال که در آن یک گذر سریع از مقدار حداقل به مقدار حداکثر وجود دارد، بسیار کارآمد است [23]. گشتاور آماری مرتبه سوم در رابطه (15) آورده شده است.

$$C_{skw} = \frac{\sigma_3}{\sigma_2^{3/2}} = \frac{E\{(X - \mu_1)^3\}}{\sqrt{(E\{(X - \mu_1)^2\})^3}} \quad (15)$$

گشتاور آماری مرتبه چهارم رابطه (16)، نشان دهنده مقدار توزیع یکنواخت نمونه‌ها و یا مقدار ضربه وار بودن آن‌ها می‌باشد. با استفاده از آن، می‌توان نواحی با شیب بیشینه یا کمینه سیگنال را به دست آورد [23].

$$C_{kts} = \frac{\sigma_4}{\sigma_2^2} = \frac{E\{(X - \mu_1)^4\}}{(E\{(X - \mu_1)^2\})^2} \quad (16)$$

هر سیگنال متناظر با ضربه  $g$  در نقطه  $d$ ام با یک بردار ویژگی  $g_{dg}$  [C<sub>av</sub>, C<sub>vrc</sub>, C<sub>skw</sub>, C<sub>kts</sub>] معرفی می‌شود. با فرض اطلاع از تعداد نقاط برخورد، از روش کامینز<sup>2</sup> برای خوشه‌بندی ضربات استفاده شده است [24]. شکل 7 حوزه فرکانسی سیگنال‌های تفکیک شده بر حسب موقعیت مکانی را نشان می‌دهد. دقت تفکیک ضربات در جدول 1 نشان داده شده است.

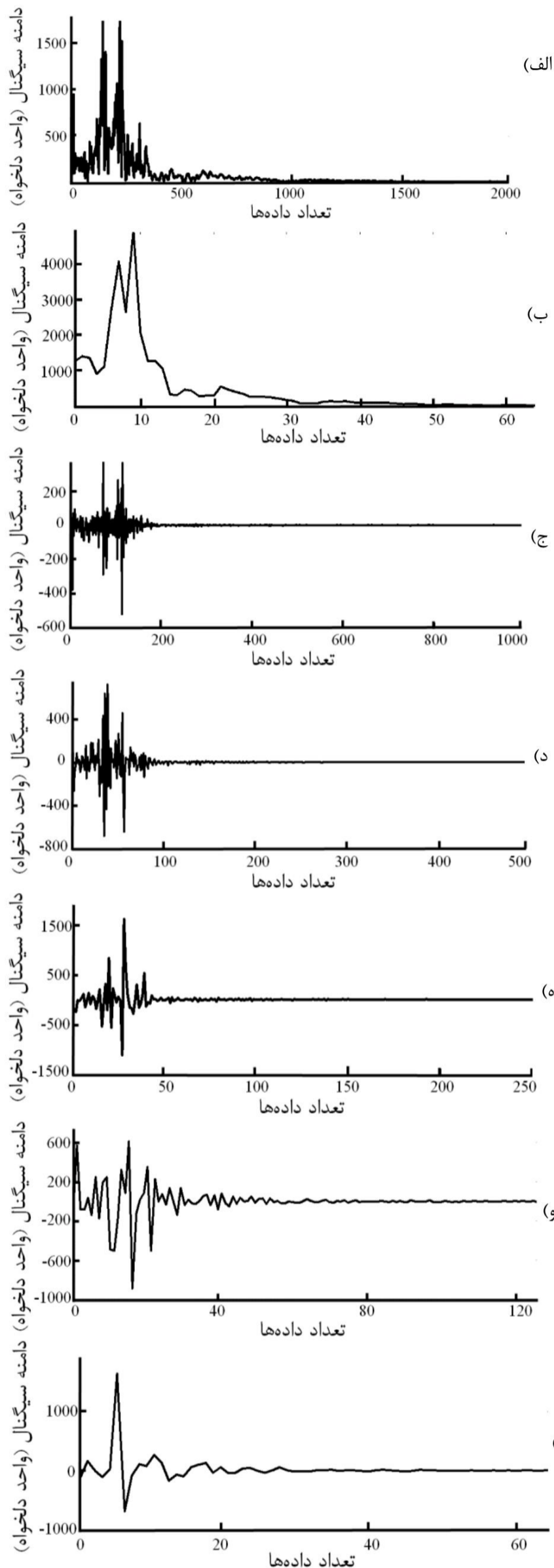
### 2-4- تعیین موقعیت مکانی ضربات

در مرحله قبلی ضربات خوشه‌بندی شدند به این معنی که تعلق ضربات به نقاط برخورد مشترک مشخص شد. در این بخش هدف تعیین موقعیت این نقاط نسبت به یکدیگر می‌باشد.

با توجه به ماهیت انتشار امواج در صفحات، با افزایش فاصله منبع صدا از میکروفون انتظار پراکندگی بیشتر در حوزه زمانی سیگنال به خصوص در فرکانس‌های بالا را داریم. همچنین افزایش میرایی به علت افزایش فاصله، به خصوص در فرکانس‌های بالا دور از انتظار نمی‌باشد. لذا در روش پیشنهادی سیگنال حوزه فرکانسی ضربات به وسیله تبدیل موجک مطابق شکل 8، تجزیه می‌شود. با بررسی توابع تبدیل مختلف، تابع تبدیل دابچیز<sup>1</sup> مرتبه 2 تا مرحله پنجم برای این منظور انتخاب گردید. در هر مرحله مقدار انرژی سیگنال ضرایب تبدیل موجک را محاسبه می‌گردد. لذا هر ضربه به وسیله‌ی یک بردار ویژگی 6 عضوی، که هر عضو آن معرف انرژی سیگنال ضرایب تبدیل موجک است، بیان می‌شود (شکل 8).

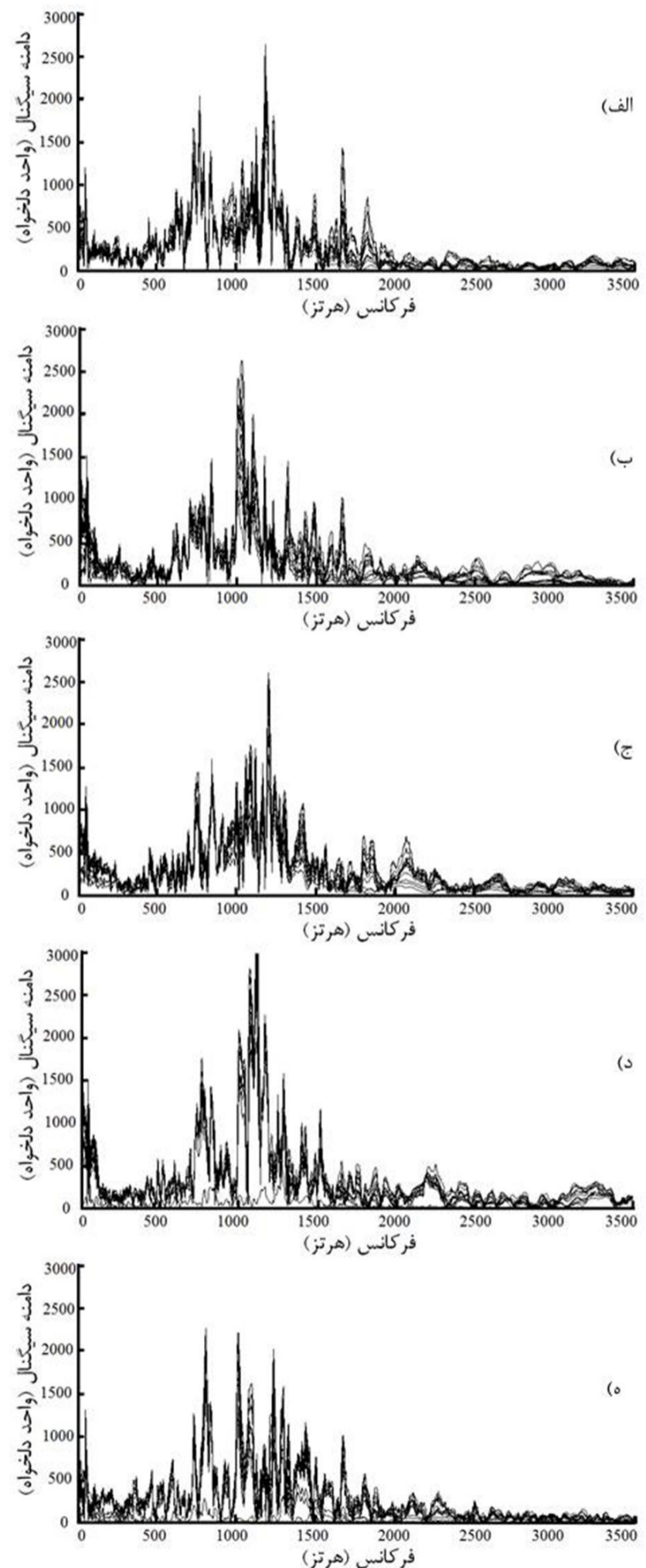
$$f_{dg} = [\alpha_{dg}, \beta_{dg}, \gamma_{dg}, \delta_{dg}, \varepsilon_{dg}, \zeta_{dg}, \eta_{dg}]$$

با انتقال سیگنال به حوزه فرکانس، هر سیگنال با بردار ویژگی  $f_{dg}$  همراه است که در آن  $\alpha_{dg}, \beta_{dg}, \gamma_{dg}, \delta_{dg}, \varepsilon_{dg}, \zeta_{dg}, \eta_{dg}$



شکل 8 ضرایب تبدیل موجک سیگنال حوزه فرکانس ضربه‌ی وارده به میز. (الف) سیگنال ضربه در حوزه فرکانس، (ب) تقریب مرتبه پنجم، (ج) جزئیات مرتبه اول، (د) جزئیات مرتبه دوم، (ه) جزئیات مرتبه سوم، (و) جزئیات مرتبه چهارم و (ز) جزئیات مرتبه پنجم

$\delta_{dg}$ ،  $\epsilon_{dg}$  و  $\zeta_{dg}$  به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار انرژی سیگنال تقریب مرتبه پنجم و جزئیات مرتبه اول تا پنجم تابع تبدیل موجک متناظر با ضربه  $g$  در نقطه  $d$  می‌باشند. ده ضربه اول در هر نقطه را به عنوان داده‌های آموزش در یک شبکه عصبی مصنوعی [25] استفاده کردیم. شکل 9 مدل شبکه عصبی استفاده شده را نشان می‌دهد. شبکه استفاده شده دارای 7 نرون در لایه ورودی (برابر با طول بردار ویژگی)، 24 نرون در دولایه میانی و 5 نرون در لایه خارجی (برابر با تعداد نقاط) می‌باشد. نتایج حاصل از روش پیشنهادی بر روی 15 ضربه باقی مانده بررسی و در جدول 2 نشان داده شده است.



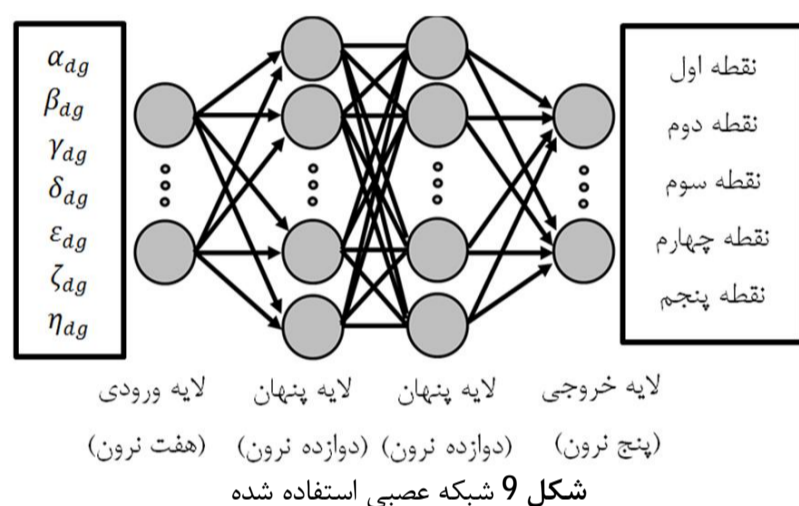
شکل 7 حوزه‌ی فرکانسی بیست و پنج ضربه در فواصل (الف) 20 سانتی‌متر، (ب) 40 سانتی‌متر، (ج) 60 سانتی‌متر، (د) 80 سانتی‌متر و (ه) 100 سانتی‌متر از میکروفون

جدول 1 ارزیابی عملکرد الگوریتم خوشه‌بندی صداهای ایجاد شده از برخورد توپ به میز پینگ‌پنگ

موقعیت ضربه	تعداد کل ضربات	تعداد ضربات آزمایش	تعداد ضربه تشخیص صحیح	تعداد ضربه تشخیص داده نشده	تعداد ضربه تشخیص اشتباه	حساسیت (%)	پیش‌بینی مثبت (%)
نقطه اول	25	25	25	0	1	100	96/15
نقطه دوم	25	25	25	0	3	100	89/28
نقطه سوم	25	25	21	4	2	84	91/30
نقطه چهارم	25	25	23	2	1	92	95/83
نقطه پنجم	25	25	20	5	4	80	83/33

جدول 2 ارزیابی عملکرد الگوریتم تعیین موقعیت مکانی صداهای ایجاد شده از برخورد توپ به میز پینگ‌پنگ

موقعیت ضربه	تعداد کل ضربات	تعداد ضربات آزمایش	تعداد ضربه تشخیص صحیح	تعداد ضربه تشخیص داده نشده	تعداد ضربه تشخیص اشتباه	حساسیت (%)	پیش‌بینی مثبت (%)	موقعیت ضربه
نقطه اول	25	10	15	15	0	1	100	93/75
نقطه دوم	25	10	15	13	2	1	86/66	92/85
نقطه سوم	25	10	15	15	0	3	100	88/33
نقطه چهارم	25	10	15	14	2	0	87/50	100
نقطه پنجم	25	10	15	12	2	1	85/71	92/30



## 3- بحث و نتیجه‌گیری

روش پیشنهادی به منظور خوشه‌بندی ضربات به داده‌های ذخیره شده، 25 ضربه در هر نقطه، اعمال شده و نتایج آن در جدول 1 نشان داده شده است. مقادیر حساسیت<sup>1</sup> و پیش‌بینی مثبت<sup>2</sup> گزارش شده در این جدول مطابق رابطه (17) محاسبه شده‌اند.

$$\text{حساسیت (درصد)} = \frac{TP}{TP + FN} \times 100$$

$$\text{پیش‌بینی مثبت (درصد)} = \frac{TP}{TP + FP} \times 100 \quad (17)$$

که در آن  $TP$ ،  $FN$  و  $FP$  به ترتیب نشان دهنده تعداد ضربه صحیح تشخیص داده شده، تعداد ضربه تشخیص داده نشده و تعداد ضربه اشتباه تشخیص داده شده، می‌باشد. به بیان دیگر مقدار حساسیت نشان دهنده تشخیص‌های درست و مقدار پیش‌بینی مثبت بیان‌گر عدم گمراه شدن الگوریتم در شناسایی موقعیت ضربات مورد نظر می‌باشد. برای مثال اطلاعات مربوط به نقطه سوم در جدول 1 را در نظر بگیرید، 25 ضربه متعلق به این نقطه می‌باشد. عملکرد الگوریتم با تشخیص 23 ضربه متعلق به این نقطه که از آن 21 ضربه مربوط به نقطه سوم و 2 ضربه متعلق به نقطه پنجم، می‌باشد. لذا الگوریتم در این حالت برای نقطه سوم: 21 ضربه صحیح، 2 ضربه اشتباه و 4 ضربه (25-21=4) را تشخیص نداده است. مطابق جدول 1 روش پیشنهادی به منظور خوشه‌بندی در این پژوهش به 125 ضربه در پنج نقطه مختلف اعمال گردید، که در این میان 114 ضربه به درستی تشخیص داده شده است 11 ضربه تشخیص داده نشده و اشتباه تشخیص داده شده است.

همان‌طور که در جدول 1 نشان داده شده است، بالاترین درصد مقدار حساسیت متعلق به دو نقطه نزدیک به میکروفون بوده در حالی که بالاترین درصد مقدار پیش‌بینی مثبت به ترتیب مربوط به نقطه اول و نقطه چهارم می‌باشد. لازم به ذکر است که به طور قاطع نمی‌توان در مورد رژیم تغییرات مقدار حساسیت و پیش‌بینی مثبت نسبت به موقعیت برخورد توپ اظهار نظر نمود. زیرا ماهیت غیرخطی انتشار امواج در میز ناهمسانگرد مورد آزمایش، ضرورت افزایش تعداد آزمایش‌ها برای رسیدن به یک مدل جامع قابل قبول را محرز می‌دارد.

همچنین نتایج اعمال روش پیشنهادی ارائه شده جهت تعیین موقعیت ضربات در جدول 2 نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که روش فوق قابلیت خوشه‌بندی را نیز دارا می‌باشد چرا که با تعیین موقعیت ضربات، خوشه‌بندی آن‌ها نیز عملاً صورت گرفته است. اما اگر هدف تنها تشخیص تعداد نقاط باشد و نه موقعیت آن‌ها بار محاسباتی روش پیشنهادی به منظور خوشه‌بندی به مراتب کمتر از بار محاسباتی این روش بوده و ترجیح داده می‌شود. مطابق جدول 2 روش پیشنهادی با 50 ضربه آموزش دیده است و به 75 ضربه جدید اعمال شده است. حاصل عملکرد این روش 69 تشخیص درست و 6 ضربه تشخیص داده نشده و اشتباه تشخیص داده شده می‌باشد. بالاترین درصد مقدار حساسیت متعلق به نقاط اول و سوم و بالاترین درصد مقدار پیش‌بینی مثبت در نقاط اول و دوم گزارش شده است.

## 4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به خوشه‌بندی و شناسایی موقعیت مکانی اصابت توپ به میز پینگ‌پنگ با استفاده از یک میکروفون ارزان قیمت پرداخته شد. بدین منظور دو فضای ویژگی مجزا با استفاده از گشتاورهای آماری و انرژی ضرایب تبدیل موجک سیگنال صوتی استخراج گردید. روش نوین پیشنهادی به بانک داده صدای ایجاد شده اعمال گردید. بررسی نتایج در رابطه با مقادیر عددی حساسیت و پیش‌بینی مثبت به دست آمده نقاط مختلف نشان می‌دهد در هر دو مورد خوشه‌بندی ضربات و تعیین موقعیت آن‌ها نزدیک‌ترین نقطه به میکروفون دارای بالاترین مقادیر می‌باشد. قابل توجه است که افزایش فاصله نقاط از میکروفون لزوماً باعث کاهش کیفیت نتایج به دست آمده نگردیده است. مقایسه توانایی الگوریتم ارائه شده به دلیل در دسترس نبودن کار مشابه

1- Sensitivity  
2- Positive Predictivity

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] H. Nakatani, T. Hajzargarbashi, K. Ito, T. Kundu, N. Takeda, Locating point of impact on an anisotropic cylindrical surface using acoustic beamforming technique, *Key Engineering Materials*, Vol. 558, No. 2, pp. 331-340, 2013.
- [10] 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.
- [11] M. R. Gorman, W. H. Prosser, AE source orientation by plate wave analysis, 1991.
- [12] M. Surgeon, M. Wevers, One sensor linear location of acoustic emission events using plate wave theories, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 265, No. 1-2, pp. 254-261, 1999.
- [13] 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.
- [14] A. M. Ali, S. Asgari, T. C. Collier, M. Allen, L. Girod, R. E. Hudson, K. Yao, C. E. Taylor, D. T. Blumstein, An empirical study of collaborative acoustic source localization, *Journal of Signal Processing Systems*, Vol. 57, No. 3, pp. 415-436, 2009.
- [15] *Sniping at US Forces Beginning to Boomerang*, Accessed 5 May, 2015; <http://www.defenseindustrydaily.com/sniping-at-us-forces-beginning-to-boomerang-01128>.
- [16] K. F. Graff, *Wave motion in elastic solids*: Courier Dover Publications, 1975.
- [17] E. Dieulesaint, D. Royer, *Elastic waves in solids: applications to signal processing*: J. Wiley New York, 1980.
- [18] A. A. Mokhtari, A. Ohadi, H. Amindavar, Reconstructing the damage shape in aluminum plate using guided Lamb wave and polygon reconstruction technique in tomography, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 239-246, 2015. (In Persian)
- [19] V. Giurgiutiu, *Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors*: Academic Press, 2007.
- [20] D. C. C. Karen M. Holford, Acoustic Emission Source Location, *Key Engineering Materials* Vols. 167 - 168, No. 2, pp. 162-171, 1999.
- [21] 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 Persian)
- [22] M. N. R. Khamedi, Identification of effects of Nylon nanofibers in carbon-epoxy composite properties by Acoustic Emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 355-360, 2015. (In Persian)
- [23] M. R. Homaeinezhad, A. Ghaffari, M. Aghaee, H. N. Toosi, R. Rahmani, A high-speed C++/MEX solution for long-duration arterial blood pressure characteristic locations detection, *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 7, No. 2, pp. 151-172, 2012.
- [24] A. A. Golafshani, H. Khozein, Simulation, propagation and interaction of ultrasonic surface waves (WAVE LAMB) in order to detect fatigue cracks damages in connection with the oil platform in *ISAV 2012*, Iran, Tehran, 2012. (In Persian)
- [25] M. M. M. Pazhoohiyani, 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 Persian)

صورت نگرفته است. با توجه به آزمایش‌های تکمیلی در دست اقدام، امید است در آینده موفق به ارائه تحلیلی جامع‌تر گردیم.

## 5- فهرست علائم

$u$	جابجایی (m)
$C_p$	سرعت انتشار امواج فشاری ( $ms^{-1}$ )
$C_s$	سرعت انتشار امواج برشی ( $ms^{-1}$ )
$w$	فرکانس ( $rads^{-1}$ )
$k$	عدد موج
$TP$	تعداد ضربه صحیح تشخیص داده شده
$FN$	تعداد ضربه تشخیص داده نشده
$FP$	تعداد ضربه اشتباه تشخیص داده شده

## علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\mu$	ضریب لامه
$\lambda$	ضریب لامه
$k$	عدد موج
$\varphi$	تابع پتانسیل اسکار
$\vec{H}$	تابع پتانسیل برداری

## زیر نویس‌ها

$p$	فشار
SV	برش در صفحه عمودی
SH	برش در صفحه افقی
av	مقدار متوسط
vrc	واریانس
skw	چلیدگی
kts	کشیدگی

## 6- مراجع

- [1] S. A. Atashipour, H. R. Mirdamadi, R. Amirfatahi, S. Ziaeirad, Application of wavelet transform in damage identification in a thick steel beam based on ultrasonic guided wave propagation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 154-164, 2012. (In Persian)
- [2] K. V. Jata, T. Kundu, T. A. Parthasarathy, An introduction to failure mechanisms and ultrasonic inspection, *Advanced ultrasonic methods for material and structure inspection*, pp. 1-42, 2007.
- [3] A. K. Mal, F. Shih, S. Banerjee, Acoustic emission waveforms in composite laminates under low velocity impact, in *Proceeding of International Society for Optics and Photonics*, pp. 1-12.
- [4] W. Liu, J.-W. Hong, Modeling of three-dimensional Lamb wave propagation excited by laser pulses, *Ultrasonics*, Vol. 55, No. 1, pp. 113-122, 2015.
- [5] T. Kundu, Acoustic source localization, *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 1, pp. 25-38, 2014.