



## A Novel Method to Detect Location of the Sound Source with a High Accuracy Using Sound Sensors Array

Mohammadreza Shokrollahi<sup>1</sup> , Mohsen Tamaddon Khoshganab<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 09.12.2021

**Revised:** 05.05.2022

**Accepted:** 05.21.2022

**Keyword:**

Localization  
Source sound  
Sound sensors  
Time Difference of Arrival (TDOA)  
Microphone array

**\*Corresponding Author:**

Mohsen Tamaddon Khoshganab

**Email:** [mtamaddon@tvu.ac.ir](mailto:mtamaddon@tvu.ac.ir)

### ABSTRACT

Various research attempts have been investigated to navigate and locate source of the sound originated from the events such as firing, explosion and the human. Noting the importance of this subject in security and environmental protection organizations, a novel approach is presented to locate sound source with a higher accuracy and a lower response time. Conventionally, the proposed approach is based on the sound signal time difference of arrival (TDOA) received by a sound sensors array. The novelty is to use the simplified results of the deployed geometric equation system. Thanks to the special structure of the sensors array, without a need to the complicated mathematical calculations and a heavy processing, just by incorporating the values in the equations the required response is achieved with the highest accuracy and the lowest time. For the proof of the concept, a primary scheme which is based on a 3-microphone array is simulated. Due to the minor error (i.e., 0.12%), to detect the source with 100% probability a 4-microphone array is developed. Also, to confirm the effectiveness of the concept in the 3-D space, the scheme is extended to a 5-microphone array. The time delays readout error is proportional to the error of the detection of the target location, and this error is dependent on the quality and the specification of the utilized hardware. Alleviating the complexities in the conventional techniques, it decreases the process time and also the required hardware. Therefore, this method saves the implementation costs in the common applications.



**EXTENDED ABSTRACT**

**Introduction**

Accurate detection of sound source location has many applications such as automatic detection of a speaker in a conference for a better sound recording, interaction between a talking robot and the user, and detection of the shooter in a terrorist attack. Detection of impulsive sound source location such as source originated from an explosion is one of the most important applications. Various methods have been developed to detect the impulsive sound source location.

In this paper a new mathematical method based on trigonometric relations was developed to detect the location of impulsive sound source. The proposed techniques utilized an array of the sound sensors which took the advantage of the widely-used Time Difference of Arrival (TDOA) approach for the target detection. In the proposed method, the sounds' time difference of arrival to the microphones was measured and incorporated in the developed mathematical relations. Thus, an accurate location of the sound source was detected with a lower complexity. For the proof of the concept, a primary scheme based on a 3-microphone array was simulated. Due to minor error (i.e. 0.12%), to detect the source with 100% probability a 4-microphone array was developed. In addition, to confirm the effectiveness of the concept in 3-D space, the scheme was extended to a 5-microphone array. Alleviating the complexities in the conventional techniques, the proposed method decreased the process time and the required hardware.

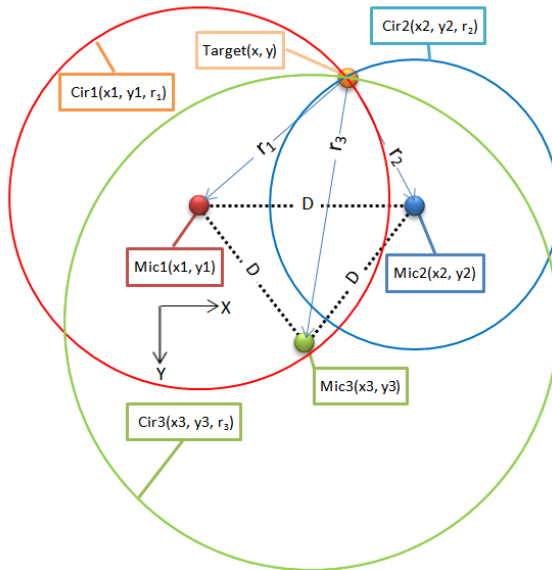
**Methodology**

For the detection of the sound source location on a 2-D surface, at least three microphones (sensors) are required. The concept of the target localization is shown in Figure 1. It is assumed that the 3 sensors are located in the corners of an equilateral triangle with a side length of  $D$ . The aim was to locate the coordinate of the target,  $(x,y)$ . Assuming the velocity of sound as  $V$  and the arrival time delay attributed to each sensor as  $d_1, d_2$  and  $d_3$ , it can be shown that the target position is calculated by solving Equation (1). Solving this, one can achieve the position of the target on a 2-D surface.

$$\begin{cases} x = Ar_1 + B \\ y = Cr_1 + D \end{cases}$$

(1) Where:

$$A = \frac{-d_2}{x_2} ; B = \frac{x_2^2 - d_2^2}{2x_2} ; C = \frac{x_3 d_2}{y_3 x_2} - \frac{d_3}{y_3} ; D = -\frac{d_3^2}{2y_3} + \frac{x_3^2}{2y_3} + \frac{y_3}{2} + \frac{x_3 x_2}{2y_3} + \frac{x_3 d_2^2}{2y_3 x_2}$$



**Figure 1. The concept of the target position detection based on a 3-microphone array.**

The simulation results show that there is a negligible error (i.e., 0.12%) in target detection in a 3-microphone array. To detect the source with 100% probability and also to further confirm the effectiveness of the proposed concept, the number of the sensors was increased. A 5-microphone array in a 3-D space is shown in Figure 2. In this scheme, microphone No. 5 was utilized to detect the height of the target. Following the proposed mathematical approach, the relations required to calculate the target coordinate (x,y,z) can be stated as Equation (2). Similar to the 3-microphone array, the points x and y, can be calculated using Equation (1). However, the height of the target position can be calculated solving Equation (3). Finally, to achieve the position of the target, Equation (4) should be numerically solved in accordance with (1)-(3).

$$(2) \quad \begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_3^2 \\ (x - x_5)^2 + (y - y_5)^2 + (z - z_5)^2 = r_5^2 \end{cases}$$

$$z = Er_1 + F$$

(3) Where:

$$E = \frac{-d_5}{z_5} ; \quad F = \frac{z_5^2 - d_5^2}{2z_5}$$

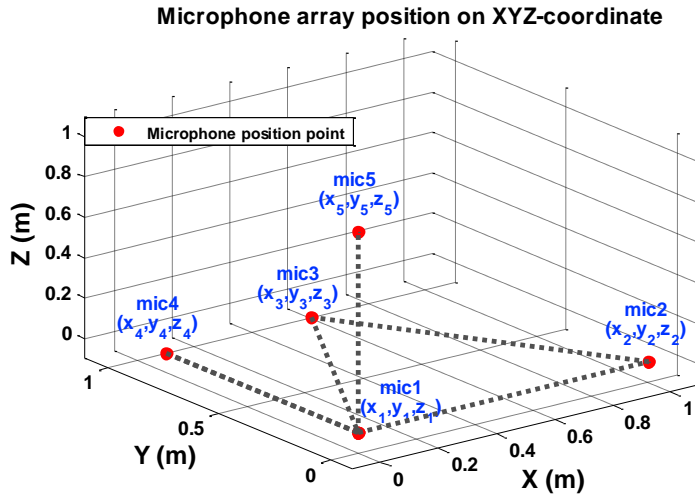


Figure 2. 5-microphone arrangement in a 3-D space

$$(4) \quad (A^2 + C^2 + E^2 - 1)r_1^2 + (2AB + 2CD + 2EF)r_1 + B^2 + D^2 + F^2 = 0$$

### Results and discussion

The simulation of a 5-microphone array scheme was performed in MATLAB with the space constraints as  $-200 < x, y < +200$ ,  $-5 < z < +30$  and the step size of 0.1. The simulation was carried out for more than 5 billion points in the space and the results are summarized in Table 1 for different cases. The simulation response time was also 0.006457 seconds for a PC with the following specifications: Intel, Core2 @ 2.80GHz. It was clear that increasing the number of the sensors and the 3-D space points during simulation led to target detection with 0% error. It should be noted that this significant achievement was gained with a lower response time and less hardware complexity thanks to the new developed mathematical method.

Table 1. Simulation results for a 5-microphone array scheme

Condition	# of points	# of correct points	# of incorrect points	Error %
all	5618808351	5618808351	0	0
$\Delta \geq 0$	5618804665	5618804665	0	0
$\Delta < 0$	3686	3686	0	0
$r_1 > 0$ & $r_1' \leq 0$	0	0	0	0
$r_1 \leq 0$ & $r_1' > 0$	3432829723	3432829723	0	0
$r_1 \leq 0$ & $r_1' \leq 0$	0	0	0	0
$r_1 > 0$ & $r_1' > 0$	2185974942	2185974942	0	0
$= r_1 \ r_1'$	3686	0	0	0

## **Conclusion**

In the present research, a novel approach was presented to locate sound sources with a higher accuracy and a lower response time. The proposed approach was based on the sound signal time difference of arrival (TDOA) received by a sound sensor array. The novelty of this approach was in using the simplified results of the deployed geometric equation system. Because of the special structure of the sensor array, without a need for complicated mathematical calculations and heavy processing, just by incorporating the values in the equations, the required response was achieved with the highest accuracy and the lowest time. For the proof of the concept, different schemes such as 3-, 4- and 5-microphone arrays were studied and extensive simulations were performed. Alleviating the complexities in the conventional techniques, the proposed approach decreased the processing time and also the required hardware. Therefore, this method saved the implementation costs in common applications.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



## ارائه روشی نوین در زمینه آشکارسازی مکان منبع صوت با دقت بالا با استفاده از آرایه حسگرهای صوتی

محمدرضا شکراللهی<sup>۱</sup>، محسن تمدن خشکناز<sup>۲\*</sup>

- ۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

تا به امروز تحقیقات زیادی در زمینه جهت‌یابی و مکان‌یابی منبع صدای تولیدی از مواردی مانند شلیک، انفجار و صدای انسان ارائه شده است. با توجه به اهمیت این موضوع در سازمان‌های مختلف امنیتی و محیط‌بانی، در این مقاله طرح جدیدی ارائه می‌گردد که در آن، مکان دقیق منبع تولید صدا، با دقت بسیار بالا و در کم‌ترین زمان تشخیص داده می‌شود. روش کار براساس تأخیر زمان ورود سیگنال صوتی به آرایه‌ای از حسگرهای صوتی است که یکی از روش‌های متداول می‌باشد. تفاوت روش پیشنهادی در این مقاله، استفاده از نتایج ساده‌شده حاصل از حل دستگاه روابط هندسی می‌باشد. با توجه به ساختار خاص آرایه حسگرها، روش پیشنهادی بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده و پردازش زیاد، تنها با یک جای‌گذاری ساده مقادیر در رابطه، پاسخ موردانتظار را در سریع‌ترین زمان و با بالاترین دقت محاسبه می‌کند. برای اثبات ایده پیشنهادی، طرح اولیه مبتنی بر آرایه‌ای از ۳ میکروفن شبیه‌سازی شده است. به دلیل وجود خطای حدود ۰.۱۲ درصدی در آن، برای آشکارسازی با احتمال ۱۰۰ درصد، طرح به آرایه ۴ میکروفنی و سپس برای اثبات کارایی ایده در فضای ۳ بعدی، به آرایه ۵ میکروفنی ارتقا یافت. اندازه خطای قرائت تأخیرهای زمانی، رابطه مستقیم با درصد و میزان خطای تشخیص مکان هدف دارد و اندازه خطا وابسته به کیفیت و کمیت سخت‌افزار مورد استفاده می‌باشد. این روش با کاهش پیچیدگی‌های متداول، باعث کاهش سخت‌افزار و زمان پردازش موردنیاز می‌گردد؛ از این رو استفاده از این روش می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی در کاربردهای مرسوم شود.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۳۱

### کلید واژگان:

مکان‌یابی  
منبع صوت  
حسگرهای صوتی  
تأخیر زمان ورود  
آرایه میکروفنی

\*نویسنده مسئول: محسن تمدن خشکناز

پست الکترونیکی:

[mtamaddon@tvu.ac.ir](mailto:mtamaddon@tvu.ac.ir)



## مقدمه

تشخیص مکان دقیق منبع تولید یک صدا، با توجه به نوع و ماهیت آن می‌تواند کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف داشته باشد. از جمله این موارد می‌توان به تشخیص خودکار سخنران در یک اجلاس برای صدابرداری بهتر، تعامل یک ربات با مخاطب خود هنگام گفتگو و تشخیص مکان یک تک‌تیرانداز در یک حمله تروریستی اشاره کرد. در میان انواع صداهای گوناگون، تشخیص مکان منبع صداهایی که به حالت انفجاری و ناگهانی و در لحظه‌ای کوتاه تولید می‌شوند (صدای تکانشی<sup>۱</sup>)، خود به یک دسته جداگانه تقسیم می‌شوند. تشخیص منبع وقوع این گونه صداهای کاربردی‌هایی چون یافتن محل اختفای تک‌تیرانداز، توپخانه دشمن، موقعیت شکارچیان غیرمجاز، انفجارهای ناخواسته در خطوط انتقال نفت و گاز استفاده می‌گردد [۱].

نخستین تحقیقات در این زمینه، در مورد تجزیه و تحلیل امواج صوتی بالاستیک در سال ۱۹۴۶ انجام پذیرفت و در سال ۱۹۷۱ به‌طور ویژه در مورد چگونگی انتشار صدای حاصل از شلیک یک تفنگ پژوهش‌هایی صورت گرفت [۲]. با گذشت زمان، این تحقیقات گسترش یافت و متناسب با نوع صدا و کاربری موردانتظار، روش‌های بسیاری برای تشخیص مکان منبع تولید صدا ارائه گردید. یکی از زیرشاخه‌های این تحقیقات، مربوط به تشخیص صداهای تکانشی مانند صدای حاصل از شلیک یک اسلحه یا یک انفجار می‌باشد. در این حیطه، نخستین پژوهش‌ها در زمینه مکان‌یابی توپخانه و ردیابی مسیر گلوله شلیک‌شده را دانشمندی به نام Reid در مرکز تحقیقات نیروی دریایی در سال ۱۹۷۵ انجام داد. پس از او در سال ۱۹۸۴ آقای Fischer و همکارانش برای نخستین بار از آرایه میکروفونی برای تخمین جهت ورود سیگنال‌های صوتی حاصل از شلیک تفنگ استفاده کردند [۳؛ ۴].

تا به امروز چندین روش مختلف در مقالات، پایان‌نامه‌ها و طرح‌های پژوهشی برای تخمین مکان منبع صدا ارائه گردیده است. همه این روش‌ها را در یک جمع‌بندی کلی می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد: اولین دسته براساس توان پاسخ هدایت‌شده<sup>۲</sup> کار می‌کند [۵]. عملکرد دسته دوم براساس ویژگی‌های مشتق‌شده از یک طیف صوتی با وضوح بالا می‌باشد و می‌توان نمونه‌هایی مانند LPC<sup>۳</sup>، MFCC<sup>۴</sup>، انرژی طیفی، توصیف MPEG-۷، ویژگی‌های طیف‌سنجی [۶] و MUSIC [۷] را از جمله موارد پژوهش‌شده در این دسته نام برد. دسته دیگر براساس اختلاف زمان ورود (TDOA<sup>۵</sup>) سیگنال صوتی کار می‌کنند [۸]. خود این روش نیز مشتمل بر زیرشاخه‌های مختلفی از جمله روش‌های همبستگی متقابل کلاسیک<sup>۶</sup>، خانواده روش‌های همبستگی متقابل

---

<sup>1</sup> Impulsive sound

<sup>2</sup> Steered Response Power

<sup>3</sup> Linear Predictive Coding

<sup>4</sup> Mel-Frequency Cepstral Coefficients

<sup>5</sup> Multiple Signal Classification

<sup>6</sup> Time Difference of Arrival

<sup>7</sup> CC; Classical Cross-Correlation

تعمیم یافته<sup>۱</sup>، تبدیل هم‌دوسی هموار شده<sup>۲</sup> و تبدیل فاز<sup>۳</sup>، روش پیش‌بینی خطی فضایی<sup>۴</sup>، ضریب هم‌بستگی متقابل چندکاناله<sup>۵</sup> و فنون ویژه بردار پایه<sup>۶</sup> می‌باشد [۹].

همگی این روش‌ها به‌خصوص دسته اول و دوم نیازمند استفاده از روابط ریاضی پیچیده و در نتیجه حجم زیاد پردازش تا رسیدن به پاسخ می‌باشد. با توجه به نوع کاربری این‌گونه سامانه‌ها در صنایع نظامی و امنیتی، سرعت و دقت تشخیص بسیار مهم می‌باشد. در بسیاری از مقالات TDOA یک روش استاندارد برای مکان‌یابی به‌صورت منفعل معرفی می‌شود [۱۰]. در این مقاله، روش جدیدی براساس TDOA ارائه می‌گردد که می‌تواند با سرعت بسیار بالا مکان منبع صوت را تشخیص دهد.

عملیات مکان‌یابی به روش TDOA براساس اختلاف زمانی دریافت سیگنال صوتی توسط حسگرها و سپس رسیدن به موقعیت مکانی منبع صوتی از روی رابطه بین این زمان‌ها و چیدمان فیزیکی حسگرها کار می‌کند. بر این اساس این روش به دو بخش کلی محاسبه تأخیر زمان‌های دریافت سیگنال توسط حسگرها نسبت به یکدیگر و محاسبه مکان منبع از روی این زمان‌ها تقسیم می‌شود. بخش اول به‌نوبه خود انواع مختلفی دارد که طبق تحقیقات انجام‌گرفته روش تبدیل فاز یکی از بهترین روش‌ها برای ثبت اختلاف زمانی دریافت سیگنال‌ها توسط حسگرها به‌ویژه در محیط‌های نویزی به‌شمار می‌رود [۱۱-۱۳]. روش‌های موجود در بخش دوم نیز معمولاً به دو روش مثلثاتی و هذلولوی تقسیم می‌شوند.

یکی از تازه‌ترین روش‌ها، ترکیب روش TDOA با AOA<sup>۷</sup> است که نتیجه آن تبدیل روابط به‌صورت خطی است و باعث کاهش حجم پردازش می‌گردد [۱۴]. در روشی دیگر روش TDOA با حداقل مربعات وزنی (WLS<sup>۸</sup>) و الگوریتم Firefly ترکیب شده است [۱۵]. مقاله‌ای دیگر، حداقل مربعات وزنی را به همراه محدودیت صفحه مماس مخروطی برای موقعیت هذلولوی در نظر می‌گیرد [۱۶]. این روش، محدوده بین منبع و حسگر مرجع را به‌عنوان یک بعد اضافه می‌کند. در طرحی دیگر روش TDOA با استفاده از ضریب همبستگی و حداکثر اصلاح‌شده عملکرد توزین احتمال مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. شبکه‌های عصبی عمیق DNN<sup>۹</sup> می‌توانند با کمک روش TDOA بیایند تا از طریق یادگیری نظارت‌شده زمان‌های ورود سیگنال صوتی مرتبط با گفتار را نسبت به روش‌های سنتی مبتنی بر همبستگی استخراج کنند [۱۸]. به‌منظور بهبود دقت مکان‌یابی در شرایط پر سروصدا، الگوریتم دیگری مبتنی بر تئوری فاصله اقلیدسی، برای دستیابی به نتایج پایدار و دقیق ساخته شده است [۱۹].

این مقاله به بخش دوم روش TDOA می‌پردازد و با این فرض که اختلاف زمانی بین سیگنال‌های صوتی دریافت‌شده از حسگرها موجود می‌باشد (بخش اول)، روش کاملاً جدیدی را براساس روش مثلثاتی برای رسیدن به مکان دقیق منبع صوتی معرفی می‌کند. در واقع در این طرح تنها کافی‌ست با استفاده از یکی از روش‌های موجود،

<sup>1</sup> GCC; Generalized Cross-Correlation

<sup>2</sup> SCOT; Smoothed Coherence Transform

<sup>3</sup> PHAT; Phase Transform

<sup>4</sup> Spatial Linear Prediction Method

<sup>5</sup> Multi channel Cross-Correlation Coefficient

<sup>6</sup> Eigenvector-based techniques

<sup>7</sup> Angle Of Arrival

<sup>8</sup> Weighted Least Squares

<sup>9</sup> Deep Neural Networks



اختلاف زمانی بین رسیدن سیگنال صوتی به میکروفن‌ها محاسبه شود و به‌عنوان ورودی به آن داده شود. سپس با یک عملیات ساده و کم‌حجم ریاضی، پاسخ دقیق موقعیت منبع صوت ساخته خواهد شد.

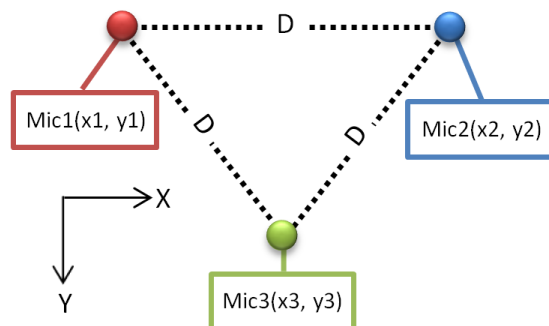
در ادامه مقاله ابتدا طرح پیشنهادی با آرایه‌ای متشکل از ۳ میکروفن، در یک محیط دوبعدی، ارائه و سپس نتایج شبیه‌سازی بررسی می‌گردد. نتایج به‌دست آمده، وجود درصد کمی خطا در برخی از نقاط خاص صفحه را نشان می‌دهد؛ از این رو با توجه به وجود این خطاها، در مرحله بعد با هدف حذف آن، یک میکروفن دیگر به آرایه موجود اضافه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی، حاکی از تشخیص ۱۰۰ درصدی نقاط هدف در محیط آزمون می‌باشد. سپس طرح پیشنهادی با افزودن یک میکروفن دیگر برای استفاده در فضای سه‌بعدی ارتقا می‌یابد. تشخیص ۱۰۰ درصدی نقاط هدف و بدون خطا، حاصل اجرای شبیه‌سازی در یک فضای مشخص برای این طرح می‌باشد که صحت عملکرد آن را تأیید می‌کند.

### روش مکان‌یابی پیشنهادی

برای رسیدن به هدف نهایی یعنی مکان‌یابی منبع صوت تکانشی در کل فضا، ابتدا مکان‌یابی یک منبع صوتی فرضی در یک سطح دوبعدی آغاز می‌شود و پس از تجزیه و تحلیل آن، محیط به کل فضا تعمیم می‌یابد. در تمامی مراحل فرض می‌شود که سرعت صوت ثابت است و اختلاف زمانی‌های بین سیگنال‌های صوتی دریافت‌شده از منبع صوتی توسط حسگرها، در اختیار می‌باشد.

### مکان‌یابی در سطح با ۳ میکروفن

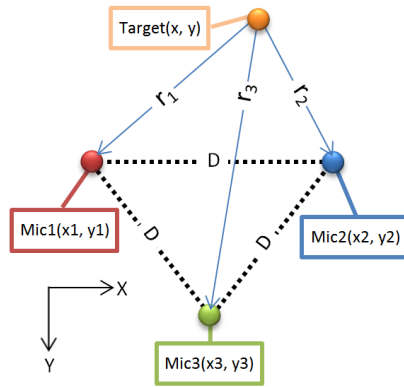
برای تعیین مکان‌یابی به روش تأخیر زمانی در یک سطح دوبعدی، وجود حداقل سه میکروفن الزامی می‌باشد. در طرح ارائه‌شده، این سه میکروفن به‌صورت یک مثلث متساوی‌الاضلاع به طول  $D$  مطابق شکل ۱ فرض می‌گردند. برای راحتی در محاسبات، میکروفن شماره ۱ در مبدأ مختصات فرض می‌گردد؛ بنابراین مختصات میکروفن‌ها به‌صورت رابطه (۱) محاسبه خواهد شد.



شکل ۱. موقعیت آرایه ۳ تایی میکروفن‌ها در صفحه

$$\begin{cases} (x_1, y_1) = (0, 0) \\ (x_2, y_2) = (D, 0) \\ (x_3, y_3) = \left( \frac{D}{2}, \sqrt{D^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه حرکت خطی یعنی  $x = vt$ ،  $v$  را سرعت صوت در نظر گرفته می‌شود و زمانی را که یک سیگنال صوتی از منبع خود به مقصدی با فاصله  $x$  طی می‌کند،  $t$  نامیده می‌شود. حال فرض می‌شود که در سطح دو بعدی مفروض، در نقطه  $(x, y)$  Target مطابق شکل ۲ یک منبع صوت تولید صدای تکانشی کند.



شکل ۲. موقعیت منبع صوت نسبت به آرایه میکروفن‌ها

فاصله این نقطه نسبت به سه میکروفن  $r_1$ ،  $r_2$  و  $r_3$  نامیده می‌شود؛ از این رو با توجه به اختلاف احتمالی بین مقادیر این فاصله‌ها، بدیهی است که یک تأخیر زمانی بین دریافت سیگنال صوتی توسط حسگرها نسبت به هم ایجاد خواهد شود. این تأخیر زمانی متناسب با شماره هر حسگر  $t_1$ ،  $t_2$  و  $t_3$  نامیده می‌شود که البته به نزدیک‌ترین حسگر زمان صفر منسوب خواهد شد. در روابط (۲) و (۳)، پارامتر  $d$  اختلاف بین دو مقدار  $r$  می‌باشد.

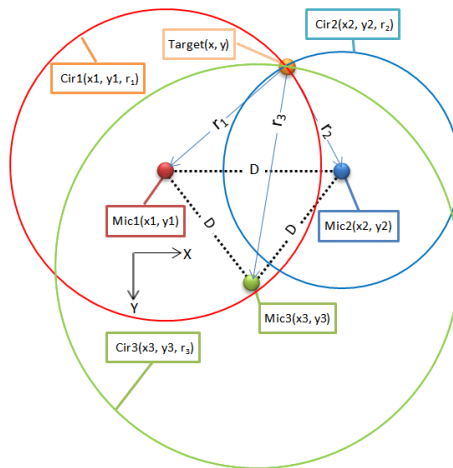
$$d_2 = (t_2 - t_1) \times V \quad (2)$$

$$d_3 = (t_3 - t_1) \times V \quad (3)$$

$$d_2 = r_2 - r_1 \quad (4)$$

$$d_3 = r_3 - r_1 \quad (5)$$

با توجه به فرض اولیه مبنی بر مشخص بودن مقدار تأخیرهای زمانی و نیز سرعت صوت در محیط، می‌توان مقادیر  $d_3$  و  $d_2$  را محاسبه کرد (روابط (۲) و (۳)) و سپس طبق روابط (۴) و (۵) نسبت بین مقادیر  $r_1, r_2$  و  $r_3$  به دست آورد. فرض مسئله بر این است که مختصات نقطه Target در اختیار نمی‌باشد و به دنبال یافتن آن هستیم. تنها داده‌های مسئله، روابط بین  $r_1, r_2$  و  $r_3$  می‌باشد که با توجه به داده‌های اختلاف زمانی از روابط (۲) تا (۵) به دست آمده است. پس باید برای هر میکروفن به دنبال نقاطی در صفحه باشیم که فاصله آن‌ها از مختصات میکروفن برابر  $r$  مربوط به خودش باشد و این یعنی یک دایره به مبدأ هر میکروفن و شعاع  $r$  مرتبط با خودش. با رسم سه دایره مذکور برای میکروفن‌ها، مطابق شکل ۳، باید این سه دایره در نقطه Target با یکدیگر تلاقی داشته باشند. رابطه (۶) معادله این سه دایره را نشان می‌دهد که طبق توضیحات با حل آن به عنوان یک دستگاه، محل تلاقی این سه دایره که همان مختصات نقطه Target نیز می‌باشد، به دست خواهد آمد.



شکل ۳. محل تلاقی سه دایره دستگاه رابطه (۶)

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (6)$$

برای حل دستگاه رابطه (۶) ابتدا با توجه به مختصات هر میکروفن که در رابطه (۱) به آن اشاره شد، رابطه بازنویسی شده و حاصل آن دستگاه (۷) خواهد شد.

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + y^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (7)$$

با جای‌گذاری رابطه اول دستگاه (۷) در رابطه (۲) و (۳) و سپس ساده‌سازی روابط می‌توان مقادیر  $x$  و  $y$  یعنی موقعیت هدف را به صورت رابطه (۸) نوشت.

$$\begin{cases} x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + x_2^2}{2x_2} \\ y = \frac{r_1^2 - r_2^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2xx_3}{2y_3} \end{cases} \quad (۸)$$

در رابطه اول دستگاه (۸) مقدار  $r_2$  با استفاده از رابطه (۴)، با  $r_1 + d_2$  جایگزین می‌شود و به صورت رابطه دستگاه (۹) بازنویسی می‌گردد.

$$\begin{cases} x = Ar_1 + B \\ A = \frac{-d_2}{x_2} \\ B = \frac{x_2^2 - d_2^2}{2x_2} \end{cases} \quad (۹)$$

با جای‌گذاری مقدار  $x$  از رابطه اول دستگاه (۸) در رابطه دوم آن و نیز جای‌گذاری مقدار  $r_1 + d_3$  به جای  $r_3$  از رابطه (۵)، این رابطه به صورت دستگاه (۱۰) بازنویسی می‌شود.

$$\begin{cases} y = Cr_1 + D \\ C = \frac{x_3 d_2}{y_3 x_2} - \frac{d_3}{y_3} \\ D = -\frac{d_3^2}{2y_3} + \frac{x_3^2}{2y_3} + \frac{y_3}{2} + \frac{x_3 x_2}{2y_3} + \frac{x_3 d_2^2}{2y_3 x_2} \end{cases} \quad (۱۰)$$

حال، رابطه‌های اول از سه دستگاه (۷)، (۹) و (۱۰) را در دستگاه رابطه (۱۱) بازنویسی می‌کنیم. با جای‌گذاری مقادیر  $x$  و  $y$  از رابطه دوم و سوم، رابطه (۱۱) در رابطه اول آن و سپس مرتب کردن آن، رابطه (۱۲) که یک معادله درجه دوم برحسب  $r_1$  می‌باشد، حاصل می‌گردد. در این رابطه  $A, B, C$  و  $D$  اعداد ثابتی می‌باشند که براساس مختصات میکروفن‌ها و مقادیر  $d_2$  و  $d_3$  که از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند، محاسبه می‌گردند.

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r_1^2 \\ x = Ar_1 + B \\ y = Cr_1 + D \end{cases} \quad (۱۱)$$

$$(A^2 + C^2 - 1)r_1^2 + (2AB + 2CD)r_1 + B^2 + D^2 = 0 \quad (۱۲)$$

با حل این معادله از طریق روش دلتا، مقدار  $r_1$  به دست آمد و با جای‌گذاری در رابطه دوم و سوم دستگاه شماره (۱۱)، مختصات نقطه Target یعنی  $(x, y)$  به دست می‌آید. اما می‌دانیم طبق رابطه (۱۳) که همان روش دلتا برای حل معادله درجه دوم می‌باشد، دو جواب مثل  $r_1'$  و  $r_1$  تولید خواهد شد. اما کدام جواب صحیح است؟

$$r_1, r_1' = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \quad (۱۳)$$

در صورتی که مقدار دلتا برابر صفر شود، رابطه (۱۳) تنها یک جواب دارد (ریشه مضاعف) و همان مقدار صحیح است. اما نکته مهم در حل این معادله، حالاتی است که مقدار دلتای معادله مخالف صفر شود و این معادله دارای دو جواب برای  $r_1$  گردد. با توجه به اطمینان از صحت عملکرد رابطه به دست آمده، مدعی هستیم که این معادله نباید دارای دو پاسخ منفی باشد؛ زیرا در این حالت، معادله نتوانسته جوابی برای مسئله بیابد. همچنین در حالت دلتا مساوی صفر نیز پاسخ باید مثبت شود. این دو ادعا در شبیه‌سازی بررسی می‌شود.

بدیهی است که در زمان تولید یک پاسخ مثبت و یک پاسخ منفی، پاسخ مثبت به‌عنوان پاسخ صحیح برای  $r_1$  در نظر گرفته می‌شود و باید ما را به نقطه هدف برساند. اما هنگامی که معادله دو پاسخ با علامت مثبت برای  $r_1$  تولید کند، با توجه به رابطه (۱۳)، کدام مقدار  $r_1$  و  $r_1'$  صحیح است؟ برای این سؤال در این قسمت، پاسخ روشنی وجود ندارد و با توجه به نیاز به پاسخ مثبت برای  $r_1$ ، تنها به انتخاب علامت مثبت جذر در رابطه (۱۳) بسنده می‌کنیم. در ادامه ابتدا شبیه‌سازی انجام شد تا ادعاهای مطرح شده بررسی گردد، سپس در بخش بعدی، برای رفع این مشکل، تغییراتی در طرح ارائه خواهد شد.

### شبیه‌سازی مکان‌یابی در سطح با ۳ میکروفن

برای تحلیل بیشتر این مورد، شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب انجام پذیرفت. محیطی در محدوده  $-۳۰۰$  تا  $+۳۰۰$  در هر دو محور  $x$  و  $y$  و با گام افزایش  $۰.۱$ ، توسط نرم‌افزار جاروب گردید. به این صورت که به‌ازای هر نقطه از این محیط، مقادیر  $t_1$ ،  $t_2$  و  $t_3$  محاسبه و به‌عنوان ورودی به معادلات داده می‌شود. اندازه  $D$  در شکل ۱ نیز برابر ۱ انتخاب می‌گردد. در کدهای برنامه هنگام محاسبه  $r_1$ ، در صورتی که مقدار  $\Delta \leq 0$  شود، آن را صفر می‌کند و مقدار  $r_1$  حساب می‌شود. هنگامی که مقدار  $\Delta > 0$  شود، اگر فقط یکی از پاسخ‌ها بزرگ‌تر از صفر باشد، آن را انتخاب می‌کند و در صورتی که هر دو پاسخ بزرگ‌تر از صفر شوند، با استناد به نیاز به پاسخ مثبت، از علامت جمع در رابطه (۱۳) استفاده می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی در جدول ۱ نمایش داده شده است.

همان‌طور که در این جدول نمایش داده شده، بیش از ۳۶ میلیون نقطه در سطح مذکور مورد شبیه‌سازی قرار گرفته که تنها حدود ۴۱ هزار نقطه دارای خطا می‌باشد که البته همگی آن‌ها در حالت  $\Delta > 0$  و با دو پاسخ بزرگ‌تر از صفر اتفاق افتاده است. اگرچه درصد خطا در همین شرایط نیز تنها حدود یک‌هزارم می‌باشد ولی برای حذف همین نقاط کم‌خطا باید روی این نقاط بررسی و تحلیل بیشتری صورت پذیرد.

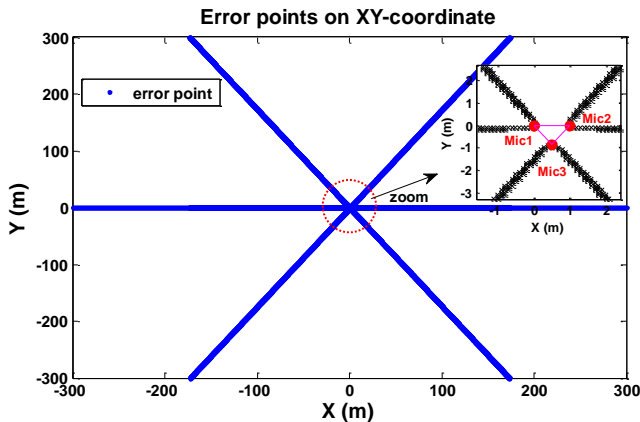
اولین تحلیل اینکه انتخاب  $r_1$  (علامت مثبت) در رابطه (۱۳) در هنگامی که هر دو پاسخ، مثبت است، انتخاب درستی بوده است. دومین مورد این‌که استفاده از  $r_1'$  (علامت منفی) در نقاط خطا، باعث رسیدن به پاسخ صحیح خواهد شد. در ادامه با هدف حذف نقاط خطا و تحلیل بیشتر آن‌ها، این نقاط روی شکل ۴ رسم می‌گردند. با نگاهی به تصویر این نقاط می‌توان فهمید که همگی این نقاط در راستای امتداد اضلاع مثلث فرضی بین میکروفن‌ها قرار دارند.

جدول ۱. نتایج شبیه‌سازی آرایه سه میکروفنی

درصد خطا	تعداد نقاط غلط	تعداد نقاط صحیح	تعداد کل نقاط	شرایط حل معادله
۰.۱۲	۴۱،۸۴۷	۳۵،۹۷۰،۱۵۴	۳۶،۰۱۲،۰۰۱	همه حالات
۰.۱۲	۴۱،۸۴۷	۳۵،۹۶۷،۱۳۴	۳۶،۰۰۸،۹۸۱	$\Delta > 0$
.	.	۲	۲	$\Delta = 0$

درصد خطا	تعداد نقاط غلط	تعداد نقاط صحیح	تعداد کل نقاط	شرایط حل معادله
.	.	۳,۰۱۸	۳,۰۱۸	$\Delta < 0$
.	.	.	.	$r_1 > 0$ & $r_1' \leq 0$
.	.	۱۸,۰۲۱,۰۶۸	۱۸,۰۲۱,۰۶۸	$r_1 \leq 0$ & $r_1' > 0$
.	.	.	.	$r_1 \leq 0$ & $r_1' \leq 0$
۰.۱۲	۴۱,۸۴۷	۱۷,۹۴۶,۰۶۶	۱۷,۹۸۷,۹۱۳	$r_1 > 0$ & $r_1' > 0$
.	.	۳,۰۲۰	۳,۰۲۰	$r_1' = r_1$

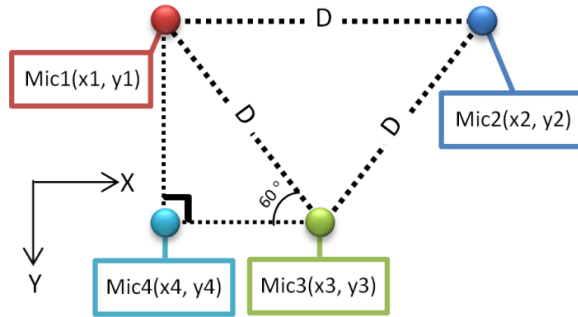
با بررسی بیشتر این نتیجه حاصل گردید که هر نقطه روی شکل ۴، دارای یک نقطه متشابه در همین محدوده نقاط می باشد که برای هر دو نقطه، مقادیر  $t_1$ ،  $t_2$  و  $t_3$  و در نتیجه  $d_2$  و  $d_3$  آن ها با هم برابر هستند. برای مثال دو نقطه (۵۶,۳۶) و (۳,۴۲۷, ۴,۵۹۸) این شرایط را دارند؛ از این رو نمی توان هنگام استفاده از روابط تشخیص داد که کدام یک از این نقاط صحیح است و خطای این روش همان حدود یک هزارم می باشد.



شکل ۴. نقاط منجر به خطا در صفحه مورد نظر

#### مکان یابی در سطح با ۴ میکروفن

به منظور تشخیص نقاط تولیدکننده خطا در طرح آرایه سه میکروفنی، یک حسگر دیگر مطابق شکل ۵ به عنوان چهارمین حسگر به آرایه حسگرها اضافه می گردد. به طور مشابه برای این حسگر، تأخیر زمانی دریافت سیگنال ( $t_4$ ) و اختلاف فاصله نسبت به میکروفن شماره یک ( $d_4$ ) طبق روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می شود. از این مقادیر هنگامی که شرایط معادله (۱۲) در حالت  $\Delta > 0$  و با دو پاسخ مثبت است (یعنی همان شرایطی که امکان تولید خطای تشخیص وجود داشت)، استفاده خواهد شد. بدین صورت که در این شرایط،  $(x, y)$  موقعیت هدف با استفاده از هر دو پاسخ مثبت محاسبه می گردد. سپس با استفاده از رابطه (۱۴)، مقدار  $d_4$  مجدد محاسبه می شود و هر کدام از پاسخها که به پاسخ به دست آمده از رابطه (۱۵) نزدیک تر باشد، به عنوان پاسخ صحیح انتخاب خواهد شد. در واقع حسگر چهارم نقش یک داور برای انتخاب پاسخ صحیح بین دو پاسخ مثبت را ایفا می کند.



شکل ۵. موقعیت آرایه ۴ تایی میکروفن‌ها در صفحه

$$d_4 = (t_4 - t_1) \times V \quad (14)$$

$$d_4 = r_4 - r_1 \quad (15)$$

### شبیه‌سازی مکان‌یابی در سطح با ۴ میکروفن

برای بررسی صحت طرح با آرایه چهار میکروفنی، شبیه‌سازی با همان شرایط انجام شده در بخش «شبیه‌سازی مکان‌یابی در سطح با ۳ میکروفن»، این شبیه‌سازی تکرار می‌گردد. نتایج به‌دست آمده در جدول ۲ نشان می‌دهد که حسگر چهارم توانسته است با موفقیت نقاط خطا را حذف کند و درصد خطا صفر شود.

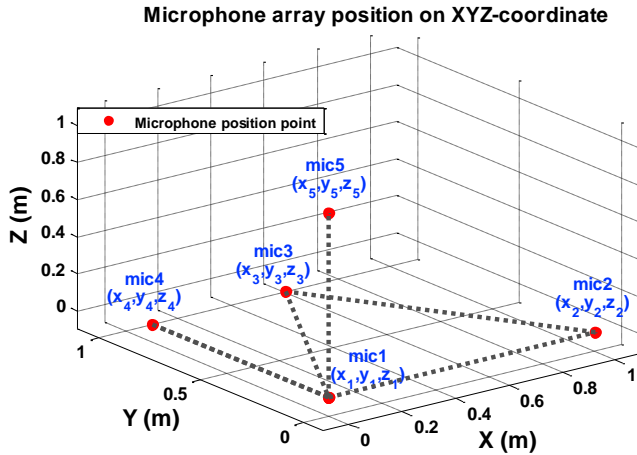
جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی آرایه چهار میکروفنی

درصد خطا	تعداد نقاط غلط	تعداد نقاط صحیح	تعداد کل نقاط	شرایط حل معادله
.	.	۳۵,۹۷۰,۱۵۴	۳۶,۰۱۲,۰۰۱	همه حالات
.	.	۳۵,۹۶۷,۱۳۶	۳۶,۰۰۸,۹۸۳	$\Delta \geq 0$
.	.	۳,۰۱۸	۳,۰۱۸	$\Delta < 0$
.	.	.	.	$r_1 > 0 \ \& \ r'_1 \leq 0$
.	.	۱۸,۰۲۱,۰۶۸	۱۸,۰۲۱,۰۶۸	$r_1 \leq 0 \ \& \ r'_1 > 0$
.	.	.	.	$r_1 \leq 0 \ \& \ r'_1 \leq 0$
.	.	۱۷,۹۴۶,۰۶۶	۱۷,۹۸۷,۹۱۳	$r_1 > 0 \ \& \ r'_1 > 0$
.	.	۳,۰۲۰	۳,۰۲۰	$r'_1 = r_1$

### مکان‌یابی در فضا با ۵ میکروفن

در ادامه برای ارتقای کاربری طرح از یک سطح دوبعدی به فضای سه‌بعدی، مطابق شکل ۶ از یک آرایه میکروفنی با ۵ حسگر استفاده می‌گردد. در این آرایه، موقعیت هر چهار میکروفن طرح قبلی، ثابت است و میکروفن پنجم با هدف

تشخیص ارتفاع در فضا واقع می‌شود. رابطه (۱۶) مختصات میکروفن‌ها در فضا را نشان می‌دهد. مشابه طرح قبلی میکروفن شماره ۱ در مبدأ مختصات فرض گردیده است.



شکل ۶. موقعیت آرایه ۵ تایی میکروفن‌ها در فضا

$$\begin{cases} (x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0) \\ (x_2, y_2, z_2) = (D, 0, 0) \\ (x_3, y_3, z_3) = \left(\frac{D}{2}, -\sqrt{0.75D^2}, 0\right) \\ (x_4, y_4, z_4) = (0, y_3, 0) \\ (x_5, y_5, z_5) = (0, 0, D) \end{cases} \quad (16)$$

مشابه طرح قبلی علاوه بر روابط (۲) تا (۵)، روابط (۱۷) تا (۲۰) برای محاسبه اختلاف فاصله میکروفن‌ها نسبت به یکدیگر تا منبع صوت نوشته می‌شود. در این حالت نیز نزدیک‌ترین میکروفن به هدف دارای اندازه تأخیر زمانی صفر خواهد شد.

$$d_4 = r_4 - r_1 \quad (17)$$

$$d_5 = r_5 - r_1 \quad (18)$$

$$d_4 = (t_4 - t_1) \times V \quad (19)$$

$$d_5 = (t_5 - t_1) \times V \quad (20)$$



مشابه آنچه در بخش «مکان‌یابی در سطح با ۳ میکروفن» انجام شد روابط مربوط به اختلاف فواصل و فاصله‌های زمانی باید بازنویسی می‌شود. نقطه هدف در سطح دوبعدی از تلاقی سه دایره موجود در رابطه (۶) به دست می‌آید. در این حالت که فضای سه‌بعدی است، به جای دایره از کره استفاده می‌شود و به جای ۳ معادله از ۴ معادله استفاده می‌گردد. پس به‌طور مشابه دستگاه (۲۱) برای آن نوشته می‌شود.

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = r_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = r_2^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = r_3^2 \\ (x-x_5)^2 + (y-y_5)^2 + (z-z_5)^2 = r_5^2 \end{cases} \quad (21)$$

همانند روش ساده‌سازی که در آن بخش صورت پذیرفت، رابطه (۲۱) با استفاده از روابط (۴)، (۵)، (۱۷) و (۱۸) ساده می‌شود و مختصات منبع صوت یعنی  $(x, y, z)$  از روابط (۹)، (۱۰) و (۲۲) به‌صورت پارامتری محاسبه می‌گردد. در این رابطه‌ها  $A, B, C, D, E$  و  $F$  اعداد ثابتی هستند که براساس مختصات میکروفن‌ها و مقادیر  $d_2$  تا  $d_5$  که از روابط (۲)، (۳)، (۱۹) و (۲۰) به‌دست می‌آیند، محاسبه می‌گردند.

$$\begin{cases} z = Er_1 + F \\ E = \frac{-d_5}{z_5} \\ F = \frac{z_5^2 - d_5^2}{2z_5} \end{cases} \quad (22)$$

سرانجام برای رسیدن به پاسخ نهایی موقعیت منبع صوت، باید معادله (۲۳) را که به روش مشابه رابطه (۱۱) به دست می‌آید، حل شود.

$$(A^2 + C^2 + E^2 - 1)r_1^2 + (2AB + 2CD + 2EF)r_1 + B^2 + D^2 + F^2 = 0 \quad (23)$$

تمامی تحلیل‌های مذکور در بخش ۰ برای مقادیر  $\Delta$  و پاسخ‌های معادله، در اینجا نیز برقرار است؛ بنابراین بدون توضیح بیشتری برای بررسی صحت کار باید عملیات شبیه‌سازی صورت پذیرد.

### شبیه‌سازی مکان‌یابی در فضا با ۵ میکروفن

با توجه به ارتقای محیط شبیه‌سازی از سطح به فضا، در صورتی که ابعاد فضای مورد شبیه‌سازی بخواهد مشابه قبل برای هر سه بعد باشد، تعداد نقاط موردآزمون بسیار افزایش می‌یابد و فرایند شبیه‌سازی را زمان‌بر می‌کند؛ از این رو این فضا را متناسب با یک محیط واقعی فرض می‌کنیم و بعد ارتفاع را کوچک‌تر در نظر می‌گیریم. به همین منظور برای هر دو محور  $x$  و  $y$  محدوده  $-200$  تا  $200$  و برای محور  $z$  محدوده  $-5$  تا  $30$  و همگی با گام افزایش  $0.1$  در نظر گرفته می‌شود. سایر نکات مشابه بخش «شبیه‌سازی مکان‌یابی در سطح با ۳ میکروفن» می‌باشد. این شبیه‌سازی برای

بیش از پنج میلیارد نقطه در فضا انجام پذیرفته و نتیجه آن در جدول ۳ نمایش داده شده است. نتایج بیانگر صحت سددردی این طرح در تشخیص موقعیت منبع در فضای موردآزمون می‌باشد.

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی آرایه پنج میکروفنی

درصد خطا	تعداد نقاط غلط	تعداد نقاط صحیح	تعداد کل نقاط	شرایط حل معادله
.	.	۵,۶۱۸,۸۰۸,۳۵۱	۵,۶۱۸,۸۰۸,۳۵۱	همه حالات
.	.	۵,۶۱۸,۸۰۴,۶۶۵	۵,۶۱۸,۸۰۴,۶۶۵	$\Delta \geq 0$
.	.	۳,۶۸۶	۳,۶۸۶	$\Delta < 0$
.	.	.	.	$r_1 > 0$ & $r_1' \leq 0$
.	.	۳,۴۳۲,۸۲۹,۷۲۳	۳,۴۳۲,۸۲۹,۷۲۳	$r_1 \leq 0$ & $r_1' > 0$
.	.	.	.	$r_1 \leq 0$ & $r_1' \leq 0$
.	.	۲,۱۸۵,۹۷۴,۹۴۲	۲,۱۸۵,۹۷۴,۹۴۲	$r_1 > 0$ & $r_1' > 0$
.	.	.	۳,۶۸۶	$r_1' = r_1$

### زمان رسیدن به پاسخ در مکان‌یابی در فضا با ۵ میکروفن

برای اندازه‌گیری زمان اجرای محاسبات موردنیاز با هدف رسیدن به موقعیت هدف، ابتدا لازم است تا میزان تأخیرهای زمانی یک موقعیت هدف فرضی نسبت به حسگرهای آرایه محاسبه گردد و به‌عنوان ورودی اولیه به برنامه داده شود. برای نمونه موقعیت هدف با مختصات (۲,۳,۴) در نظر گرفته می‌شود. زمان‌های محاسبه شده برحسب ثانیه به شرح زیر می‌باشد:

$$t_1 = 0.002043379550915 \text{ sec}$$

$$t_2 = 0 \text{ sec}$$

$$t_3 = 0.002632164216615 \text{ sec}$$

$$t_4 = 0.001548124333234 \text{ sec}$$

$$t_5 = 0.001201775746380 \text{ sec}$$

زمان اجرای محاسبات برای رسیدن به موقعیت هدف یعنی (۲,۳,۴) با دو سخت‌افزار لپ‌تاپ و میکروکنترلر اندازه‌گیری شد و نتایج به شرح جدول می‌باشد.

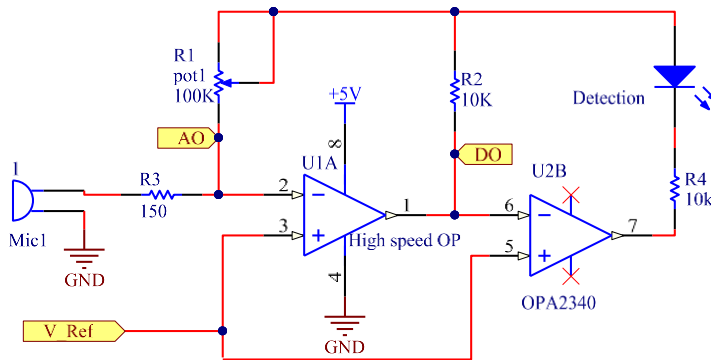
جدول ۴. نتایج اندازه‌گیری زمان اجرای برنامه آرایه پنج میکروفنی

سخت‌افزار	مشخصات پردازنده	نرم‌افزار	دقت اندازه‌گیری	زمان محاسبه شده
لپ‌تاپ	Intel, Core2 @ 2.80GHz	MATLAB V: ۸.۱	۱ us	۰.۰۰۰۶۴۵۷
میکروکنترلر	ARM, Cortex-M3 @ 72MHz	Keil u ۴.۶	۱۰ us	۰.۰۰۰۱۲۰

## راهکار پیشنهادی عملی

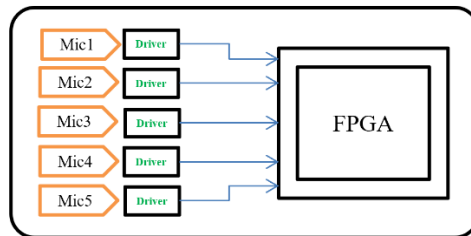
برای ساخت عملیاتی این طرح، لازم است تا در ابتدا یک سازه بسیار دقیق مشابه شکل ۶ برای استقرار حسگرهای صوتی ساخته شود. برای اندازه‌گیری زمان تأخیر می‌توان از مدار شکل ۷ استفاده کرد. در این مدار از یک مقایسه‌کننده استفاده شده است که سیگنال ورودی از میکروفن را با یک ولتاژ مرجع مقایسه می‌کند و تا زمانی که شدت صوت دریافتی از آن بیشتر باشد، خروجی دیجیتال DO را در سطح ولتاژ بالا نگه می‌دارد. برای تنظیم میزان حساسیت به صدای ورودی از یک پتانسیومتر استفاده شده است.

دقت ساخت سازه مکانیکی، یکسان بودن و کیفیت بالای ساخت میکروفن‌های مورد استفاده و مدار تشخیص شدت سیگنال صوتی، تأثیر مستقیم بر دقت اندازه‌گیری زمان تأخیر دارد. طبیعی است که هرچه این دقت بالاتر باشد، پاسخ نهایی دقیق‌تر می‌باشد.



شکل ۷. مدار تشخیص صوت و تبدیل به سیگنال دیجیتال

در آخرین مرحله لازم است تا سیگنال‌های تولیدی DO توسط هر ۵ میکروفن مطابق شکل ۸ به یک پردازنده وارد شود و ضمن اندازه‌گیری تأخیر زمانی بین آن‌ها، موقعیت هدف محاسبه شود. برای افزایش دقت زمانی، باید از یک FPGA استفاده شود تا با قابلیت پردازش موازی خود بتواند با کمترین خطا اختلاف زمانی بین سیگنال‌ها را دریافت کند. برای مثال اگر فرکانس کاری آن ۵۰۰ مگاهرتز باشد، دقت ثبت اختلاف زمانی ۲ نانوثانیه خواهد بود.



شکل ۸. دریافت سیگنال‌های DO توسط FPGA

## مقایسه

روش‌های مکان‌یابی منبع صوت بسیار متنوع و متفاوت می‌باشد و پارامترهای مورد ارزیابی آن‌ها بعضاً با یکدیگر متفاوت هستند. از سوی دیگر برخی از طرح‌ها مانند همین مقاله به صورت شبیه‌سازی می‌باشد و پارامترهای محیطی کمتر در آن دخالت دارد. این امر باعث سختی کار در امر مقایسه می‌شود. با این وجود می‌توان برخی از موارد نهایی را در صورت موجود بودن در داده‌های مقالات با یکدیگر مقایسه کرد. این کار در جدول ۵ انجام پذیرفته است.

جدول ۵. مقایسه بین روش‌های مکان‌یابی صوتی

مرجع	تعداد حسگر	الگوریتم مورد استفاده	زمان اجرا (ms)	خطا (m)	برد مفید (m)	میزان S/N	فضای کاری
این کار	۵	تأخیر زمانی و محاسبات هندسی	۰.۱۲۰	۰	۳۰۰	--	۳D
[۴]	۷	طراحی میکروفون‌ها به نحوی که جمع تأخیرات صفر باشد. (GCC-PATH)	--	--	۳۰۰	--	۳D
[۴]	۷	استفاده از فیلترمیانه و الگوریتم GCC-PATH	--	--	۵۰۰	--	۳D
[۴]	۷	روش ES4 برای SNR کم	--	--	۱۰۶۲	--	۳D
[۱۲]	۵	US-GCC	۹.۵۳۸	۰.۰۵	--	۳۰ dB	۳D
[۱۲]	۵	GCC	۲.۴۱	۰.۵	--	۳۰ dB	۳D
[۱۹]	۵	EDM	--	۰.۱۷ ۶	--	۱۰ dB	۳D
[۱۹]	۵	EDM + OPTIMIZATION(DOA)	--	۰.۰۳ ۹	--	۱۰ dB	۳D

## نتیجه‌گیری

تحقیقات زیادی در زمینه جهت‌یابی و مکان‌یابی منبع صدای تولیدی از مواردی مانند شلیک، انفجار و صدای انسان ارائه شده است. با توجه به اهمیت موضوع، آنچه در این مقاله بیان شد ارائه روش جدیدی برای یافتن موقعیت منبع صوت تکانشی با بالاترین دقت و کمترین زمان پاسخ‌دهی می‌باشد. مبنای عملکرد براساس تأخیر در رسیدن سیگنال صوتی به حسگرهای صوتی (TDOA) می‌باشد و فرض بر این است که این تأخیرهای زمانی به‌عنوان ورودی مسئله وجود دارند. برخلاف روش‌های موجود که نیازمند سخت‌افزار و پردازش زیاد هستند، در این روش از روابط ریاضیاتی ساده و دستگاه محاسبات هندسی استفاده شده است که می‌تواند موقعیت منبع صوت را تنها با یک جای‌گذاری ساده تعیین کند. چیدمان خاص آرایه حسگرهای صوتی نیز به هدف طرح کمک می‌کند و باعث می‌شود تا در فضای سه‌بعدی نیز کارایی کامل داشته باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش ارائه شده توانسته است بیش از ۵ میلیارد نقطه موردآزمون در فضای موردنظر را با موفقیت ۱۰۰ درصدی تشخیص دهد. روش پیشنهادی با کاهش

پیچیدگی‌های متداول، باعث کاهش زمان پردازش، صرفه‌جویی در سخت‌افزار موردنیاز و کاهش هزینه‌ها در کاربردهای مرسوم می‌شود.

## References

- [1] Dorostan, R., Zabihi, H., Asgharzadeh, A., & Gorji Poshti, M. (2021). Explaining the Components of Feeling Safe in Crime Prevention in Urban Design (Case Study: Rajai Main Street, Karaj). *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(1), 77-93. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.130678>
- [2] Borzino, Â. M. C. R., Apolinário, J. A., & De Campos, M. L. R. (2015, April 19-24). *Robust DOA estimation of heavily noisy gunshot signals*. 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing ,South Brisbane, QLD, Australia <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2015.7178009>
- [3] Amiri, M. (2021). Fast Texture Retrieval Using Walsh-Hadamard Transform. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(3), 137-153. <https://doi.org/10.48301/KSSA.2021.262698.1326>
- [4] Abiri, A., & Pourmohammad, A. (2016, February 17-18). *A review of the sound detection and localization of the snipers*. Third National Conference and First International Conference on Applied Research in Electrical, Mechanical and Mechatronics Engineering, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/479788>
- [5] Zhang, Z., Wu, M., Han, X., & Yang, J. (2020). Performance comparison of UCA and UCCA based real-time sound source localization systems using circular harmonics SRP method. *Applied Acoustics*, 164, 107241. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107241>
- [6] Hrabina, M., & Sigmund, M. (2018, April 19-20). *Gunshot recognition using low level features in the time domain*. 2018 28th International Conference Radioelektronika Prague, Czech Republic <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2018.8376372>
- [7] Kumar, N. (2017). Study Of Sound Source Localization Using Music Method In Real Acoustic Environment. *International Journal of Electronics Engineering Research*, 9(4), 545-556. [https://www.ripublication.com/ijeer17/ijeerv9n4\\_09.pdf](https://www.ripublication.com/ijeer17/ijeerv9n4_09.pdf)
- [8] Kraljević, L., Russo, M., Stella, M., & Sikora, M. (2020). Free-Field TDOA-AOA Sound Source Localization Using Three Soundfield Microphones. *IEEE Access*, 8, 87749-87761. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993076>
- [9] Rahimi, M., Sadeghi, H., Ghasemi, A., & Shamsi, M. (2015). A combined method of locating audio sources for near and far field applications. *Journal of Iranian Audiovisual Engineering Association*, 3(1), 10-25. <http://joasi.ir/article-1-57-fa.html>
- [10] Ho, K. C. (2012). Bias Reduction for an Explicit Solution of Source Localization Using TDOA. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60(5), 2101-2114. <https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2187283>
- [11] Diaz-Guerra, D., Miguel, A., & Beltran, J. R. (2021). Robust Sound Source Tracking Using SRP-PHAT and 3D Convolutional Neural Networks. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 29, 300-311. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2020.3040031>
- [12] Kan, Y., Wang, P., Zha, F., Li, M., Gao, W., & Song, B. (2015). Passive Acoustic Source Localization at a Low Sampling Rate Based on a Five-Element Cross Microphone Array. *Sensors*, 15(6), 13326-13347. <https://doi.org/10.3390/s150613326>

- [13] Ramamurthy, A., Unnikrishnan, H., & Donohue, K. D. (2009, March 5-8). *Experimental performance analysis of sound source detection with SRP PHAT- $\beta$* . IEEE Southeastcon 2009, Atlanta, GA, USA <https://doi.org/10.1109/SECON.2009.5174117>
- [14] Yassin, A., Nasser, Y., Awad, M., Al-Dubai, A., Liu, R., Yuen, C., Raulefs, R., & Aboutanios, E. (2017). Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 1327-1346. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2632427>
- [15] Wu, P., Su, S., Zuo, Z., Guo, X., Sun, B., & Wen, X. (2019). Time Difference of Arrival (TDoA) Localization Combining Weighted Least Squares and Firefly Algorithm. *Sensors*, 19(11), 1-14. <https://doi.org/10.3390/s19112554>
- [16] Jin, B., Xu, X., & Zhang, T. (2018). Robust Time-Difference-of-Arrival (TDOA) Localization Using Weighted Least Squares with Cone Tangent Plane Constraint. *Sensors*, 18(3), 1-16. <https://doi.org/10.3390/s18030778>
- [17] Hosseini, M. S., Rezaie, A., & Zanjireh, Y. (2017). Time difference of arrival estimation of sound source using cross correlation and modified maximum likelihood weighting function. *Scientia Iranica*, 24(6), 3268-3279. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4355>
- [18] Pertilä, P., Parviainen, M., Myllylä, V., Huttunen, A., & Jarske, P. (2020, September 21-24). *Time Difference of Arrival Estimation with Deep Learning – From Acoustic Simulations to Recorded Data*. 2020 IEEE 22nd International Workshop on Multimedia Signal Processing, Tampere, Finland. <https://doi.org/10.1109/MMSP48831.2020.9287131>
- [19] Kafaei Zad Tehrani, A., Makkiabadi, B., Parsayan, A., & Hozhabr, S. H. (2018, December 17-19). *Sound Source Localization Using Time Differences of Arrival; Euclidean Distance Matrices Based Approach*. 2018 9th International Symposium on Telecommunications Tehran, Iran. <https://doi.org/10.1109/ISTEL.2018.8661037>