

## **The Design and Construction of an Acoustic Imaging System for Imaging Underground Facilities**

M. Ardini<sup>\*</sup>, A. Tamimi, H. R. Khodadadi, A. Bashiri, Y. Bayrami

<sup>\*</sup> Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 07/04/2021, Accepted: 14/12/2021)

### **Abstract**

As underground hidden facilities are used for various applications, imaging systems are required for the detection and recognition of these facilities. In this paper, imaging by mechanical wave propagation in the soil is investigated. Most underground facilities can be considered as air chambers located in the middle of the soil. Air and soil have a large difference in acoustic impedance, so underground facilities can produce a large reflective signal because the amplitude of the reflected signal depends on the difference in impedance of the two materials. Seismic and non-destructive concrete testing systems also use the process of propagation of mechanical waves in the material. Although seismic systems have been successful in the detection issue, they require several meters of space for equipment layout, and transportation complexity is also one of their problems. They are unsuitable for urban space because they are inherently designed to detect water sources at depths of several hundred meters. On the other hand, while the non-destructive concrete testing system equipment have suitable dimensions, they have low penetration depth which is impractical for this purpose. Seismic and non-destructive testing systems of concrete operate in the range of subsonic and ultrasonic waves, respectively. This research project proposes the idea that by choosing an operating frequency between the two mentioned ranges, it is possible to obtain equipment with the appropriate dimensions for imaging underground facilities. In this project we managed to image an underground constructed cylindrical cavity with the diameter of 1 meter and the depth of 4 meters. The accuracy of this method depends on the sound propagation speed in the material. Since there are accurate relationships for the propagation speed of sound in air, the diameter of the cylinder was estimated with an accuracy of about 4%, but with the measurement of propagation speed being infeasible in this project, leading to the ambiguity in the value of propagation speed of sound in soil, the values cited in several reference sites were used, giving the accuracy of 4 to 20%.

**Keywords:** Acoustic Impedance, Acoustic Imaging, Correlation Function

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: msdardini@iran.ir

## طراحی و ساخت سامانه تصویربرداری صوتی از تأسیسات زیرزمینی

مسعود اردینی<sup>۱\*</sup>، علی تمیمی<sup>۲</sup>، یحیی بایرامی<sup>۳</sup>، عباس بشیری<sup>۴</sup>، حمیدرضا خدادادی<sup>۵</sup>

۱ و ۲ و ۳ و ۴- کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۵- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳)

### چکیده

از تأسیسات مخفی زیرزمینی برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شود. در نتیجه وجود سامانه‌های تصویربرداری که اقدام به کشف این تأسیسات کند یکی از نیازمندی‌ها می‌باشد. در این مقاله تصویربرداری به وسیله انتشار امواج مکانیکی در خاک بررسی می‌شود. می‌توان غالب تأسیسات زیرزمینی را محفظه‌های هوا فرض کرد که در میانه خاک قرار گرفته‌اند. هوا و خاک تفاوت فاحشی در میزان مقاومت صوتی دارند، بنابراین تأسیسات زیرزمینی می‌توانند سیگنال بازتابی بزرگی را تولید کنند چرا که دامنه سیگنال بازتابی به تفاوت مقاومت دو ماده وابسته است. سامانه‌های لرزه‌نگاری و تست غیرمخرب بتن نیز از فرایند انتشار امواج مکانیکی در ماده بهره می‌گیرند، هر چند سامانه‌های لرزه‌نگاری، عملکرد موفقی برای کشف داشته‌اند اما نیاز به چند ده متر فضا برای چیدمان تجهیزات و پیچیدگی حمل و نقل از مشکلات آنهاست. آنها برای فضای شهری نامناسب هستند چرا که ذاتاً برای تشخیص منابع آب در عمق چند صد متری خاک طراحی و ساخته شده‌اند. از طرفی تجهیزاتی مانند سامانه آزمون غیرمخرب بتن، هر چند دارای ابعاد کوچکی هستند، اما عمق نفوذ پایینی و برای این موضوع عملاً کاربردی ندارند. سامانه‌های لرزه‌نگاری و تست غیرمخرب بتن به ترتیب در محدوده فرو صوت و فراصوت عمل می‌کنند، در این طرح تحقیقاتی، فرکانس کاری مابین دو سامانه نامبرده انتخاب می‌شود، با این ایده می‌توان به تجهیزاتی با ابعاد کوچک‌تر از سامانه لرزه‌نگاری رسید، در حالی که عمق تصویربرداری بهتر از سامانه‌های تست غیرمخرب است. این تحقیق در مطالعه موردی خود توانسته از فضای خالی احداث شده در زیرزمین (به صورت استوانه‌ای با قطر ۱ متر و در عمق ۴ متری سطح زمین) تصویربرداری کند. دقت مکان‌یابی وابسته به دانستن سرعت انتشار صوت در ماده است. از آنجا که روابط دقیقی برای سرعت انتشار صوت در هوا وجود دارد قطر استوانه با دقت حدود ۴ درصد تخمین زده شد ولی به دلیل ابهام در میزان سرعت انتشار صوت در خاک (عدم امکان اندازه‌گیری در این طرح تحقیقاتی) از اعداد موجود در مراجع مختلف استفاده شد که دقت ۴ الی ۲۰ درصد را نتیجه می‌دهد.

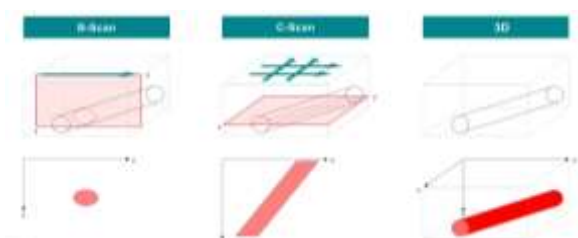
**کلید واژه‌ها:** مقاومت صوتی، تصویربرداری صوتی، تابع همبستگی

### ۱- مقدمه

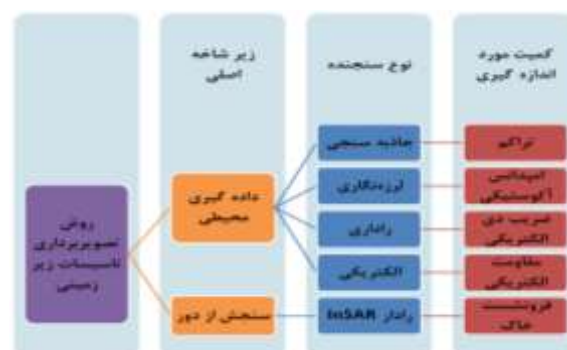
اقتصادی را دور می‌زند که در سال ۲۰۱۴ شناسایی شده‌اند. در سال ۲۰۰۵، یک تونل در یک زندان نظامی در عراق کشف شد که ۴/۶ متر عمق و ۱۰۹ متر طول داشت. حادثه مشابهی در سال ۲۰۱۱ در نزدیکی قندهار واقع در افغانستان رخ داد که در آن ۴۸۸ نفر از زندان سارپوسا که بزرگ‌ترین زندان جنوب افغانستان است فرار کردند. ساخت این تونل تقریباً پنج ماه به طول انجامیده است که طول آن بیش از ۳۰۰ متر و عرض ۱ متر و سرتاسر تونل دارای تهویه و روشنایی بوده است [۱]. روش‌های مختلفی برای تصویربرداری از عمق خاک به کار می‌روند. هر یک از این روش‌ها دارای خصوصیت‌هایی هستند و کمیت متفاوتی را اندازه‌گیری می‌نمایند که معمولاً باعث می‌شود که سامانه عملیاتی ترکیبی از این روش‌ها باشد. فلوجارت شکل (۱) مقایسه‌ای بین روش‌ها ارائه می‌دهد. مرجع [۲]. از جمله مراجعی است که از روش راداری برای کشف قنات استفاده کرده است.

سالیان زیادی است که از تأسیسات مخفی زیرزمینی برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شود. به جز در مواردی مانند قنات برای انتقال آب، اغلب کاربردهای حفر تونل در طول تاریخ نظامی بوده است و کشف آن دارای اهمیت اطلاعاتی می‌باشد. موارد متعددی در قرن گذشته از جمله، تونل‌های ساخته شده در بلژیک (در طول جنگ جهانی اول)، تونل‌های فرار از بازداشتگاه در طول جنگ جهانی دوم، تونل‌های در ویتنام در طول دهه ۱۹۶۰ می‌توان اشاره کرد. نمونه‌های جدیدتر شامل بیش از ۱۷۰ تونل قاچاق مواد مخدر است که از سال ۱۹۹۰ در مرز ایالات متحده و مکزیک شناسایی شده‌است. تونل‌هایی بین مصر و غزه و حدود ۳۰ تونل از غزه به اسرائیل که محدودیت‌های محاصره

درون آن قرار گرفته تا ناپیوستگی‌های محیط (نظیر گسل، شکستگی و ...) را کشف نماید. این پروژه در سطح آزمایشگاهی در این طرح تحقیقاتی مطرح شده است و تست در ابعاد محفظه ۳۰۰ mm در ۳۰۰ mm و ضخامت ۱۵۰ mm است. از آب به‌عنوان ماده واسط استفاده شده است. همچنین از گریس به‌عنوان یک ماده واسط مؤثرتر نامبرده شده است. همچنین از یک مبدل انرژی الکتریکی به صوتی (در فرکانس کاری ۵۰۰ kHz) جهت تصویربرداری استفاده شده است. می‌بایست افزود که این محصول قادر است تا خاک با عمق ۳۰ cm را تصویربرداری کند؛ بنابراین اگر قرار باشد چنین سامانه‌ای برای مطالعه تأسیسات زیرزمینی در عمق استفاده شود می‌بایست دچار تغییرات جدی (در فرکانس کاری و توان) شود.



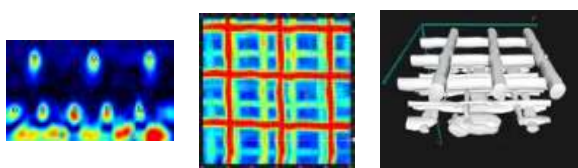
ویژگی تأسیسات زیرزمینی مانند تونل این است که همگی محفظه هوایی داخل خاک محسوب می‌شوند، از آنجا که تفاوت زیادی بین مقاومت صوتی خاک و هوا وجود می‌آید. در نتیجه ضریب انعکاس بزرگی ایجاد می‌شود که روش صوتی را مطلوب می‌نماید. اما با توجه به اینکه ضریب تضعیف خاک بزرگ است می‌بایست فرکانسی انتخاب شود که میرایی آن کم باشد. اما فرکانس کم باعث می‌شود ابعاد سامانه بزرگ شود. جدول زیر مقایسه‌ای بین روش‌های رایج تصویربرداری لرزه‌ای و صوتی ارائه می‌دهد.



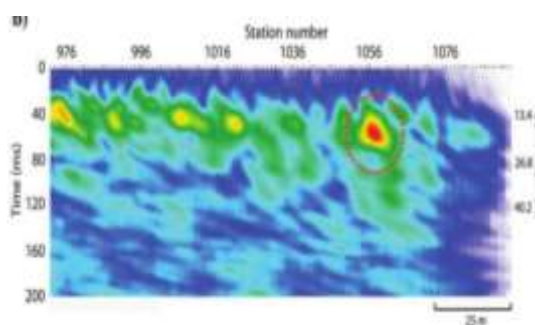
شکل (۱): انواع روش‌های تصویربرداری از زمین.

جدول (۱). مقایسه سامانه‌های تصویربرداری.

تفکیک پذیری	عمق نفوذ	تضعیف ماده مورد مطالعه	فرکانس کاری	ابعاد سیستم	
چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر	چند سانتی‌متر تا ۱ متر	(بتن) متوسط	چند کیلوهرتز	متوسط	تست غیرمخرب
چند متر	چند متر تا چند کیلومتر	(خاک) زیاد	چند هرتز	بزرگ	تصویربرداری لرزه‌نگاری



الف



ب

شکل (۲): الف) تصویرسازی صوتی، ب) تصویرسازی لرزه‌ای [۱].

هر چند تصویرسازی در تست غیرمخرب و پزشکی به لحاظ تکنیکی مشابه یکدیگر هستند اما تصویرسازی در لرزه مبنای متفاوتی دارد. شکل (۲) نمونه‌ای از تصاویر ایجاد شده توسط این سامانه‌ها را با یکدیگر مقایسه کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سونوگرافی اسکن از مقاطع مختلف و تصویرسازی سه‌بعدی را نیز شامل می‌شود. اما تصویرسازی لرزه‌ای این چنین نیست.

در لرزه‌نگاری سیگنال ارسالی (یک موج مکانیکی) با تک ضربه ایجاد می‌شود و امواج مکانیکی بازگشتی در طول موج فرو صوت توسط سنسور (ژئو فن) اندازه‌گیری می‌شود. مقالات و مراجع متعددی وجود دارند که روش‌های لرزه‌نگاری را مبنای کشف تونل قرار داده‌اند که از جمله آن می‌توان به [۳،۴،۵،۶،۷]. اشاره کرد. ابعاد بزرگ سامانه نقطه ضعف تمامی این مراجع است.

در تست غیرمخرب امواج مکانیکی با فرکانس فراصوت به‌صورت متوالی به خاک وارد می‌شود. تفکیک‌پذیری بالا و عمق نفوذ پایین دو ویژگی سامانه‌های نامبرده است. فعالیت‌های کمی در حوزه مطالعه خاک با این تجهیزات به چشم می‌خورد که از جمله آن می‌توان به [۸] اشاره کرد. البته هدف این مرجع با موضوع کاری ما متفاوت است. در فعالیت تحقیقاتی صورت‌گرفته در [۸] فرض بر این است که دستگاهی در زمان حفاری تونل

$$v_T = \left[ \frac{E}{2\rho(1 + \mu)} \right]^{0.5} \quad (2)$$

$$v_S = \left[ \frac{(0.87 + 1.12\mu)}{(1 + \mu)} \right] v_T \quad (3)$$

نوع خاک به لحاظ ترکیبات (میزان شن، ماسه و سنگ) و همچنین رطوبت دارای تنوع بسیار است. همگی این مؤلفه بر سرعت صوت در خاک تأثیرگذار هستند، مراجع متعددی بررسی شد که اقدام به اندازه‌گیری سرعت انتشار صوت در خاک کرده‌اند. برخلاف هوا و آب، هیچ عدد مشخصی در رابطه با سرعت انتشار صوت در خاک مشاهده نشده‌است. در بین مراجع، مرجع [۱] سرعت انتشار طولی را ۵۶۰ تا ۴۷۵ متر بر ثانیه اعلام کرده‌است. همچنین مرجع [۱۱] طیف وسیعی از اندازه‌گیری‌ها را روی خاک‌های مختلف ارائه کرده‌است که محدوده تغییرات بسیار وسیع است.

مقاومت صوتی به چگالی ماده و سرعت صوت وابسته است بیان‌کننده مقاومت ماده در برابر امواج صوتی است و از روی رابطه زیر به دست می‌آید [۹]:

$$Z = \rho v \quad (4)$$

وقتی میدل انرژی الکتریکی به صوتی خود را به درون ماده انتقال می‌دهد، فقط بخشی از انرژی به ماده منتقل شده و مابقی منعکس می‌شود. نسبت مقاومت صوتی دو ماده تعیین‌کننده میزان انعکاس است. میزان ضریب انعکاس و عبور موج صوتی در مرز مشترک دو ماده به صورت زیر است [۹]:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (5)$$

جدول (۲): مقایسه مقاومت صوتی [۱۱].

نوع ماده	سرعت موج طولی (m/s)	سرعت موج عرضی (m/s)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	مقاومت صوتی (g/cm <sup>2</sup> s) × 10 <sup>4</sup>
گیاه خاک	۳۰۰-۷۰۰	۱۰۰-۳۰۰	۱/۲-۲/۴	۵/۱-۱۶/۸
ماسه‌های خشک	۴۰۰-۱۲۰۰	۱۰۰-۵۰۰	۱/۵-۱/۷	۶-۲۰/۴
ماسه‌های خشک	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۴۰۰-۶۰۰	۱/۹-۲/۱	۲۸/۵-۴۲
خاک رس اشباع شده	۱۱۰۰-۲۵۰۰	۲۰۰-۸۰۰	۲-۲/۴	۲۲-۶۰
سنگ گرانیت	۴۵۰۰-۶۰۰۰	۲۵۰۰-۳۳۰۰	۲/۵-۲/۷	۱۱۲-۱۶۲
هوا	۳۳۰	-	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۴۳

مطابق با اطلاعات داده شده در مرجع [۱۱] می‌توان مقاومت صوتی خاک با هوا را بررسی نمود. تفاوت زیاد موجب می‌شود

این تحقیق با انتخاب فرکانس صوتی قصد توانست تا خلأ بین دو سامانه نامبرده را جبران کند که سامانه‌ای ارائه دهد که از لحاظ ابعاد کوچک‌تر سامانه لرزه‌نگار شود و همچنین از لحاظ تکنیک تصویربرداری شبیه سامانه سونوگرافی و تست غیرمخرب باشد. تا مقدمه‌ای بر ساخت تصاویر باکیفیت سونوگرافی برای تأسیسات زیرزمینی باشد. این مقاله در چهاربخش ارزیابی تئوری، شبیه‌سازی، معرفی سامانه پیاده‌سازی شده و نتایج می‌باشد.

## ۲- ارزیابی تئوری

دو چالش اصلی این طرح تحقیقاتی تضعیف و ضریب بازتاب ضریب انعکاس و معادله توان انتشار در این بخش مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد همچنین مؤلفه‌های مؤثر بر تفکیک‌پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲-۱- ضریب انعکاس

وقتی فرستنده انرژی خود را به درون محیط انتقال می‌دهد، فقط بخشی از انرژی به ماده منتقل شده و مابقی منعکس می‌شود. نسبت تفاوت مقاومت صوتی دو محیط تعیین‌کننده میزان انعکاس است. در حقیقت هرگونه تغییر محیطی که تفاوت بیشتر در مقاومت صوتی حاصل کند، باعث ضریب بازتاب بزرگ‌تر می‌شود؛ بنابراین مطلوب این است که هدف مورد مطالعه (حفره هوا) می‌بایست تفاوت مقاومت بزرگ‌تری نسبت به خاک داشته باشد ولی اهداف نامطلوب (سنگ و ریشه درختان) تفاوت مقاومت کوچکی داشته باشد. این موضوع با روابط مدل‌سازی ریاضی در ادامه بحث خواهد شد:

سرعت انتشار به جنس ماده و نوع موج انتشاری وابسته است. روابط زیر سرعت انتشار موج صوتی را برای موج طولی، عرضی و سطحی بیان می‌کند ۳۰۰ mm کشسانی<sup>۱</sup> و چگالی هر ماده دو مؤلفه تأثیرگذار بر میزان سرعت است. به‌طور مثال سرعت صوت در آب و جیوه تقریباً برابر است در حالیکه ۱۳ برابر چگال‌تر از آب می‌باشد [۱۰]. در این رابطه E ثابت کشسانی و  $\mu$  ثابت پواسن و  $\rho$  چگالی ماده است. همچنین  $v_L$ ،  $v_T$  و  $v_S$  به ترتیب سرعت انتشار طولی، عرضی و سطحی هستند.

$$v_L = \left[ \frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \right]^{0.5} \quad (1)$$

<sup>۱</sup> Elasticity

به موج تابشی در فاصله ۱ متری (برحسب dB) است. این مؤلفه از روی رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$SL = 10 \log \left( \frac{I_{ref}}{I_{inc}} \right) \quad (11)$$

ضریب قدرت هدف به مؤلفه‌های نظیر: شکل هدف، ابعاد هدف، ساختار دیواره، طول موج تابشی و زاویه تابش وابسته است. مقدار قدرت هدف برای حجم‌های مختلف قابل اندازه‌گیری و محاسبه است به‌طور مثال، برای استوانه به صورت رابطه زیر است. در این رابطه K عدد موج، L طول استوانه و a شعاع استوانه و  $\theta$  زاویه تابش است.

$$TS = 10 \log \left( \frac{aL^2}{2} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \theta \right) \quad (12)$$

$$\beta = \frac{kL \sin \theta}{2} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

میزان سطح نویز گیرنده (NL) است. این مؤلفه نیز به پهنای باند از منبع وابسته است:

$$NL = 10 \log \left( \frac{BW}{1 \text{ Hz}} \right) \quad (13)$$

مؤلفه DI نیز میزان هدایت‌پذیری پرتو مبدل انرژی الکتریکی به صوتی را نشان می‌دهد. با داشتن پهنای باند در دو راستای سمت و ارتفاع می‌توان هدایت‌پذیری پرتو را به دست آورد.

$$DI = 10 \log \left( \frac{40000 (\text{deg}^2)}{\theta_{az} \theta_{el}} \right) \quad (14)$$

فشار صوتی در سمت فرستنده می‌بایست به گونه‌ای انتخاب شود که برای اپراتور آزاردهنده نباشد و از طرفی توان لازم را برای کشف داشته باشد، در این تحقیق عدد مناسب ۱۴۰ dB در نظر گرفته شده است. این عدد آستانه درد گوش است اگر گوش در مجاورت منشأ صدا باشد. اما طبق نتایج عملی این حجم بالای صدا ابداً آزاردهنده نخواهد بود چون فرستنده با خاک کوپل شده است و از طرفی با از عایق صوتی برای کاهش میزان آلودگی صوتی را نیز استفاده شده است.

فشار صوتی در سمت گیرنده می‌بایست به گونه‌ای انتخاب شود که در محدوده حساسیت دستگاه‌های رایج باشد، در این

ضریب انعکاس برای حفره هوا نزدیک ۱ شود. اما این اتفاق برای سایر مواد موجود مانند سنگ و ریشه درختان رخ نخواهد داد.

## ۲-۲- معادله توانی انتشار

در مباحث سوناری معادله سونار تعیین می‌کند که سونار به چه بردی از آشکارسازی می‌رسد، چنین معادله‌ای برای مباحث خاک ارائه نشده است؛ بنابراین رابطه معادله سونار در این بخش ارزیابی شده است:

$$SNR = SL - TL - (NL - DI) + TS \quad (6)$$

که SL، TL، NL، DI و TS به ترتیب بیان‌کننده سطح فرستنده<sup>۱</sup>، تلف انتقال<sup>۲</sup>، سطح نویز<sup>۳</sup>، شاخص‌پذیری پرتو<sup>۴</sup> و قدرت هدف<sup>۵</sup> است.

مؤلفه SL نسبت توان منبع به یک منبع مرجع است. در حقیقت قدرت فرستنده را مشخص می‌نماید. در رابطه زیر  $I_s$  میزان چگالی سیگنال اندازه‌گیری شده در فاصله یک متری از منبع است و منبع مرجع نیز یک موج صوتی با فشار 1  $\mu Pa$  است.

$$SL = 10 \log \left( \frac{I_s}{I_{ref}} \right) \quad (7)$$

در این رابطه TL اتلاف است شامل دو مؤلفه تضعیف ناشی از اثر جذب و تضعیف هندسی است. تضعیف هندسی نیز برای منبع نقطه‌ای از روی رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$TL_{geom} = 20 \log R \quad (8)$$

مرجع [۱۳] یک مقاله بر اساس داده‌های تجربی است و برای انواع خاک‌های مختلف با درصد رطوبت‌های متفاوت میزان ضریب تضعیف و سرعت انتشار را به دست آورده است. از ضرایب تضعیف مندرج در مرجع [۱۳] و رابطه زیر می‌توان اتلاف ناشی از جذب را محاسبه کرد. در این رابطه f برحسب KHz و r برحسب cm در این رابطه جای‌گذاری می‌شوند.

$$TL_{absorb} = 2 \times \alpha \times r \times f \quad (9)$$

بنابراین رابطه تلف به صورت زیر حاصل می‌شود که ناشی از اتلاف هندسی و جذب خاک است:

$$TL = 2 \times (20 \log(r/100) + \alpha \times r \times f) \quad (10)$$

مؤلفه TS مشابه سطح مقطع راداری است با این تفاوت که برای صوتی به کار می‌رود. این مؤلفه نسبت شدت موج انعکاسی

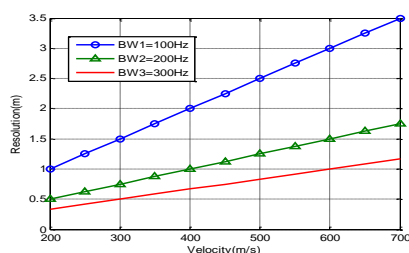
<sup>1</sup> Source Level (SL)

<sup>2</sup> Transmission Loss (TL)

<sup>3</sup> Noise Level (NL)

<sup>4</sup> Directivity Index (DI)

<sup>5</sup> Target Strength (TS)



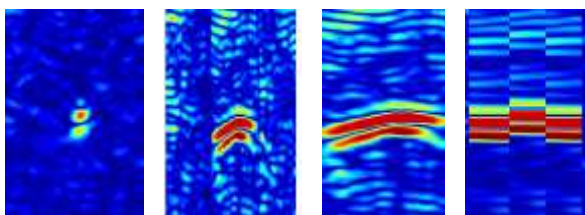
شکل (۳): نمودار تفکیک پذیری بر حسب سرعت خاک برای پهنای باندهای مختلف.

به علت برهم کنش‌های امواج فراصوتی در محیط انتشار دو الگو تولید می‌کنند. یکی پرتو همگرا در نزدیکی سطح مبدا تا فاصله کانونی است که به آن میدان نزدیک می‌گویند و دیگری یک پرتو واگرا بعد از فاصله کانونی است که به آن میدان دور می‌گویند. فاصله کانونی تابعی از ابعاد مبدا فراصوتی و فرکانس کاری آن است. زاویه واگرایی در میدان دور که مؤلفه تعیین کننده تفکیک پذیری عرضی است از رابطه زیر به دست می‌آید. در این رابطه  $d$  ابعاد مبدا و  $\lambda$  طول موج کاری است [۱۲]:

$$\theta = \sin^{-1} \left( 1.22 \frac{\lambda}{d} \right) \quad (۱۶)$$

هرچه عرض بیم باریک‌تر باشد تفکیک پذیری عرضی کمتر خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طول موج یک مشخصه تأثیرگذار بر تفکیک پذیری عرضی است. به طور مثال یک مبدا انری الکتریکی به صوتی به ابعاد سطح تحریک ۱m در فرکانس ۵kHz و ۱kHz به ترتیب بیمی با پهنای ۷ و ۳۷ درجه ایجاد می‌کند. (این محاسبات با فرض سرعت انتشار ۵۰۰m/s بیان شده است).

تفاوت تصویرسازی اسکن B در شکل (۴) درج شده است. شکل الف حرکت مکانیکی اسکن B است که تنها در سه نقطه تصویرسازی شده. در شکل ب با استفاده از آرایه سنسورها تعداد نقاط اسکن افزایش یافته است. در شکل ج بیم باریک شده است و تعداد اسکن‌ها کماکان زیاد است. در شکل د روزه مصنوعی ایجاد شده است [۱۲]:



شکل (۴): تأثیر تفکیک پذیری سمت بر کیفیت تصویر [۱۴].

بنابراین یکی از چالش این دستگاه این است در محیطی که صدای به بلندی صدای یک اره برقی وجود دارد، صدای نفس کشیدن شنیده شود. این موضوع یکی از چالش این پروژه است. ایده‌ای که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته به این صورت است که با استفاده از سیگنال چیرپ، فرایندی ایجاد شود که فرکانس سیگنال ارسالی و دریافتی کمی متفاوت شود تا تفکیک پذیری سیگنال ارسالی از اکوی دریافتی امکان پذیر شود. در ادامه دو محاسبه تخمینی برای بودجه خط ارائه شده است:

- اگر یک مبدا انرژی الکتریکی به صوتی با ابعاد دهانه حدود ۱۸ سانتی‌متر، فرکانس کاری ۳/۵ kHz میزان SL برابر ۱۴۰dB فرض شود، بیم ۳dB آن ۳۱ درجه آن هدایت پذیری پرتو ۱۶dB را نتیجه می‌دهد. میزان TS برابر ۱۵dB خواهد بود. ضریب تضعیف بسیار متنوع است برای ضریب ۰/۴ (مقدار متوسط) و فرکانس ۳/۵ kHz میزان تضعیف برابر با مقدار زیر ۷۱۲ dB خواهد شد و میزان NL برابر ۳۵ dB خواهد شد؛ بنابراین SNR برابر ۵۴۴ dB است که یک عدد غیرممکن است.

- اگر مبدا انرژی الکتریکی به صوتی بخش قبل لحاظ شود با این تفاوت که فرکانس کاری ۱ kHz باشد آنگاه ضریب ۰/۴ (مقدار متوسط) در فرکانس ۱ kHz میزان تضعیف برابر ۲۱۲ dB خواهد شد. میزان NL برابر ۳۰ dB خواهد شد؛ بنابراین SNR برابر ۶ dB است که یک عدد ممکن است.

### ۳-۲- تصویربرداری

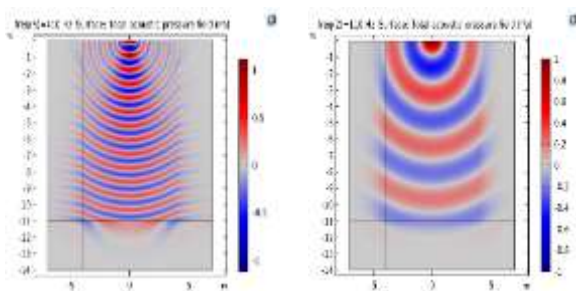
همان‌طور که مشاهده می‌شود فرکانس یک مشخصه حیاتی در عملکرد سامانه است اما کاهش فرکانس باعث افت جدی تفکیک پذیری می‌شود. ایجاد مصالحه و انتخاب فرکانس مناسب چالش این بخش است. از آنجا که این طرح تحقیقاتی از ساختار موج پیوسته جاروب شوند استفاده کرده با توجه به رابطه تقریبی زیر می‌توان گفت که این پهنای باند متناسب با چه تفکیک پذیری است. پهنای باند تابعی از فرکانس مرکزی نیز می‌باشد در نتیجه با کاستن از فرکانس مرکزی تفکیک پذیری دچار کاهش جدی می‌شود. این موضوع در شکل (۳) نشان داده شده است.

$$\text{res} = \frac{c}{2B} \quad (۱۵)$$

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود تضعیف خاک دارای مقدار زیادی است و تنها راه عملی انتخاب فرکانس‌های زیر یک کیلوهرتز است.

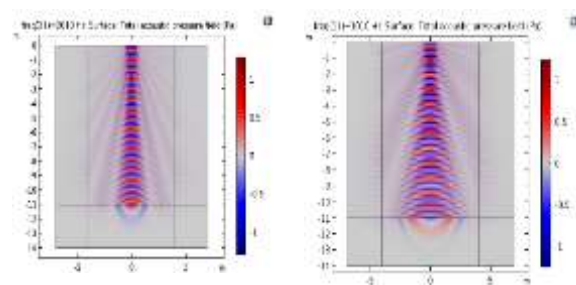
### ۲-۲- شبیه‌سازی پهنای باند

از آنجا که شرط قابل حمل بودن جزء ورودی‌های مسئله در نظر گرفته شده، بنابراین سطح تحریک یک متر انتخاب شده است و رفتار پهنای باند مورد مطالعه قرار گرفته است. رفتار پهنای باند در چهار فرکانس مورد مطالعه قرار گرفته است. به ازای هر فرکانس منحنی فشار صوتی درج شده است. سرعت انتشار در این شبیه‌سازی برابر  $350 \text{ m/s}$  در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود که هرچه فرکانس بالاتر باشد باند باریک‌تر خواهد بود و تفکیک‌پذیری سمت بهبود خواهد یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود محدوده فرکانسی  $1 \text{ KHz}$  و زیر آن نیز می‌تواند از هدایت‌پذیری پرتو مناسبی برخوردار شود.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل (۶): شبیه‌سازی عددی واگرایی باند (الف)  $110 \text{ Hz}$  (ب)  $410 \text{ Hz}$

(ج)  $1010 \text{ Hz}$  (د)  $210 \text{ Hz}$ .

### ۳-۳- شبیه‌سازی ضریب بازتاب

شکل‌های زیر توصیف‌کننده انتشار امواج برای حالتی است که حفره اطراف و خاک اطراف آن از یک جنس و یا دو جنس متفاوت باشند. در این مثال خاک دارای سرعت  $300 \text{ m/s}$  و چگالی  $3000 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است در حالی که هوا  $330 \text{ m/s}$  است.

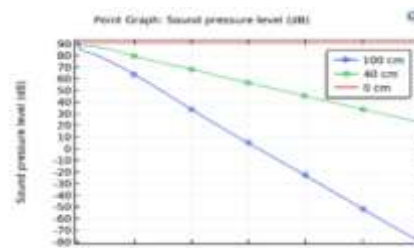
### ۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش سه شبیه‌سازی اتلاف، پهن‌شدگی زاویه باند و ضریب بازتاب در این بخش انجام شده است. نرم‌افزار کامسول جهت شبیه‌سازی‌هایی صورت انتخاب شده است. نرم‌افزار کامسول یک مجموعه کامل شبیه‌سازی است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتق‌های جزئی به روش اجزاء محدود (FEM) در فضاهای یک، دو و سه بعدی حل نماید. هدف این شبیه‌سازی تعیین محدوده فرکانسی مناسب است. همان‌طور که گفته شد مواردی مانند ابعاد سامانه و تفکیک‌پذیری نیازمند افزایش فرکانس است ولی غلبه به اتلاف کانال انتشار وابسته به کاهش مقدار فرکانس است. همچنین ضریب بازتاب شبیه‌سازی شده که نشان دهد که روش‌های صوتی می‌توانند در آشکارسازی موفق عمل کنند.

### ۳-۱- شبیه‌سازی تضعیف خاک

در این روش ضریب تضعیف توسط دستگاه لوله امپدانس اندازه‌گیری شده و سپس مدل فشار صوتی<sup>۱</sup> جهت شبیه‌سازی انتخاب خواهد شد و از اثرات تداخل صرفه نظر می‌شود در این صورت با تنها انتخاب چند ضریب می‌توان شبیه‌سازی را انجام داد. از آنجا که در این تحقیق دسترسی به لوله امپدانس میسر نشد از اندازه‌گیری‌های مرجع [۱۳] برای حل عددی استفاده شد. این مرجع برای خاک با کدهای مختلف میزان تضعیف را ارائه می‌دهد. دیمانسیون تضعیف در مقاله  $\text{dBcm}^{-1}\text{kHz}^{-1}$  اما در نرم‌افزار ضریب تضعیف  $\text{dB}\lambda^{-1}$  است که می‌بایست، تبدیل شود. در این شبیه‌سازی مقدار تضعیف در فاصله  $40 \text{ cm}$  و  $1 \text{ m}$  برای به‌عنوان دو پراب در نظر گرفته شده و میزان تضعیف آن برحسب فرکانس ترسیم شده است. مقدار فشار که به مرز به‌عنوان ورودی اعلام شده  $1 \text{ Pa}$  است اما دارای  $\text{SPL} = 90 \text{ dB}$  است. مقدار  $\text{SPL}$  از روی رابطه زیر به دست می‌آید و  $P_0$  کمترین فشاری است که توسط گوش انسان شنیده می‌شود و مقدار آن  $20 \mu\text{Pa}$  است.

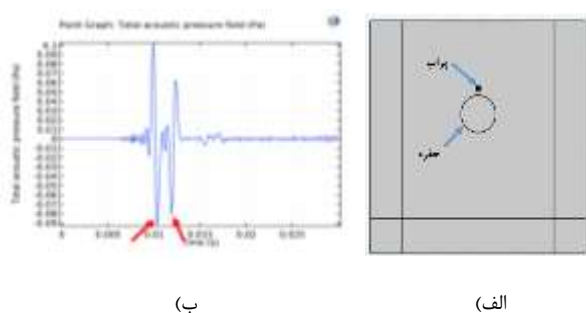
$$\text{SPL} = 20 \log \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (17)$$



شکل (۵): شبیه‌سازی عددی میزان تضعیف.

<sup>۱</sup> Acoustic pressure

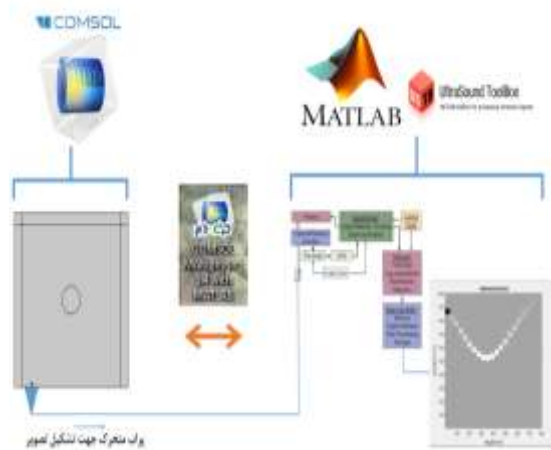




شکل (۸): اندازه‌گیری ضریب انعکاس در حالتی وجود حفره هوا (الف) هندسه تعریف پراب (ب) سیگنال شبیه‌سازی شده.

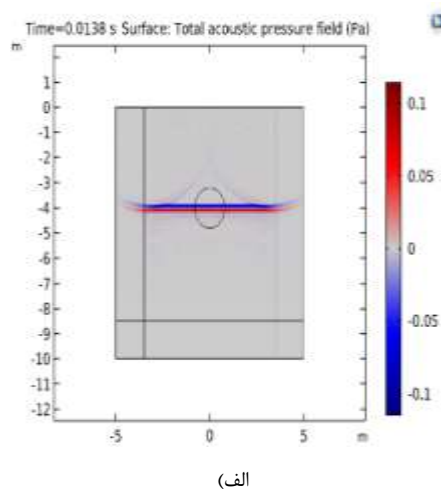
### ۴-۳- شبیه‌سازی تصویرسازی

شبیه‌سازی کامل تلفیقی از COMSOL و متلب است. دیاگرام این تلفیق در شکل زیر درج شده است طبق این شکل انتشار در COMSOL انجام می‌شود و تشکیل تصویر در متلب انجام خواهد شد. اتصال این دو نرم‌افزار از طریق افزونه‌ای انجام می‌شود. این افزونه رابط امکانات گرافیکی ندارد، صرفاً با اجرا آن نرم‌افزار اصلی به متلب متصل می‌شود و می‌توان به خروجی‌های نرم‌افزار کامسول در متلب دسترسی پیدا کرد و یا ورودی‌هایی از متلب برای کامسول تعریف کرد. با استخراج خروجی‌های کامسول در متلب انواع پردازش و شبیه‌سازی را می‌توان انجام داد.

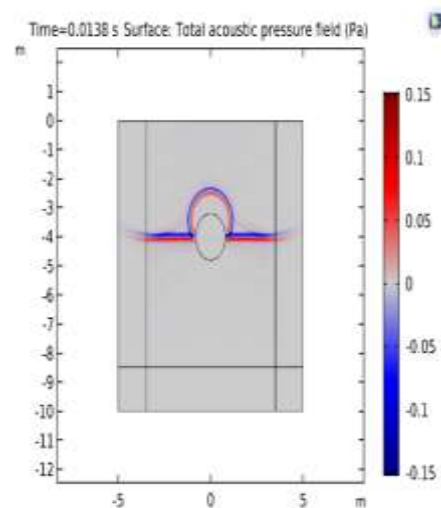


شکل (۹): بلوک دیاگرام شبیه‌سازی

شکل (۱۰) الف تصویر محیط شبیه‌سازی در نرم‌افزار COMSOL را نشان می‌دهد. فرستنده یک پاره خط است که گوشه سمت چپ-پایین شکل نشان داده شده است و گیرنده یک نقطه است در مرکز این پاره خط تعریف شده است. فرکانس تصویربرداری ۴ KHz است. فرستنده و گیرنده از فاصله ۰٫۱ متر تا ۰٫۹ متر به مقدار ۴ سانتی‌متر حرکت می‌کنند در نتیجه، بخش COMSOL شبیه‌سازی ۲۱ بار اجرا برنامه را در پی دارد. شکل ۱۰-ب یکی از سیگنال‌هایی است که در فرایند اجرای پی‌درپی



(الف)



(ب)

شکل (۷): شبیه‌سازی عددی ضریب بازتاب (الف) محیط اطراف و حفره (ب) محیط اطراف و حفره دو جنس متفاوت.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود وقتی حفره هوا تعریف می‌شود، تقریباً موجی وارد حفره نمی‌شود و کاملاً بازتاب می‌شود، همچنین وقتی خاک تعریف می‌شود تقریباً تمام موج مکانیکی از حفره عبور می‌کند. این نتیجه هم قابل انتظار بود چرا که میزان تفاوت بالای چگالی بین خاک و هوا موجب می‌شود ضریب بازتاب تقریباً یک شود.

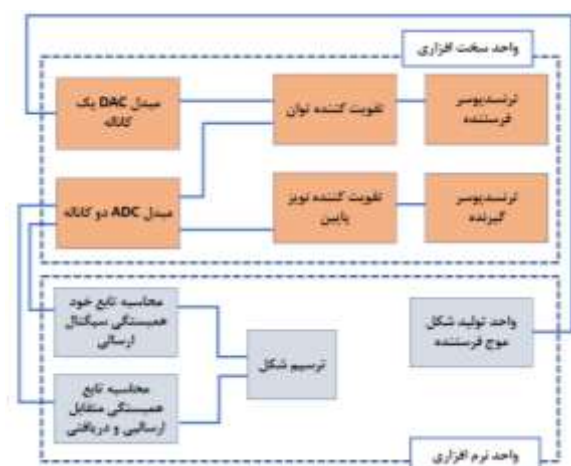
مطابق با شکل (۸)، برای اندازه‌گیری ضریب انعکاس می‌بایست یک پراب در نزدیکی حفره قرار داد به طوری که پالس بازتابی و تابشی با هم ادغام نشوند، در این صورت میزان ضریب انعکاس استخراج خواهد شد. برای اندازه‌گیری ضریب بازتاب می‌بایست، مقایسه دامنه‌ای که با فلش در شکل (۸) ب نشان داده شده را مبنای کار قرار داد، علت تفاوت ناچیز دامنه، در شکل تلف هندسی است.



#### ۴- نتایج عملی

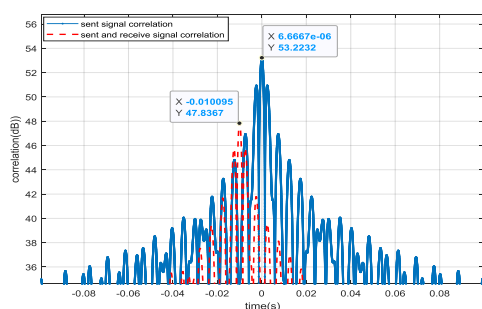
##### ۴-۱- بلوک دیاگرام سامانه

سامانه شامل یک فرستنده و گیرنده است. فرستنده سیگنال موج پیوسته چیرپ سینوسی را با توان بالا ارسال می‌کند و گیرنده سیگنال بازگشتی را دریافت می‌کند. پس از دریافت سیگنال توسط گیرنده همبستگی دو سیگنال محاسبه و رسم می‌شود و با توجه به تأخیر سیگنال بازگشتی و زمان تغییرات در همبستگی محل حفرة هوا را تشخیص می‌دهد. لازم به ذکر است که تقویت‌کننده توان دارای مقاومت ۴ اهم و مبدل ADC دارای مقاومت ۱ مگا اهم است. در نتیجه مسیر توان ناچیزی به سمت گیرنده خواهد آمد



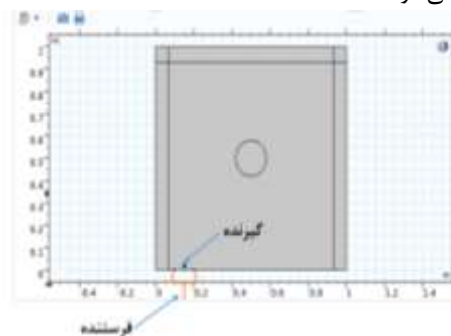
شکل (۱۲): بلوک دیاگرام تست عملی

مبنای عملکرد سامانه اندازه‌گیری زمان تأخیر بین سیگنال ارسالی و دریافتی است. در ابتدا یک شبیه‌سازی ارائه شده که در آن جهت سیگنال دریافتی از با تأخیر حدود  $0.1/0.1$  s را به‌عنوان سیگنال دریافتی گیرنده تعریف شده و نتیجه خود همبستگی و همبستگی متقابل به‌صورت داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همین میزان تأخیر در شکل قابل مشاهده است.

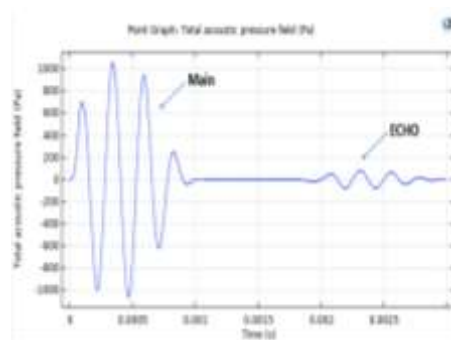


شکل (۱۳): اندازه‌گیری تأخیر توسط تابع همبستگی

برنامه، توسط گیرنده دریافت می‌شود. چون نقطه گیرنده در جلوی پاره خط فرستنده است در نتیجه سیگنال اصلی نیز شکل ذخیره شده وجود دارد اما اکو با کمی تأخیر و دامنه ضعیف‌تر دریافت می‌شود.



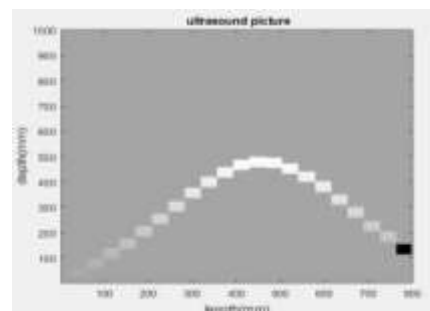
(الف)



(ب)

شکل (۱۰): (الف) مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار COMSOL (ب) یکی از نتایج شبیه‌سازی شده در COMSOL.

شکل (۱۱) نمونه تصویر خروجی در متلب پس از انتشار در کامسول است، برای تشکیل تصویر از افزونه<sup>۱</sup> نرم‌افزار متلب استفاده شده است، این افزونه USTB استفاده شده است که امکانات فراوان و متنوعی دارد از جمله متمرکز کردن پرتو فرستنده‌های آرایه‌ای و پردازش سیگنال‌های بازگشتی و ... را دارا می‌باشد که شبیه‌سازی یک سامانه تصویربرداری کامل را پوشش می‌دهد.

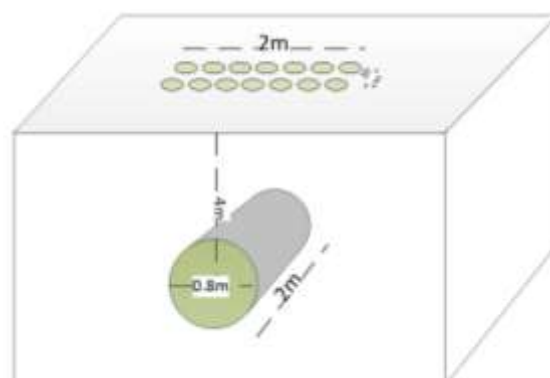


شکل (۱۱): نتیجه تصویر ساخته شده با Matlab

<sup>۱</sup> UltraSound ToolBox (USTB)

#### ۲-۴- چیدمان تست

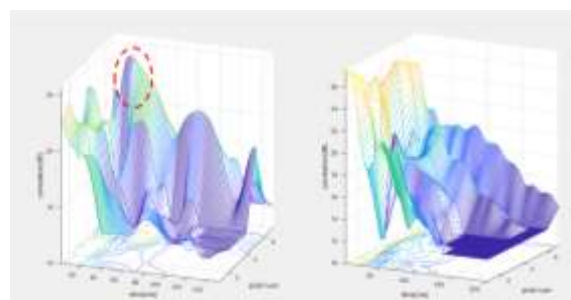
شکل (۱۴) نیز چیدمان تست را نشان می‌دهد، حفره هوایی با در عمق ۴ متری با طول ۲ متر و قطر ۸۰ سانتی‌متر حفاری شد. برای تست اسکن B به تعداد ۷ مرتبه گیرنده و فرستنده بر روی حفره حرکت داده می‌شود. محل قرارگیری گیرنده و فرستنده در ۷ مرحله تست اسکن B در شکل (۱۴) مشخص است. فاصله گیرنده و فرستنده در این تست ثابت و ۳۰ cm است.



شکل (۱۴): چیدمان تست.

#### ۳-۴- مقایسه حضور و عدم حضور حفره هوا

با کنار هم قراردادن اسکن A انجام شده، نمودار تصویر سه بعدی تشکیل شده برای حالت بدون و با حفره هوا در شکل (۱۵) رسم شده است. با مقایسه دو شکل یک قله در شکل وجود دارد که در حالت بدون حفره هوا دیده نمی‌شود، این قله وقتی ایجاد شده دقیقاً بالای سر حفره هوا است. این قله در شکل علامت‌گذاری شده است.



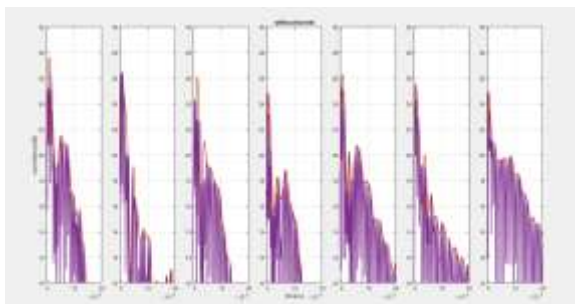
(ب)

(الف)

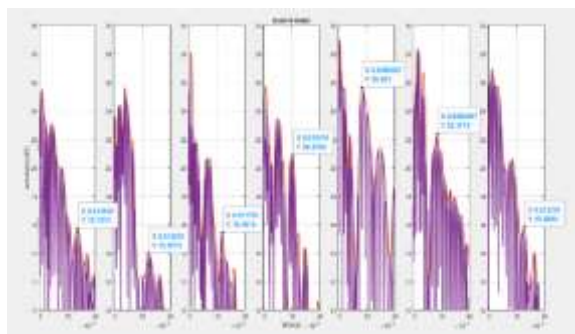
شکل (۱۵): نمایش سه‌بعدی اسکن A (الف) بدون حفره هوا (ب) بدون حفره هوا.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت زیادی بین دو حالت با و بدون حفره هوا موجود است حال سؤال اینجاست که آیا این تفاوت قابل تفسیر است و یا خیر؟ برای این منظور در شکل (۱۶) نمودار همبستگی متقابل در ۷ حالت را نشان می‌دهد. همان‌گونه

که مشاهده می‌شود در حالت وجود حفره هوا قله‌های در حدود ۰/۰۱ ثانیه در همبستگی اضافه می‌شود که در حالت بدون حفره هوا وجود ندارد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۶): نمایش دوبعدی اسکن A (الف) بدون حفره هوا (ب) با حفره هوا

#### ۴-۴- تخمین عمق

نقاط نشانه‌گذاری شده در شکل (۱۶) با یکدیگر یک سهمی می‌سازند که قله سهمی زمانی رخ می‌دهد که مبدل انرژی الکتریکی به صوتی درست بالای سر حفره هوا هست. تعیین عمق حفره به دلیل بازه وسیع تغییرات سرعت موج صوتی در خاک کمی پیچیده است. با تغییر رطوبت، تراکم و جنس اجزا سازنده آن، سرعت انتشار در آن به شدت تغییر می‌کند. مراجع مختلف سرعت خاک را بین ۳۰۰ تا ۲۵۰۰ m/s گزارش کرده‌اند. اما مرجع [۱] عدد با سرعت خاک ۴۷۵ m/s و ۵۶۵ m/s برای موج طولی پیشنهاد کرده است. موج طولی زمانی ایجاد خواهد شد که فرستنده و گیرنده دقیقاً بالای حفره هوا هستند پس با احتساب این عدد فاصله حفره هوا با سطح به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$x = v \cdot t$$

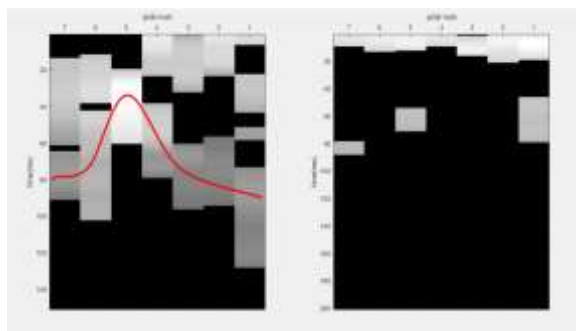
$$x = 565 \cdot 0.0079 = 4.4\text{m}$$

(۱۸)

$$x = 475 \cdot 0.0079 = 3.75\text{m}$$

با بهبود آرایه می‌توان به شکل (۳) ج نیز رسید. در صورت پیاده‌سازی روزنه مصنوعی تحقق شکل (۳) د نیز شدنی خواهد بود.

- تصویر با توجه به هندسه تصویر برداری تصویر حاصل می‌بایست به شکل یک سهمی باشد. هرچه میزان بسته باشد به معنای آن است که سامانه هدایت‌پذیری پرتو مناسبی را برخوردار است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هدایت‌پذیری پرتو مقدار مناسب را دارا می‌باشد.
- از آنجاکه داده‌برداری شامل ۷ نقطه بوده در نتیجه تفکیک‌پذیری به حد مطلوب نیست.
- جهت تصویرسازی از آستانه‌گذاری استفاده شده است آستانه با توجه به ماهیت خروجی تابع همبستگی و تلفات سیگنالی که مسیر طولانی‌تری طی کرده یک مقدار ثابت نیست و در نتیجه فرمی گنبدی شکل خواهد داشت.



شکل (۱۸): نمایش سه‌بعدی اسکن A (الف) بدون حفره هوا (ب) بدون حفره هوا.

شکل (۱۸): نمایش سه‌بعدی اسکن A (الف) بدون حفره هوا (ب) بدون حفره هوا.

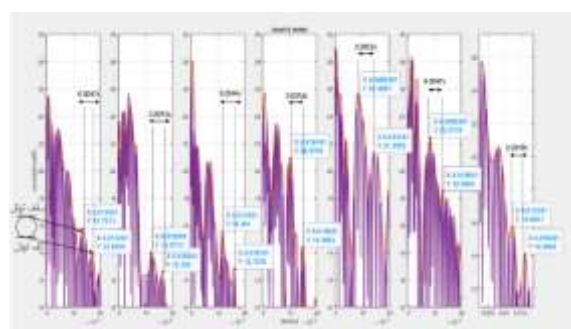
## ۵- نتیجه‌گیری

خاک محیطی غیرخطی است و به ازای تحریک خاک با مبدل انرژی الکتریکی به صوتی، مد انتشاری مختلفی در خاک به وجود می‌آید. از طرفی، وجود ریشه درختان و یا قطعات سنگ بزرگ در مسیر انتشار سیگنال می‌تواند، حجم وسیعی از اکوها اضافی را ایجاد کند. اما از آنجا که روش صوتی در تفاوت تراکمی بالا، ضریب انعکاس بزرگی را ایجاد می‌کند، بنابراین روش صوتی (در مقایسه با روش‌های راداری یا الکتریکی) توانسته اکوی برگشتی حفره هوا را نسبت به سایر موانع محسوس‌تر آشکار کند. این تحقیق به لحاظ بررسی تئوری و شبیه‌سازی و نتایج عملی اثبات کرد که صوتی می‌تواند ابزاری مناسب برای کشف حفره هوا باشد و می‌تواند عمق حفره هوا و شعاع آن را تعیین کند. همچنین طبق تست عملی، هر چند سامانه در نهایت در محدوده صوتی

بنابراین عمق (با فرض ۵۶۰ و ۴۷۵ متر بر ثانیه) برابر ۴/۴ m و ۳/۷۵m می‌شود که می‌بایست ۳/۶ m محاسبه می‌شد که خطای ۲۰ درصدی و ۴ درصدی را نتیجه می‌دهد. همان‌طور که گفته شد منشأ خطا عدم دانستن دقیق سرعت صوت است.

## ۴-۵- تخمین قطر

مطابق با شکل (۱۷)، حدود ۴/۵ ms بعد از قله‌های علامت‌گذاری شده همواره یک قله دیگر نیز وجود دارد. تکرار منظم قله‌ها با فواصل زمانی منظم قطعاً تصادفی نیست و به نظر نگارندگان یک قله مربوط به اکوی سقف و یک قله مربوط به اکوی کف حفره هوا است. در ادامه مقاله، این موضوع بیشتر بحث شده است.



شکل (۱۷): نمایش دوبعدی اسکن A جهت تخمین قطر.

اگر دمای داخل حفره هوا ۳۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شود، سرعت صوت ۳۴۸ متر بر ثانیه خواهد بود که با احتساب رفت و برگشت موج داخل حفره هوا و دیواره بتنی حفره هوا می‌بایست طول ۱۵۵ سانتی‌متر فرض شود؛ بنابراین اختلاف زمانی مورد انتظار بین دو قله از روی رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t = \frac{1.55}{348} = 0.00445 \text{ (s)} \quad (19)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود عدد با دقت بالایی با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل همخوانی دارد؛ بنابراین این سامانه با دقت خوبی قطر حفره را تعیین می‌کند.

## ۴-۶- تصویرسازی

سامانه موجود متشکل از مجموعه‌ای از اسکن A است می‌توان با کنار هم قراردادن این شکل موج‌ها و تعریف آستانه مناسب تصویرسازی اسکن B را انجام داد. جهت تشکیل تصویر می‌بایست چند نکته را اشاره کرد که به شرح زیر می‌باشد.

- از آنجا که نمی‌توان تعداد داده‌برداری اسکن A را افزایش داد (به دلیل محدودیت‌های اسکن مکانیکی) بنابراین تصویر مورد انتظار مانند شکل (۳) الف خواهد بود. با ساخت آرایه جاروب شونده می‌توان به شکلی مشابه شکل (۳) ب رسید و

- [3] S. L. Walters, R. D. Miller, and J. Xia, "Near surface tunnel detection using diffracted Pwaves: A feasibility study," in SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007, pp. 1128–1132, Jan. 2007.
- [4] S. D. Sloan et al., "Tunnel detection using near-surface seismic methods," in SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012, pp. 1–5, 2012.
- [5] G. Riddle, "Detection of Clandestine Tunnels using Seismic Refraction and Electrical Resistivity Tomography," University of Alberta, 2012.
- [6] S. L. Peterie, R. D. Miller, J. Ivanov, and S. D. Sloan, "Shallow tunnel detection using SH-wave diffraction imaging," GEOPHYSICS, vol. 85, no. 2, pp. 29–37, 2020.
- [7] Y. Wang et al., "Tunnel detection at Yuma Proving Ground, Arizona, USA — Part 1: 2D full-waveform inversion experiment," GEOPHYSICS, vol. 84, no. 1, pp. 95–105, 2019.
- [8] D. H. Kim, U. Y. Kim, S. P. Lee, H. Y. Lee, and J. S. Lee, "Experimental studies of a geological measuring system for tunnel with ultrasonic transducer," Geotech. Asp. Undergr. Constr. Soft Gr., pp. 536–537, 2009.
- [9] N. Dube, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. R/D Tech, 2004.
- [10] M. Moayeni and A. Y. Saadi, Non-destructive testing of ultrasonic method (ultrasonic). Atra, 2012.
- [11] T. Bourbié, O. Coussy, and B. Zinszner, Acoustics of Porous Media. CRC Press, 1988.
- [12] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd ed. CA: Peninsula Publishing, 1983.
- [13] M. L. Oelze, W. D. O'Brien, and R. G. Darmody, "Measurement of Attenuation and Speed of Sound in Soils," Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 66, no. 3, pp. 788–796, 2002.
- [14] Z. Shao, L. Shi, Z. Shao, and J. Cai, "Design and application of a small size SAFT imaging system for concrete structure," Rev. Sci. Instrum., vol. 82, no. 7, p. 073708, 2011.

استفاده شد اما جفت‌شدگی مناسب با خاک و استفاده از عایق صوتی موجب شده نهایتاً سامانه صدای مزاحم ناچیزی را تولید کند. همچنین این تحقیق با انتخاب فرکانس صوتی قصد توانست تا خلأ بین دو سامانه لرزه‌نگار و تست غیرمخرب را جبران کند و سامانه‌ای ارائه دهد که از لحاظ ابعاد کوچک‌تر سامانه لرزه‌نگار شود و همچنین از لحاظ تکنیک تصویربرداری شبیه سامانه سونوگرافی و تست غیرمخرب باشد. تا مقدمه‌ای بر ساخت تصاویر باکیفیت سونوگرافی برای تأسیسات زیرزمینی باشد. این تحقیق در مطالعه موردی خود توانسته از فضای خالی احداث شده در زیرزمین (به‌صورت استوانه‌ای با قطر ۱ متر و در عمق ۴ متری سطح زمین) تصویربرداری کند. دقت مکان‌یابی وابسته به دانستن سرعت انتشار صوت در ماده است. از آنجا که روابط دقیقی برای سرعت انتشار صوت در هوا وجود دارد قطر استوانه با دقت حدود ۴ درصد تخمین زده شد ولی به‌دلیل ابهام در میزان سرعت انتشار صوت در خاک (عدم امکان اندازه‌گیری در این طرح تحقیقاتی) از اعداد موجود در مراجع مختلف استفاده شد که دقت ۴ الی ۲۰ درصد را نتیجه می‌دهد. همچنین فرایند تصویرسازی در شبیه‌سازی با ۲۱ نقطه و در تست عملی با ۷ نقطه انجام شده‌است.

## ۶- مراجع

- [1] S. D. Sloan, S. L. Peterie, R. D. Miller, J. Ivanov, J. T. Schwenk, and J. R. McKenna, "Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques," GEOPHYSICS, vol. 80, no. 5, pp. 127–135, 2015.
- [2] A. Ahmadpour, R. Ahmadi, and A. K. Rouhani, "Detection of Cylindrical Objects Using the GPR Method Based on Numerical Forward Modeling: A Case Study of the Buried Qanat," J. Radar, vol. 5, no. 3, pp. 37–50, 2017.