



# Estimating the Planar Position of Underground Excavations Through Seismic Method

Safa Khazai\*, Mohammad Reza Seif

\*Associate Professor, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

(Received: 27/06/2022, Revised: 07/10/2023, Accepted: 21/11/2023, Published: 21/07/2025)

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.1.7

## ABSTRACT

*Seismic methods have gained significant attention for locating seismic sources caused by large explosions and enhancing the signal-to-noise ratio. Most studies focus on large-scale scenarios where the seismic source is assumed to be far from the seismic array. In military applications, underground excavations are often conducted to create passages for transferring forces and equipment. Hence, seismic methods can be employed to determine the location of such excavations as seismic sources. This study investigates the feasibility of estimating the planar position of low-energy underground excavations, which are not detectable using conventional seismic techniques. To this end, a tool based on triangular seismic arrays is developed, and a simple mechanism utilizing cross-correlation analysis is proposed for estimating the planar position of the source. The efficiency of this method is compared with existing approaches. Since the received signals are significantly affected by local noise due to the low energy of the source, a noise reduction algorithm based on the similarity of received signals is introduced, yielding favorable results compared to conventional methods.*

**Keywords:** Seismology, Location Estimation, Underground Excavation

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University



\* Corresponding Author Email: skhazai.s@ihu.ac.ir S



پدافند غیرعامل



سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴ (پیاپی ۶۲): صص ۱-۱۰

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۸۰۳۰-۲۹۸۰

علمی - پژوهشی

## تخمین موقعیت مسطحاتی حفاری‌های زیرزمینی از طریق روش لرزه‌نگاری

صفا خزائی<sup>۱\*</sup>، محمد رضا سیف<sup>۲</sup>

DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.1.7

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

### چکیده

امروزه استفاده از روش‌های لرزه‌نگاری برای تعیین موقعیت چشمه‌های لرزه‌ای ناشی از انفجارهای بزرگ و بهبود نسبت سیگنال به نوفه مورد توجه قرار گرفته است. بیشتر پژوهش‌ها به بررسی موارد بزرگ‌مقیاس پرداخته‌اند که در آن‌ها چشمه لرزه‌ای در فاصله زیادی از آرایه لرزه‌نگاری فرض می‌شود. در حوزه نظامی، حفاری‌های زیرزمینی اغلب به منظور ایجاد معبر برای انتقال نیروها و تجهیزات انجام می‌شوند. بنابراین، می‌توان از روش‌های لرزه‌نگاری برای شناسایی موقعیت این حفاری‌ها به عنوان چشمه‌های لرزه‌ای استفاده کرد. در این پژوهش، امکان تخمین موقعیت مسطحاتی حفاری‌های زیرزمینی با انرژی پایین، که با روش‌های متداول لرزه‌نگاری قابل شناسایی نیستند، بررسی شده است. برای این منظور، ابزاری بر پایه آرایه‌های مثلثی طراحی و مکانیسمی ساده مبتنی بر تحلیل همبستگی متقابل برای تخمین موقعیت مسطحاتی چشمه پیشنهاد شده و کارایی آن با روش‌های موجود مقایسه شده است. از آنجا که سیگنال‌های دریافتی به دلیل انرژی پایین چشمه تحت تأثیر نوفه‌های محلی قرار می‌گیرند، الگوریتمی برای کاهش نوفه بر پایه شباهت سیگنال‌های دریافتی ارائه شده که در مقایسه با روش‌های متداول نتایج مطلوبی به دست می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** لرزه‌نگاری، تخمین موقعیت، حفاری زیرزمینی

<sup>۱</sup> دانشجویار دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (skhazai.s@ihu.ac.ir) - نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> پژوهشگر، دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران



\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## ۱- مقدمه

بررسی اثر تونل و حفر تونل بر پاسخ لرزه ای سطح زمین تحقیقاتی صورت گرفته است. در تحقیق [۱۳] نشان داده شده است که سختی خاک و پوشش تونل و هم چنین محتوای فرکانسی امواج، تاثیر بسزایی در پاسخ لرزه ای زمین می گذارد و می تواند حداکثر شتاب سطح زمین را در شرایط امواج هارمونیک تا حدود ۱/۷ برابر افزایش دهد. همچنین، تحقیق [۱۴] نشان داده است که هندسه سازه در تحلیل های دینامیکی بسیار مهم بوده و منجر به تغییر در میزان جابه جایی ها، شتاب ها و طیف پاسخ می گردد.

از آنجایی که حفاری های زیرزمینی به عنوان معبری برای انتقال نیرو و تجهیزات، مورد استفاده قرار می گیرد و ابزارهای مورد استفاده جهت حفاری را نیز می توان به عنوان یکی از چشمه های لرزه ای در نظر گرفت، می توان با طراحی مکانیسمی مبتنی بر آرایه های لرزه ای، به تعیین موقعیت این دسته از چشمه ها یا به طور کلی حفاری های زیرزمینی فعال پرداخت. تفاوت اساسی چشمه های حفاری با چشمه های انرژی طبیعی، مانند زلزله انرژی محدود آن هاست که موجب می شود این امواج مسیر کوتاهی را در درون زمین سیر کنند. با این وجود در مقایسه با امواج زلزله، فرکانس بالاتری را داشته و آرایه مورد نیاز برای ثبت آن ها باید فاصله ی بین گیرنده ای کمی داشته باشد یا به عبارتی کوچک مقیاس باشد.

در این تحقیق به بررسی امکان تخمین موقعیت مسطحاتی حفاری های فعال زیرزمینی با استفاده از آرایه های لرزه ای بسیار کوچک پرداخته می شود. بدین منظور ابتدا برای یک آرایه ی مفروض روش پردازش سیگنال های دریافتی در آرایه که در حقیقت برانبارش سیگنال های دریافت شده در گیرنده های متفاوت به منظور دستیابی به یک سیگنال تمیز و قابل تحلیل است، ارائه می شود. سپس با استفاده از قواعد حاکم بر آرایه های مثلثی و روش تحلیل همبستگی متقابل به تعیین زمان تأخیر بین گیرنده ها که از مواد لازم برای قسمت پردازش نیز هست، پرداخته و معادلات ریاضیات لازم استخراج می شود. سپس با استفاده از زمان تأخیر به دست آمده، راستای امواج رسیده به آرایه تعیین می گردد. همچنین، به منظور تعیین رومرکز چشمه ی لرزه ای از فصل مشترک گیری امتدادهای تعیین شده، کمک گرفته می شود. از آنجایی که بهبود کیفیت سیگنال موجب افزایش دقت عملیات می شود، با استفاده از ویژگی شباهت که وجه مشترک امواج تولید شده توسط یک چشمه می باشد، کاهش نوفه ی سیگنال دریافتی نیز پرداخته می شود.

آرایه های لرزه ای ابتدا به منظور کشف و شناسایی انفجارهای اتمی به کار گرفته شده و امروزه نیز به همین منظور به کار می روند [۱]. این ابزار کمک شایانی به تعیین موقعیت زلزله ها و انفجارهای اتمی و همچنین بهبود کیفیت سیگنال های دریافتی می کند [۲]. آرایه های لرزه ای را می توان با مبانی ریاضی حاکم بر آرایه ای از گیرنده های رادیویی یا راداری تحلیل کرد [۳] و این هر دو تأثیری مشابه با به کار بردن آرایه ای از تلسکوپها در کیهان شناسی مدرن دارند. یکی از مزیت های اصلی آرایه های لرزه ای در مقایسه با یک ایستگاه زلزله نگاری بهبود نسبت سیگنال به نوفه (SNR)<sup>۱</sup> از طریق جمع تمامی سیگنال های دریافت شده از آرایه در یک ایستگاه زلزله نگاری است. علاوه بر این، آرایه های لرزه ای، اطلاعات مربوط به جهت دریافت سیگنال های لرزه ای را نیز در اختیار کاربر قرار داده که امکان تعیین موقعیت چشمه ی موج لرزه ای توسط یک آرایه تکین را نیز فراهم می کند [۲].

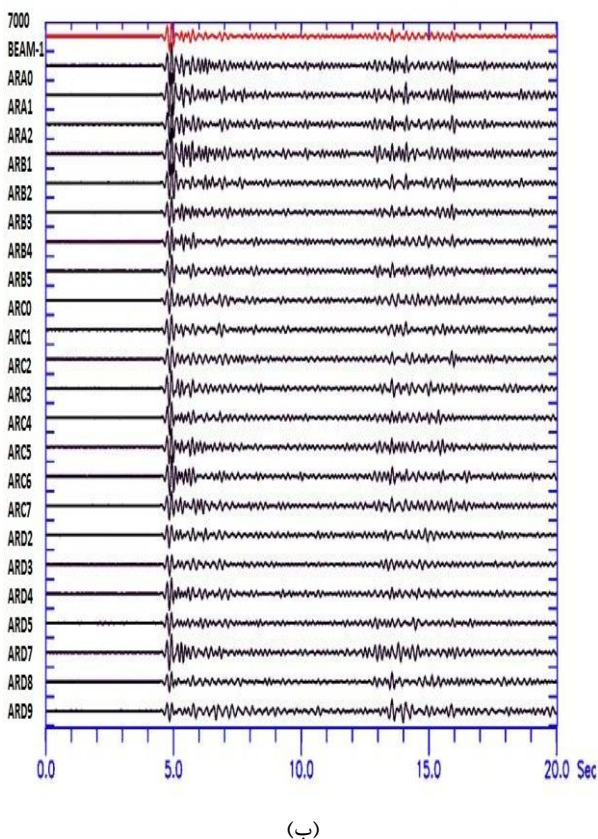
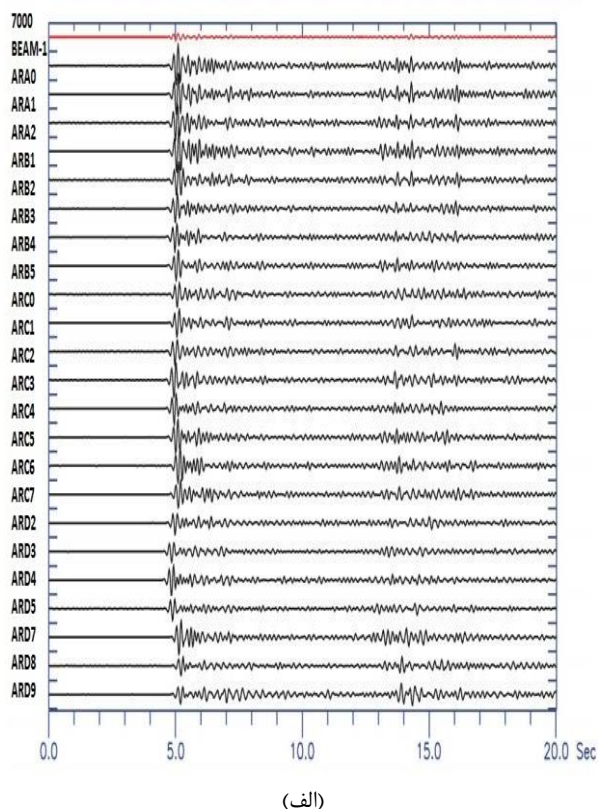
آرایه ها با توجه به دهانه<sup>۲</sup> یا بزرگ ترین فاصله ی بین دو گیرنده ی آرایه به انواع مختلف بزرگ مقیاس [۴]، متوسط [۵]، کوچک مقیاس [۶]، آرایه های موقتی [۷] و بسیار کوچک [۸] تقسیم بندی می شوند. تاکنون انواع مختلفی از آرایه های لرزه ای متناسب با اهداف متفاوت طراحی شده است. به کارگیری آرایه های لرزه ای و صوتی به منظور اهداف نظامی به زمان جنگ ویتنام برمی گردد که ارتش آمریکا از شناسایی موقعیت توپخانه های ویتنام عاجز مانده بود [۹]. در ادامه تلاش های برای به کارگیری این ابزار در تعیین موقعیت اهداف نظامی متحرک صورت پذیرفت [۱۰]. به عنوان مثال لاکوس<sup>۳</sup> [۱۱] موفقیت هایی در تعیین موقعیت اهداف هوایی و زمینی به کمک آرایه های لرزه ای و صوتی کسب کرد.

در سطح کشور تحقیقات محدودی در زمینه آشکارسازی پدیده های طبیعی زیرزمینی نظیر گسل و سفره های آب با روش لرزه نگاری انجام شده است؛ ولی در زمینه آشکارسازی تونل تنها می توان به تحقیق [۱۲] اشاره نمود. در این تحقیق نشان داده شده است که توانایی روش لرزه ای با افزایش عمق تونل به شدت کاهش می یابد. اما تاکنون تحقیقی در زمینه موقعیت یابی حفاری های زیرزمینی به روش لرزه نگاری منتشر نشده است؛ اما در خصوص

<sup>۱</sup> Signal to Noise Ratio

<sup>۲</sup> Aperture

<sup>۳</sup> Lacoss



شکل (۱): نمونه سیگنال دریافتی در آرایه‌ی NORESS در تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۲۴ ساعت ۰۴:۲۴:۰۴ (الف) جمع بدون اعمال زمان تأخیر، (ب) جمع با اعمال زمان تأخیر [۱۵].

در ادامه، ابتدا به معرفی تکنیک شکل‌دهی پرتو<sup>۱</sup> به منظور پردازش سیگنال‌های دریافتی در یک آرایه پرداخته، سپس روش فیلتر میانگین حداقل مربعات به منظور کاهش نوفه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش سوم ریاضیات لازم برای تعیین راستای امواج ورودی به صورت تابعی از زمان تأخیر استخراج شده و در نهایت نیز به محاسبه‌ی زمان تأخیر بین گیرنده‌ها پرداخته می‌شود.

## ۲- مبانی نظری پژوهش

### ۲-۱- شکل‌دهی پرتو

اکثر روش‌های تحلیل آرایه نیاز به همبستگی بالای سیگنال در طول آرایه داشته و این مهم محدودیت‌های جدی برای هندسه آرایه به خصوص اندازه‌ی آرایه ایجاد می‌کند [۱۵]. علاوه بر این تحلیل مناسب داده‌های یک آرایه به پایداری و دقت بالای زمان وابستگی برای تمام اجزای آرایه دارد. تعیین دقیق این وابستگی زمانی بسیار ضروری است، زیرا تعیین اختلاف زمان رسیدن موج به هر یک از گیرنده‌های آرایه، نقش بسیار مهمی در تمامی روش‌های پردازش و تحلیل آرایه دارد.

برای ثبت و کشف سیگنال‌های یک آرایه به صورت ممتاز، از روش شکل‌دهی پرتو [۱۶، ۱۵] استفاده می‌شود که با جمع تمام سیگنال‌های رسیده به هر کدام از گیرنده‌های موجود در آرایه، نسبت سیگنال به نوفه را افزایش داده و قدرت تحلیل سیگنال را بهبود می‌بخشد. با استفاده از یک آرایه می‌توان نسبت سیگنال به نوفه‌ی سیگنال لرزه‌ای را به واسطه‌ی جمع سیگنال‌های هم‌دوس در هر کدام از گیرنده‌های آرایه افزایش داد. شکل (۱) جبهه‌ی موج P رسیده به یک ایستگاه آرایه‌ی NORESS<sup>۲</sup> [۲] را نشان می‌دهد. اولین رد لرزه از بالا مجموع تمام سیگنال‌های دریافتی را نشان می‌دهد. در شکل (۱) (الف) رد لرزه‌ها<sup>۳</sup> بدون اعمال هیچ‌گونه زمان تأخیری با یکدیگر جمع شده‌اند و در نتیجه به سبب تداخل‌های ویرانگر رد لرزه‌ی حاصل به شدت تضعیف شده است. در شکل (۱) (ب) زمان تأخیر بر روی تمام رد لرزه‌ها اعمال شده و همان‌گونه که مشاهده می‌شود در سیگنال حاصله رخدادها به وضوح دیده شده و نوفه‌ی تصادفی نیز به میزان زیادی از بین رفته است.

<sup>۱</sup> Beamforming

<sup>۲</sup> Norwegian Experimental Seismic system

<sup>۳</sup> نمودار حرکت‌های زمین برحسب زمان که با لرزه نگار ثبت شود.

$$B(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M W_i(t + r_j.s) = \sum_{j=1}^M (S_j(t + r_j.s) + n_j(t + r_j.s)) \quad (2)$$

از آنجا که سیگنال‌ها همدوس و میرایی در نظر گرفته نشده است، پس:

$$B(t) = M.S(t) + \sum_{j=1}^M (n_j(t + r_j.s)) \quad (3)$$

حال فرض شود که نوفه دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  در تمام گیرنده‌ها باشد، در نتیجه واریانس نوفه پس از جمع برابر  $\sigma_s^2 = M \cdot \sigma^2$  و خطای استاندارد  $\sqrt{M} \sigma$  می‌شود. عبارت بالا نشان می‌دهد که خطای استاندارد نوفه با ضریب  $\sqrt{M}$  و خطای استاندارد سیگنال همدوس با ضریب  $M$  افزایش می‌یابد. بنابراین میزان بهبود نسبت سیگنال به نوفه برای یک آرایه با  $M$  گیرنده  $\sqrt{M}$  است [۱۵]. از آنجایی که سیگنال‌های دریافتی عمدتاً دارای انرژی کم و نوفه پس‌زمینه‌ی بالا هستند، این میزان افزایش در مقدار SNR کمک شایانی به تحلیل بهتر سیگنال دریافتی در آرایه می‌کند. در شرایطی که میزان نوفه‌ی زمینه به میزان قابل توجهی بالا باشد، لازم است تا قبل از تخمین زمان تأخیر و اعمال الگوریتم شکل‌دهی پرتو، با استفاده از روش‌های تضعیف نوفه، نوفه زمینه کاهش داده شود. از این‌رو در قسمت بعد، یک روش کاهش نوفه بر روی داده‌های مورد مطالعه ارزیابی می‌شود.

## ۲-۲- کاهش نوفه با استفاده از روش فیلتر میانگین حداقل مربعات

از آنجا که هدف تعیین محل حفاری‌های زیرزمینی است که به منظور انتقال تجهیزات و نفرات حفر می‌شوند و چنین حفاری‌هایی عمدتاً در مناطق نظامی صورت می‌گیرد میزان نوفه‌ی سیگنال دریافتی در گیرنده‌ها بسیار بالاست. از این‌رو استفاده از روش‌های مناسب جهت کاهش نوفه‌ی سیگنال دریافتی الزامی است. نظریه‌ای که چشمه‌ی سیگنال‌های دریافتی در تمام گیرنده‌ها یکسان است، سیگنال‌های دریافتی شباهت بسیار زیادی با یکدیگر دارند. در نتیجه استفاده از الگوریتم‌هایی که از ویژگی شباهت به منظور کاهش نوفه استفاده می‌کنند، موثر به نظر می‌رسد. بودس و همکاران<sup>۴</sup> [۱۷] الگوریتمی را به منظور تضعیف نوفه‌ی تصاویر بر مبنای خودشباهتی [۱۸] تصویر دریافتی معرفی کردند. اگر تصویر  $u$  به نوفه‌ی  $n$  آلوده شود، آنگاه تصویر نوفه‌دار به صورت رابطه‌ی ۴ نشان داده می‌شود:

$$v = u + n \quad (4)$$

مثال فوق نشان می‌دهد که نکته‌ی کلیدی در فرآیند جمع (شکل‌دهی پرتو) پیدا کردن بهترین زمان تأخیر بین گیرنده‌هاست که به منظور حصول بزرگ‌ترین دامنه‌ها در نقاط مشابه به هر یک از ردلرزه‌ها اضافه یا کم می‌شود. ساده‌ترین راه برای تخمین زمان تأخیر پیک کردن، زمان اولین رخداد در هر کدام از رد لرزه‌ها و اعمال آن با توجه به یک رد لرزه‌ی مبناست. اما اشکال اساسی اینجاست که در بسیاری از رد لرزه‌ها اولین رخداد به قدری ضعیف است که پیک کردن آن دشواری بسیار به همراه دارد. از طرفی اگر آرایه شامل تعداد بسیار زیادی گیرنده باشد پیک کردن زمان اولین رخداد در عمل کار بسیار سختی است.

با فرض اینکه زمان تأخیر بین هر دو گیرنده یا هر گیرنده و گیرنده‌ی مرجع معلوم باشد، عملیات شکل‌دهی پرتو را که شامل اعمال زمان تأخیر مربوط به هر سیگنال و جمع تمام سیگنال‌ها برای به دست آوردن یک سیگنال قوی با نسبت سیگنال به نوفه بالاست، قابل اجراست. حال فرض کنید که  $W_i(r_j, t)$  شکل گسسته یا دیجیتالی لرزه‌نگاشت  $z$  ام در یک آرایه‌ی  $M$  گیرنده باشد، در نتیجه پرتو حاصل از جمع تمام سیگنال‌ها به صورت زیر است:

$$b(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M W_i(t + r_j.s) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M W_i(t + \tau_j) \quad (1)$$

که  $\tau_j$  زمان تأخیر مربوط به گیرنده‌ی  $z$  ام،  $r_j$  بردار مکان هر گیرنده نسبت به مرجع مکانی و  $S$  بردار کندی یا عکس سرعت ظاهری در زیر آرایه می‌باشد. معادله‌ی فوق که عملیات جمع  $M$  لرزه‌نگاشت با اعمال زمان تأخیر را در برمی‌دارد، شکل‌دهی پرتو می‌گویند. از آنجایی که در عملیات فوق از داده‌های گسسته یا دیجیتال استفاده می‌شود، نیاز به تعیین زمان نمونه‌برداری<sup>۱</sup> است که این نرخ نمونه‌برداری با توجه به فرکانس غالب سیگنال لرزه‌ای یا فرکانس نایکوئیست<sup>۲</sup> محاسبه می‌شود.

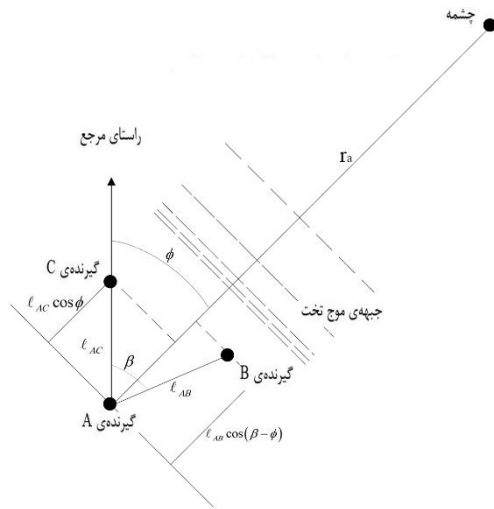
با فرض اینکه امواج چشمه ( $S(t)$ ) هماهنگ‌های خالص و بدون نوفه باشند، اگر میرایی در طول آرایه در نظر گرفته نشود، عملیات شکل‌دهی پرتو دقیقاً سیگنال چشمه را بازسازی می‌کند. میرایی در طول آرایه عمدتاً قابل چشم‌پوشی است، اما به دلیل تفاوت در جنس لایه‌های زیر گیرنده‌ها، ممکن است گیرنده‌ای دامنه‌ی رخدادها را بسیار بزرگ ثبت کند و جمع این سیگنال با سایر سیگنال‌ها ممکن است مقداری خطا ایجاد کند؛ لذا در این حالت پیشنهاد می‌شود، قبل از شکل‌دهی پرتو تمامی سیگنال نرمال شده تا از این خطا جلوگیری شود. حال اگر فرض شود که نوفه زمینه نیز برای تمام گیرنده‌ها وجود دارد پس پرتو حاصل از جمع به صورت رابطه‌ی زیر تغییر می‌کند.

<sup>1</sup> Sampling rate

<sup>2</sup> Nyquist

<sup>3</sup> Standard deviation

<sup>4</sup> Buades et al.



شکل (۲): هندسه‌ی دریافت جبهه موج تخت توسط گیرنده‌ها

فرض جبهه موج تخت بدین معنی است که فاز جبهه‌ی موج به صورت ثابت تعریف می‌شود. در شکل (۲) فاصله‌ی میان چشمه و گیرنده‌ی A با  $r_A$  مشخص می‌شود. از آنجایی که جبهه‌ی موج عمود بر راستای انتشار در طول  $r_A$  در نظر گرفته شده، مهم‌ترین عبارت برای تعیین اختلاف فاز بین جبهه‌ی موج در دو نقطه (به عنوان مثال گیرنده‌ی A و B) تصویر فاصله‌ی بین دو گیرنده بر روی جهت انتشار است. این تصویرسازی برای دو گیرنده‌ی A و B به صورت  $\ell_{AB} \cos(\beta - \phi)$  که  $\ell_{AB}$  مشخص کننده‌ی فاصله‌ی بین دو گیرنده،  $\cos(\beta - \phi)$  زاویه‌ی بین جهت انتشار و خط واصل دو گیرنده و  $\phi$  زاویه‌ی انتشار است.

نظر به فرض تخت بودن جبهه‌ی موج فاصله‌ی چشمه تا گیرنده‌ی B به صورت رابطه‌ی ۱۰ بیان می‌شود.

$$r_B = r_A - \ell_{AB} \cos(\beta - \phi) \quad (10)$$

به طور مشابه فاصله‌ی چشمه تا گیرنده‌ی C نیز برابر است با:

$$r_C = r_A - \ell_{AC} \cos \phi \quad (11)$$

معادلات ۱۰ و ۱۱ فقط با فرض اینکه جبهه‌ی موج در طول آرایه تخت باشد صادق هستند.

معادلات ۱۰ و ۱۱ را می‌توان در معادله‌ی ۹ جایگزین کرد و عبارتی را برای سرعت ذره در گیرنده‌ها مطابق زیر به دست آورد.

$$\dot{\xi}_A(r, t) = \omega A(r) \exp \left( j \left[ \omega \left\{ t - \frac{r_A}{v(\omega)} \right\} + \theta + \frac{\pi}{2} \right] \right) \quad (12)$$

$$\dot{\xi}_B = \omega A \exp \left( j \left[ \omega \left\{ t - \frac{r_A - \ell_{AB} \cos(\beta - \phi)}{v(\omega)} \right\} + \theta + \frac{\pi}{2} \right] \right) \quad (13)$$

$$\dot{\xi}_C = \omega A \exp \left( j \left[ \omega \left\{ t - \frac{r_A - \ell_{AC} \cos \phi}{v(\omega)} \right\} + \theta + \frac{\pi}{2} \right] \right) \quad (14)$$

دو معادله‌ی ۱۳ و ۱۴ را می‌توان به فرم معادله‌ی ۱۵ نوشت:

در این صورت پیکسل  $i$  ام در تصویر نوفه‌زدا شده با استفاده از روش میانگین غیرمحملی  $\bar{v}(i)$  برابر با میانگین وزنی همه‌ی پیکسل‌های داخل تصویر نوفه‌دار بوده و به صورت رابطه‌ی ۵ است.

$$\bar{v}(i) = \sum_{j \in \mathcal{V}} w(i, j) v(j) \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $w(i, j)$  وزن‌های میانگین‌گیری بوده و به شباهت بین پیکسل‌های  $i$  و  $j$  بستگی دارد. این شباهت بر مبنای یک تابع کاهشی بر حسب فاصله‌ی وزنی مطابق رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید [۱۹].

$$D^2(i, j) = \|v(N_i - N_j)\|_{2,a}^2 = \sum_{l \in nl} \{G_i(l) [v(N_{i(l)} - N_{j(l)})]\} \quad (6)$$

در نتیجه پارمتر وزن دهی  $w(i, j)$  به صورت رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید [۲۰].

$$w(i, j) = \exp \left( \frac{-D^2(i, j)}{h^2} \right) / \sum_j \exp \left( \frac{-D^2(i, j)}{h^2} \right) \quad (7)$$

در رابطه ۷، پارمتر  $h$  یک تابع ثابت است. مقدار زیاد  $h$  وزن‌های مشابه را برای همه‌ی پیکسل‌های  $j$  در کل تصویر جست‌وجو می‌کند و مقادیر کوچک  $h$  متعاقباً به جست‌وجوی پیکسل‌های مشابه در یک همسایگی کوچک می‌پردازد.

### ۳- روش پیشنهادی

فرض می‌شود که چشمه‌ی انرژی به اندازه‌ای از آرایه دور باشد که بتوان جبهه‌ی موج دریافتی را به صورت تخت در نظر گرفت. در این صورت فاز جبهه‌های موج را می‌توان به صورت ثابت در نظر گرفت [۲۱]. این فرض به صورت نسبتی از  $r$  (فاصله‌ی تخمینی چشمه تا آرایه) به  $\ell$  (فاصله‌ی بین گیرنده‌ها در آرایه) در نظر گرفته می‌شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که نسبت بزرگ‌تر از ۱۱ برای این فرض قابل قبول است [۱۰]. از همین فرض می‌توان استفاده کرد و از تغییرات دامنه در محدوده‌ی داخل آرایه چشم‌پوشی نمود.

چگونگی دریافت جبهه‌ی موج تخت توسط یک آرایه‌ی کوچک مقیاس سه مؤلفه‌ای با گیرنده‌های A, B و C در شکل (۲) نشان داده شده است. مقداری که توسط ژئوفون‌ها حس می‌شود سرعت ذره‌ای  $\dot{\xi}(r, t)$  بوده که به صورت مشتق زمانی  $\xi(r, t)$  که جابه‌جایی دریافتی در گیرنده‌هاست، تعریف می‌شود [۲۲].

$$\xi(r, t) = A(r) \exp \left( j \left[ \omega \left\{ t - \frac{r}{v(\omega)} \right\} + \theta \right] \right) \quad (8)$$

$$\dot{\xi}(r, t) = \omega A(r) \exp \left( j \left[ \omega \left\{ t - \frac{r}{v(\omega)} \right\} + \theta + \frac{\pi}{2} \right] \right) \quad (9)$$

در رابطه بالا،  $A(r)$  دامنه‌ی موج دریافتی،  $J$  برابر  $\sqrt{-1}$ ،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $v(\omega)$  سرعت و  $\theta$  زاویه‌ی فاز اولیه‌ی دلخواه است.

آوردن راستای انتشار قابل توجه هستند. با استفاده از معادله ۲۲ سرعت انتشار برای هر باند فرکانسی دلخواه به دست می‌آید. برای به دست آوردن زاویه‌ی انتشار فقط محاسبه‌ی زمان تأخیر بین دو گیرنده مانده است.

در ادامه‌ی کار چگونگی محاسبه‌ی زمان تأخیر برای یک سیگنال دلخواه که در دو گیرنده در موقعیت‌های متفاوت ثبت شده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش‌های متفاوتی برای تخمین زمان تأخیر دریافت یک سیگنال در گیرنده‌های متفاوت بیان شده است [۲۳-۲۵]. عمده‌ی این روش‌ها بر مبنای همبستگی متقابل<sup>۱</sup> دو سیگنال دریافتی کار می‌کنند. در این مقاله نیز از روش همبستگی متقابل که در عین سادگی نتایج قابل قبولی نیز ارائه می‌دهد، استفاده شده و نتایج حاصل را با روش ITDC [۲۶] مقایسه می‌شود. این روش برای حالتی که تعداد نمونه‌های سیگنال دریافتی کم باشد به کار رفته است.

روش همبستگی متقابل بر پایه‌ی تخمین کوواریانس متقابل  $C_{ij}$  برای شیفتهای زمانی  $u$  بین دو سیگنال  $\xi_1$  و  $\xi_2$  استوار است به‌طوری که [۲۷]:

$$C_{ij}(u) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \xi_1(t) \xi_2(t+u) dt \quad (23)$$

کوواریانس متقابل برای هر جفت گیرنده‌ی  $i$  و  $j$  موجود در آرایه در شیفتهای زمانی  $u$ ، که  $u$  کمتر از  $T$  است، محاسبه می‌شود.  $T$  طول زمانی انتگرال‌گیری است و باید بزرگ‌تر از دوره‌ی باند فرکانسی غالب داده و اختلاف زمان‌رسید پیش‌بینی‌شده بین دو گیرنده باشد. در نتیجه اختلاف زمان‌رسید بین دو گیرنده برابر مقدار شیفتهای زمانی است که تابع همبستگی متقابل در آن بیشینه شده است. سپس اختلاف‌زمان‌های  $\tau_{AC}$  و  $\tau_{AB}$  با پیدا کردن مقادیری از  $u$  که برای آن هر دو  $C_{AC}$  و  $C_{AB}$  بیشینه شوند به دست می‌آید. تأکید می‌شود که  $\tau_{AC}$  و  $\tau_{AB}$  به دلیل خاصیت پاششی زمین، وابسته به فرکانس هستند و تعیین بازه‌ی مناسب فرکانسی برای تعیین زمان تأخیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

حال که امکان به دست آوردن زمان تأخیر بین دو سیگنال دریافتی با استفاده از روش همبستگی متقابل مهیا گردید، سرعت نیز با استفاده از انتگرال‌گیری معادله‌ی ۱۸ به دست می‌آید. با داشتن دو پارامتر سرعت و زمان تأخیر می‌توان زاویه‌ی انتشار را با استفاده از معادله‌ی ۱۷ تخمین زد. با تخمین زاویه‌ی انتشار برای دو

$$\xi_{K=B,C}(r, t) = \omega A \exp \left( j \left[ \omega \left\{ t - \frac{r_A}{v(\omega)} \right\} + \theta + \frac{\pi}{2} + \Delta\theta_{AK} \right] \right) \quad (15)$$

که  $\Delta\theta_{AK}$  شیفتهای سیگنال در گیرنده‌های  $B$  و  $C$  نسبت به  $A$  است. بنابراین شیفتهای فاز به‌صورت زیر داده می‌شود:

$$\Delta\theta_{AB} = \frac{-\omega \ell_{AB} \cos(\beta - \phi)}{V(\omega)} \quad (16)$$

$$\Delta\theta_{AC} = \frac{-\omega \ell_{AC} \cos \phi}{V(\omega)} \quad (17)$$

در نتیجه اختلاف‌زمان بین دریافت سیگنال توسط گیرنده‌ی  $A$  و  $B$  به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ دست می‌آید:

$$\tau_{AB} = \frac{\ell_{AB} \cos(\beta - \phi)}{V(\omega)} \quad (18)$$

به‌طور مشابه اختلاف‌زمان رسید بین دو گیرنده‌ی  $A$  و  $C$  نیز برابر است با:

$$\tau_{AC} = \frac{\ell_{AC} \cos \phi}{V(\omega)} \quad (19)$$

$\cos(\beta - \phi)$  را نیز می‌توان به‌وسیله‌ی مثلثات بسط داد. در نتیجه زاویه‌ی  $\phi$  با استفاده از رابطه‌ی ۲۰ به دست می‌آید.

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{1}{\sin \beta} \left( \frac{\ell_{AC} \tau_{AB}}{\ell_{AB} \tau_{AC}} \right) - \cos \beta \right] \quad \text{for } 0 \leq \phi \leq 360 \quad (20)$$

اگر ژئوفون‌ها دقیقاً در رئوس یک مثلث متساوی‌الاضلاع قرار گیرند در نتیجه تقارن فضایی مسئله افزایش می‌یابد. آنگاه  $\beta$  برابر  $60^\circ$  درجه بوده و معادله‌ی ۱۶ به فرم زیر کاهش می‌یابد.

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\tau_{AB}}{\tau_{AC}} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad \text{for } 0 \leq \phi \leq 360 \quad (21)$$

توجه داشته باشید که محاسبه‌ی  $\tau_{AC}$  و  $\tau_{AB}$  جهت تعیین زاویه‌ی انتشار ضروری است.

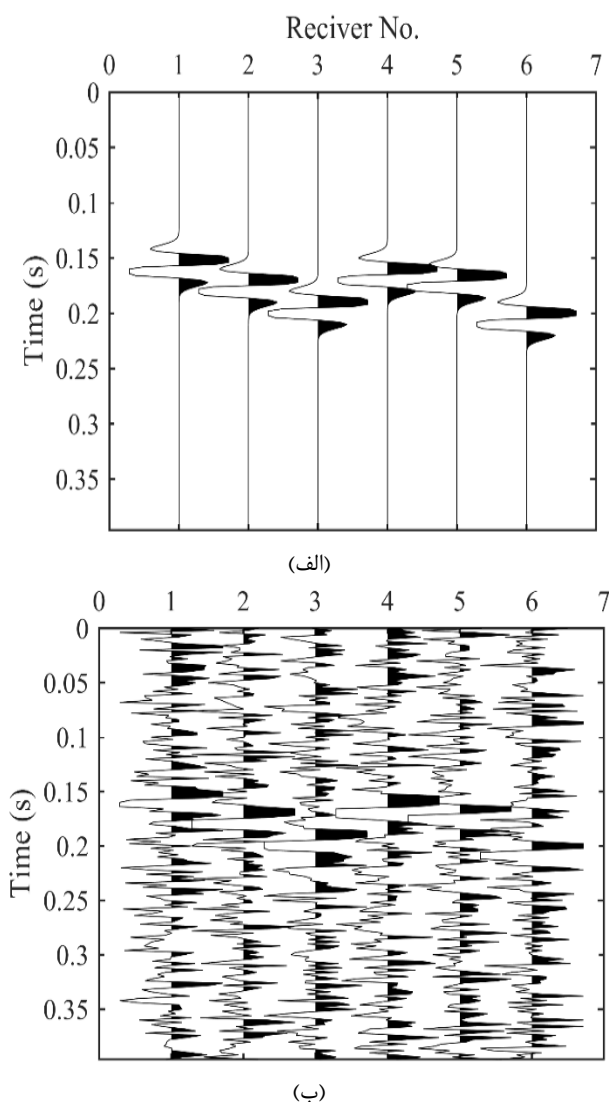
در استخراج معادلات ۲۰ و ۲۱ فرض شده است که سیگنال چشمه حاوی یک فرکانس مشخص است. به‌هرحال چشمه‌ی واردکننده‌ی نیرو به زمین به‌صورت ضربه‌ای عمل می‌کند. در نتیجه یک باند گسترده از فرکانس‌ها به زمین منتقل می‌شود. در نتیجه سرعت ذره‌ای در هر گیرنده به‌وسیله‌ی انتگرال‌گیری از روی تمام فرکانس‌ها مطابق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\dot{\xi}_A = \int_{-\infty}^{\infty} \omega A(\omega) \exp \left( j \left[ \omega \left\{ t - \frac{r_A}{v(\omega)} \right\} + \theta + \frac{\pi}{2} \right] \right) d\omega \quad (22)$$

سیگنال دریافتی می‌تواند فرکانس به فرکانس برای تخمین جهت انتشار با استفاده از  $\tau_{AC}$  و  $\tau_{AB}$  پردازش شود.  $\tau_{AC}$  و  $\tau_{AB}$  تابع فرکانس هستند زیرا سرعت موج به فرکانس بستگی دارد. به‌هرحال هرچقدر که باند فرکانسی انتخاب‌شده برای پردازش باریک‌تر باشد می‌توان فرض کرد که سرعت در این باند فرکانسی ثابت است، در نتیجه کاربرد معادلات ۲۰ و ۲۱ برای به دست

<sup>1</sup> Cross Correlation

<sup>2</sup> Information Theoretic Delay Criterion

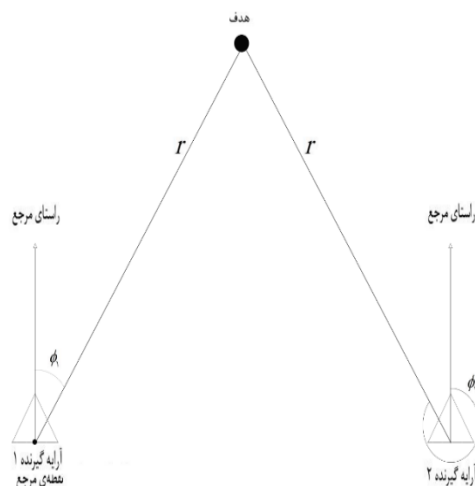


شکل (۵): (الف) داده‌ی تمیز. (ب) داده‌ی آلوده به نوفه با  $SNR = -2dB$

چنانچه از میرایی صرف‌نظر شود، برای مثال ذکرشده سیگنال دریافتی در گیرنده‌ی R2 پس از طی زمان  $0.3/0$  ثانیه با سرعت  $v$  می‌بایست به گیرنده‌ی R6 برسد، بدون اینکه تغییری شکل موج حاصل شود. برای نمایش بهتر دو سیگنال دریافتی در دو گیرنده‌ی R2 و R6 در شکل (الف) نشان داده شده است. حال انتظار می‌رود با استفاده از تعریف همبستگی متقابل، شباهت دو سیگنال دریافتی در زمان تأخیر  $0.3/0$  ثانیه بیشینه باشد. نمودار همبستگی متقابل دو سیگنال ذکرشده نسبت به تغییرات زمان تأخیر محاسبه و در شکل (۶) نشان داده شده است.

همان‌گونه که از شکل (۷) (الف) واضح است، همبستگی متقابل در زمان تأخیر  $0.3/0$  ثانیه برای سیگنال تمیز بیشینه است، که حکایت از درستی تخمین زمان تأخیر بر مبنای همبستگی متقابل دارد. زمان تأخیر بین دو گیرنده مذکور با استفاده از روش ITDC نیز محاسبه گردید که برای حالت تمیز برابر  $0.2/0$  ثانیه تخمین زده شد.

آرایه‌ی مثلثی، موقعیت مسطحانی چشمه به کمک فصل‌مشترک‌گیری امتدادهای تخمین زده‌شده مطابق شکل (۷) به دست می‌آید.

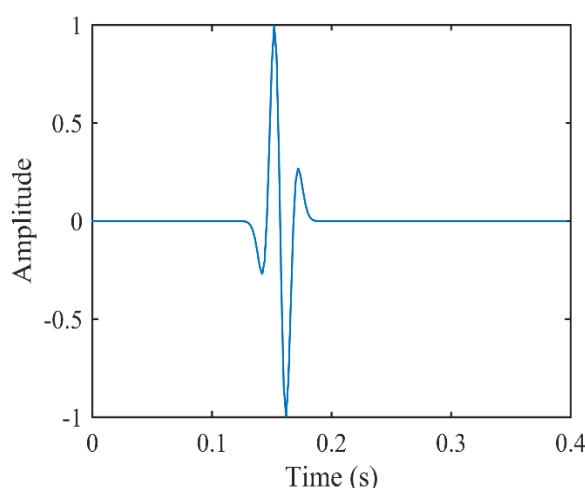


شکل (۳): تخمین موقعیت مسطحانی با استفاده از دو آرایه‌ی مثلثی

#### ۴- تجزیه و تحلیل

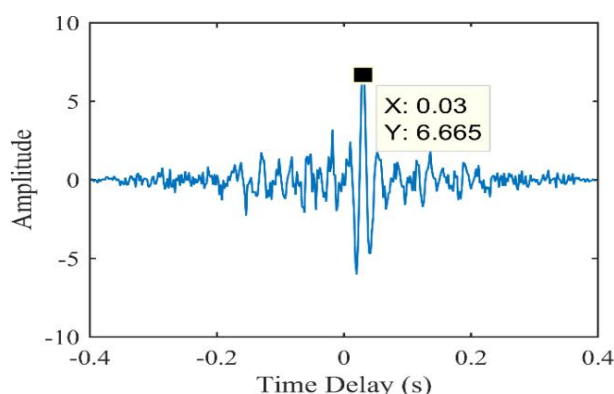
##### ۴-۱- تخمین زمان تأخیر

در این قسمت به بررسی عددی مسئله‌ی تعیین زمان تأخیر پرداخته می‌شود. فرض کنید که چشمه موردنظر، سیگنالی دلخواهی مطابق شکل (۴) تولید کند و در ۶ گیرنده که در موقعیت‌های متفاوت نسبت به نقطه‌ی مرجع قرار گرفته‌اند، مطابق شکل (۵) دریافت شود.



شکل (۴): سیگنال مصنوعی تولید شده توسط چشمه

چنانچه جبهه‌ی موج رسیده به آرایه تخت در نظر گرفته شود و از میرایی بین گیرنده‌های آرایه نیز صرف‌نظر شود، این فرض‌ها به سادگی مسئله کمک شایانی می‌کند.



(ب)

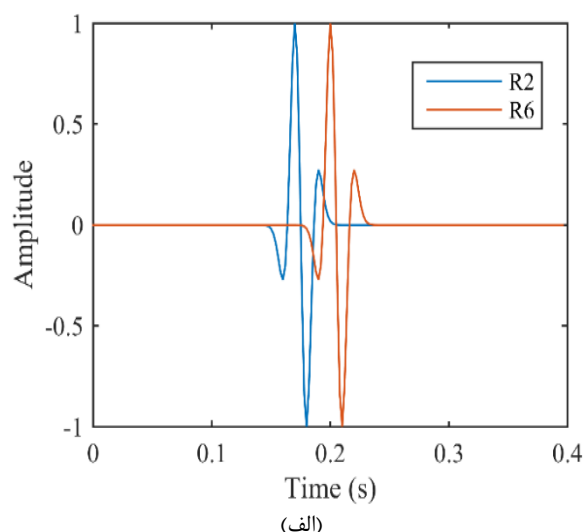
شکل (۷): همبستگی متقابل اندازه‌گیری شده. الف) با فرض سیگنال تمیز. ب) سیگنال نوفه دار

#### ۴-۲- کاهش نوفه

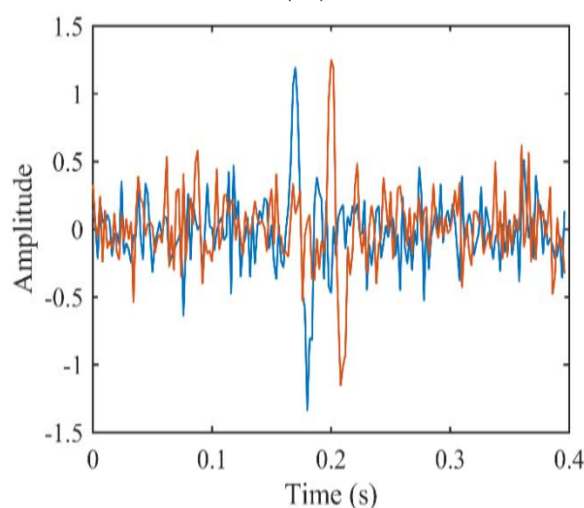
در این بخش به ارزیابی عملکرد روش معرفی شده به منظور کاهش نوفه پرداخته می‌شود. داده‌ی دریافتی در شکل (۵) الف) به نوفه گوسی با SNR -۲ مطابق شکل (۵) ب) آغشته شده و روش پیشنهادی بر روی آن اعمال می‌شود، سپس نتایج بدست آمده با دو روش FX-Deconvolution [۲۸] و FX-SSA [۲۹] که دو تکنیک متداول در کاهش نوفه هستند مقایسه می‌شوند. نتایج حاصل از اعمال روش‌های Deconvolution، FX-SSA و روش پیشنهادی در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. همانگونه که از روی شکل (۹) الف) مشخص است، روش پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته و توانسته حجم زیادی از نوفه را حذف و سیگنال اولیه را بازسازی کند. عملکرد روش پیشنهادی با پارامتر SNR نیز سنجیده شده و نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است. میزان نوفه‌ی حذف شده در شکل (۱۰) نیز حکایت از این دارد که میزان نوفه‌ی حذف شده توسط روش پیشنهادی قابل قبول و اثری از داده‌ی اولیه نیز در نوفه‌ی حذف شده دیده نمی‌شود. مقدار زمان تاخیر در حالت نوفه‌دار نیز با استفاده از دو روش همبستگی متقابل و ITDC به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۱۸ به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که روش همبستگی متقابل در حالت نوفه‌دار نیز عملکرد مناسبی ارائه می‌کند.

جدول (۱): نتایج SNR های خروجی

| SNR اولیه | روش پیشنهادی | FX-deconvolution | FX-SSA |
|-----------|--------------|------------------|--------|
| -۲        | ۷/۸          | ۱                | ۰/۵    |

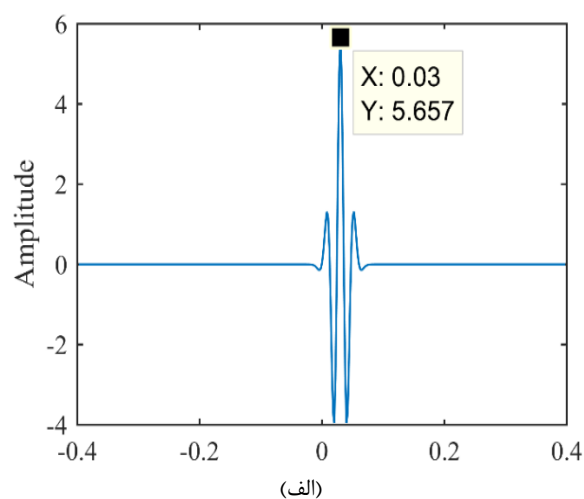


(الف)

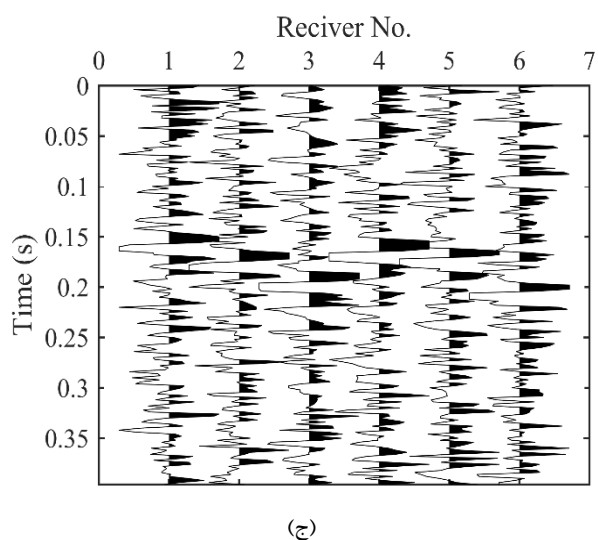
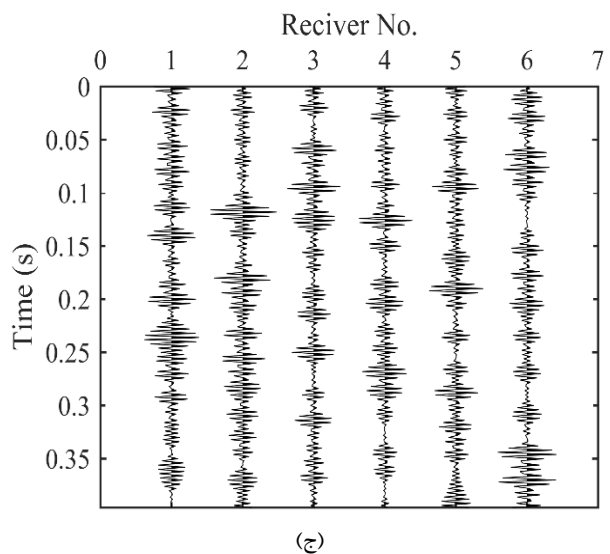
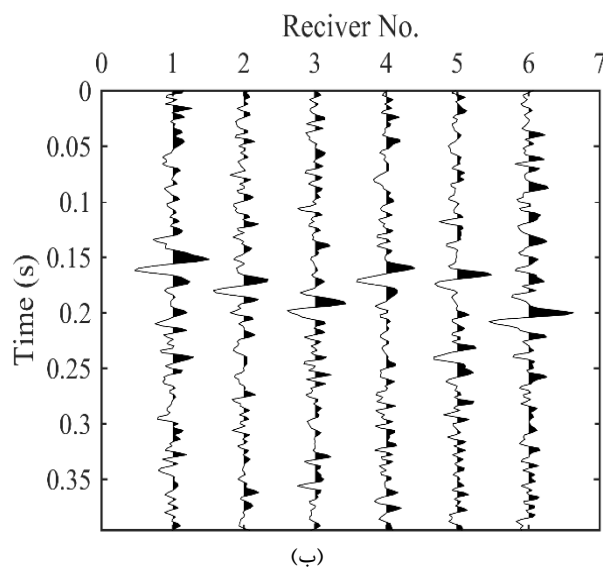
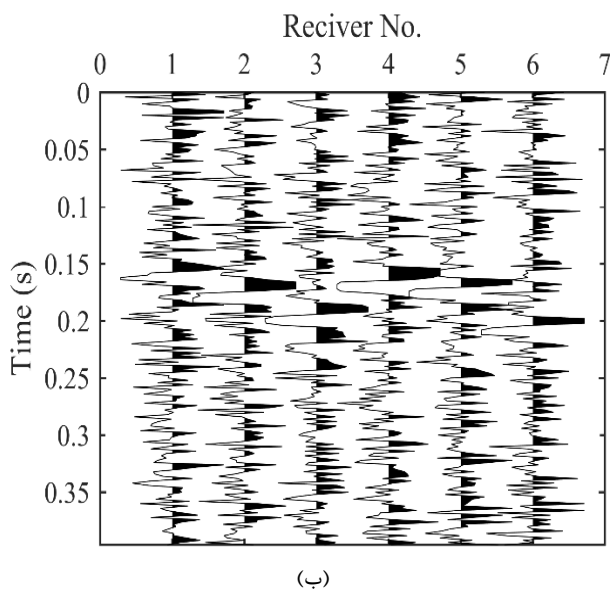
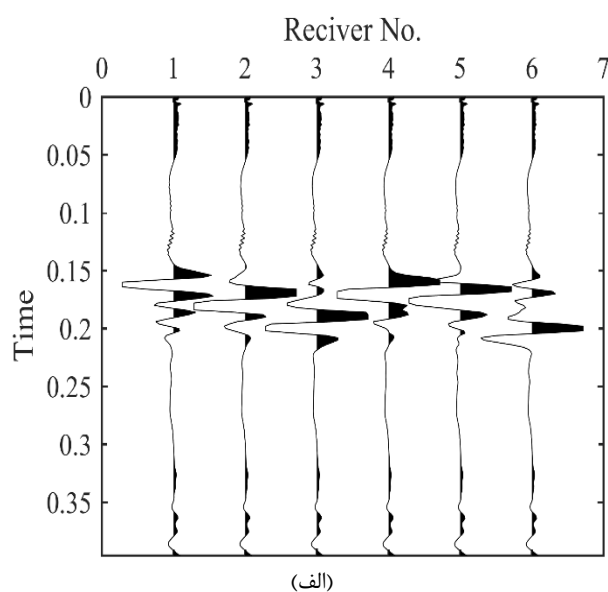
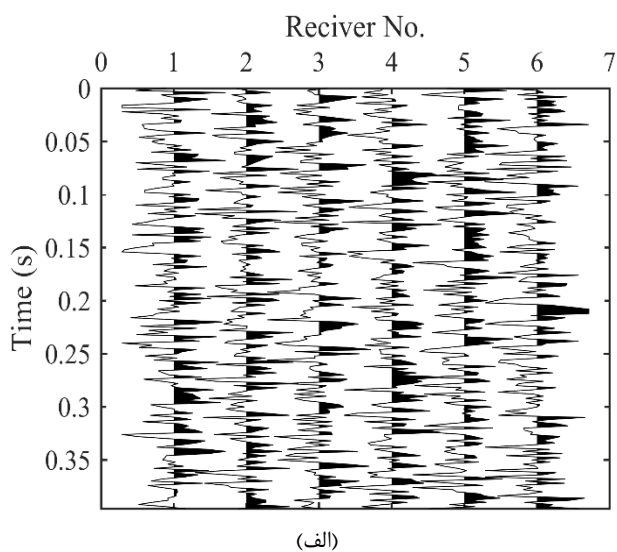


(ب)

شکل (۶): سیگنال دریافتی در دو گیرنده‌ی فرضی R2 و R6. الف) حالت تمیز. ب) حالت نوفه دار



(الف)

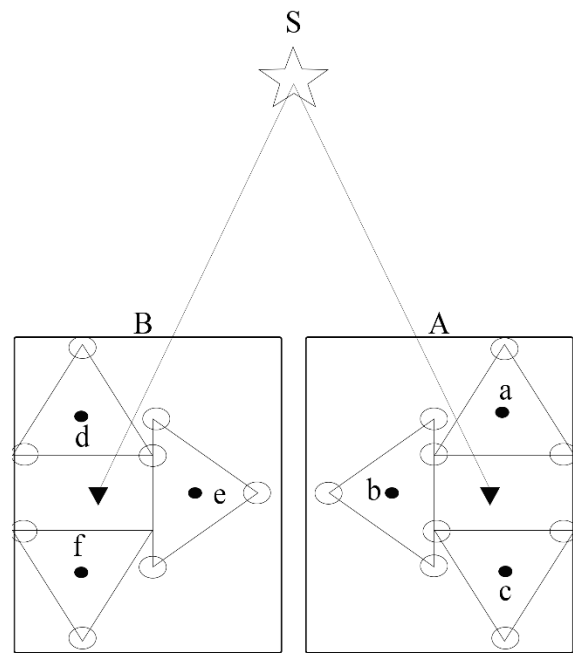


شکل (۱۰): نوفه‌ی حذف شده. (الف) روش پیشنهادی. (ب) روش FX\_Decon. (ج) روش FX\_SSA

شکل (۹): (الف) داده‌ی حاصل از اعمال روش پیشنهادی. (ب) روش FX-Decon. (ج) روش FX\_SSA

### ۳-۴- آرایه پیشنهادی

با توجه به مفاهیم گفته شده استفاده از حداقل دو آرایه‌ی مثلثی مطابق شکل (۷) برای تعیین موقعیت چشمه لازم است. از طرفی کیفیت سیگنال خروجی آرایه تأثیر ویژه‌ای در دقت محاسبات دارد. با توجه به این دو اصل پیشنهاد می‌شود برای تعیین موقعیت رومرکز چشمه‌ی حاصل از حفاری‌های زیرزمینی از آرایه‌ای شبیه به آرایه‌ی شکل (۱۱) استفاده شود.



شکل (۱۱): آرایه طراحی شده به منظور تخمین موقعیت چشمه

این آرایه از دو بلوک A و B که هر کدام دارای ۳ زیر آرایه‌ی مثلثی هستند، تشکیل شده است. برای یک سیگنال رسیده به آرایه ابتدا زمان تأخیر در هر گیرنده‌ی موجود در زیر آرایه‌های a, b, c, d, e و f به دست می‌آید. سپس برای هر زیر آرایه با استفاده از عملیات شکل‌دهی پرتو یک سیگنال باکیفیت متناسب به دست آمده، در این حالت در هر بلوک A و B سه سیگنال دریافتی، با کیفیت مناسب وجود دارد که این سیگنال‌ها نیز بر روی رؤوس یک مثلث متساوی‌الاضلاع قرار دارند، حال برای هر کدام از آرایه‌های A و B نیز در این مرحله زمان تأخیر با استفاده از سیگنال‌های بهبودیافته تخمین زده و راستا نیز محاسبه می‌شود. در نهایت نیز با فصل مشترک‌گیری از هر کدام از راستاهای تخمین زده شده موقعیت رومرکز چشمه تعیین می‌گردد.

### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شد تا امکان تخمین موقعیت مسطحاتی چشمه‌ی انرژی حاصل از حفاری‌های زیرزمینی فعال بررسی شود. بدین منظور ابتدا چگونگی دستیابی به یک سیگنال باکیفیت مورد

بررسی قرار گرفت و در ادامه معادلات ریاضی موردنیاز برای تعیین راستای ورود جبهه‌ی موج به آرایه بر مبنای زمان تأخیر استخراج شد. روش تحلیل همبستگی متقابل به عنوان ابزاری برای محاسبه‌ی زمان تأخیر پیشنهاد گردید و در نهایت نیز یک آرایه متشکل از مجموعه‌ای از زیر آرایه‌های مثلثی برای اجرای عملیات پیشنهاد گردید.

در شبیه‌سازی انجام شده جهت تحلیل تخمین تأخیر زمان، ۶ گیرنده که در موقعیت‌های متفاوت نسبت به چشمه سیگنالی مرجع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همبستگی متقابل در زمان تأخیر ۰/۰۳ ثانیه برای سیگنال تمیز بیشینه است، که حکایت از درستی تخمین زمان تأخیر بر مبنای همبستگی متقابل دارد. زمان تأخیر بین دو گیرنده مذکور با استفاده از روش ITDC نیز محاسبه گردید که برای حالت تمیز، ۰/۰۲ ثانیه تخمین زده شد.

همچنین در تحلیلی دیگر، عملکرد روش پیشنهادی به منظور کاهش نوفه در یک داده شبیه‌سازی شده با اضافه کردن نوفه گوسی با SNR -۲ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی با روش‌های Deconvolution و FX-SSA مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در نوفه‌ی حذف شده توسط روش پیشنهادی، اثری از داده‌ی اولیه وجود ندارد. مقدار زمان تأخیر در حالت نوفه‌دار نیز با استفاده از دو روش همبستگی متقابل و ITDC به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۱۸ به دست آمد.

روش پیشنهادی بر مبنای تخمین موقعیت مسطحاتی چشمه لرزه‌ای با استفاده از دو شبکه آرایه‌ای می‌باشد. لذا، بدیهی است که برآورد خطای مکان‌یابی مستلزم استفاده از یک شبکه آرایه جدید است که حداقل متشکل از سه زیر آرایه باشد. پیشنهاد می‌شود این موضوع در تحقیقات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

از آنجایی که در روش پیشنهادی وابستگی سرعت به فرکانس در نظر گرفته شده است، تعیین بازه‌ی فرکانسی مربوط به معادله‌ی ۱۸ کار دشواری است. در این حالت اگر دو چشمه هم‌زمان فعال باشند و باند فرکانسی یکسانی نیز داشته باشند، محاسبات با خطای فراوانی همراه است. از طرفی اگر دو چشمه باند فرکانسی متفاوتی داشته باشند، زمان تأخیر تخمین زده شده بیشتر تحت تأثیر چشمه‌ای است که فرکانس غالب را دارد. به‌طورمعمول تعداد چشمه‌ها برای کاربر نامعلوم است ولی می‌توان با استفاده از طیف فرکانسی سیگنال دریافتی امکان وجود دو چشمه‌ی هم‌زمان را در حالتی که دو چشمه مفروض باند فرکانسی متفاوتی داشته باشند، بررسی کرد.

لازم به توضیح است از آنجا که ابزارهای موردنیاز برای اجرای عملیات و برداشت داده‌ی واقعی به‌طور قابل ملاحظه‌ای هزینه‌بر بوده و دستیابی به آن‌ها نیز میسر نبود، در این تحقیق از اجرای الگوریتم بر روی داده‌ی واقعی صرف‌نظر شد. در پایان پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی، تأثیر قرابت فازهای p و s با استفاده از شبیه سازی در نرم افزار اجزا محدود آباکوس و یا کد نویسی در متلب، در

[۱۴] نایینی، سید ابوالحسن و محمدی، سعیده، بررسی لرزه ای تاثیر سازه‌های سطحی و تونل بر پاسخ ساختمانگاه زمین در محیط های شهری، کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، ۱۳۹۶.

[15] J. Schweitzer, J. Fyen, S. Mykkeltveit, and T. Kværna, "Seismic arrays," in Proc. IASPEI-New Manual of Seismological Observatory Practice, 2002, pp. 31–32.

[16] J. C. Chen, K. Yao, and R. E. Hudson, "Source localization and beamforming," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 19, no. 2, pp. 30–39, 2002, doi: 10.1109/79.985679.

[17] A. Buades, B. Coll, and J. M. Morel, "A review of image denoising algorithms, with a new one," Multiscale Modeling & Simulation, vol. 4, no. 2, pp. 490–530, 2005, doi: 10.1137/040616024.

[18] A. A. Efros and T. K. Leung, "Texture synthesis by non-parametric sampling," in Proc. Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, pp. 1033–1038, doi: 10.1109/ICCV.1999.790383.

[19] S. Sarker, S. Chowdhury, S. Laha, and D. Dey, "Use of non-local means filter to denoise image corrupted by salt and pepper noise," Signal & Image Processing: An International Journal, vol. 3, no. 2, pp. 223–230, 2012, doi: 10.5121/sipij.2012.3215.

[20] B. Bonar and M. Sacchi, "Denoising seismic data using the nonlocal means algorithm," Geophysics, vol. 77, no. 1, pp. A5–A18, 2012, doi: 10.1190/geo2011-0235.1.

[21] A. Ben-Menahem and S. J. Singh, Seismic Waves and Sources. New York, NY, USA: Springer Science & Business Media, 2012, doi: 10.1007/978-1-4612-5856-8.

[22] D. H. Clewell and R. F. Simon, "Seismic wave propagation," Geophysics, vol. 15, no. 1, pp. 50–60, 1950, doi: 10.1190/1.1437573.

[23] G. Carter and G. Knapp, "Time delay estimation," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 1976, pp. 357–360, doi: 10.1109/ICASSP.1976.1170926.

[24] B. Emile, P. Comon, and J. L. Roux, "Estimation of time delays with fewer sensors than sources," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 46, no. 7, pp. 2012–2015, 1998, doi: 10.1109/78.668802.

[25] J. Chen, Y. Huang, and J. Benesty, "Time delay estimation," in Audio Signal Processing for Next-Generation Multimedia Communication Systems, 2004, pp. 197–227, doi: 10.1007/978-1-4020-7769-2\_8.

[26] R. Moddemeijer, "An information theoretical delay estimator," in Proc. Ninth Symposium on Information Theory, pp. 121–128, 1987.

[27] C. Knapp and G. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 24, no. 4, pp. 320–327, 1976, doi: 10.1109/TASSP.1976.1162830.

[28] N. Gulunay, "FXDECON and complex Wiener prediction filter," in Proc. SEG Annual Meeting, 1986, pp. 279–281, doi: 10.1190/1.1893035.

[29] M. Sacchi, "FX singular spectrum analysis," in Proc. CSPG CSEG CWLS Convention, 2009, pp. 392–395.

تحقیقات بعدی ارزیابی گردد. همچنین، با توجه به اینکه پیاده سازی روش پیشنهادی مستلزم تعیین ویژگی‌های حسگرهای مورد نیاز است و تحلیل ویژگی‌های حسگرها بر اساس فاصله تا چشمه لرزه تابعی از شرایط محیطی، جنس خاک و حساسیت حسگرها است، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی به صورت آزمایشگاهی و میدانی ویژگی‌های حسگرهای مورد نیاز تعیین شوند.

## ۶- مراجع

[1] E. Husebye and B. Ruud, "Array Seismology—Past, Present and Future Developments," Observatory Seismology, vol. 2, pp. 123–153, 1989.

[2] S. Rost and C. Thomas, "Array seismology: Methods and applications," Reviews of Geophysics, vol. 40, no. 3, pp. 2-1–2-27, 2002, doi: 10.1029/2000RG000100.

[3] H. Harjes and M. Henger, "Array-seismologie," Zeitschrift für Geophysik, vol. 39, pp. 865–905, 1973.

[4] R. Frosch and P. Green, "The concept of a large aperture seismic array," Proc. Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 290, no. 1422, pp. 368–384, 1966, doi: 10.1098/rspa.1966.0055.

[5] J. E. Vidale, D. A. Dodge, and P. S. Earle, "Slow differential rotation of the Earth's inner core indicated by temporal changes in scattering," Nature, vol. 405, no. 6785, pp. 445–448, 2000, doi: 10.1038/35013009.

[6] J. Keen, Y. Montgomery, W. Mowat, J. Mullard, and D. Platt, "British seismometer array recording systems," Radio and Electronic Engineer, vol. 30, no. 5, pp. 297–306, 1965, doi: 10.1049/ree.1965.0107.

[7] M. E. Wyssession, K. M. Fischer, T. J. Clarke, G. I. Al-eqabi, P. J. Shore, and M. J. Fouch, "Slicing into the Earth," Eos, Transactions American Geophysical Union, vol. 77, no. 49, pp. 477–481, 1996, doi: 10.1029/96EO00325.

[8] C. F. Romney, "VELA overview: The early years of the seismic research program," in Proc. VELA Program: Twenty-Five Years of Basic Research, 1985, pp. 38–65.

[9] M. L. Moran and D. G. Albert, "Source location and tracking capability of a small seismic array," DTIC Document, 1996.

[10] D. H. Cress, "Seismic methods for locating targets," DTIC Document, 1976.

[11] R. T. Lacoss, "Geometry and patterns of large aperture seismic arrays," DTIC Document, 1965.

[۱۲] موسوی، سید حسین و خرائی، صفا، آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری شکستی، فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۳، ص ۶۰۶–۵۸۷، ۱۳۹۵.

[۱۳] خلج زاده، محمدحسین و آزادی، محمد، "ارزیابی اثرات حفر تونل بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با استفاده از روش تفاضل محدود، مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)، دوره ۵۱، شماره ۱، ص ۹۹–۱۰۸، ۱۳۹۸.

doi: 10.22060/ceej.2017.12537.5238